

现代建筑的艺术与技术

译 者 的 话

设计现代的高层建筑及大型建筑需要各个工种特别是建筑与结构工种的密切配合。只有正确表达结构逻辑的建筑才有强大的说服力与表现力，单纯追求美的表现而忽视力学原理，设计出的将是雕塑作品或是虚伪的结构。所以著者在介绍每类建筑或结构时，尽可能根据力学概念，阐明结构造型的优缺点。并附有許多插图及实物照片，使读者易于理解。

本书主要从建筑师的角度考虑力学问题，所以没有引用任何公式与繁琐的计算，而是引导读者从自然界及日常生活用品中去理解结构的概念。

著者除了介绍许多著名建筑师和工程师的成功作品外，在每章中还对一些华而不实，不符合结构原理，甚至矫揉造作的虚伪结构予以严厉地批评。书中有许多地方值得我们参考和借鉴。目前我国还缺少此类书籍。正当我国向四个现代化光明前景迈进时，这是一本洋为中用颇有价值的书。在建筑专业中可作为结构选型课的参考文献。

1979年12月

……我还发现，我们时代是有一些人创造了一些美的东西的。之所以美，只不过是这些东西是根据逻辑，根据理智，根据事物理性的存在的规律，并根据所用材料的准确、必需和自然的法则而建造起来的。

亨利·凡·德·维尔德(Henry Van De Velde)在“Kunstgewerbliche Laienpredigten” 1902一书中的一段话。

前 言

我对探索覆盖于所有“建成”之物中的形式的意义有着强烈的兴趣，这就是我写这本书的真正动机。在我一生中一直被自然形式的适应性，良好工程设计的逻辑性以及著名建筑作品的表现性所吸引。在我看来，似乎所有“建成”的物体都有一个共同起因。

本书试图从建筑师的观点出发，而又在现代技术知识的指导下，重新考虑、分析和解释现代建筑中的结构造型问题。有些人会认为把技术科学抬高到与艺术相等的地位是方向性的错误，而予以否定。凡是不同情我而有上述偏见的人；凡是不愿意承认新建筑材料及其力学规律是建筑学的主要组成部分的人；以及凡是不承认那些无偏见而又不被感情冲昏头脑的工程师的智慧对现代技术及建筑设计具有极端重要性的人，请马上抛弃这本书。

另一方面，对于想从这本书中查出“计算得出来的”建筑艺术的诀窍，或想从计算尺上看出美学论点的读者，同样也会感到失望。他必将发现每当以正确构思对待工程时，时常需要超越结论而合理地，似乎不可避免地，遇到更重要的问题，即结构造型的趋向和题材问题。我的目的就是要明确这类造型问题，这些问题太复杂了，如果单靠计算，那是解决不了的。

我试用图形表达“现代建筑的结构造型”，既不受任何习惯的约束，也在技术上可行，同时本书又表达了我的观点。由于涉及的内容广泛，可能有遗漏之处。加之造型本身是难以捉摸的，从不同的角度考察，就不能排除不同的解释，因此在细节上可能会出现矛盾。虽则如此，如果本书能引起批评性的反映，或者使人理解到即使在建筑学中也可以用含糊和能举例说明的方法；或者能够在设计的真实性及简洁性方面有所促进，有助于以完整性及高质量来反对形式主义和功利主义，那么本书的目的就算圆满达到。

既然本书探讨的是造型问题，因此插图是必要的。既然要表达观点，势将对某些实际建筑物加以评议。为了发挥评议的作用，以便通过个别实例，说明典型意义，有些例子采用了匿名的建筑物插图，并把它们抽象化以取得高度的概括性。

在写本书之前，必须查阅许多资料以寻找结构与造型相互关系的证据。我获得斯图加特（Stuttgart）工科大学友谊协会的慷慨经济援助，在此深表感谢。

我不时得到同行专家们的宝贵经验与意见，获益不浅。我的助手们，彼得·米勒（Peter Müller），罗尔夫·沙尔（Rolf Schaal），弗朗茨·克劳斯（Franz Krauss）及库夫（Kuff）先生毫不疲倦地与我在一起，给我许多帮助和善意的批评。维蓉丽佳·多本哥斯基（Veronika V. Dobrogoiski）夫人率领许多高年级和低年级的学生为本书准备了許多简图。他们对这些繁重的工作表现出无私与关心的高尚精神。我对这些协作者表示由衷的感激。

感谢出版者，抱着耐心与谅解的态度来满足在本书的形式与编排方面我的所有要求，我们之间的协作是非常愉快的。

斯图加特 1960年夏季

柯特·西格尔

目 录

前言		带悬臂的V形支座	99
绪论	1	运动场的挑棚	104
第一章 骨架结构	8	叉形柱	109
网格	9	V形支座上改进的支承	125
窄网格	9	一些特例	126
宽网格	17	奈尔维设计的飞机库的扶壁	126
二层楼面处骨架的收束	20	一个教堂的设计	129
窄网格的收束	22	马亚的桥梁	129
二层楼面宽网格的收束	27	三维V形支座	136
在墙角收束骨架	31	那不勒斯火车站的设计	141
承重的角柱	31	第三章 空间结构	146
单向出挑的墙角	35	空间网架	149
双向出挑的墙角	42	折板结构	162
用山墙解决墙角问题	43	壳体	177
在屋顶收束骨架	46	圆柱形壳体	178
底层收进	50	旋转壳体	199
骨架结构和幕墙	52	劈锥壳体	210
一些矫揉造作的设计	58	双曲抛物面壳体	214
美化	58	自由式造型的壳体	231
“有肉的”墙角	58	悬索结构与网络结构	242
嵌入式的网格	59	单向弯曲的悬吊屋顶	242
橱柜式框架	61	两向相反弯曲的缆索体系	245
第二章 V形支座	67	缆索与支杆的组合	255
V形支座与刚性框架	71	帐棚	258
独立的V形支座	86	结论	263
偏置的V形支座	91	参考文献	265

注：原书在西德慕尼黑(Munich)1961年出版，德书名“STRUKTURFORMEN”。由托马斯·伯顿(Thomas E. Burton)译成英文本，书名“STRUCTURE AND FORM IN MODERN ARCHITECTURE”，1962年英国伦敦出版。现译自英文版本。

绪 论

没有将建筑设想变成物质现实的工程技术，就没有建筑艺术。

工程技术一直影响着建筑造型。各个时代的建筑师都是对材料在技术上的熟练掌握从而得到了启发。帕提农神殿（Parthenon）和哥德式大教堂都是特定技巧的高度提炼。

一向用以标志所有艺术实践特性的，那种认为任何东西都带有技术性的朴素的断言，随着机械化而消失了。美术和技术被赶到两个极端。在建筑学中，艺术和技术过去曾长期是一个统一体，现在越来越多地转入工程师的工作范围，而留给艺术家的只是装饰工作了。

只要工程技术停留在和艺术设计过程没有关联的状态中，则一切试图使建筑与艺术重新结合的努力，都是注定要失败的。在这个论点中，当然，不要把工程技术误解为提供技术设备。环境控制与卫生设备，甚至与现代建筑的表现形式和最终质量也是毫无关系的。然而，结构布局固然与舒适没有联系，但是今天它是所有工程的主要部分，渐渐成为设计中关键因素。今后凡是提到工程技术时，主要就是指结构而言。

现代建筑所具有的特征是：过分强调工程技术而缺乏建筑的艺术性营养，把这种状况完全归罪于工程技术，是和试图忽略工程技术的重要性同样错误的。更糟的是，把工程技术“人性化”地涂脂抹粉。这些处理方法都是无价值的。对当代的技术现象曾有过许多解释，哲学与宗教，美术与科学都卷入这场混战中。可是，直到现在，还没有人在不采用高度的抽象论点的前提下，而试图找出个别造型的技术性根源。这就是作者想做的事。既不想涉猎建筑理论，更蓄意避免运用职业美术评论家的夸张文笔。目的将是追溯现代房屋建筑的技术规律，并探讨这些规律对现代建筑造型的影响。

可以证明通过结构的客观分析，对了解建筑造型原理，要比深奥的对造型本身重要性的论著更能解决问题，因为这些论著往往完全忽略了技术方面。

必须先有一定的技术知识，才能理解技术造型。单凭直觉是不够的。同样对受技术影响的建筑造型，没有技术的指引，也不会完全理解。要了解建筑造型的世界，就必须具备技术知识，这标志着冷静的理智闯进了美学的领域。如果想深入探讨具有决定性技术趋向的现代建筑的造型问题时，必须清楚地认识到这一观点。

当技术考虑作为衡量美学价值的尺度的一部分时，经济问题提到了重要的地位。“经济”一词不应单纯理解为省钱，而应看作为一个理智的原则，一种全面的道义法则，要求以最少的代价而取得最大的收获（包括精神的，美学的和物质的收获）。

自从现代建筑与现代技术开始以来，对符合功能的建筑是否是美的这个过分简化的问题曾引起热烈的争论。凡·德·维尔德在他的著作《应用美学入门》[1]中对建筑美的要点定义为“手段与目的完整的协调”，而密斯·凡·德·罗（Mies Van der Rohe）却说：“功能就是一种艺术”[2]。

如果故意地加以曲解，这些提法常被视为笑柄。如果正确地理解，现代建筑的特点应

是艺术和技术的统一，凡产生于这个统一体的并具有从现代结构技术导出的形象或造型，才是我们所称的“结构造型”。虽则“结构”是个曾过分不严格地用于许多领域的口头禅，但是还找不出比它更恰当的词汇来表达我们的意图。就其本来的含义来说，结构系指加之于建成的或装配好的所有东西的秩序。

结构型式是不能简单地计算出来的，而必须是设计出来的。结构与造型的关系太复杂，无法单靠数字表达。它包含了艺术创造的因素。这里提出了使用“结构造型”一词的进一步正当理由，这一词不应和某一特定结构物的偶见外形相混淆。我们所说的结构造型，不是指偶然的或个别的东西而是指典型的和经久的东西，我们希望它被理解为由结构所决定的特有的和代表性的造型。这种造型来源于建筑的和自然方面的规律，把个别升华为概括的表现力量。

建筑中经常存在结构形式，这些形式反复出现，比任何个别风格持久。最简单的例子是架在两个柱上的楣石（图1），这类题材早在史前神庙中就出现过，在以后的所有建筑文化实践中，以更加优美的形式，反复出现。随着文化脉络，不同的材料和不同的手法，在基本形式上产生新的变化。而形式的主要各点总是保持不变，只要结构的原理受到尊重的话。在新古典主义作品中，天然楣石是以钢梁悬吊着饰面石来代替的，真实形式的表现力突然消失，而屈服于宏伟性的追求。结构的造型也就宣告死亡。

结构造型的衰败并不一定完全都归咎于技术上的不忠实，也可能是虚伪装饰的结果。简单的柱象征承载的能力，全世界凡是有房屋建筑的地方都有柱。柱顶与柱底是传递点，可做成上百种的形式来传递力量，不管怎样装饰，柱身总是一个闭合体。主要是圆筒体或棱柱体，着重强调的是竖向作用。一根支柱由一堆小柱绞缠而成，或把柱身扭成麻花螺线形，都是不合理的，退化的，那都是为了戏剧性的效果而牺牲了结构的内容（图2）。

伟大的哥德大教堂的卓越的拱顶肋不仅是装饰线条，本身既是结构的组成部分，又是结构造型的辉煌范例。晚期哥德式伪装的拱顶的装饰性的肋，不再反映力的实际分布情况，它没有受力的功能（图3），而只是一些几何图形，并非结构造型。

十九世纪末，随着现代技术的出现，西方建筑的稳定秩序在混乱中崩溃了。晚期古典派的垂死的形式化概念受到尚未协调的新技术造型的冲击。新艺术学派曾试行艺术的与道义的革命，但未能和现代技术的成就结合起来。也许就由于这个原因，革命只成功了一半。

芝加哥学派走在时代前五十年，创始的一个骨架结构形式与以后二十世纪的思想完全一致。给人印象深刻的芝加哥一些摩天大楼，现在仍然主导着城市的建筑艺术格局。它们的直接了当的力量也应归功于公正性，这是任何健康的技术发展的前提。仅就这一点，在这样早的年代中，使得有可能对大城市建筑的新功能有了真正客观的理解，并作为合乎逻辑的结果，掌握了用钢铁建造的技术。可惜的就是这个进步也不过仍是一个插曲而已。它虽然走向正确的方向，但当时似是而非的欣赏力却迫使它让步，最后被要求公式化的和流行风格的潮流所阻滞了。一直到二十世纪技术观念才被较广泛地承认为是决定造型的因素，并相应运用于建筑。令人惊奇地，并非工程师而是象勒·柯布西埃（Le Corbusier）和包豪斯（Bauhaus）学院等的建筑师将风格的新技术概念介绍到建筑学中来。这并不是由于他们掌握了任何特殊的工程技巧，而是由于他们预见到技术科学性造型的新领域，并纯直觉地将其成形。其结果往往成为建筑史上划时代的大事，对以后技术的发展不是没有影响

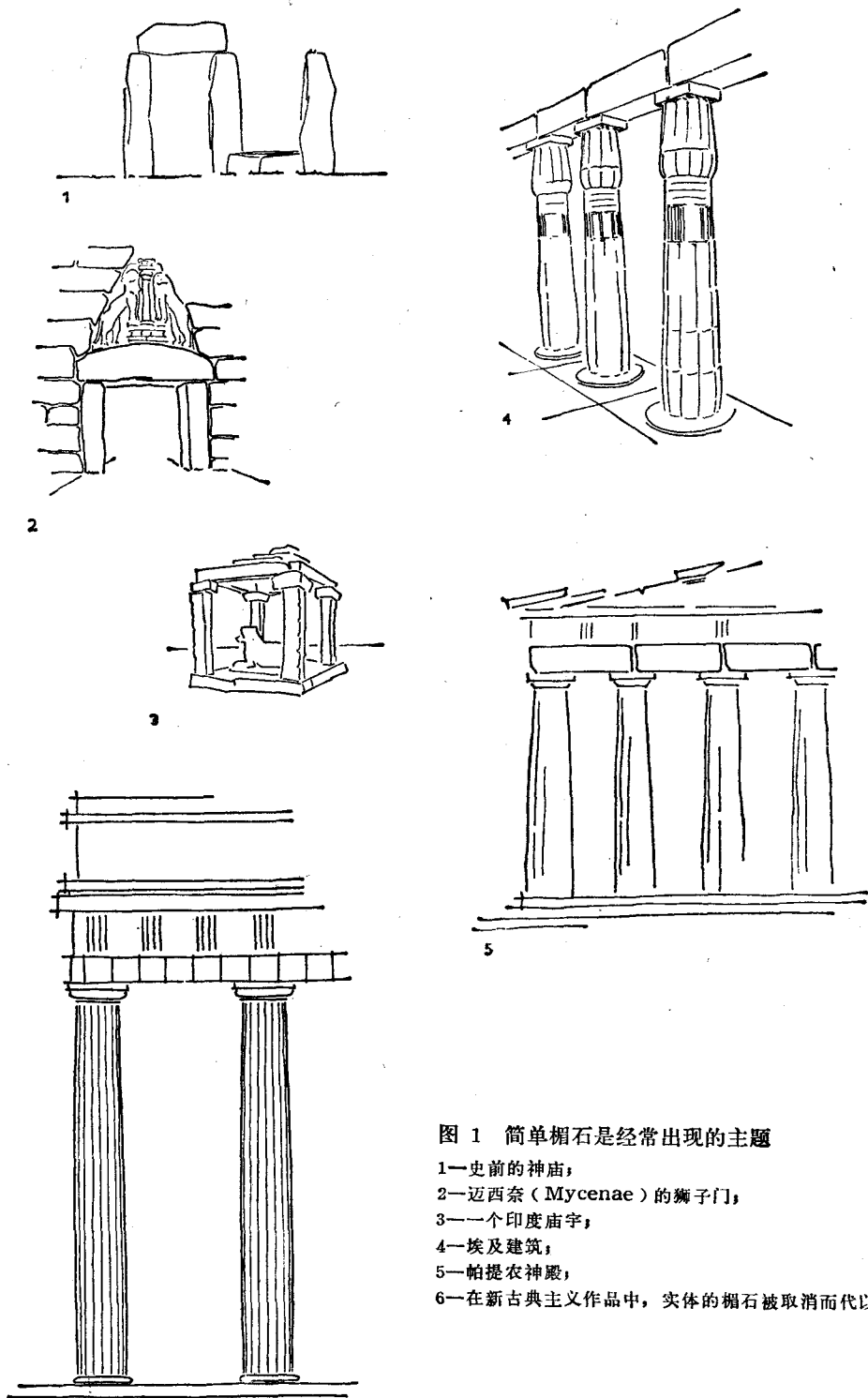


图 1 简单楣石是经常出现的主题

- 1—史前的神庙；
- 2—迈西奈（Mycenae）的狮子门；
- 3—一个印度庙宇；
- 4—埃及建筑；
- 5—帕提农神殿；
- 6—在新古典主义作品中，实体的楣石被取消而代以面石

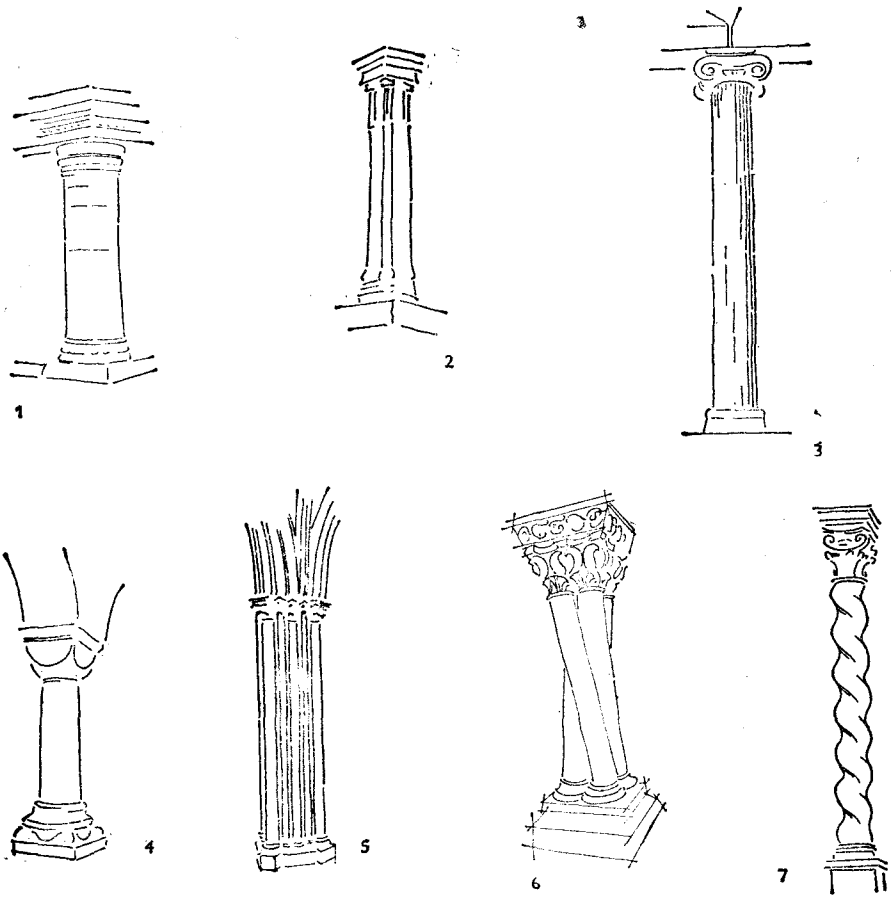


图 2 简单的柱身最能表达承受荷载的柱的功能

- 1—柬埔寨的吴哥 (Angkor)；
- 2—印度式；
- 3—爱奥尼克式 (Ionic)；
- 4—罗马式；
- 5—哥德式；
- 6及7—不论是纹饰的一束柱或一个扭麻花形的柱都不能表达承担竖向荷载的能力

的。不过，结构造型最后明确的时机还不够成熟，也还未获得公认。嗣后的几十年中，对房屋的因袭思想经历一次彻底的变革之后，技术科学的观念和现代建筑的观念才能取得胜利。同时，对可能保证积极进展到新建筑的一切约束将汇成浪潮。这种形势是不以永久价值而是以波动的价值为特征的。对一切发明抱怀疑态度的强烈倾向，并立即进一步投入尚未开拓的技术科学及艺术领域。

技术的熟练也意味着解除了以往对设计随意性的限制。什么东西在技术上都能变成可能的了，不管多么荒谬的东西也可以建造得起来。用“技术上不可能”作矫正的理由也收回了。在这动荡时期，时髦的效果贩子比过去任何时候都更兴旺。用诱人的照相和复制品抬高他的作品，同时以普及刊物广为宣传，证明了它比那些较严谨的有真正技术科学价值的造型更有市场。技术逻辑的纯化影响和其道义力量都被遗忘了，最后，艺术性的衰退竟矛



图 3 拱肋

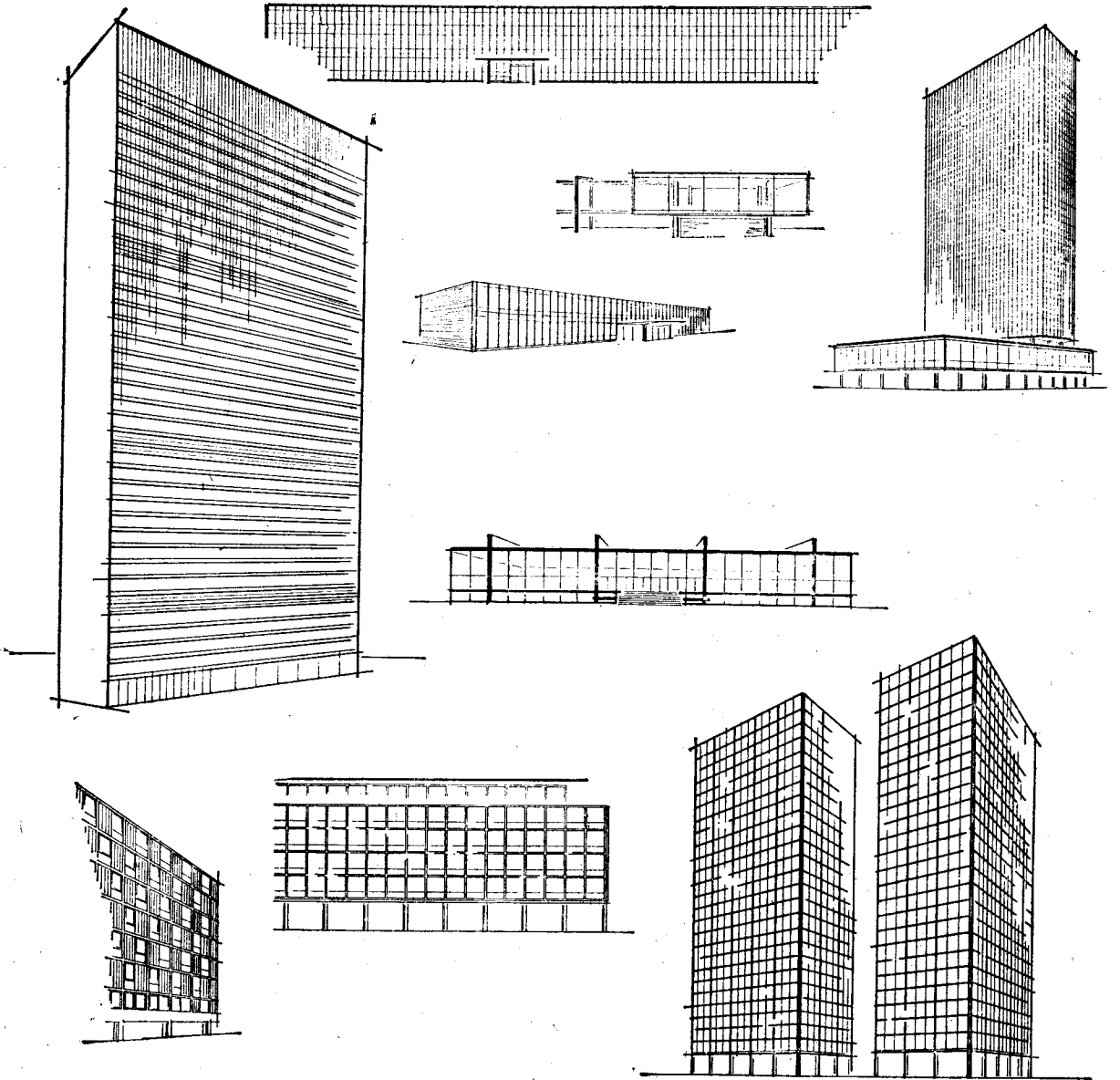
1—在伟大的哥德大教堂中，朴素的拱肋本身就是结构的组成部分；
2及3—晚期哥德式中，纯装饰性的拱肋是非结构的

盾地出现在技术科学的门口。这就是今天我们所处的状况。

在这种情况下我们应该提出建筑艺术中看来似乎是工程技术性形式的真实性问题，并力求得到一个逻辑的简单的答案。困难在于建筑鉴别的基础用纯理性方法从来没有建立起来。他们承认有一个既宽广而又难以规定的标准范围。逻辑推论本来容易向“建筑艺术领域”挑战的。但是，不论是谁，对“艺术的”或“建筑的”看法有所怀疑，提出同等充分，但纯属技术的论证时，将立即冒着被戴上门外汉的帽子，而被摈之于艺术大门之外的风险。这就是为什么在讨论建筑合乎逻辑的论点中，与那些牺牲合理性的以“人的因素”第一的理论相比，显得无足轻重，不论这些理论是多么的空虚。好象理智和逻辑本身不属于人类本质似的！

我们曾指出，建筑必须包括工程技术组成部分，因此，在一个合理的体系中，至少一定要包括这一方面。事实上，现代建筑是科学技术时代的建筑，在决定造型的技术问题没有明确以前，建筑是不可能先行的。如果现代建筑学不准备陷入新形式主义泥潭中去的话，这是将来必然到来的净化过程的先决条件。这类形式主义的所有症状，现时表现为伪装技术性，对于敏锐的观察者来说是十分明显的。由于现代建筑比过去的建筑更紧紧地依靠技术科学，没有相应的建造知识是无法完全理解的。换而言之，以前惯用的方法，仅仅用美学标准来衡量建筑不再恰当了。通常纯粹以哲学的观点考虑形式对“科学技术世界”的让步，就会完全忽视实际施工问题和有充分根据的建筑评论的目的。我们面临着这种需要：就是比过去要更为系统更为深入地钻研力学的和自然的（物理的）相互关系。这是发展结构造型的基础。过去对建造工艺是普遍了解的，而今天我们被迫去寻求对复杂的工程语言和科学语言既会讲又能懂的新途径，因为这种知识已成为建筑学的组成部分。最后，我们必须努力领会技术科学的现代意义，它的作为决定造型因素的具有影响后果的极其重要地

位，这在早期是从未被怀疑过的。我们必须驱使它为建筑服务，而不为形式主义所腐蚀，不向形式主义屈服。为达到此目的，我们一定要使建筑艺术真正成为处于技术科学世界中的一种艺术，而不在两者之间制造敌意。这样，我们才将看到生根于自然法则中的技术科学对现代建筑将是一种强大的动力。它们将共同结出“结构造型”的果实，这就是本书的主旨。



第一章 骨 架 结 构

现代骨架结构是建筑中合理应用钢和混凝土的成果。把承重构件尺寸缩减到最小值和明显地划分结构的与非结构的元件是其许多特征中的两点。由刚接的梁柱组成骨架，特别适合于多层建筑。现代建筑材料的高强度促使房屋越造越高以满足不断增长的需要。我们大城市的格调是决定于钢和混凝土的骨架结构的，就象中世纪城市的格调决定于木构架那样。由于现代骨架结构的广泛采用，已经使它成为现代建筑的中心课题。

对结构造型来说，给“骨架结构”下一个清楚的定义是重要的，但并不容易。在很大程度上造型非语言所能描述，而是必须由它自身直接产生效果的。观察者的直观印象是和所谓骨架相当符合的，可参看附图。矩形面构成方盒子，再次划分成犹如蜂窝的网状。这些网格单独似乎与人体尺度没有什么关系。整个房屋就是这许多独立元件的总和，其内部组织还必须从属于骨架的结构功能。

立面的光洁、建筑的尺度、朴素的齐整性都会使那些对现代建筑的技术成分还不了解的人感到压抑。“玻璃加钢铁”这个时髦的词组既被用为赞语也被用为贬词，却道出了骨架结构的独特材料性质。立面的格调取决于玻璃、金属和各种板材而非砖、石和木，它们形成围护空间的外部表皮，仅仅起填充或覆盖骨架的作用而本身不承重。

骨架结构的立面有两个相反的趋势，一种是骨架外露，一种是骨架隐蔽在幕墙之后。当然，讨论“结构造型”时对外露的骨架更饶兴味。从对设计的直接理解的程度来说，结构以直观易懂较好。因为战后建筑大部分是外露骨架的，所以值得我们特别注意。虽然对某些可能在艺术方面还有异议，但是我们现在的目的不仅在于描述建筑范例。与此相反，我们更感兴趣的是骨架结构那种突出的朴实、明朗和可理解性。

幕墙从外面盖住了骨架，遮蔽了甚至完全隐藏了结构的规律。这就使结构有受轻视的危险，认为结构在设计中即使不算是多余的也是不算重要的因素。如果现代的建筑师们的确是在探索一个物质上和形式上完整的统一体的话，就绝不应当把结构看做次要问题。结构即使隐蔽在幕墙之后仍然可以作为重要的技术因素而影响整个设计。这不过是如何将骨架与幕墙两者紧密融为一体并且一气呵成的问题。在幕墙的情况下讨论骨架的结构问题比骨架外露时要复杂一些。似应先来探讨一下外露的骨架结构。当然，许多问题两者是共同的，不过角度不同而已。所以我们从外露骨架开始，幕墙问题留待本章第六节讨论。

下面几节主要论述大城市特有的多层办公和商业大楼，它们几乎全是骨架结构。抵抗相当大的水平荷载（风力和地震）的摩天楼和高楼不是我们的主题，因为那时水平荷载是关键，它掩盖了承受竖向荷载的基本问题。在多数的低层和中等多层房屋则不存在风力问题，因为风力极易被剪力墙、楼梯间和升降机井所传递，而对结构骨架整体影响不大。这类房屋的骨架主要取决于竖向而非水平荷载。许多骨架系统是只考虑承受竖向荷载的，因而建筑平面布局也是以它为依据的。但实践中不可能将仅承受竖向荷载的骨架和同时也承受水平荷载的骨架截然分开。明确的界限是不存在的。所以在讨论主要承受竖向荷载的骨

架结构时，也并不限制我们描述和讨论有关摩天楼结构的某些细部。然而，讨论的根据还是竖向荷载，因为楼面系统的性质及梁柱的尺寸主要取决于它。当然有空调及其他大型设备的房屋结构设计在很大程度上受到机械工程师需要的影响。

本章的引言及要点是对网格的分析，因为网格对结构的立面有很强的表达力。接着针对一些由网格发展出来的立面成果加以评论。以下几节的内容是很重要的二楼底边和建筑上非凡重要的墙角，最后是立面收头的屋顶。本章接着讨论底层的退缩和幕墙的细部，结尾对骨架结构中常遇的一些过分夸张的造型作些评论。

网 格

“网格”这个字常被争议者用来描述为三等货色的骨架结构，含有与内容无关联的无生气的无机的和单调的划格子的意思。更有人呼之为“网格病”而加以蔑视，其实它的原本由来不过是秩序，只是由于滥用和误解而使它变成了僵死的形式主义了。

如果我们摆脱这些有点无谓的联想，将发现网格实质上是一种交织的直线系统。网格本身既不好也不坏，只不过是获取条理的一种方式而已。当然，如果纯粹为了形式而布置的网格，也就仅仅是在建筑立面上任意安排的虚假的条理，而且又与建筑内容毫不相干，当然应受到人们的嘲笑。不少单调乏味的房屋就是按这种所谓网格原则设计的。反之，如果网格与建筑任务之间具有逻辑的联系，它本身成为设计的组成部分，在它的比例上反映功能和造型的统一，那么它就成为整体之所必需而且有机地融合于整体之中（图4）。

为了更加明确易解，将网格分为两大类：“窄”网格和“宽”网格。是按柱距而分的。这一特点是一系列次要特点的根源。因为柱距的差别影响立面的分划，确实得出两种基本不同的系统，这种分为“窄”与“宽”的分法看来是合适的。

窄网格 “窄”网格是两柱之间只有一窗。如果柱距较大，其间有几个窗的话，称之为“宽”网格。对照图5所示的典型“窄”网格和图11所示的典型“宽”网格，区别是明显易见的。

窄网格的采用较多从平面功能出发而较少从力学原理出发的。一片外墙分解为窗面、统过梁和柱面，意味着只有在柱子的地方可以布置横隔墙，柱距越小则可布置横隔墙的机会越多，平面的灵活性越大，空间的利用率就越高。当然这是以确实需要把空间分小为前提的。如果不是如此，而是需要大而开敞的面积，则上述论点不适用。凡是较适合于分成许多单间的办公房屋，则以具有空间分隔灵活性大的“窄”网格为优越，但是喜用“开敞布局”的地方，如多数大型办公房屋，“窄”网格就不合适了。为了理解下面几节的内容，应该对以下两种情况的区别有个清楚的概念，一种是由真实的小柱距形成的“窄”网格，另一种是一个“宽”网格而由幕墙划分造成的窄柱距的假象。

为使“窄”网格的柱距与办公家具平面尺寸取得协调而作的大量工作给我们留下了无数不同的模数，大约在90厘米和3.5米之间。这些模数各有优缺点。对近十年德国新建的比较重要的窄网格办公楼做过一个统计，其中大约有50%的轴距在1.8到1.9米之间。很明显这个尺寸对德国的办公组织和办公家具特别合适，所以备受欢迎。不过，在功能需要和经济问题之外，进行如此重要的一个尺寸的决定因素主要还有建筑艺术。特别是窄网格容

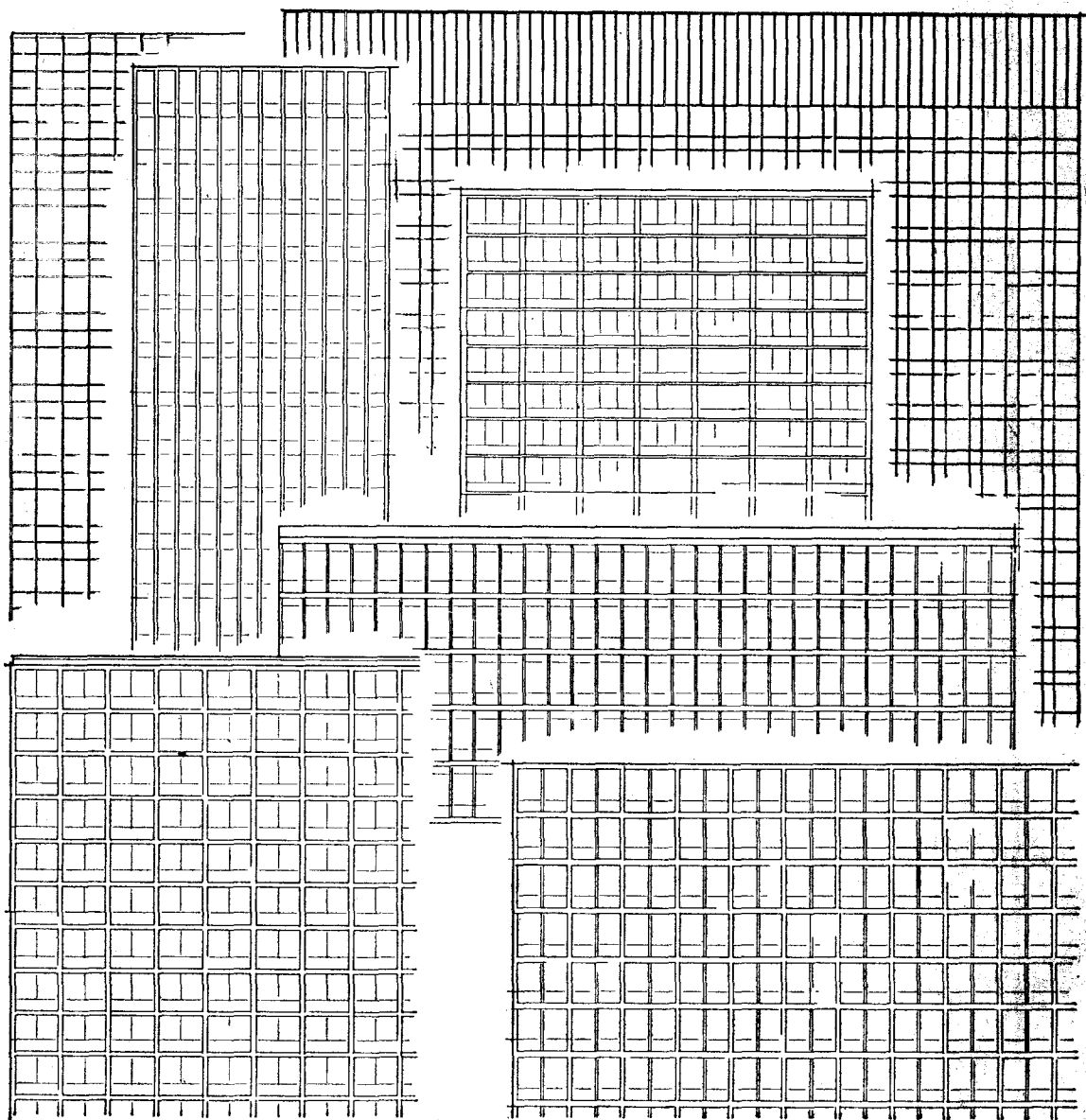


图 4 表现骨架结构的网格

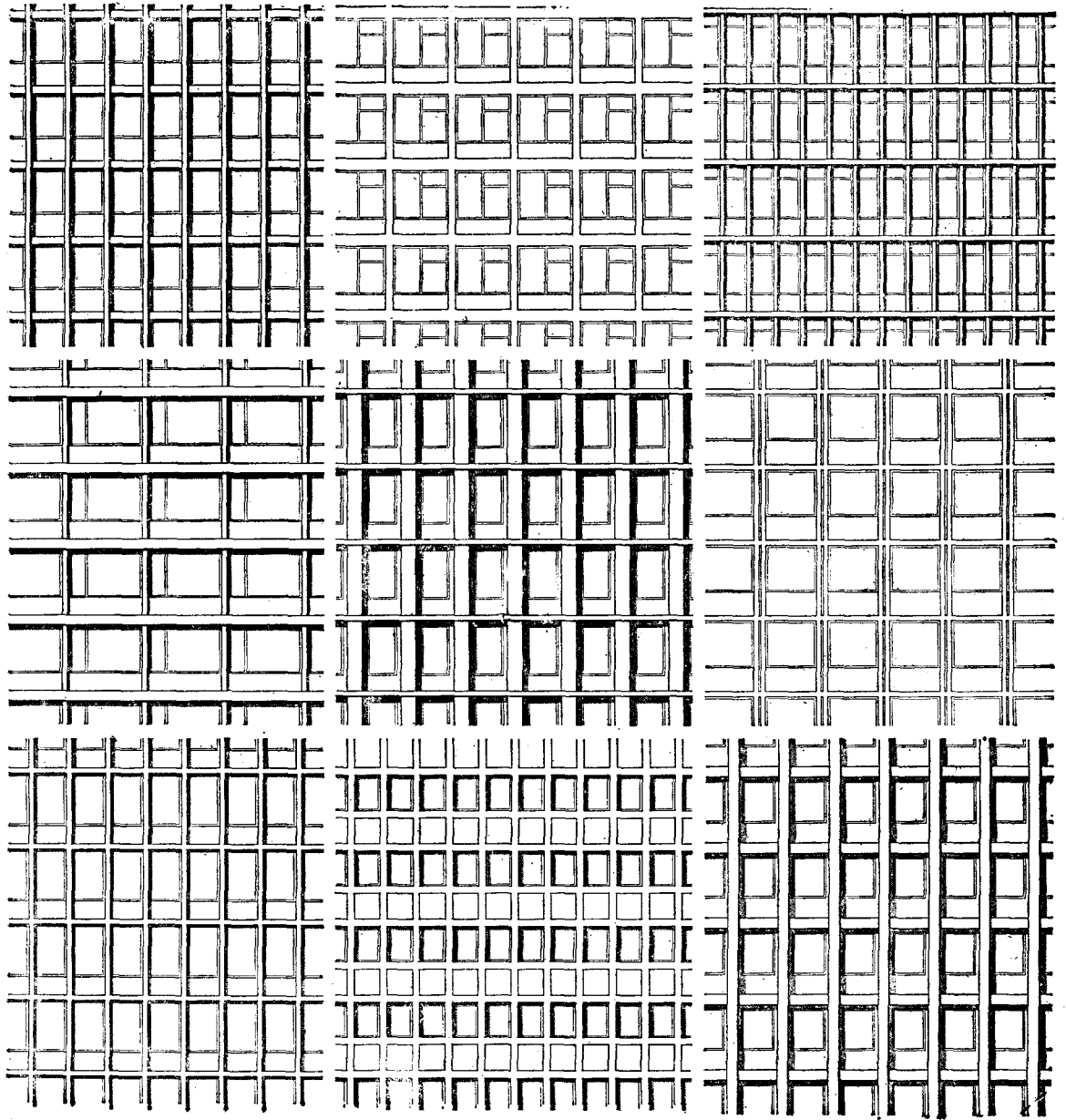


图 5 窄网格中两柱之间只有一窗

易造成某些单调感，象德国重建的城市中不少窄网格立面清楚地显示的那样。

为了阐明这种结构形式的结构上的特点，应当首先考查一番间距小的柱上的一般荷载，然后考查一些重要的楼面系统，从考查的结果以及所包含的物理上力学上的问题来考虑，我们可以导出最适于窄网格的结构造型。图6说明四层和十二层钢筋混凝土窄网格骨架建筑中一般荷载和柱所需的平均尺寸，钢骨架建筑柱子的实际尺寸本来可以小一些，但是加上防火层及隔热层之后，总尺寸与钢筋混凝土柱的尺寸差不了多少。图6中首层的柱子尺寸是纯从结构需要考虑承受最大荷载而确定的，完全没有考虑美学的因素。意味着即使十二层楼用窄柱距柱子也可以极其细长，因为每个柱子承担的荷载较小。这不是一般人们习惯的形象。实际上在多数窄网格建筑中柱子尺寸通常远比荷载要求的大得多。虽然现浇混凝土柱采用最小尺寸20厘米一般是足够的，如果采用预制构件还可以减小到15厘米，但是在相当低的建筑中经常还看到30到50厘米的柱子。这个尺寸对钢柱或钢筋混凝土柱都是不合理的，它可能是老式的砖石结构的遗产，也可能归因于某种对宏伟性的口味，仍然为全世界各地不少建筑师所偏爱，然而它和现代骨架结构的性质没有多大关系。

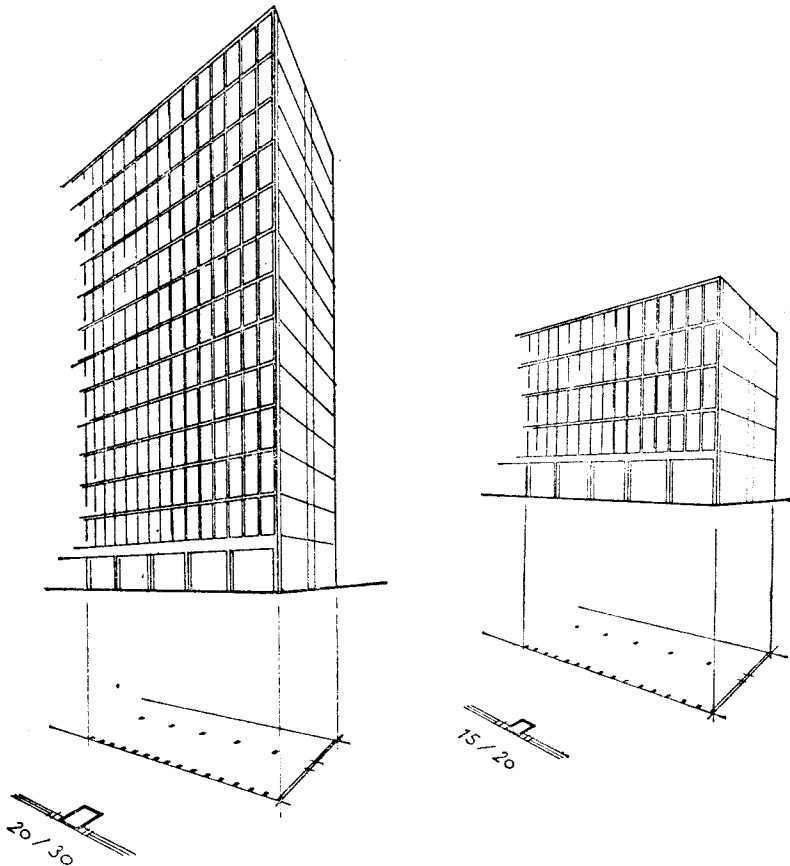


图6 即使在高层的窄网格建筑，柱子可以保持很细。图中尺寸单位为厘米，适于一般跨度和中等强度的混凝土

在窄网格中柱子是非常细长的。这个特点与意味深长的造型之间的关系是无论怎样强调也不为过的。任何不必要地加大柱子尺寸不管是由于附加上了管道、耐火层、绝缘层等

等，都会损伤它们的造型意义。

在窄网格的钢筋混凝土骨架结构中合理的是将楼面设计成为由外墙统长过梁支承的横向混凝土小梁式。外墙过梁的跨度很短（等于窄网格的模数），高度一般不会超过楼面结构。在一般的跨度中大约25厘米到35厘米就足够了。统长过梁可以视为楼面增厚边缘的加劲措施（图7-1）。较大跨度的横向平板（图7-2）一般既厚又不经济，然而比小梁楼面的隔声效果好。平板厚度总是小于过梁的高度，过梁高度则与小梁的差不多。所以，图

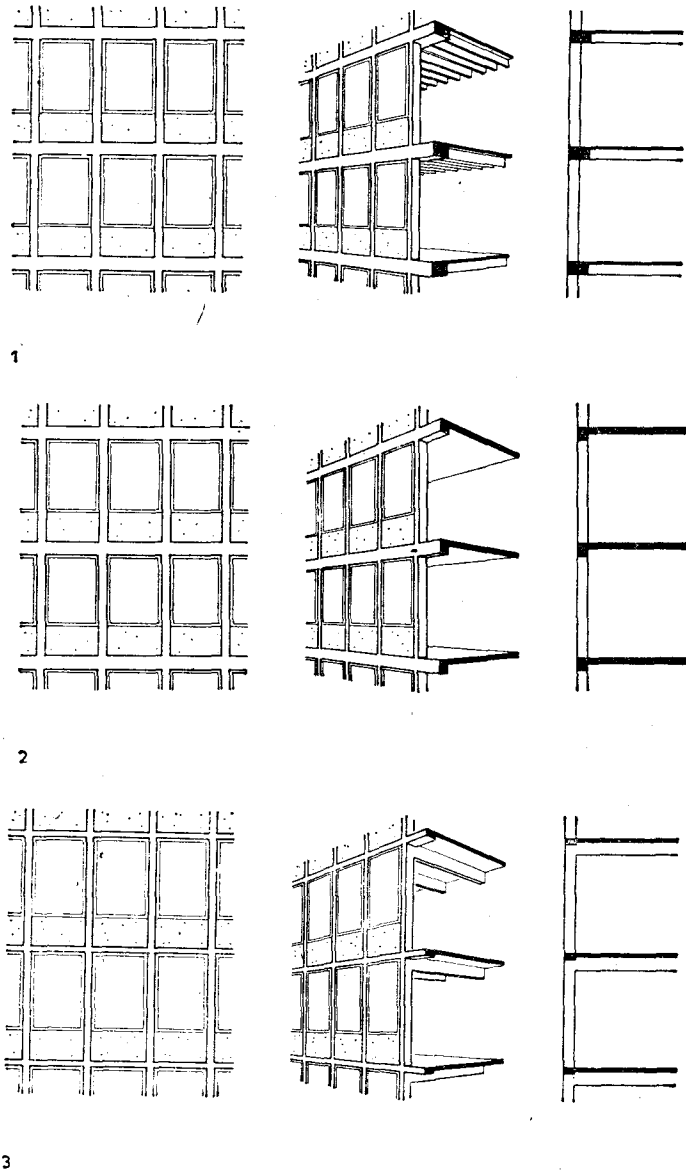


图 7 窄网格式的钢筋混凝土楼面系统

- 1—小梁；
- 2—垂直于建筑纵轴搁置的平板在立面上是分不出来的；
- 3—平行于建筑纵轴搁置的平板形成的可见的楼面带很薄，并不典型

7-1和图7-2的外貌很相同。如果平板纵向搁置，则必须支承在横梁上（图7-3）。横梁与外柱连为框架，在立面上是看不见的。但室内可以看到梁凸出于板之下，因而顶面失去了平整性。因为网格很窄，横梁相距很近使得楼板的承载力鲜能充分发挥作用，特别是为了隔声，楼板的厚度不能小于一定的尺寸。此外，尽管薄的过梁与楼面设计无关，但它承托着外墙，是难以省去的。图7-3所示的布置是个特殊的理论性的情况，不需多加探讨。就窄网格而论，实质上它是不重要的。

如果在楼板下面安装采暖、通风、空调管道，楼面的总厚度将增加，但柱子的尺寸保持不变。在欧洲较少采用需要较大厚度的设备，例如空调系统，则上述楼板厚度和从外面看到的差不多。在美国几乎所有较大建筑都有空调，因此立面上表现楼面构造的水平带常常厚得多。不过，即使没有机械设备所需的外加构造高度，窄网格柱子和那相当厚的水平带对比之下给人的印象也总是细长的。用钢材取代钢筋混凝土对此基本法则影响不大。

将柱子加上天然石板、人造石板或其他材料作为饰面，或用保温材料将柱子包裹起来，这样柱子尺寸加大，遮蔽了上述合理的比例关系。当然这绝不是要贬低保温层的价值。问题只是防止热损耗采取什么方式对结构上的朴素造型最为恰当。

关于采用外露柱子的设计有两种极端的情况。

如果建筑立面是齐平的（图8-1），柱向内凸，就意味着柱身处于室内温度之中，那么即使天气很冷的话，钢筋混凝土柱一般也可以不用保温。如果采用保温层也只需加在柱子外面的窄边，并不影响柱子的细长形象。

但是如果柱子完全暴露在外而又没有保温层，柱子就成为室内与室外冷空气之间的不利的冷桥。况且在一般静荷载产生的应力之外，又增加了敏感的温度应力。为了避免此一缺点，必须在全露柱子的三面加上保温层，随之对细长的结构造型产生了不利的效果（图8-2）。

竖向管线对柱子的尺寸也有不惬人意的效果。如果管线在外墙，最好与每隔一个的柱子相贴或包在每隔一个柱子之内。这样可以供应柱子各边毗邻的两条窗。这就意味着不同的柱子执行不同的功能。一个柱子承重，其邻柱就是不承重的设备柱。这样结构柱的间距增加一倍，就应当放弃窄网格的方式。因为柱荷载比以前加了一倍，相间的承重柱截面必须加大。介于其间的设备柱可以很清楚地区别出来。于是按照我们前定的概念已变成了“宽”网格（图9-1）。不幸的是设备柱与承重柱的截面常常相同，产生了一系列看上去相等而过大的支柱的外观（图9-2）。奇怪的是，结构柱与设备柱采用同一尺寸竟成惯例。对秩序的错误感觉促使许多建筑师取消了两者的实际的区别，他们事实上取得的是单调乏味的“标准化”，而毁坏了真实的结构造型，而且失去了一个有兴味的设计的良机。

图10中两座建筑的结构柱和中间柱相间在立面上没有区别开来。指责这类骨架结构的单调，并不涉及网格的原则和现代建筑在技术上的可能性；真正的过失在于设计的思路，错误处理了结构造型课题，忘却了有生命力的因素，而不是使它成为设计中的题材。

“窄”网格的较重要的特点可以归纳如下：

1. 可说是一条定式，即使高达十二层，窄网格的外柱宽度一般不超过20厘米，如果柱是预制的，宽度还可以减小。窄网格骨架结构中柱子细长是典型的。这是柱距小和每柱承受荷载较小的结果。

2. 立面上水平楼面带反映楼面构造厚度。这不是由柱距小而是由横向楼板跨度决定

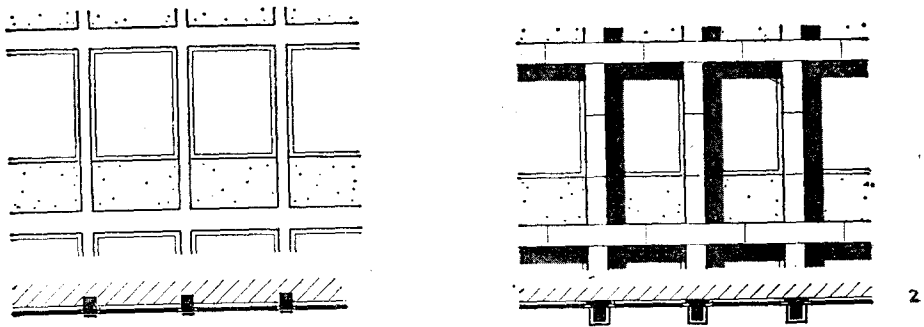


图 8 外柱的保温

- 1—如果立面是齐平的，附加保温层并不影响柱子的外表尺寸；
2—如果柱子外凸，附加保温层将使柱子显得笨重些

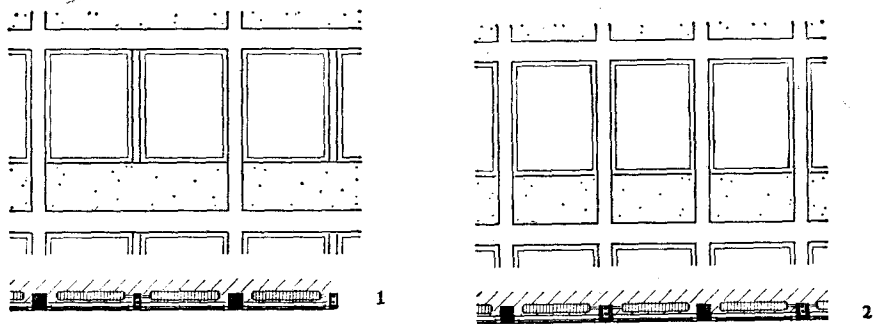


图 9 竖向的设备管线安装在外柱内

- 1—将结构柱和设备柱合理地分开，形成宽网格；
2—两类柱子的尺寸完全相同，产生的印象是逾常尺寸的窄网格

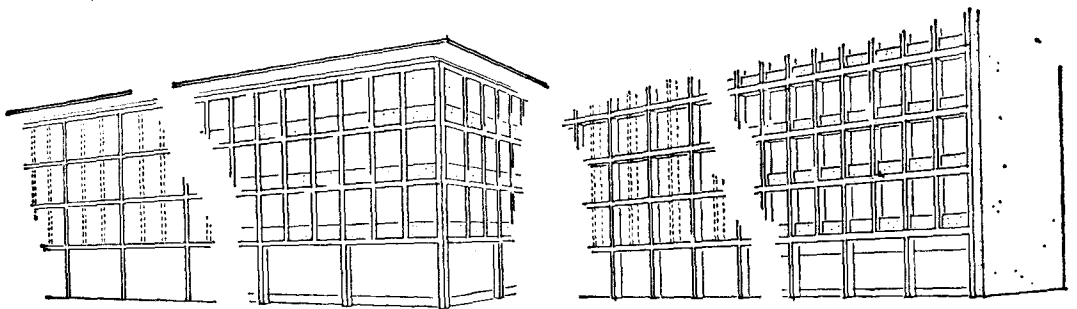


图 10 没有区分结构柱与设备柱因而使骨架结构单调乏味

的。一条定式，通常楼面带比柱子宽。

3. 网格的结构形象表现在细长柱与厚楼面带的关系上。

4. 这个关系的自然的态势有可能被剥夺掉，这是某些工程需要的后果，更可能是随便的建筑处理的后果。虽然如此，一旦掌握了它的潜在力量，它就可以变成立面上富有表现力的题材。

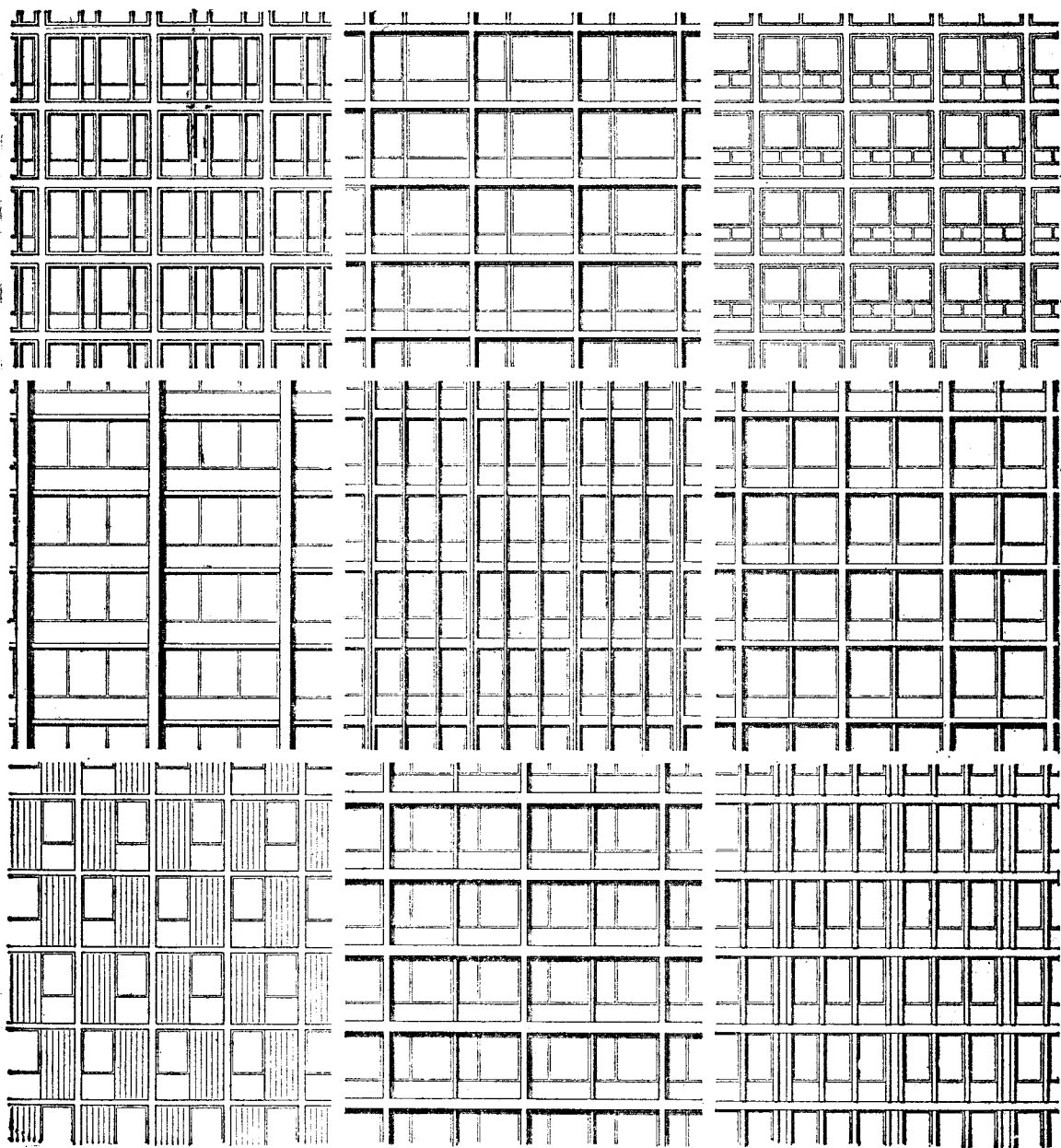


图 11 宽网格中，二个承重柱之间不只一个窗，一般以直挺分划

当然，上述的尺寸和比例关系绝不能毫无辩证地加以接受。每一设计任务有它独具的特点，所以上述尺寸和比例关系不能普遍采用。它们只是作为结构造型必须依据的指导，才是正确的。

宽网格 在“宽”网格中，结构柱相距数窗之远。这几个窗在一起形成窗带，或为直挺所分开。直挺并不承重也不成为结构框架的一部分，只是为安装与分隔窗面、安置设备和布置隔墙而设的。直挺间距较小，约相当于窄网格的轴距，即由家具规格、单窗尺寸和考虑为取得楼层平面组织最大可能的灵活性，而导出的轴向模数。因此，只有间距宽的承重柱方属结构的组成部分，和水平楼面带一起形成一些大的横向矩形，与窄网格中小而竖向的矩形是明显不同的（图11）。

图12类似图6，给出四层和十二层的“宽网格”结构中的荷载与最小柱子尺寸。因为宽网格中柱距比窄网格大，柱子尺寸也相应大了，究竟增大多少有待确定。但下述观点是很清楚的，只要总的竖向荷载与结构材料保持不变，不论是采用许多细柱或少数粗柱（窄或宽网格），每层所有柱截面的总和差不多是个常数。有人反对，认为细柱比粗柱对挠曲较为敏感，这一附加因素对截面尺寸不利，原则上，上述理由是正确的。但是窄网格中柱子对挠曲的敏感性比较是不起什么作用的，因为柱的有效长度（=层高）很小，即使最细的柱子也没有明显挠曲的趋势。例如，在德国钢筋混凝土规范中，如层高为3.5米时，现浇柱许可的最小尺寸为20厘米，其挠曲系数为4%。就我们所作的比较的定量概念而言这个数

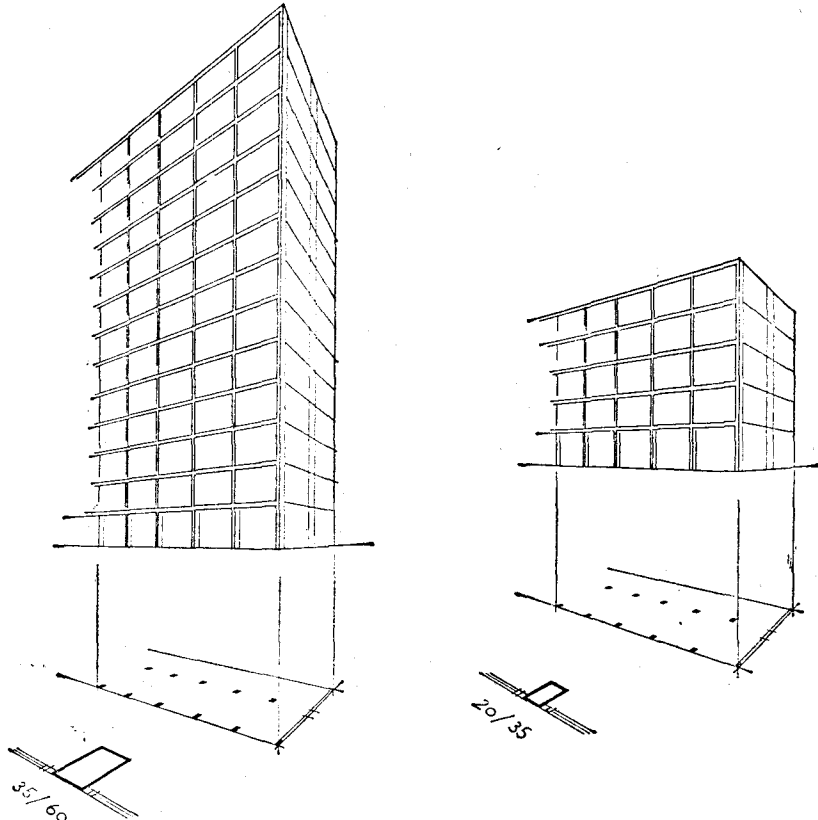


图 12 在宽网格中，柱截面的加大与跨度的增加成正比，但在立面上能看到的柱宽的增加率比跨度增加率为小（尺寸单位为厘米）

值是微不足道的。

从窄网格过渡到宽网格，如柱距增大，每柱的荷载随之增大，截面亦相应加大。柱距加大两倍，承载也就加倍，从而截面也大两倍。所以柱距、柱荷载、柱截面是约成直线正比的。可是柱截面本身不是直接作为造型可以察觉的。观察者感到的只是柱子宽度才是立面上起作用的形象。但是柱宽与截面、荷载和柱距没有直线关系，宽度是截面的基本函数。因此柱距增大，可见的柱宽的增大只是增大的截面积的平方根。总括起来，宽网格骨架中承重大的少数柱子比窄网格中承重小的多数柱子外现的面积要少些。换言之，宽网格中在立面上看到的柱宽的总和比窄网格中的小，因此宽网格中的柱显得较细些。这条规律对钢筋混凝土柱在材料质量同等且配筋率相同的前提下是正确的，然而对耐火的混凝土钢柱也是足够接近而加以应用的，其外部尺寸和钢筋混凝土柱比没有多大差别。

现在再来谈一谈楼面系统。图13-1是一个纵跨的钢筋混凝土平板；对窄网格而言，这个楼面系统并不合理，因为跨度太小（图7-3），在宽网格中跨度较大，可以有效地采用梁板系统。但是板的边缘比在窄网格中的更要加厚；因为外墙过梁的跨度增大，承担的荷载也大了。应当注意到在计算楼板时并未考虑外墙过梁这个因素。从设计的观点来看它并不重要，有适当的比例即可，不能超越它在结构上的应有地位而予以过分地强调。

伸入柱中的横向梁的尺寸决定于跨度与荷载。通常使它的宽度与柱宽相同，并凸出在楼板之下，因此顶棚看起来就不平整。横隔墙的高度也就不等，取决于横隔墙在梁下还是板下。如要求隔墙等高或要求顶棚平整的话，这种结构形式是不适合的。当然可以在梁下悬吊平顶，但也有缺点。例如：外墙过梁在结构上本是无足轻重的，为了吊平顶，得将它降低，就变得过分强调了。另一缺点是降低净空高度，从窗上部透进可贵的光线也被切去了一些，最后在吊平顶与隔墙的连接处还带来不少麻烦，因为顶棚之上传音，也影响了隔音效果。图13-1所示系统的优点在于梁与板的布置简洁明确。只要外露的梁无关大局，这种系统是较满意的。但是，要求顶棚必须平整，则由于上述结构的遮蔽和技术性的缺点，这种系统是不宜采用的。

如果支点相距较远，采用小梁比平板方便（图13-2）。长跨度的小梁比较高，这就有利于安排横梁作为楼面厚度之内的实心带；否则横梁将在板下面凸出来（图13-1）。唯一的困难是这些实心带和外柱的接触处。因为只有柱面提供的很小的接触面积可以用来传递内力。此外，梁上如果还要留出通过管道的洞孔，可能剩下的位置不够配置钢筋之用；更不用说，这样可能造成混凝土的应力超过容许值。这些困难可以减少，如果使小梁的跨度在横向如图13-3；或者象窄网格的结构形式那样（与图7-1比较）。将外墙过梁设计成与小梁等高的实心带。但是这类实心带的跨度有一定的限度，大约等于小梁跨度的三分之二较为合理。例如，房间的进深为六米，设计成为实心带的外墙过梁的跨度不能超过 $2/3 \times 6 = 4$ 米。外墙过梁是包括在小梁楼面厚度之内的；如果它的跨度超过4米，与柱连接处的配筋将非常拥挤，以致难于浇灌混凝土，可能危及它的质量。此外，结构变得过于柔软；与柱接触的狭窄区域内的材料的应力可能超限。

如果柱距超过房间进深的三分之二，采取另外一种形式的外墙过梁比较方便。图13-4中的形状就是最简便的一种，但在窗楣处切掉了一部分可贵的光线。

图13-5的上翻梁没有上述缺点，而且跨度可以很容易到八米或以上；但是施工较难。上翻梁不宜现浇，因为在板的顶面浇灌必须中断；这是经常造成构造缺陷的原因。

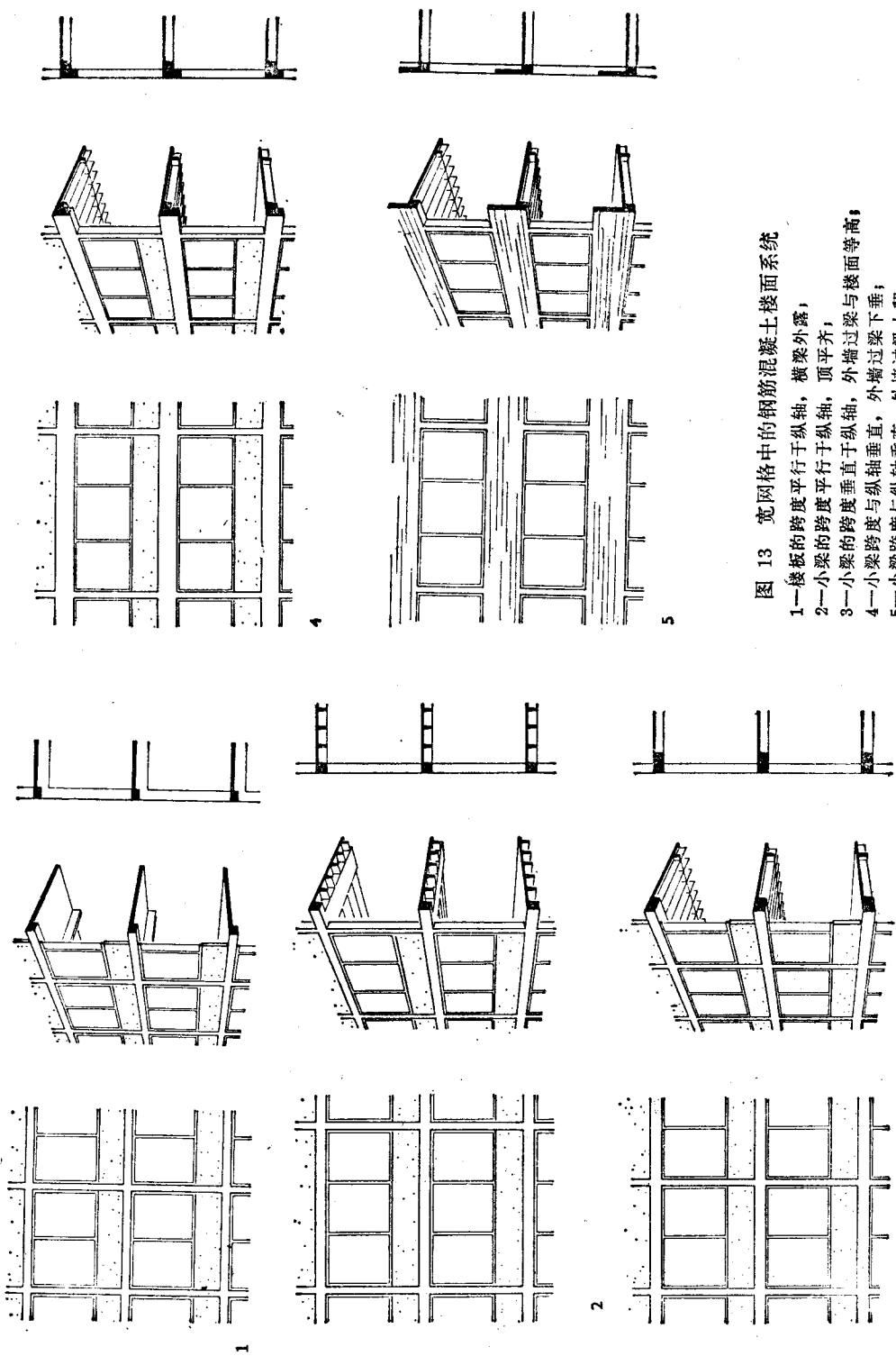


图 13 宽网格中的钢筋混凝土楼面系统

- 1—楼板的跨度平行于纵轴，横梁外露；
- 2—小梁的跨度平行于纵轴，顶平齐；
- 3—小梁的跨度垂直于纵轴，外端过梁与楼面等高；
- 4—小梁跨度与纵轴垂直，外端过梁下垂；
- 5—小梁跨度与纵轴垂直，外端过梁上翻；

曾试图对上述各种楼面进行比较，并结合合理的柱子尺寸为宽网格找出一系列规定，但是这比窄网格的情况下困难得多。在讨论窄网格时，细柱与宽楼面带的对比的正确原则是容易建立的。至于宽网格，则“正确”的处理方案可有好几个，从某些角度来讲它们又是互相背道而驰的。立面上可辨别的比例如果不连同其背后的结构设想是难以了解的。图13-1方案中楼面带和柱差不多等宽，柱甚或宽一些。图13-5方案中情况恰恰相反，高的上翻梁比柱宽好几倍。

在宽网格中对于柱宽和楼面带宽之间不可能找出一个普遍正确的规律。但并不意味着这是混乱和不可捉摸。结构原理继续有效。谁只要把结构、建筑功能及其建筑艺术表现作为一个整体对待，他就经常能为特定的骨架选出适当的结构造型。许多形式和比例在结构上可能是正确的，同样许多是错误的或纯形式主义的，所谓“正确”与“错误”要看从事解决的任务如何而变化。正确地选择宽网格比窄网格困难得多。可能的结构变化较多，这给建筑师在设计时留下较大的自由。

二层楼面处骨架的收束

前节讨论了网格。本节及以下几节将考虑如何使骨架在各种边缘收束的这一重要课题。网格的比例对建筑有决定性的影响，很大程度上给予骨架结构以尺度感，这是对的；但网格单独尚不足以创造凝聚的建筑造型。朋蒂(Ponti)[3]论及“la forma finita”，就是具有肯定的首和尾的造型。在骨架结构中一个造型的首尾，实质上指的是建筑各个边缘上网格的收束。骨架结构的收束要比砖石结构复杂得多；后者闭实的面从地面平顺地生长出来，以砖石搭砌而形成的简单边角结束两侧，上盖以屋顶。表面由于只受到相对小的切入的孔洞所破，它的完整性总是很好地保持着。但在骨架结构中却缺少这种易于收束的实面。在骨架结构的情况下，由骨架的结构部件浮雕式地组合成富有表现力的面，紧凑地形成了线条、透明平面和墙板的组合系统。每个组成部分各有其功能和结构联系，又与其毗

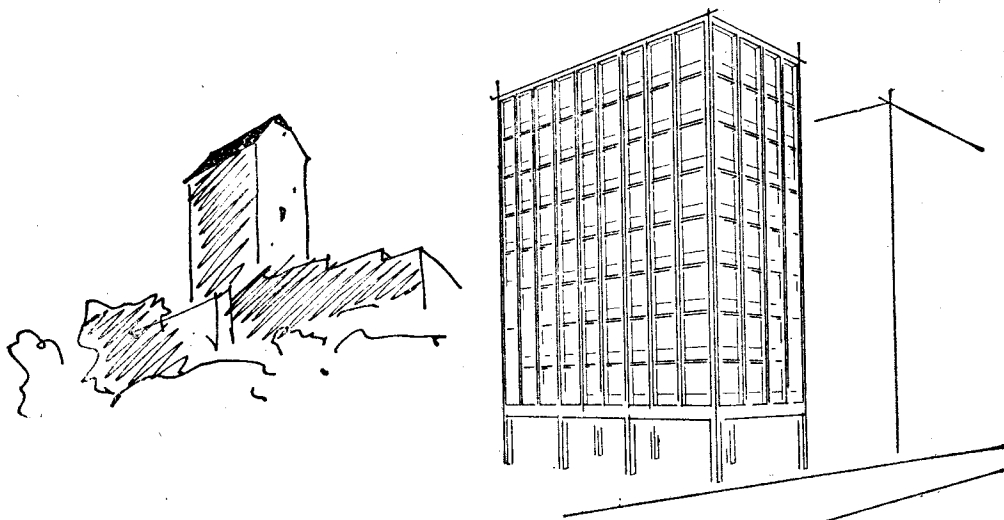


图 14 古老重实型结构与骨架结构的基本差别明显表现在主要各面的处理上和各面交接的边缘上

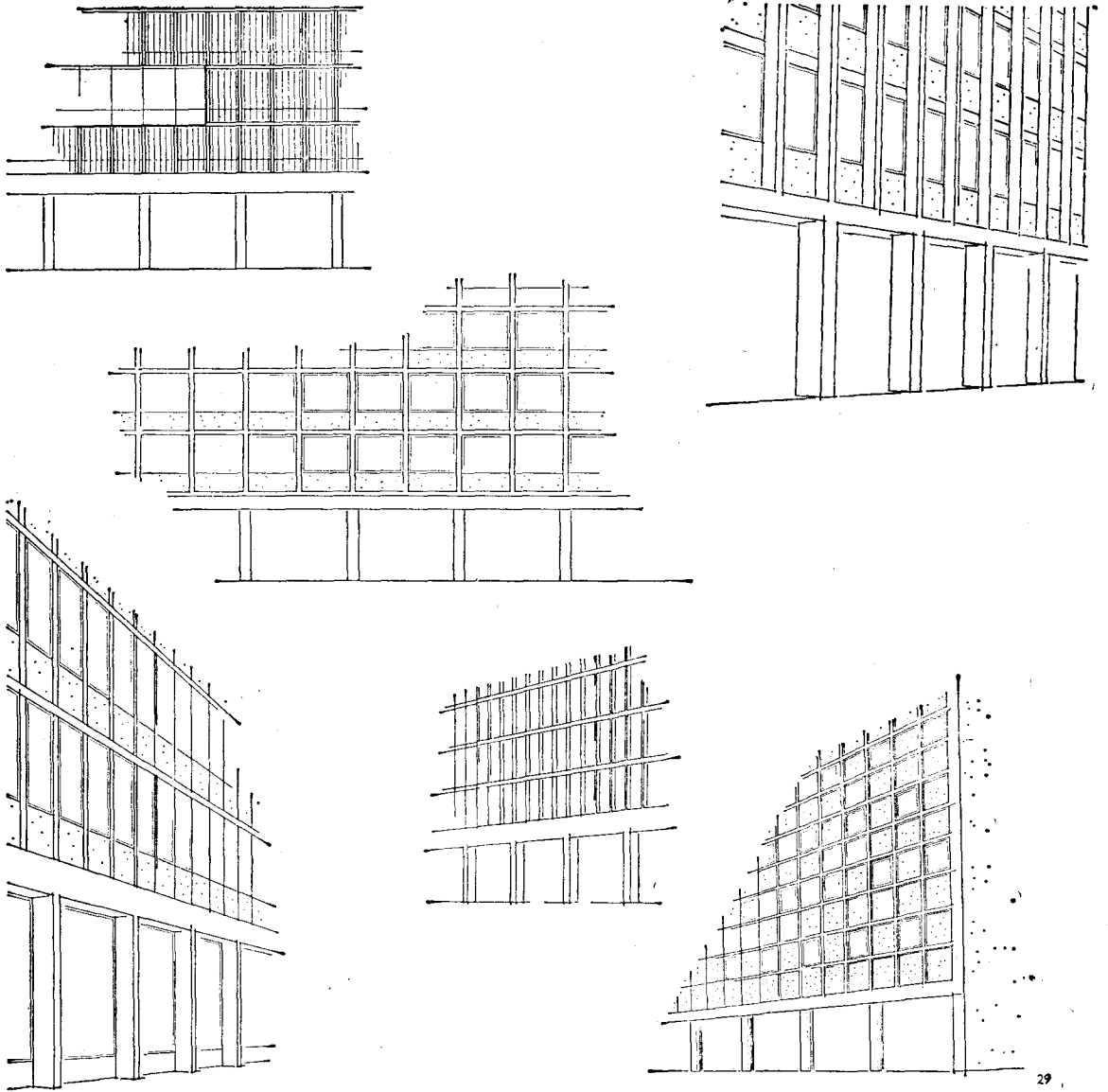


图 15 在二层楼面处，用一根大梁将上面的窄网格过渡到临街层的宽柱距

邻部分由凹槽、脊、接榫或嵌条而分开。这些组成部分在结构上的和功能上的相互关系形成骨架结构建筑的面的基础，从而也是立面在结构方面表明收束的依据（图4）。

窄网格的收束 一般规律骨架的类型主要取决于楼层的空间要求。底层的目的是不同。这就需要在结构式样上予以断开加以反映。小的柱距是不适宜于临街的橱窗、进口面积及其他较大使用面积的。

如果采用的是窄网格骨架，为了过渡到宽柱距，必须在二层楼面插进一根大梁（图15）。大梁的尺寸取决于跨度、楼层柱距、层数、楼面荷载、还有是大梁如何设计的问题。

图16-1清楚表示，在二楼楼面一定要托住一些柱子。在以上几层的楼面带是一般的外墙过梁，仅将楼面荷载传给柱子。可是在二楼楼面的过梁看来太细，不足以承受所有楼层累积下来的荷载。这太明显了，即使外行也看得出。这样的建筑立面图上就显出其本身内部的弱点。使人怀疑还有一个隐藏着的独立结构支承这个建筑物。当然，有发明能力的设计

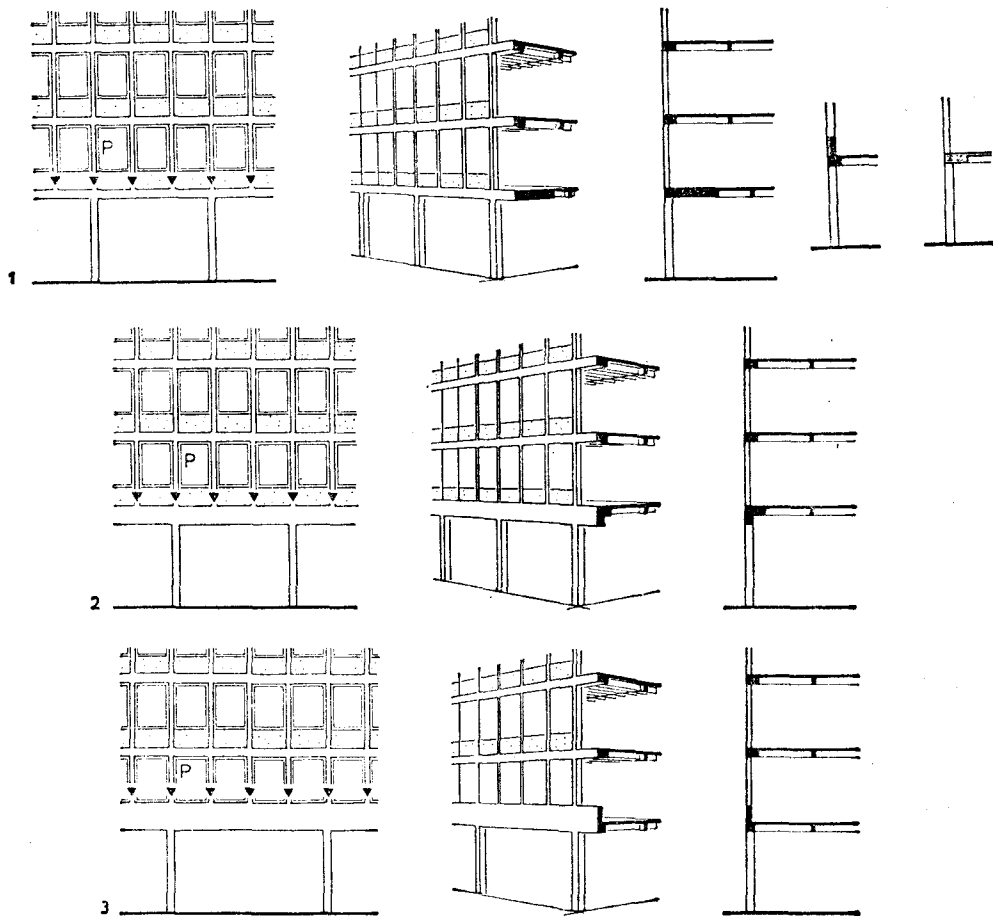


图 16 二层楼面大梁的设计

- 1—明显的细长比在结构与美学方面都不好；
- 2—在正常位置的一个典型大梁；
- 3—大梁与上下层窗间墙结合成一个非常强有力的上翻大梁

师总有办法或用型钢埋在混凝土内，或用较宽的过梁，或用藏在墙板后面的上翻梁。然而不禁要问他的动机何在，收到的艺术效果是那么大吗？与实际结构关系很少的网格能成为建筑艺术性有意义的组成部分吗？

图16-2表示一个L形大梁，截面板易于浇灌。它的尺寸由静荷载确定。二楼楼面跨度越大，荷载越大，大梁就越深。如果坦率地强调了这个结构要点，立面就不会失去明确性。在这方面，尺寸只要是满足计算要求并不是死板的。众所周知，可以在相当宽的限度之内适应建筑师的愿望。灵活性是可以达到的，通过采用高强的钢和混凝土，变化大梁的宽度和高度，或者与部分的板合并为受压区。梁可以采用多种的比例而仍保持力学上的可靠。提供设计师足以享受的自由度很大，只要他不亵渎结构原理或执行公然的骗术。

图16-3的上翻大梁是很有意思的结构形式。利用上下层窗间墙可以大大地增加结构上的强度，这种形式适用于长跨度。然而截面并不简单。二楼的窗直接放在这根上翻大梁上。作为以上各层特点的窗和墙板的格式就消失了。它的效果是那样的突然和不一致，所以建筑师经常试图将这种上翻梁隐藏在某种形式的面层后面（参考图18-4）。

令人奇怪的是，我们很难找到什么例子，用来表达对这种直接了当的结构题材，既巧妙又客观的处理，或许是由于缺乏接受不妥协的结构造型的勇敢的原故。这就只有提一提意大利建筑师吕西香蒂（Luccichenti）在罗马设计的办公大楼[4]（图17），是一个结构上干净利落、生动活泼又在美学上满意的方案。

仍在不断建造，同时又不受批判地被接受下来的无数歪曲了的结构，充分暴露了部分建筑师们和工程师们对骨架结构那样有意义的设计缺乏兴趣是多么令人可悲。下面举出少数典型的以各种形式重复地冒出来的虚伪结构，应当加以批判。

图18-1似乎象一个窄网格。

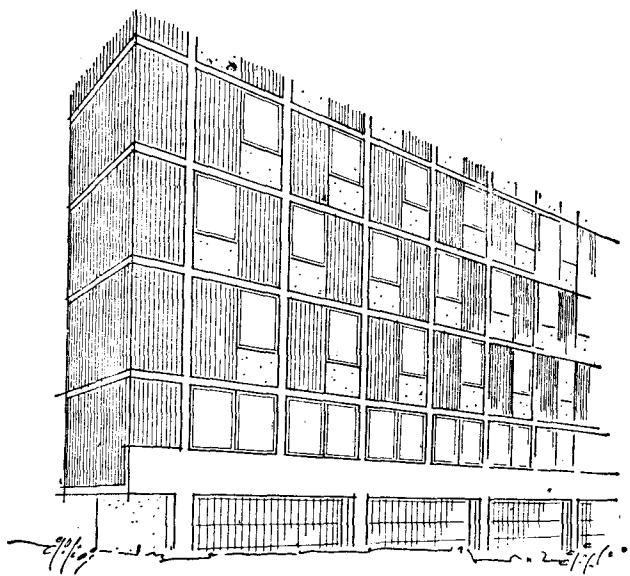
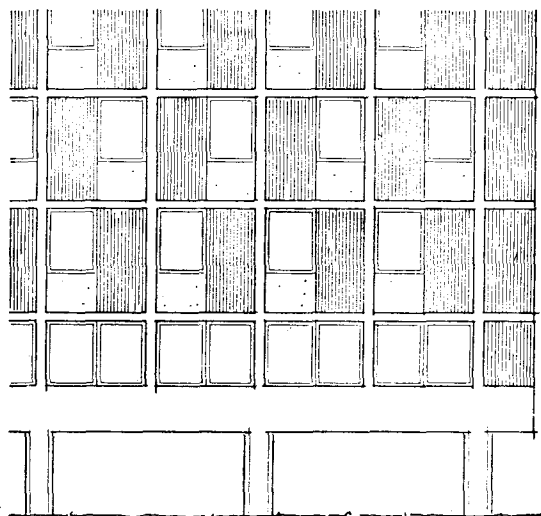


图 17 罗马的办公大楼上翻大梁承托着中间柱设计得很好

上面几层的柱都是相同的，因为使人想象所有柱子承受相同的荷载，因此每一相间的柱子必须在二层楼面被托住，但又没有为此安放一根大梁。二楼的过梁高度并不大于上面几层的过梁，那么它不可能承受从以上几层传下来的集中荷载，我们怎样解释这个奥妙呢？从荷载图与剖面图看来每隔一个柱实际上是虚设的不承重的。在每层楼面外墙过梁简支地跨越二倍相邻柱距，并承受虚假柱的重量。因此，二楼楼面的外墙过梁截面不必大过上面各层的过梁，因为，承受的荷载完全相等。此处用大梁是不必要的。虽然如此，省掉了这根大梁却使敏感的人们感到不安。虚假柱子与真实柱子是难以辨别的。眼睛在寻找他们认为应当传递荷载的最后支承点，但是没有着落。模棱两可的设计起源于思路的出发点。不合逻辑的第一步就是把假柱和承重柱等同处理。结果造成假象，好象在二层楼面缺少了一根大梁，而实际上并不需要。这样，结构上一个含糊不清，不可避免地又导致另一个含糊不清。

在图18-2中所有的柱子都承受同样的荷载并一直延伸到地基。这样，二楼平面就不需要放一根大梁。但是很奇怪，那里却放了一根大梁。一层楼面同上面几层楼面外观上的差别很小（柱距保持一样），这就暗示上下房间的功能相同。使人更不易理解这根笨重大梁和它区分的作用是什么。难道上下面积的功能真的不同吗？是不是因为底层较高表示有较大的空间呢？那么密密成群的柱子就毫无意义了。既然二层楼面有一个笨重的梁，显然意图强调表现关键部位。为什么不实际上利用来承托中间柱呢？那样，岂不可以减少底层的柱子数目？或者是不是仅仅为了在二层楼面利用这根大梁隐藏机械装置？这是另一个可能的解释。但是，为了达到这个目的，总应该还有其他方式，而不必在这样显著的位置上伪装一个如此重要的结构部件。

图18-3中造成的结构模式不论实际上力是怎样分布的，总是一种伪装。可以明显看出，大梁承托着二层楼面每间隔的一个柱子。因为以上楼层的柱子的尺寸都一样，就没有理由怀疑它们都具有相同的承载力。上面几层的薄的过梁更给人加深了这种印象，因为这样大小的梁不大会跨过两个柱距。很明显，它的跨度只能是一个柱距。这是从外貌来说，它显示了一个明确而不含混的结构。我们必须再次转到荷载和剖面图，这是为了把外形与内在规律之间的矛盾毫无掩饰地摆出来。中间柱是非承重的管线柱，只有间隔的柱承受荷载同图18-1。看上去很薄的过梁为一简支梁，跨度为柱距的二倍，还支承着管线柱的重量。这是立面上露出的结构高度所担负不了的。实际上要靠隐藏在上下层窗间墙后面的上翻梁加强作用。因为中间柱不承重，在二层楼面所谓的大梁和以上楼层的过梁的作用完全一样。大梁好象是一个重要的结构构件，事实上它是伪装的，和普通过梁的简单形象不同。但是，似是而非地，整个建筑上它都是唯一的一根外露尺寸与功用相适应的梁，换句话说，它能跨越两倍的柱距。它和以上各层过梁的区别在于它不必把加劲部分隐藏起来。至此，就不再显得混乱了。

这个例子是值得注意的，因为尽管结构和造型有分歧，而建筑的外貌却显现出经过计算的结构明确性，实际上用不着改变露出部分的任何尺寸，而只要取消隐藏的上翻大梁，建筑立面就能自然地表现一个真正的结构格式。这样，内部的静力分布和建筑外貌就将得到统一。结构虚伪的管线柱也要真正地承受荷载。过梁的高度不必大于露出的楼板带，也不需借助上翻大梁就能跨过柱距。二层楼面的大梁将承受两个柱距的荷载，从而发挥了它应有的功用，结构格式与力的分布得到很好的协调。

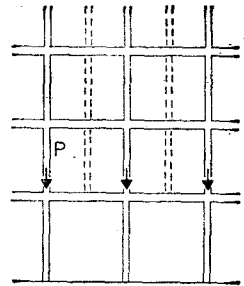
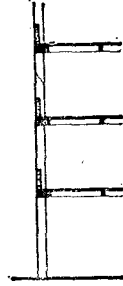
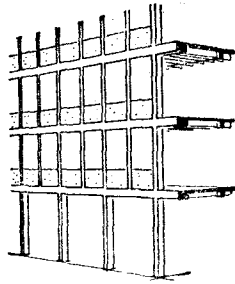
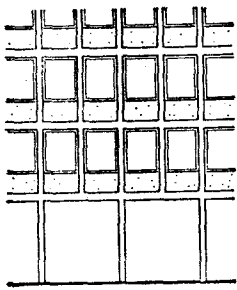
这些是建筑与结构在思想方面的分裂走到极端的例子。有个人设计了一个比例适当的结构框架，不但结构完善，而且施工也没有问题。但是由于某种理由，或许与机械装置有关，或者为了安装竖管，基本的结构构思被抛弃了。虽然尺寸没有改变，承重柱变成了假柱。过梁的跨度加倍了，但是它能看到的尺寸仍旧不变，而增加了一根上翻大梁。二层楼面的大梁只承受一层楼的荷载，不需要增加伪装的加劲，它原有的尺寸足足有余，因为最初它是曾为承担大得多的荷载而设计的。对此，工程师是满意的，因为他不需要对建筑师的设计加以任何修改。建筑师当然接受他的方案，因为从结构的意义上讲，一切表面的背后发生的事，对他是无关痛痒的。

从外表来看图18-4与图18-1非常相似。它也是窄网格的问题。所有的柱都一样，都好像是承重的。但在二层楼面少了一根大梁，比图18-1更令人感到不安。在底层的柱距很大，很难相信那样薄弱的楼板能跨越过去，甚至难以相信在这样一个跨度上它能支持单单一个楼面。从好几层楼传来的荷载集中到两点，它怎能承受！只要具备最少应有的结构常识的人，看到这么一个框架会感到不安。他一定会意识到缺少了一根大梁来承受二层楼面柱子的荷载，如果没有隐藏着的支点这个结构非倒不可。这种框架的外露部分是不能表达内力分布的真实情况的。荷载图与截面图暴露了这个歪曲现象究竟是怎样产生的。为了保持网格外形尺寸一样，在墙后面藏着一根深梁。上面几层薄的过梁与二层楼面的粗壮大梁之间有力而自然的对比就此被丢掉了。剩下的就只是那种常见的单调的骨架建筑。务必注意这不是技术性考虑造成的结果，而完全是随心所欲，毫无意义的和缺乏逻辑的结果。在很大程度上它是那带有问号的“艺术自由”造成的结果，所谓“艺术自由”错放到有些人手里必将成为不可理解的怪想而抛弃了真正的设计。这样的思路对真正的结构造型的发展是致命伤。

图19-1和图19-2的特点是二层楼面的大梁。它的尺寸明显地由承受一层楼而非几层楼的荷载所确定的。但是，由于有一个门洞，就必须有一根大梁承担从中间柱传来的集中荷载。可是为了刻板的规律性，无关结构而将大梁隐藏在上下层窗间墙的后面。任何人只要稍有一点关于材料和力学的常识就会觉得一定在什么地方藏掉了一根大梁。

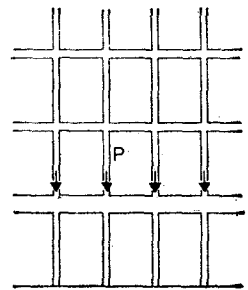
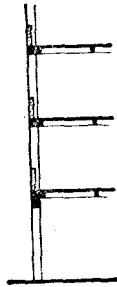
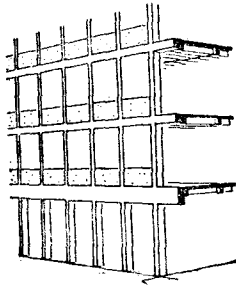
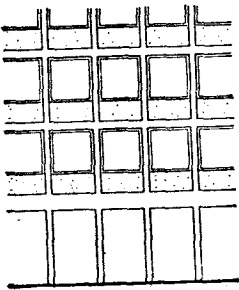
图19-3和图19-4所示二层楼面的大梁并没有什么真正的作用，全部柱子都一直落到基础，大梁成为画蛇添足。

图19-5的房屋是一个小市民欲望的典型表现，“想要一个我们自己的框架结构”。图中可能是主要的柱子之一却顶在门框的上面，这就明显地表明立面是虚伪的，完全不实际的。如果在上面几层柱子大小不同可以解释为一种宽网格的手法，那么二层楼面的大梁就变成多余的了。大梁唯一的功用就只是支撑商店门上的主要柱子。但是，这柱子明显地处在不适当的位置（真实柱子在图中是表示出来的）。不论这根大梁是否恰当，这个框架给人的印象在结构上完全是混乱的。这并不是现在为了讨论而编造出的一个可怕的例子。无数这类房屋真的“装饰”着我们的近郊。事实上，象图19-5那种房屋不值得批评，提也不值得一提。可是，对现代建筑缺乏理解还自以为是地摹仿，在目下许多矫揉做作的建筑中具有典型意义。有些用大理石，青铜和波斯毯铺天盖地的保险公司，银行和其他大企业的大楼中也不乏同样的对现代建筑缺乏理解和同样的矫揉做作。这种幽灵产生了我们小城市的带有陡坡顶和乡土气息的所谓“现代框架结构”，也产生了大城市的具有新古典主义雄伟性的所谓“现代办公大楼”。这些建筑谈不上与时代精神或现代建筑有任何联系。



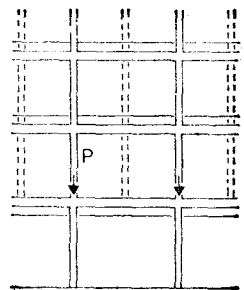
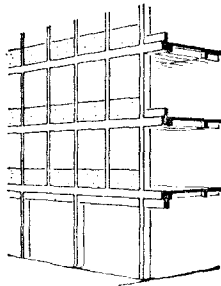
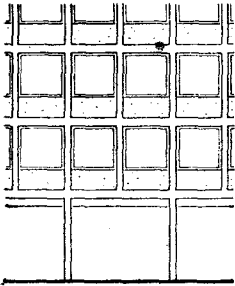
1—所有上层的柱相同，暗示省掉二楼楼面的大梁；

1



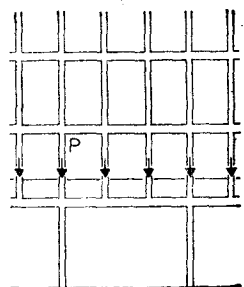
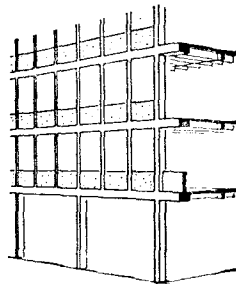
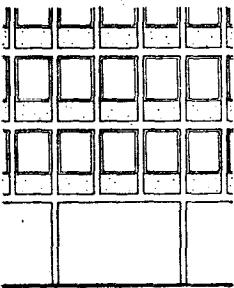
2—底层柱距小，使大梁显得多余；

2



3—立面上好象老实的比例并不反映力的真实分布情况；

3



4—将上翻大梁隐藏起来，使结构有一种不稳定的紧张气氛

4

图 18 对二楼大梁的笨拙处理

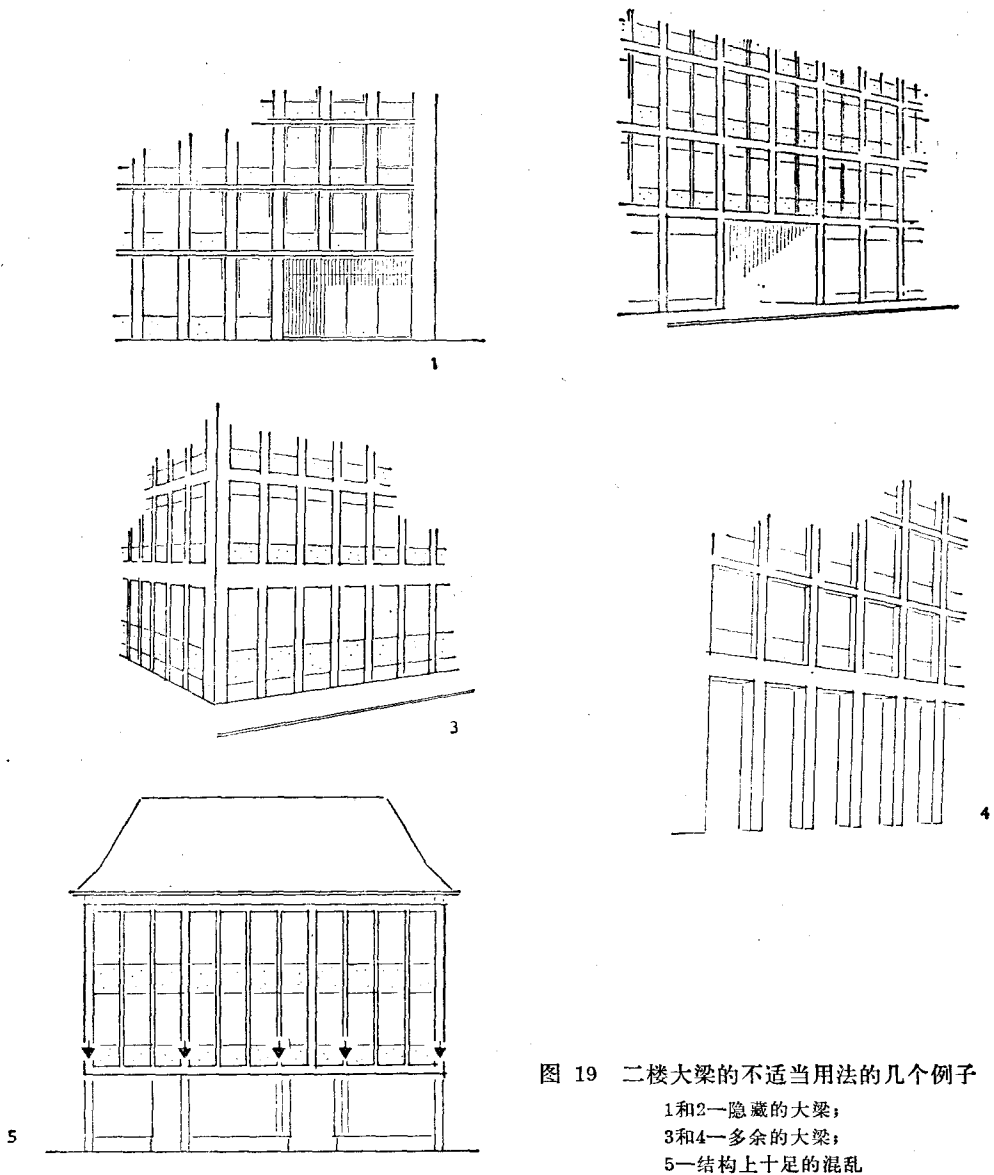


图 19 二楼大梁的不适当用法的几个例子

- 1和2—隐藏的大梁；
- 3和4—多余的大梁；
- 5—结构上十足的混乱

二层楼面宽网格的收束 宽网格设计中因为中间柱是非承重的，所以二层楼面不需要大梁。在这层楼面带承受的荷载和上面几层完全一样，结构上不必区分，所以在二层楼面收束网格并不需要采取任何特殊措施。从一开始，宽网格的模数和底层柱子布置是协调的。因此，一般不需要和以上几层的柱距不同。在二层楼，越是简单自然地重复上面几层的格式，暴露的结构越能优美地反映力的真实分布情况。这直率而忠实的造型是本身出于自然的(图20)。如果在二层楼面下要留出机械设备地位的话，那么在设计上绝不能使人误解成此处还有结构作用。

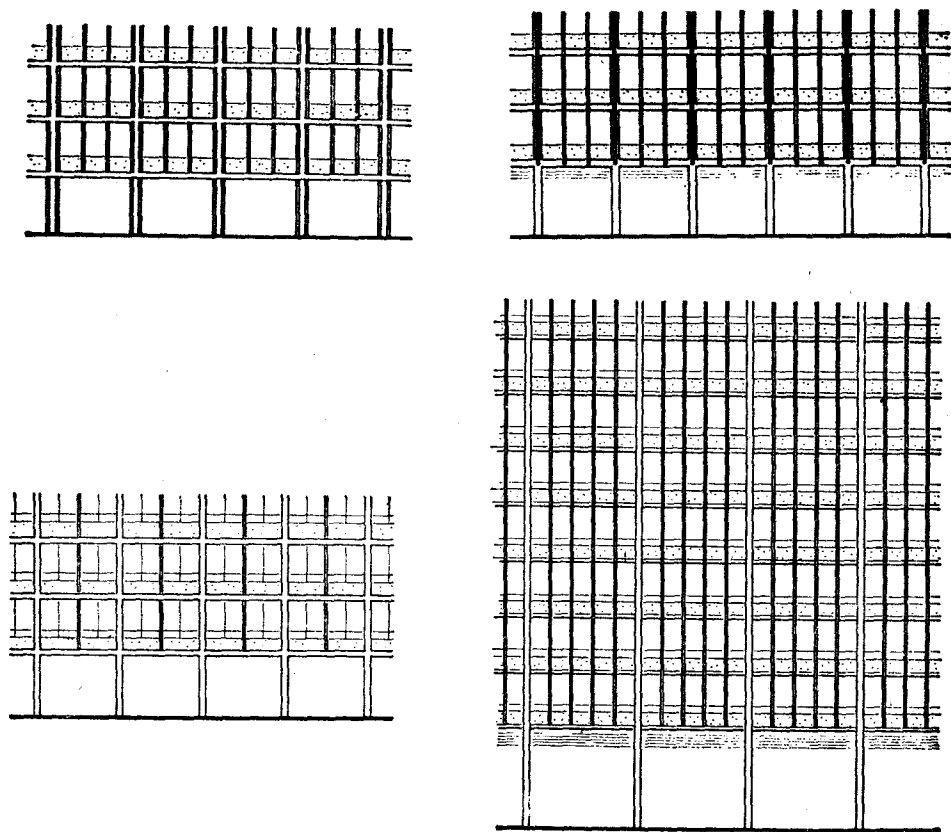
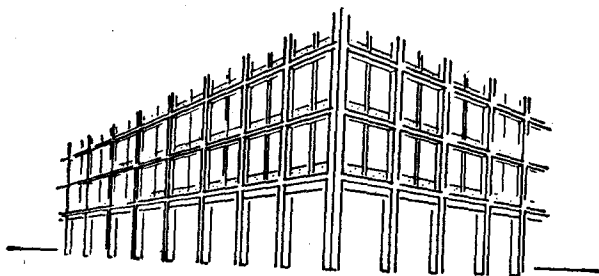


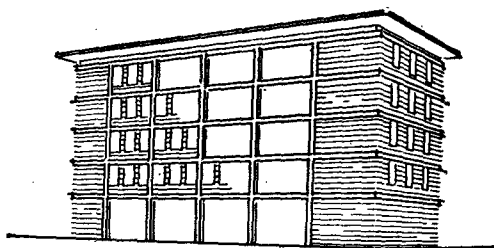
图 20 宽网格最下边缘的处理

对宽网格的歪曲相对地少一些，实际上只有二点是比较普遍的，图21-1是真正宽网格型的框架。上面几层的和二楼楼的承重柱距一样，中间的竖杆不承重，结构在这方面表达得很清楚。虽然，在二楼平面我们能够辨别出一根大梁，这根大梁必须承受的荷载是和上面几层过梁所承受的完全一样。不顾它的划一性，而加以强调，看上去有些与窄网格结构格式相混淆。可能是设计师冥想某种雄伟性而受到影响，联想到某些地区仍然流行的那种基座、主层、夹层等等组合而成的建筑立面。

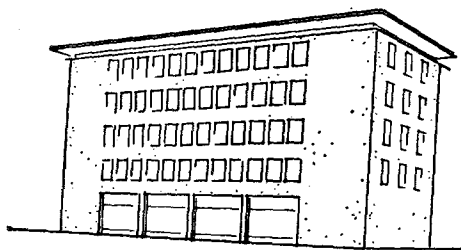
图21-2是一种混合式的建筑。骨架结构的线条明显。在完成时一部分填充了承重的，而一部分填充了非承重的砖砌体材料，然后抹灰。在窄网格与宽网格的设计中都存在这种滥用材料和结构的不合理现象。不过，由于宽网格的跨度较大，显露结构骨架更为清楚，和砖石工的混淆状态更令人不能同意。这就是为什么把混合式联系宽网格一起讨论的原故。抹灰的混水立面与骨架结构毫无关系。随着时间的消逝，房屋的沉陷和反复的温度变化发生很大的影响，这时一连串不可避免的裂缝又暴露出骨架的格式。这些裂缝将是对滥用材料性能和践踏结构原理的外部表现，混合式是无法用一层马赛克或其它结构装饰代替抹灰来补偿的。这是非结构的思路造成的一种畸形，这里提出来只是为了引以为鉴。



1



2



3

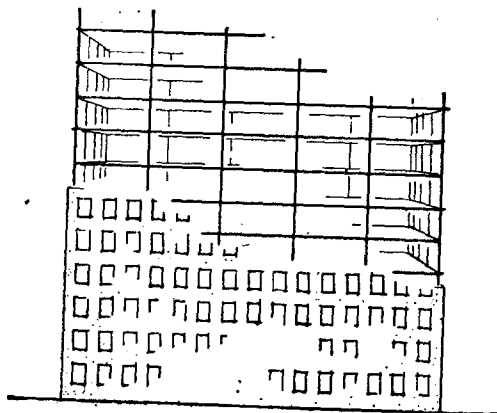
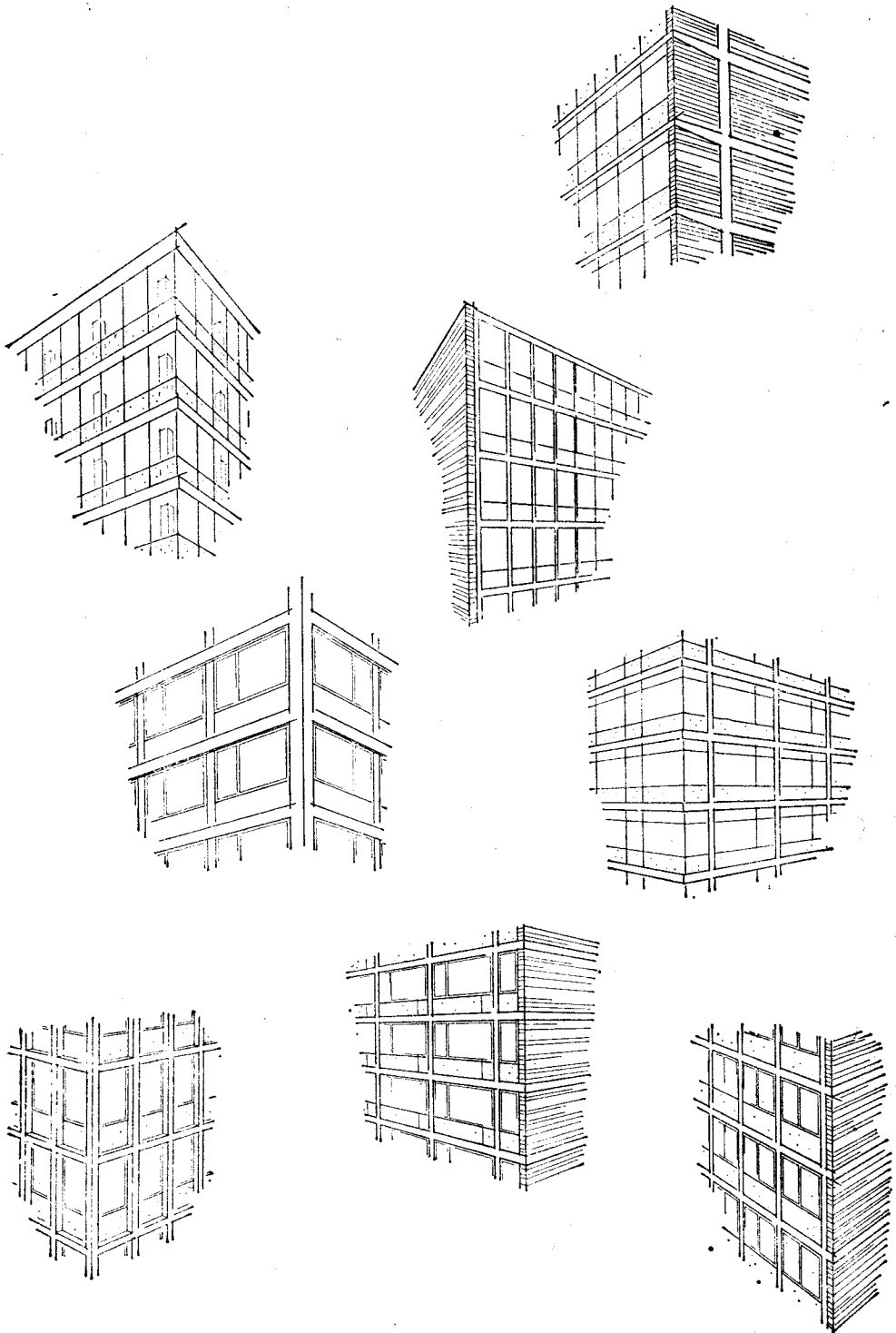


图 21 宽网格中，违背结构的变化
1—多余的大梁；
2和3—混合结构



在墙角收束骨架

墙角是相邻墙面重要的会合处，是墙面的端线和终线。由于砖和墙的简明的连续性致使墙角的处理方式必须有力而有所据。而骨架结构建筑物的外表面是多样化结合起来的。梁与柱相互交织，梁与柱之间、梁柱和窗与上下窗间墙之间的凹凸面深度都不同，各部分很少在一个平面上。结果，形成一般类似深浮雕和浅浮雕的墙面艺术效果。这种多样的结合使骨架结构建筑墙角的设计成为一个真正的结构上的问题（图22）。

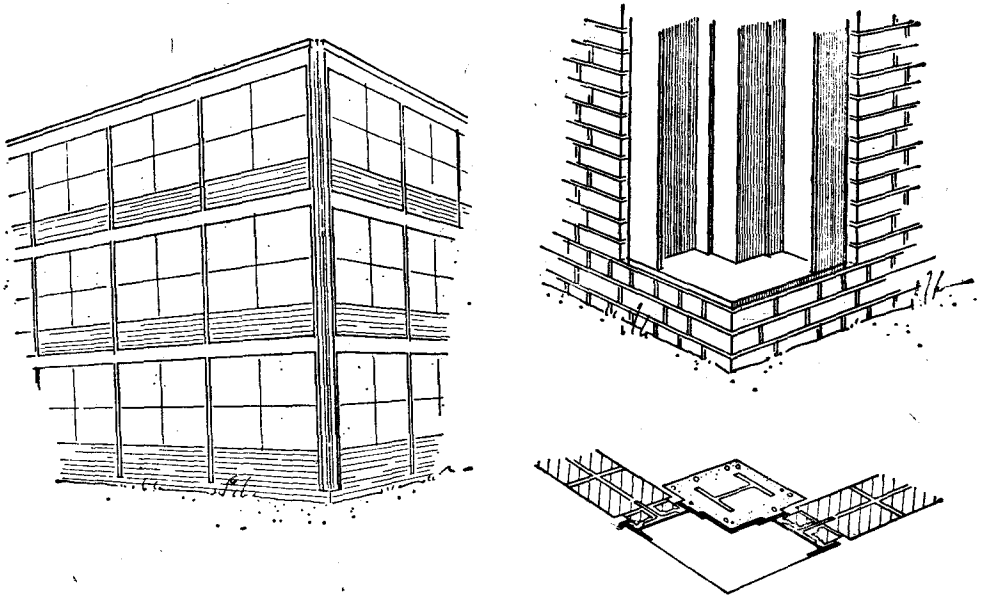


图 22 一些墙角的详图

承重的角柱 把相同的柱等距离地排列起来，最后一个就是角柱，转过墙角再重复这种排列方式，这真是再简单不过的了。是常见的四个立面都相同的骨架建筑的格式。

角柱的尺寸与一般边柱相同，除非由于某种值得商榷的理由，将角柱的尺寸更加大一些。从荷载分布图可以明显地看出，这种布置和真正的应力图形是不大相称的。图23所示的窄网格骨架，楼面是跨横向搁置的。沿着房屋长边的柱的尺寸都一样，截面由等分楼面荷载肯定地定了下来。暂称这等分荷载为典型荷载，以100%来表示。在角柱上的荷载就少多了。因为承担的面积减少一半，荷载当然只占典型荷载的50%，并且由于在中间支点的过梁的连续性，更减轻了柱子的负担。房屋短边的中柱承受最大的荷载，中间部分的大梁的一端就落在这根中柱上，它承受相当于典型荷载的300%的荷载，所以是外柱中承受

最大荷载的柱子（图23）。短边的其它柱子实际上不承受荷载。理论上是多余的。然而，在实际上，还有一定的作用。使得那些承载较轻的角柱更减轻负担。由于真正的荷载分布不易确定，所以很难估计角柱究竟承受多大的荷载，很可能它最后传递 10~20% 典型荷载到基础。这样，角柱基本上不承担多少荷载，在结构上也就不太重要。

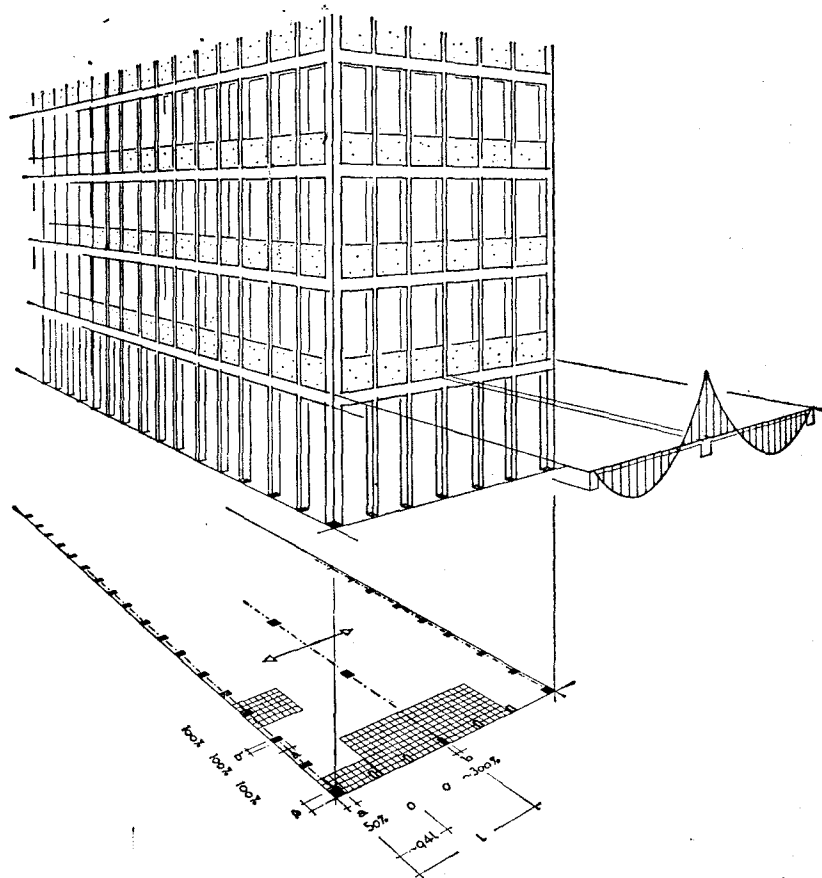


图 23 建筑骨架的荷载分布图

角柱是承重的，各边的柱距相等，角柱承受最少的荷载

没有想象力的设计师，因为缺乏技术上的了解和所谓“美学的理由”，将不同的构件“标准化”，成为无生气的单调性。结构那种自然地出于其自身内在逻辑所具有的生命力的特性就被剥夺了。这一点应当向一些人说清楚，这些人把过分强调技术，视为造成现代骨架结构某种形式上贫乏的理由。他们应在形式上的缺点和太忽视常见的技术要求之间去寻求联系。技术性的不合理，例如将不同的柱等同起来，表现在角柱上，常比过于重视结构是更多地使造型贫乏的原因。令人遗憾的是，在当代建筑学有关艺术与技术的对立评论中经常颠倒了事实。显而易见，这种对立是抽象领域中的产物，主要是对任何技术性事物的敌视和对技术有关的美与逻辑的一窍不通。这就是为什么这么多建筑师自以为掌握这样简单机械的程序就算从正确的荷载分布求得结果了。也就是为什么“专家们”要求建筑学从技术的枷锁中解放出来。因此，无足为怪，许多没有结构性的网格，是“从纯艺术

观点”设计出来的，这仅仅是模拟一个建筑骨架而和它的内在逻辑毫无关系。同样大量这样枯燥无味的形式必然给人留下一个千篇一律的印象，我们对之也不会感到惊奇。

过大的角柱的几个例子如图24所示。尽管尺寸大，但承受的荷载却最小。很明显外形与静力作用是矛盾的，但是，这种墙角方案今天仍很盛行，这是什么原因呢？

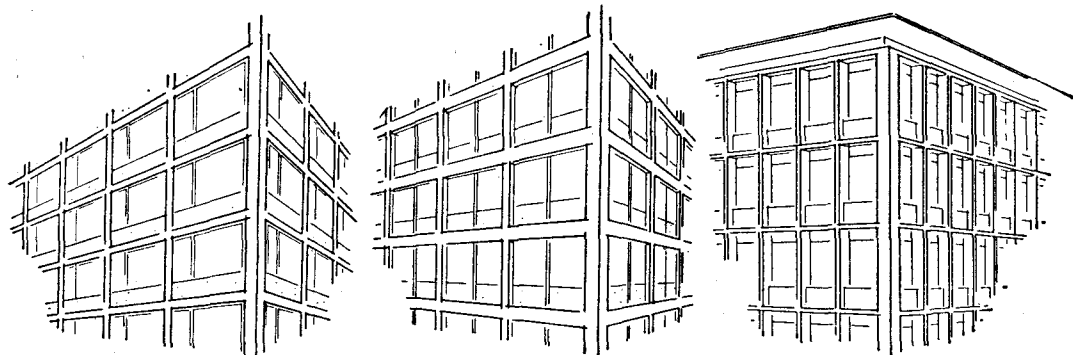


图 24 大角柱在结构上的不合逻辑

如果角柱和墙板联接处的细部，与典型柱和墙板的联接处相同，这样，角柱截面的大小必须和两个方向的典型柱尺寸一致（参看图25-1和25-2）。如果典型柱截面为深而窄的长方形，角柱截面必须是方形的，即角柱二个方向的宽度与典型柱的深度相同。这就是为什么角柱做得比典型柱更大的主要理由。

此外，还要加上透视的效果。眼睛从房屋正面看到的不是尺寸 a ，而是从大多数位置上看到角柱 C 的投影，大于典型柱的投影 C' 。矩形桌椅的腿都有同样的印象，从某个角度来看总比从前面看要宽些。在设计角柱时这个透视的原理是非常重要的，虽然它是由“本身”存在而产生的（容易说成是“自然而然”的），这种现象仍然和结构形式相矛盾。

即使用两个窄肋直角相接以求分散角柱的截面（图25-3），但在感观上仍得不到要求的效果。密斯·凡·德·罗的墙角方案（图22左图）得到广泛地宣传和称赞，是现代最优美的钢墙角细部[5]，给人一种轻巧活泼的感觉，单从一触的敏感来说，这是一个完美的方案，虽然乍看上去各个部分涌集在一起，而稍后退来看，又产生一个统一的很紧凑的体量的效果。令人遗憾的是角柱的组成部分并不全属承重骨架。在一定程度上它们只是安装在承重柱前的一种砖石包角的连结体。虽然，在理论上，对特殊情况提供了一个解决方案，但密斯的柱子尚不能当成“骨架结构中墙角”问题的“唯一”解决方案。

图25-4所示的角柱感觉比较细长。如果将窗深退进骨架，并将典型柱做成方形，角柱将显得相当地苗条，至少不会大过典型柱。但是，如果准确反映力的真正分布情况的更为细长的效果，用上述方式是不能达到的。再者，联系到凹窗的细部，这种方案在技术上是有点缺点的。

另外一个可能性是故意地加宽典型柱，这种措施对灵活性可能有一定的优点，例如，家具可以靠柱布置，横隔墙位置伸缩性大些，同时减少了过多的采光面积（图25-5）。这样，角柱常显得比典型柱细长。但是，典型柱笨重，和骨架结构的一般格局不协调，柱子丢掉它的特点而变成一长片墙。这种方案在预制结构中也许合适，但对骨架结构则是不能令人满意的。

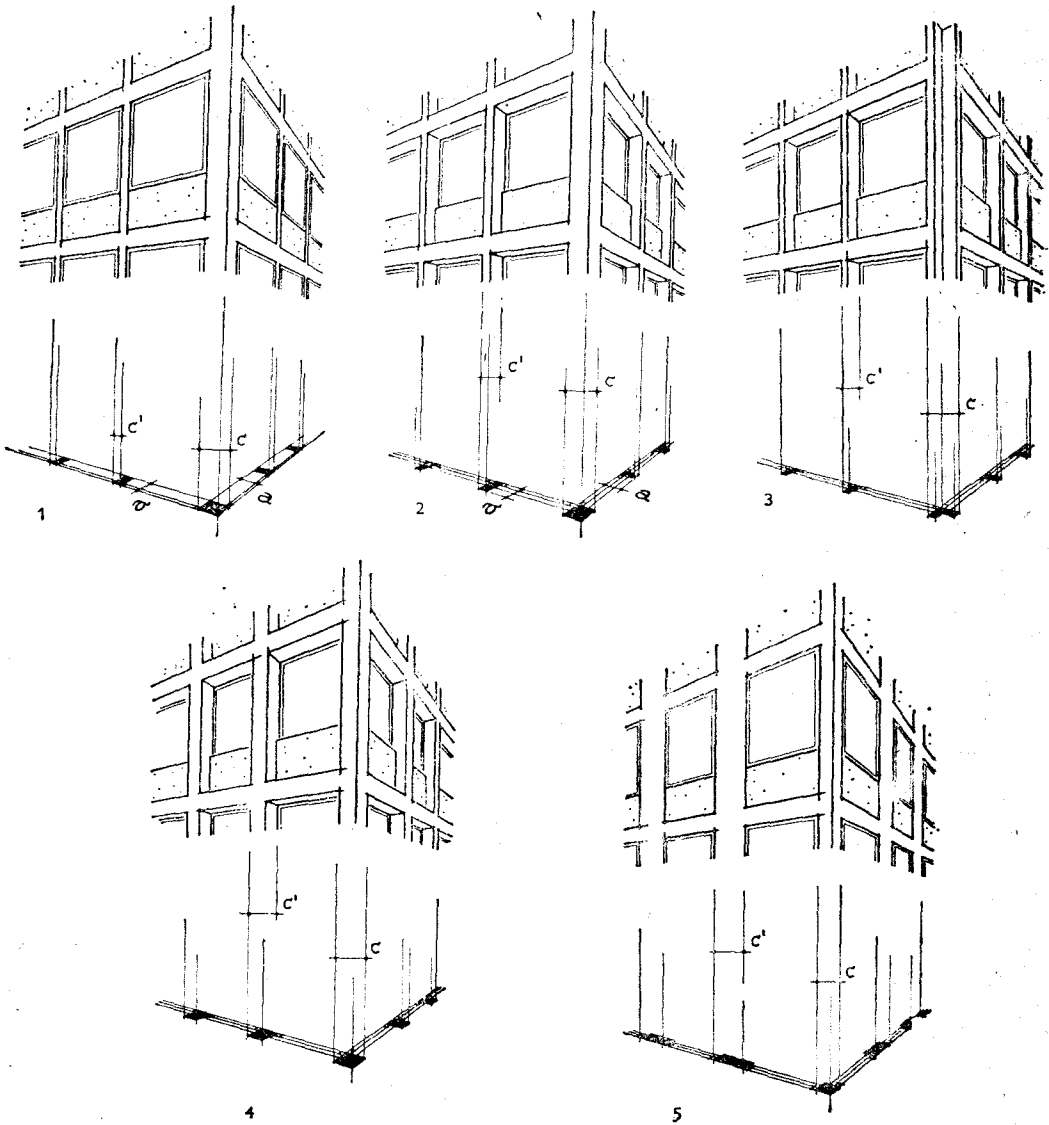


图 25 角柱细部和透视效果

1和2—透视中方形的角柱尺寸“C”给人的效果好象总比典型的矩形柱的尺寸粗重；

3—一个L形角柱看来不象方形的那样粗，但是尺寸“C”仍然大于“C'”

4—如果将外墙退进，又将典型柱做成方形，这样尺寸“C”就接近“C'”；

5—将典型柱加宽以取得角柱细长效果是与骨架结构的性质矛盾的

由于上述的理由，实际上不可能设计一个角柱，既与较小的荷载相适应又显得比典型柱细长。于是就产生了这个问题，要求细长的角柱是否夸张，仅仅是为了符合理论要求呢？然而值得注意的是，这种结构上的要求与感情上对胖角柱的厌恶相吻合。谁要是能够完全掌握现代建筑的美学价值尺度，他将清楚地意识到这种柱子所造成的不协调。这个理性上和感情上判断的一致性指出一个共同目标，它是以结构造型的逻辑性的美为基础的，而这种结构造型在功能上又很完善，并且赋予在比例关系的旧定律上以新的内容。我们已

经看到，细长的角柱，几乎是不可能取得的，但是认识到它的结构重要性这一点还是为设计中的相当肯定的趋向提供了一个起点。这些趋向从以下的一些照片中可以看得很清楚，在最好的一些现代建筑中也是经常察觉得到的。

在现代骨架结构中，尺寸过大的角柱既缺乏美感又缺乏逻辑性。不过，为改善墙角设计，也曾做过相当少的一些努力。好象这个问题尚未普遍地被人们理解。就所有论及的各种承重角柱来说都有缺点。好象找不到没有后遗症的满意方案。经验证明了确实没有一个已知的方案能获得圆满的结构造型。

有趣的是，窗的细部也发生同样的问题。当二条窗带在墙角相遇，立柱和窗框重复了骨架柱之间一样的格式。必然，为了构造的理由，角上的立柱仍是最大的，虽然为了美观和结构的理由，它应该是最细长的。

单向出挑的墙角 在前节中已经说明，试图在承重角柱处收束骨架得出结构上满意的方案是失败的。

从力学角度再建议另一种方案。参看图23很容易理解，骨架结构中角柱应当承受最小的荷载，这是典型的。在力学上角柱几乎是无意义的，完全去掉，与骨架结构的特性最协调。角上的轻荷载可以很容易地由悬臂楼面承受再传到典型柱。图26是一个宽网格骨架中的荷载分布图，房屋短边的楼面悬挑（单向出挑的墙角）。合乎逻辑地，房屋短边的柱包括角柱都是多余的，长边上的柱仍保持在外立面上。这些边柱以同样尺寸和差不多相等荷载按照骨架的支撑功能综合成房屋的长边立面。而与无柱的短边形成对比，短边格局是由悬挑决定的。本节讨论的单向出挑，不但提供一个解决墙角的办法而且作为不同立面之间必要差别的结果而丰富了建筑构图。

思路是从力学定理开始的，通过清楚的荷载分布而达到一个清晰的结构系统，表明有意义的结构造型是赋予建筑以方向的，就是说，区分纵向和横向结构。因此，单向出挑和建筑长边立面与短边立面的重新组织有密切关系。思想开朗对结构设计有感觉的建筑师将会因为不仅消除了使人烦恼的角柱而感到高兴，而且还可不必单靠附加装饰而使光面处理得更加清新有力。这再次证明，结构推理本身是驱除那种把定型构件不加思索地标准化而造成单调感觉的有效方法。本身就蕴育着促进因素。对荷载图有了理解导致角柱的省略，逻辑的结果是楼面的悬挑。

这样悬挑和造型上的先入的想法是无关的，但对骨架结构在许多方面是有成效的手法，特别是关于解决角柱的问题。合理地应用悬挑结构需要对它的结构原理和它与支承骨架的关系有所理解。一根自由悬臂梁本身并不是动人的结构型式。重要的是挑出的地方怎样承受荷载，如何固定、挑出长度与支承结构的关系（图26）。

悬臂梁应当有机地与骨架作为一个整体结合在一起。如果悬臂的比例正确，它将从楼面结构尺寸自然地伸展出来的。悬臂和主体骨架应融成一体。图27所示为柱距不变而悬臂不等的骨架及其相应的弯矩。在支座处的悬臂弯矩与各节过梁的弯矩处于一定的关系。如果悬臂弯矩太大，典型过梁因高度的限制，其能量很快耗尽。例如图27-3所示，悬臂与主体骨架联接处即第一支点上的梁需要局部加强以抵抗较大的弯矩，在某种情况下整个系列的过梁可能要加大尺寸。在一般概念中悬臂结构只是简洁的收束并不是一个中心题材，如不论什么情况都似乎被过分强调时，结构的明显规律将无理地被搅乱了。



照片：大众汽车修配厂〔6〕

建筑师：弗里德里希·威廉·克雷默尔（Friedrich Wilhelm Kraemer）

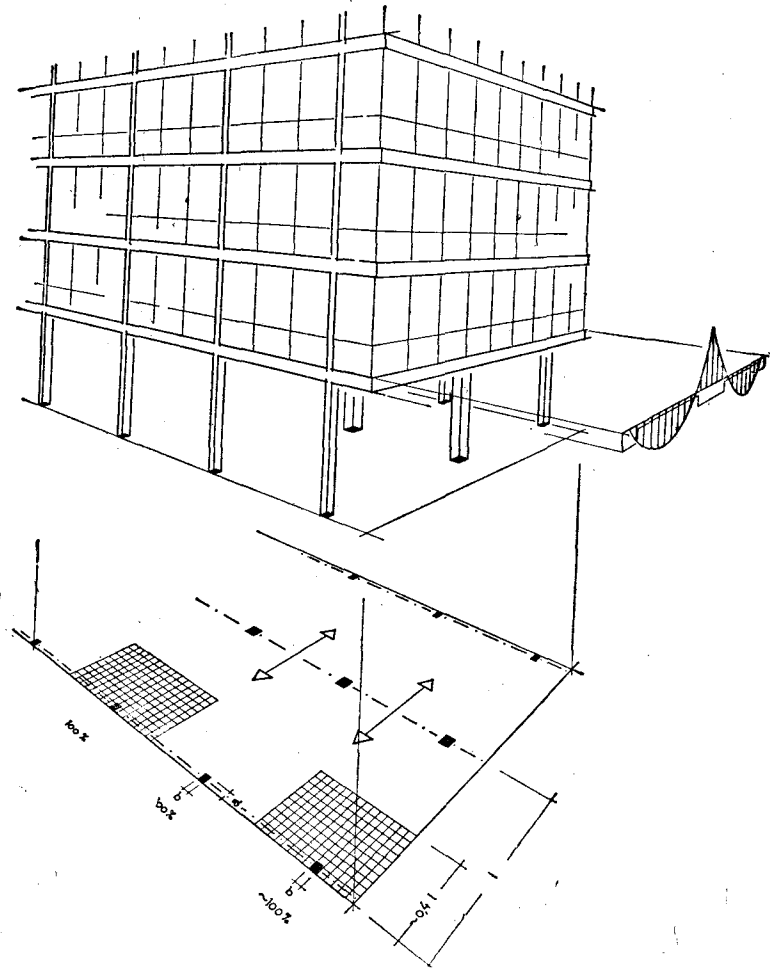
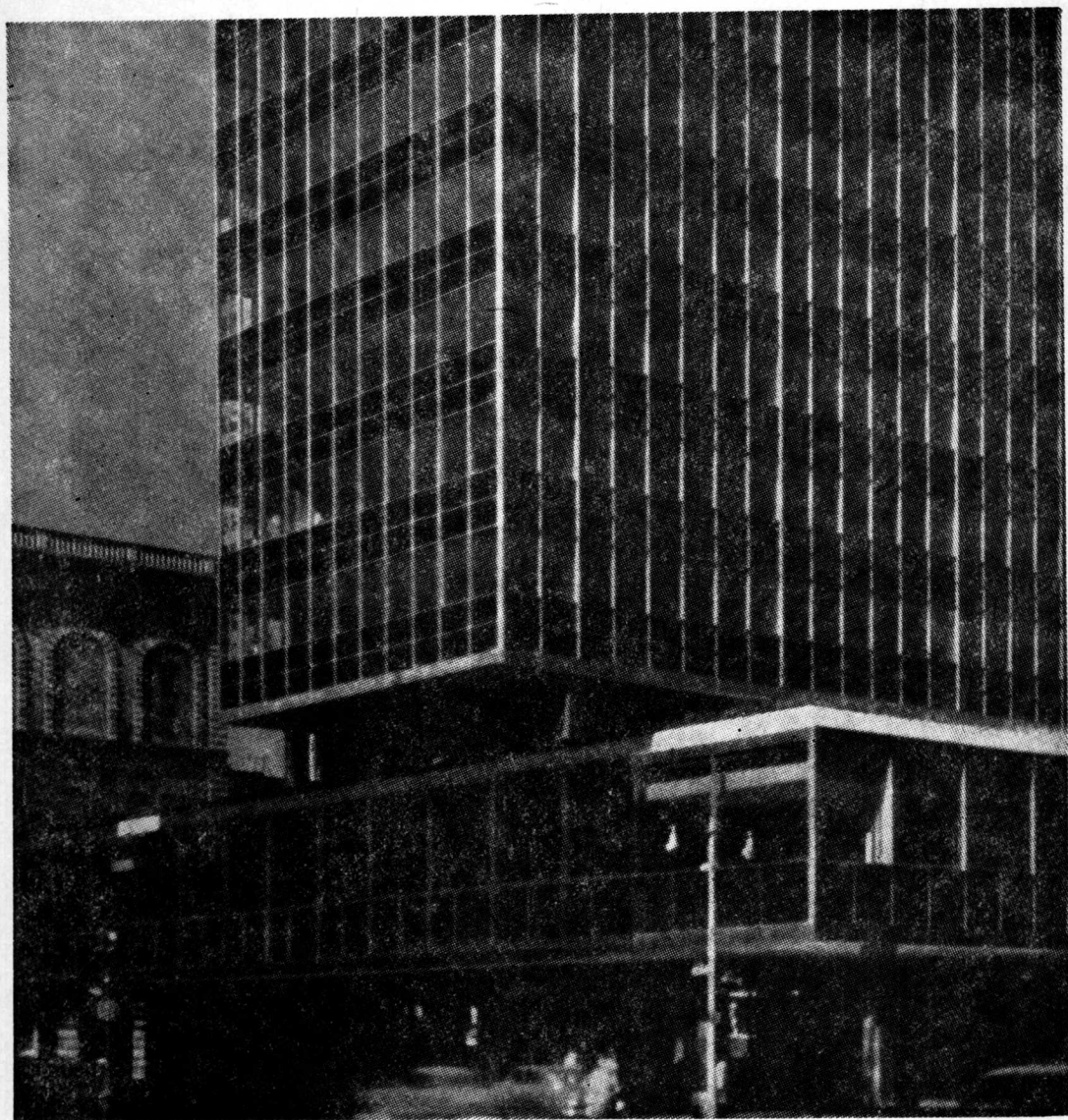


图 26 单向出挑的宽网格骨架的荷载分布图，其中角柱已经取消

如果悬挑部分发展到极端，当支点处过梁的高度保持不变时，悬臂的应力将过大，这样，有说服力的设计将变成牵强的设计，接点处的弱点显然表明材料的滥用和骨架的过分柔软。使有经验的观察者将不可避免地感到不安。如果悬挑过小，虽然没有结构方面的麻烦，但通常失去表现力。当然，某种特殊情况中很小的悬臂之所以使人信服，纯粹是由于功能上的合理。例如图28-1悬臂完全决定于墙厚。

对悬臂当然有一种“正确的比例”。可是，究竟应该怎样，是还不能列出公式的。决定性因素经常是过梁跨度，悬挑长度和荷载大小之间的关系。例如，也有可能承受风荷载的实心山墙压在悬臂的端部，过梁即使很大，也将超负荷。在这种情况下出挑长度应当非常之小，这是不能单从美学上的比例来考虑的，拟定的尺寸需要从力学上加以复核，结果可能需要修正原来的设计。

只有反复地对设计和计算进行平衡，才有可能取得美好的结构造型，即使情况特殊。



照片： 纽约的利弗（Lever）大厦[7]

建筑师：斯基摩（Skidmore），欧文斯（Owings）和梅里尔（Merrill）

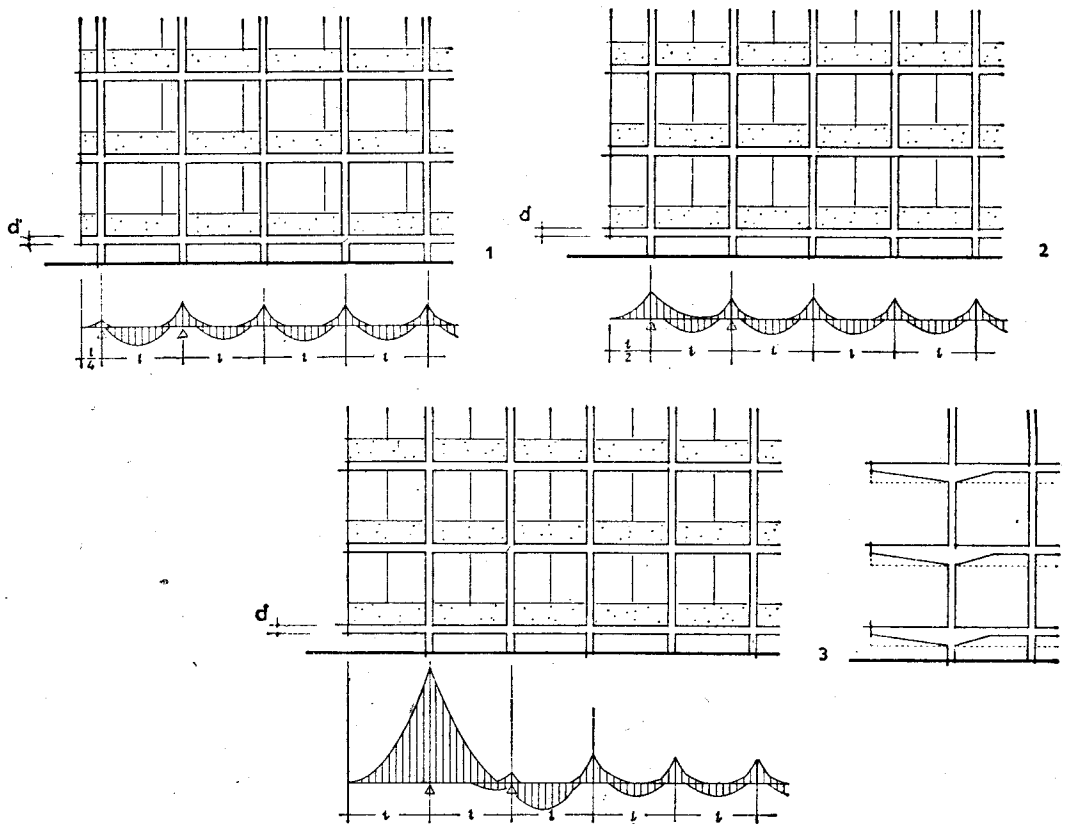


图 27 一个悬臂的“正确”比例

- 1—受力不足的悬臂；
- 2—完全受力的悬臂；
- 3—超应力的悬臂需要加劲

窄网格结构中很难清楚地表现悬挑。即使如图28-1那样清晰的方案也缺少悬臂设计的轻松特点。另一方面，宽网格结构中悬臂就可以被有力又动人地表现出来。承重柱和中间柱的清楚的区别对悬臂造型有利。精细而显然非结构性的竖挺在墙角和沿悬臂重复出现。与房屋长边布置的承重柱相对比，这些直挺对设计起明显的作用。从这个角度来看宽网格似乎特别适宜于悬臂挑墙角的方案。奇怪的是上述单向出挑的设计在骨架结构中还是相当少的。虽然如此，少数沿着这条线思考出来的建筑中包含有现代建筑几个最好的和最著名的例子。尽管这个概念多么朴素和明晰，然而在一般水平的建筑师的作品中，单向出挑的设计显然被忽视了。朴素明朗是稀有价值的质量概念，对设计师而言，要掌握这些概念比制造粉墨登场的，每天可见的方案来得困难得多。

不管事实上设计得多么干净，并且真正解决了墙角问题。密斯·凡·德·罗的一些典范作品孤自矗立了二十五年，只是在最近几年才有一些同等重要的结构物参加到这群建筑行列中来了。

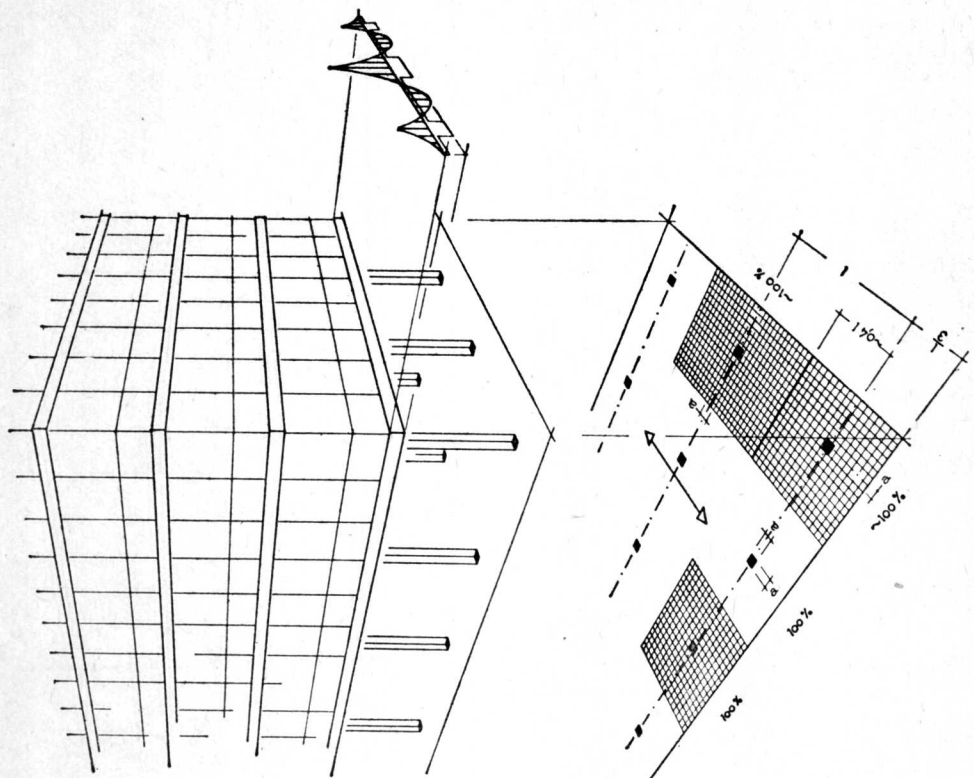


图 29 双向出挑的宽网格骨架的荷载分布图，角柱取消。荷载均匀分布到所有的柱上

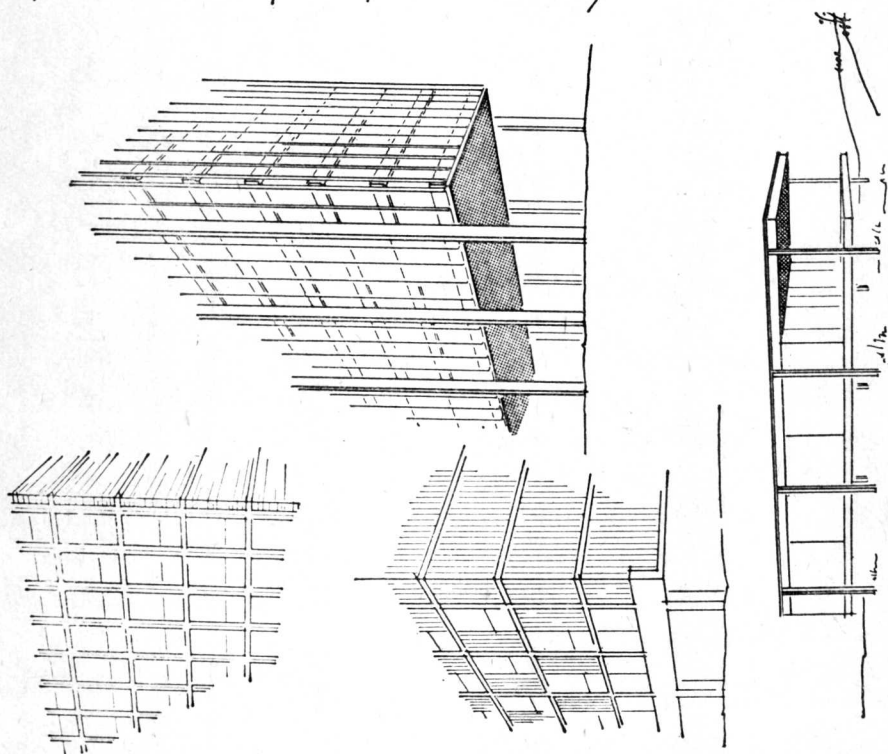
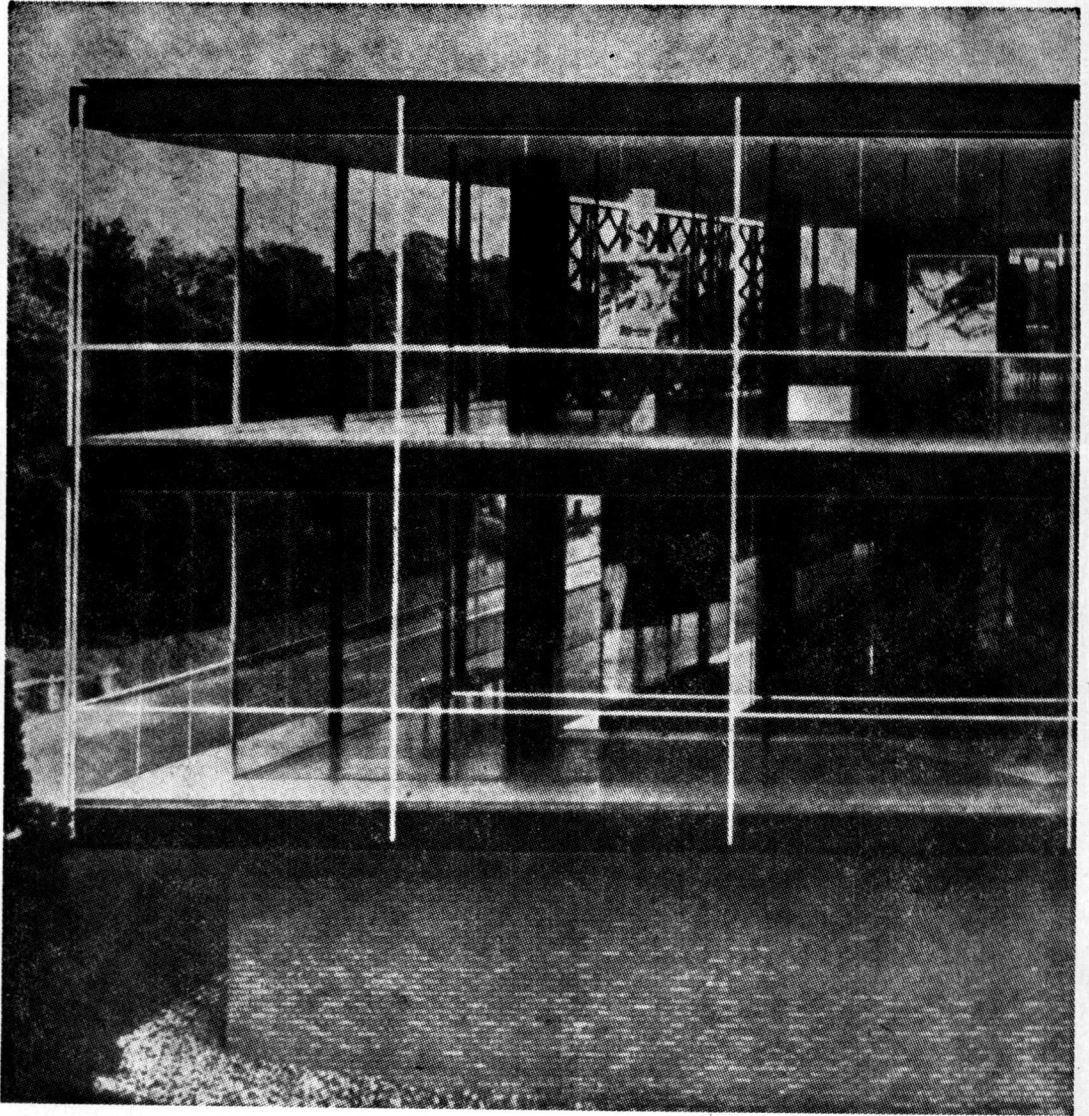


图 28 房屋骨架在一边出挑的例子



照片：1958年布鲁塞尔展览会中的德国馆 [8]
建筑师：爱贡·艾尔曼 (Egon Eiermann)，泽普·鲁夫 (Sep Ruf)

双向出挑的墙角 不作端柱而采取单向出挑是解决骨架结构墙角问题的决定性进展。楼面双向出挑也是可行的。对重要结构造型而言有什么影响将加以阐述。

如果楼面双向出挑，由图29可看出在宽网格骨架中，荷载是近乎均匀分布到所有柱上的。横向的悬挑意味着外柱与内柱实际上承受相等的荷载。所有柱尺寸相同，承受的荷载也差不多相等，这是一个理想的情况，假定的条件为宽网格。双向出挑并不适于窄网格骨架，因为长边柱距太小不适合于内部空间的安排。宽网格结构中长边的柱较少，可以比较方便地与整个楼层平面结合成一体。否则，宜于采用单向出挑。需要布置较多的灵活隔断时多如此。只有房间大又不必分隔时，才采用一长列退后的柱子。只要条件许可，双向出挑柱子退后是一个结构非常明确的优异方案。

图30为双向出挑的几个建筑。结构骨架从各立面后退进去，只是由于透明的大玻璃面从外面才能看见结构。一切给予立面以表现力的东西是从幕墙的几何图形演化出来的。现在建筑师对这方面的设计有充分的自由。在设计无柱墙角时，这种自由是个有利条件。但是在考虑立面划分方面，这种自由又可能是不利条件。工业化预制构件装配的幕墙细部，质量再好也是不能保证结构造型有力的，如果只是很随便地悬挂在框架上，更谈不到好的建筑造型了。在这种情况下，一切应该取决于保持外表皮与承重骨架间的有机联系。如果由于不熟练的手法，自由变成了任性，那么结构与立面的联系将被割断，内部与外部的统一性也将瓦解，内部结构和外面的覆盖层将没有任何共同之处。双向出挑与单向出挑同样

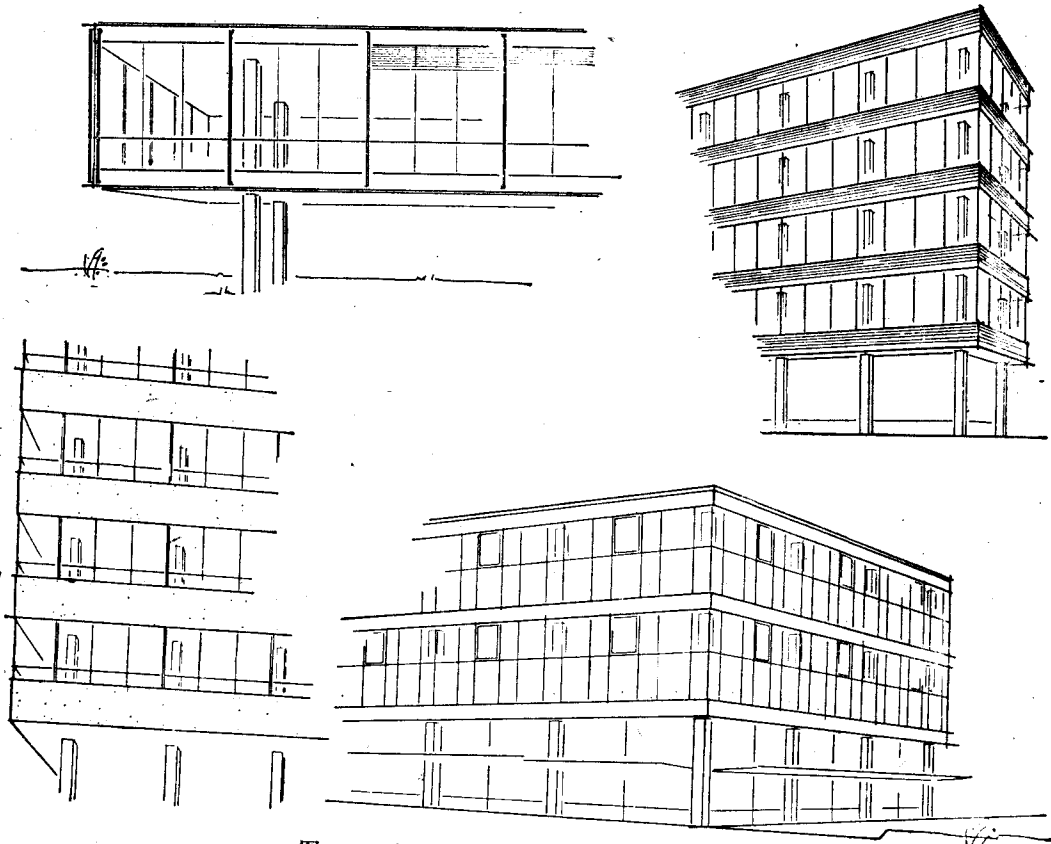


图 30 双向出挑的建筑骨架的墙角和立面

解决墙角问题。对于设计一座立面和结构互相协调的建筑而言，单向出挑一般模棱两可的地方比较少。

用山墙解决墙角问题 上述的墙角问题都是假定角由骨架的两边相交而形成为前提的。在这种情况下角柱实际上不承重，结果，一个轻型的可能没有柱子的墙角成为设计中的突出特点。

当角的一边是骨架而另一边是墙体时，情况就不同了。读者请不要把这种处理和角和骨架之间任意插进的那种多余的所谓“肉”混为一谈。这在以后章节中还会严肃加以探讨。一片墙完全封住建筑的一个面，并和顺着建筑长边的骨架共同形成墙角可能充分满足功能要求。同样的空间一边采光两端封以实墙，多次重复之后，出现一种长边（框架）大玻璃面加以整片山墙的建筑典型。这种结构形式适用于某些教学和办公大楼。一般情况山墙在结构上没有什么作用，仅仅是围蔽空间，以屏蔽噪声和寒暑。如果又用来承重，就必须用砖石或混凝土实墙体，则墙和骨架的力学作用必须结合起来。但是，两者特性不同不能直接混成一个匀质的结构体。骨架采取的是高应力下最小的截面，而墙体则起围蔽空间作用，截面是过大的。再者两种结构具有不同程度的变形，沉降和收缩。从各方面讲都是以两者分开为宜。

在美国底特律（Detroit）通用汽车公司研究中心大楼就是一个端墙与骨架明显分开的典型例子（图31-1）。实墙的窄面与骨架几乎取平而紧贴着最后一根柱子。骨架与墙合成一体，但彼此又干净利索地分开。最后一根柱子与典型柱的宽度相同，它很自然地配合在长立面的格局之中。因为这根柱子被山墙遮住，一般避免了由于透视致使角柱显得笨重的那种不良效果。山墙是自承重的，它仅仅附着骨架起侧向稳定作用。

高层建筑中上述的那种非常简单又令人悦服的方法却遇到一定的困难。由于高度增加，骨架与“自承重”墙的沉降不同，使两者不能混成一体。同时，山墙一直下到基础可能干扰底层平面结合其特定功能的自由布局。在这种情况下，最好使山墙逐层由骨架支承。例如图31-2，这里底层没有墙和总的设计相当协调。

最后，再谈谈以砖填充结构骨架而形成的山墙（图31-3）。墙体与框架取平，只是由于质地不同才区别得出。墙角处又遇到老问题，就是看上去矮胖的角柱仍无法避免。然而，填充骨架的想法是和骨架结构相当一致的。

有许多好的例子证明填充墙的手法是有效的，当然不能仅从墙角的效果来评论它。

上述的方案（图31-1~31-3）是以墙体的材料用砖、石、或其它容易与骨架区别开的材料为前提的。混凝土墙并不一定恰当，特别是如果它与钢筋混凝土同时现浇的话。如果要保持墙体与骨架之间的易区分性，而这个特性对于取得鲜明的结构造型一般是重要的，那么，就必须特别注意混凝土墙的设计。一种可能的办法是将墙体脱开骨架而支承在悬臂的自由端（图31-4）。鉴于大片混凝土墙的重量，挑出部分应尽量小。只有这样结构的效率才是可靠的（参看图27）。

如果墙体与骨架分开，就不承受竖向荷载。同时它继续作为加劲隔膜抵抗水平风力。进一步探讨这方面的作用那就超出本章所述的范围了。讨论的范围必须限于结构骨架和特别是初始确定其结构造型的竖向荷载。所举的几例只能为一边有墙的墙角设计有影响的一般原则提供概要。无疑，还有其他联接实墙和结构骨架的方式。不管怎样，墙体和骨架总

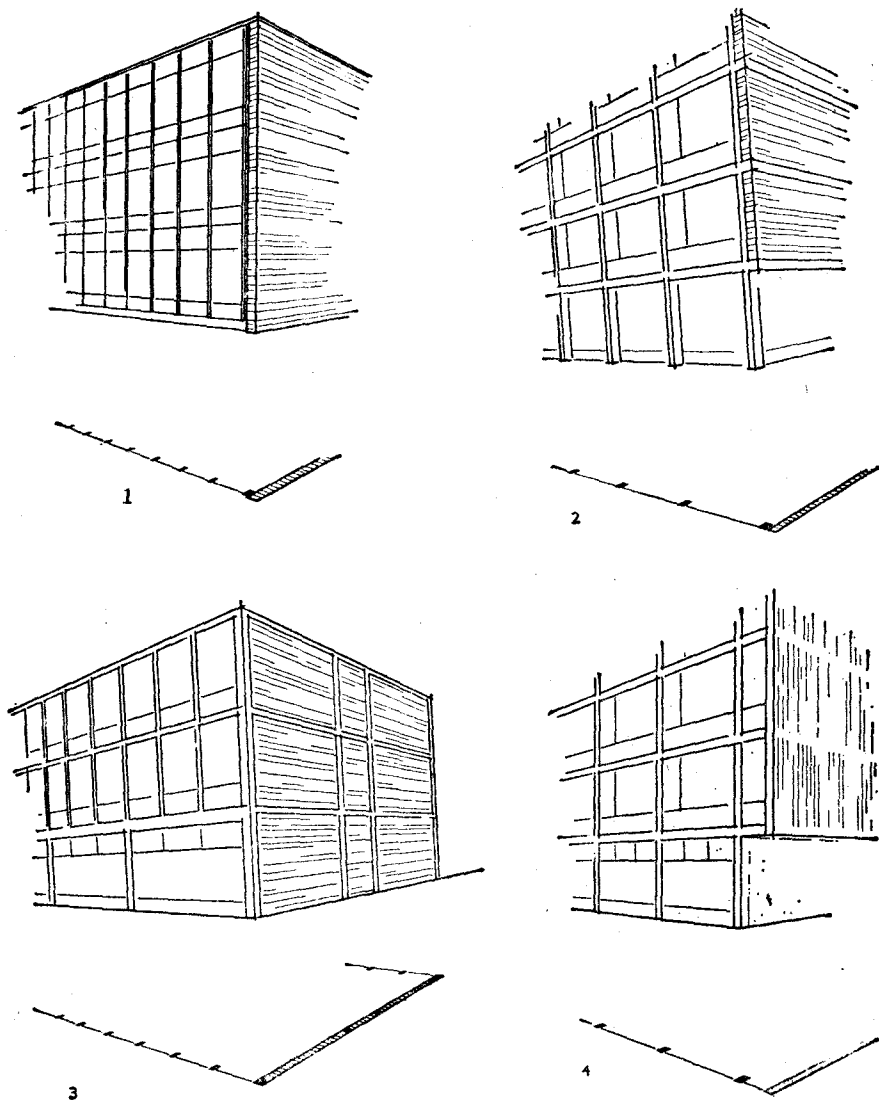
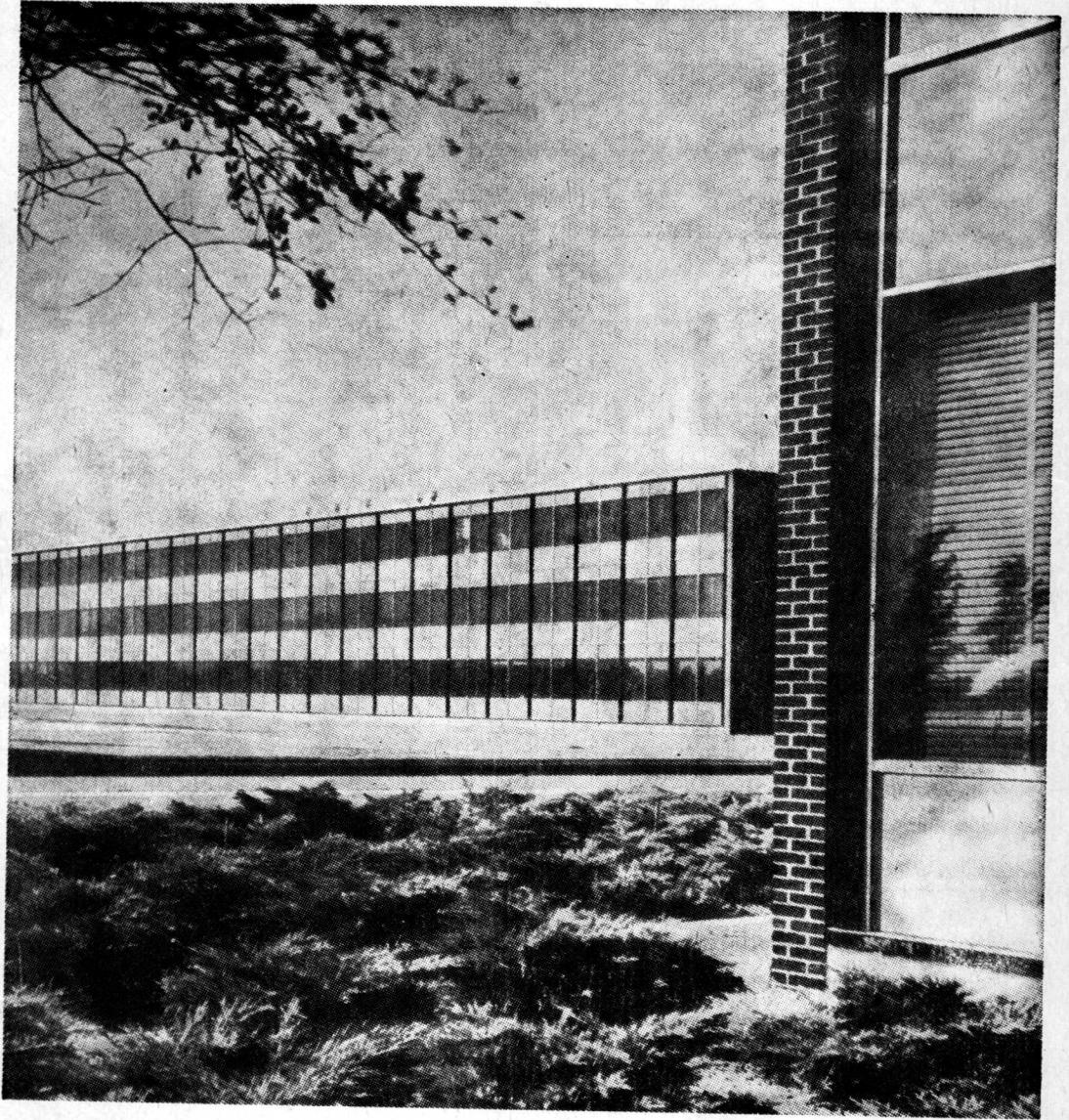


图 31 利用山墙解决墙角问题

- 1—非承重的实墙将结构骨架封住；
- 2—在多层房屋中逐层楼面支承山墙；
- 3—填充的墙体与结构骨架取平，角柱仍显得笨重，说明参看图25；
- 4—由短悬臂支承的混凝土墙虽然不承受竖向荷载，但能抵抗风力

是必须清楚地区别开的。它们在这个要紧的接触处必须既不使设计含糊不清又不丧失它们本身朴素的特性。否则，其结果将是一些矫揉造作的造型如图32所示。

这些细部无论是与空间组合的关系，还是与骨架结构或墙体的关系都是不可理解的。它们之间的有问题的美学虚伪性只是一些时髦的陈词滥调。



照片：通用汽车公司（General Motors）技术中心大楼，底特律[9]
建筑师：伊罗·萨里宁（Eero Saarinen）

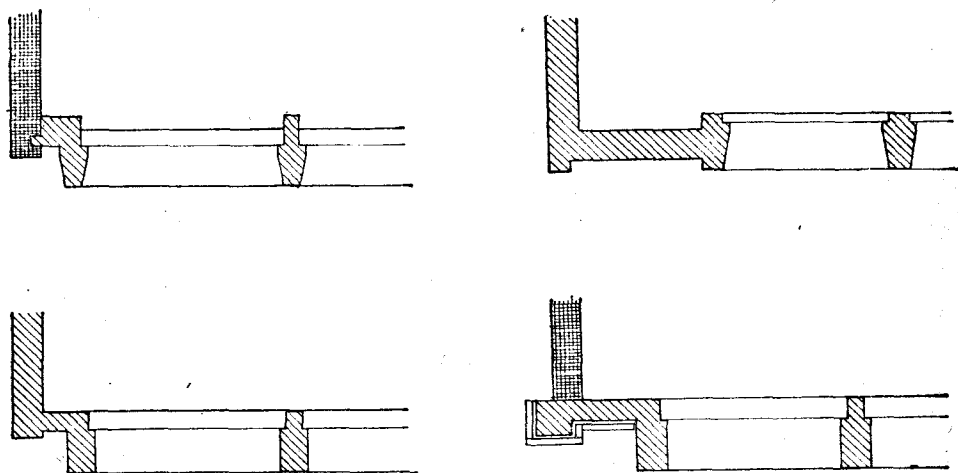


图 32 骨架与山墙相遇处的拙劣细部的例子

在屋顶收束骨架

在墙角和下边收缩网格主要是从力学角度来决定的，在这些地方构件及其截面尺寸决定于荷载。这些构件的组合决定了造型。屋顶荷载较轻，它的造型主要是其他一些因素的结果。从前多数房屋是实墙体和坡度陡的屋顶，情况是不同的。古老的木构檐口是应力大的区域，相当大的瓦顶荷载，由那里传递给稳固的下部结构。这里最重要的一些尺寸是由静载和屋檐的挡雨雪作用来确定的。屋顶的形式主要是材料与功能之间的妥协。城市建筑较为虚假的檐口差不多无例外地只是对上述原始先驱的加工而已，不管最后的造型如何复杂，基本的形式还是来之于实用的。

较平的阿尔卑斯山式（Alpine）屋顶是串风平屋顶的典型，今天再次受人欢迎认为它是最满意的工程方案。屋顶小坡度和顶下通风，保证了冬季积雪不易滑动。如果加高坡顶，雪有下滑的危险，加之顶下采暖，雪将溶化而形成水槽，发生漏水现象。梁挑的檐口是另一个功能性形式，既能蔽雨雪又能减轻屋顶结构的负担，因为屋顶结构要承受很大的雪荷载。从整体而言，这个屋顶在结构上和形式上都是一个成熟的方案(图33-1)。

中古德国木构屋顶在完全不同的力学原则下产生了另一种但同样是合乎逻辑的形式。陡斜的椽子互相撑靠产生的侧向压力和支架中类似。椽子末端必须稳固地支在拉条上，从支撑点到拉条尾端的距离决定于木料的水平推力和剪切强度。拉杆出挑的拉条和这类结构中最典型的三角形起翘垫块一样，都是结构的组成部分。后者的存在是为了平缓椽子与拉条之间的角度。不同的功能要求，不同的气候和不同的建筑技术产生不同的但同样是完美的结构形式(图33-2)。

现代平屋顶所演化的造型没有象这样的明确性。屋顶荷载很轻，对一般钢筋混凝土结构不会有什么问题。也不会因檐口设计不合理到不能用钢筋混凝土建造的地步。许多收束顶部的方式中几个例子如图34所示。很难说其中有哪个是从结构上得出来的迹象。

如果我们重视了对于冬季保温和夏季隔热的物理和工程的知识，如果我们采取了适当措施防止结露和防止暴露部分的开裂，最后，如果我们试图把结构精简到最为基本的必要

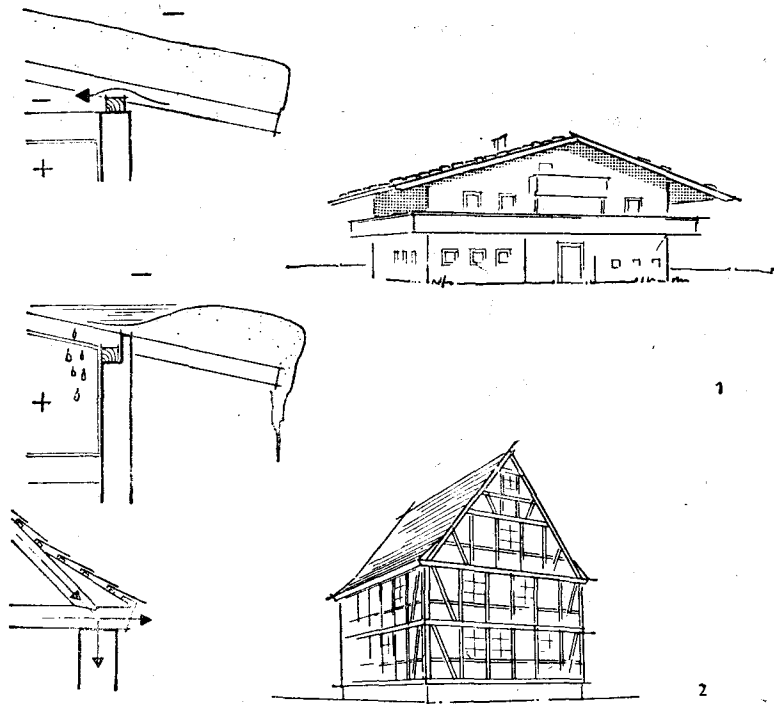


图 33 古老木构房屋中，屋檐的设计主要由严格的功能要求和材料的限制决定的

- 1—传统的较平的阿尔卑斯山式屋顶是现代申风小坡度屋顶的原型。深挑的檐口既能蔽雨雪又能减轻椽子的应力。如果屋顶下面的空间因受热关系，挑檐口出挑可能造成漏水；
 2—此坡屋顶的形状决定于力的分布和木材的物理性能

部件，那么剩下来就是最简单的立方体了（图35-1和图35-2）。悬挑的类型如图35-3所示严格说并不是必须的。在高层建筑中想象突出的檐板对外墙面有一定的保护作用，那是相当迷惑人的。

看来不加装饰的立方体站住脚了。不管怎样，近十年所造的重要建筑很少带有突出的檐板（图36）。

顶层的一些特殊功能如屋顶空间的串风，屋顶花园的设置，机械设备，屋顶住房等等经常用来丰富建筑的收束部分。不管这种努力原则上是多么无可非议，但对那种不少单纯从构图“装璜”出发而与建筑功能或结构都没有什么关系的作法还是不可原谅的。一种爱用的手法是将顶层做得特别高或者将最上两层合而为一层使成为壮观的“超高层”，或在上下窗间墙处饰以花格栅，或做成夸张而不合乎一般的窗型和排成老虎窗似的屋顶层，所有这些手法均顽强地反复地出现在现代骨架结构中，就象新古典主义的其他陈词滥调一样，表明从早已陈腐的风格概念借来的已经过时的形式仍深受欢迎。它们与我们所讲的结构造型的概念有着天渊之别（图37）。

骨架的上部收束，在结构处理上什么是“正确的”思想还很难下定义。更重要的是考虑屋顶在骨架结构中的实际功能和结构上的特征。在设计骨架这个显著而重要的部分，删繁就简，保存重要部分，去掉不需要的虚饰，远比装饰性点缀的技巧更为有用。无论在什么地方，涉及造型语言的纯化，就要应用上述的原则。

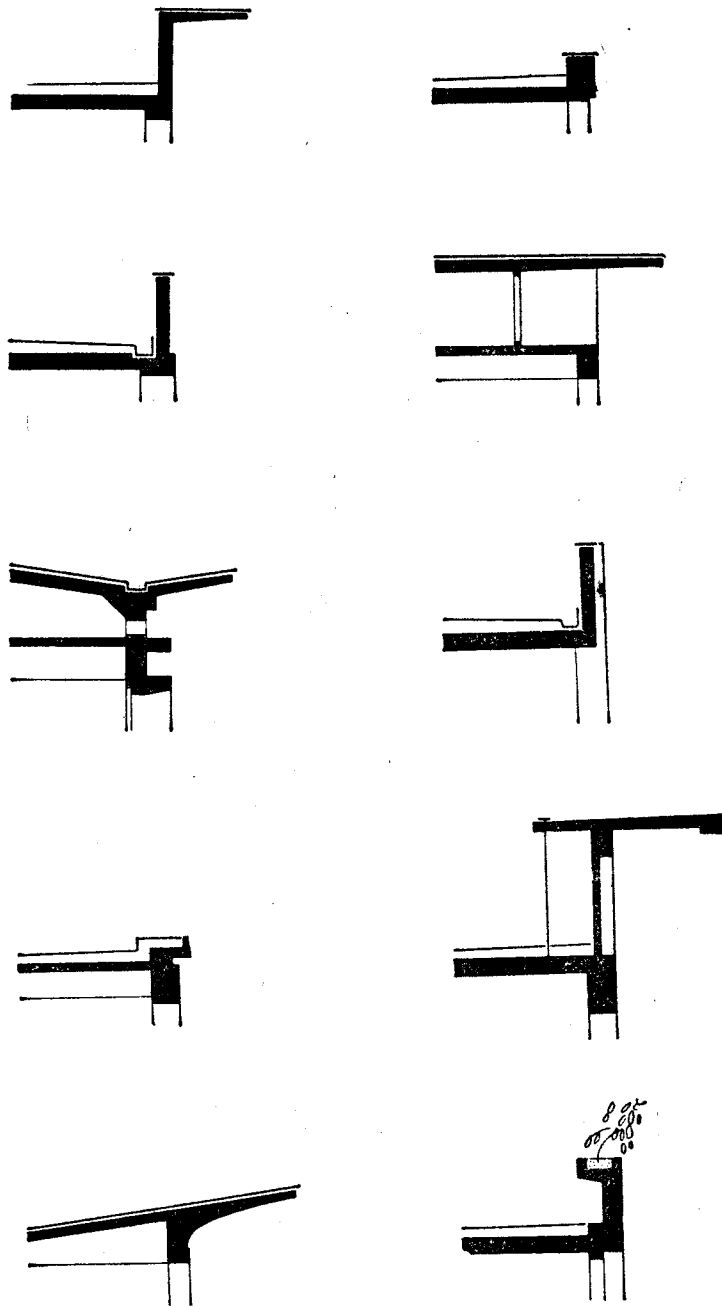


图 34 许多今天采用的檐口在结构上是无意义的

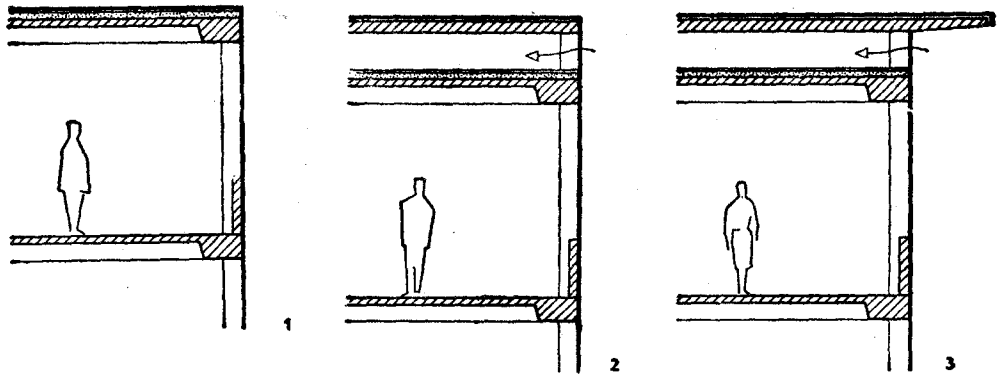


图 35 平屋顶及其在骨架结构中的功能

- 1—不通风的屋顶，结构和隔热层在房屋的立面上收头；
- 2—通风屋顶。结构和隔热层也在房屋的外立面上收头。防水层在同一点收头；
- 3—屋面板挑出并不必要。对高层建筑来讲，以为它可以保护外墙面的想法是相当可笑的

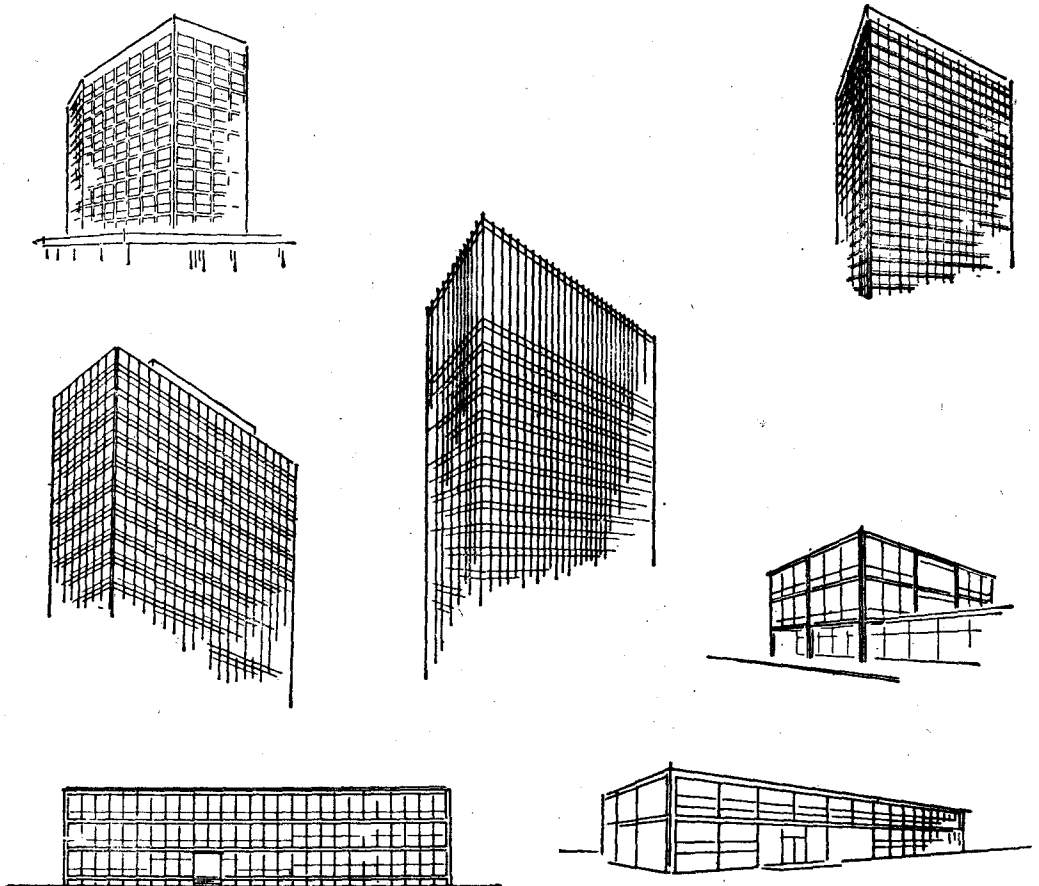


图 36 朴素的平屋顶与骨架结构的特性很协调

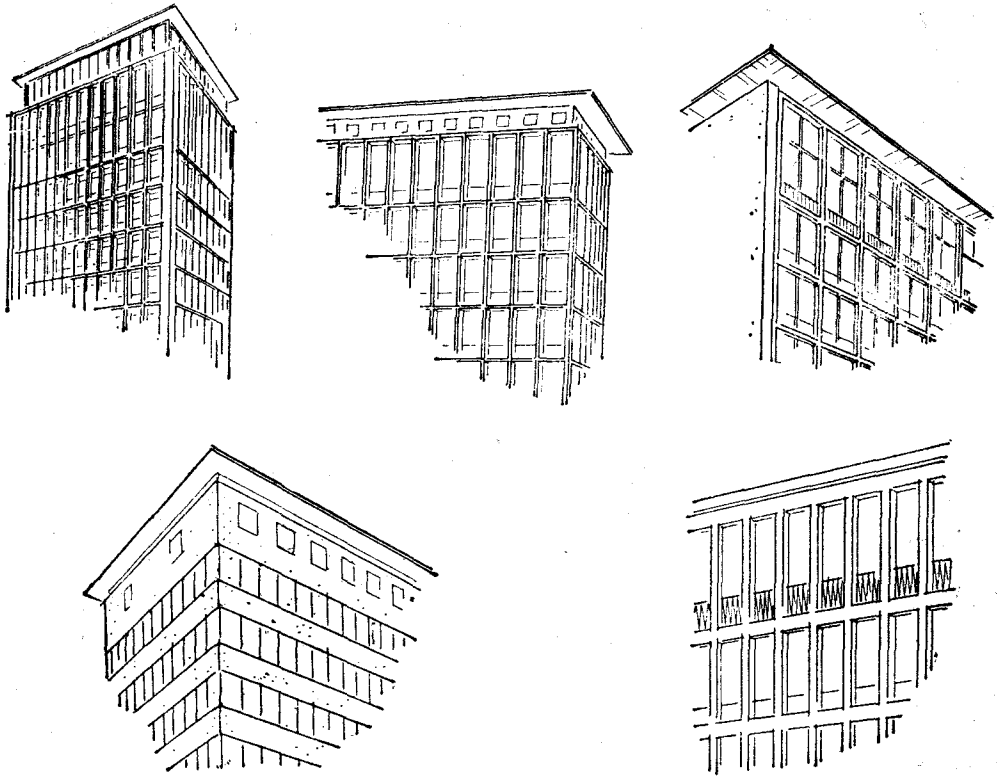


图 37 “建筑性的题材”不是结构造型

底 层 收 进

多层建筑中的底层收进的思想起源于使下部结构和以上楼层强烈对比的愿望。

如果偏移底层的外柱，将产生一个以后在第二章讨论（参考第91页）的结构问题。这样，柱子的竖向连续性被切断，还要采取特殊措施去承受力的重分布。第二章讨论的收缩形柱就是措施之一。第二章图82是允许偏心距与荷载大小之间的关系。建筑越高，荷载越集中在柱上，底层柱的偏离越不合理，因为在底层柱荷载当然最大。如果这种承重大的柱完全不偏离而直到基础，是与具有匀称的横竖构件的骨架结构的性质更为协调的。

有两种将底层收进而柱不用偏离的方式。

在讨论墙角问题的同时，所有悬挑设计的结果，就出挑之下的面积来说，外柱自然而然地“偏移”。图38-1表示实际上不必割断柱子的连续性而取得收进的效果。如果认为这种方案存在缺点的话，唯一的缺点是柱子移到房屋的内部，对以上楼层布置可能产生问题。

当楼层不悬挑时，可以用楼层外墙与柱子外表面取平，而底层外墙与柱子内表面取平的办法做到收进。收进的尺寸正是柱子的深度。如果柱子细长，挑出的部分就相应小。但在高层建筑中，荷载及由此而定的柱截面大，所以收进部分也就比较显著（图38-2）。它的优点是结构很明确。

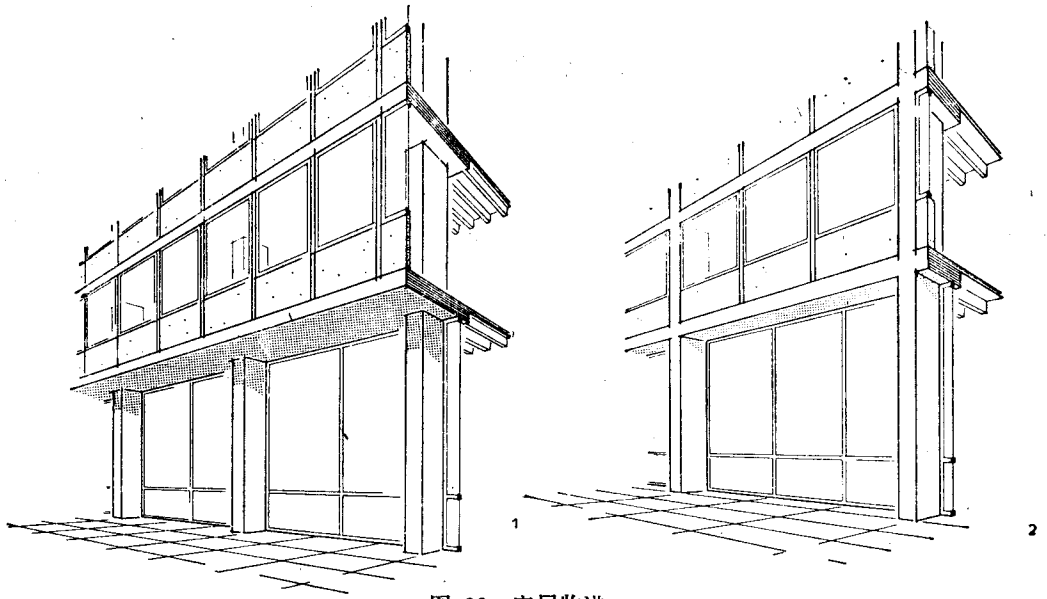


图 38 底层收进

1—收进的效果是楼层悬挑的结果；

2—收进的效果在于楼层取平的立面和底层在柱子内面收束之间造成的对比

不幸得很，许多底层的收进缺乏这种明确性。有种先入之见就是认为不管造价多少底层必须收进，这种思想可能导致违犯结构的逻辑。什么地方出现这种情况，底层的收进就变成对赶时髦而做出的让步(图39)。

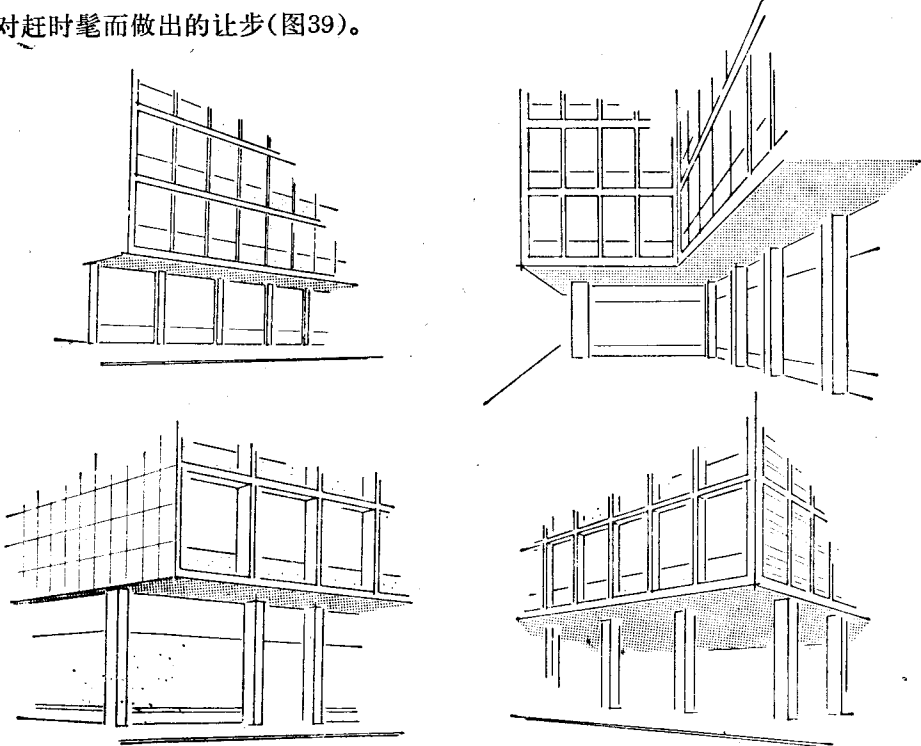


图 39 与结构无关的任意收进

骨架结构和幕墙

顾名思义，幕墙如同幕一般悬挂在结构的前面。它是把结构骨架与围蔽空间的墙分开的结果。幕墙本身没有承重作用。仅仅分隔建筑的内部和户外。幕墙设计者的目的就是为房屋配备一层具有主要物质功能的轻质表皮。只要这片幕墙能够保证适当的照明和完善的通风，再加上合理地防雨，防热及防寒，如果又轻，又耐久，又易安装，它就满足了一切应有的需要(图40)。

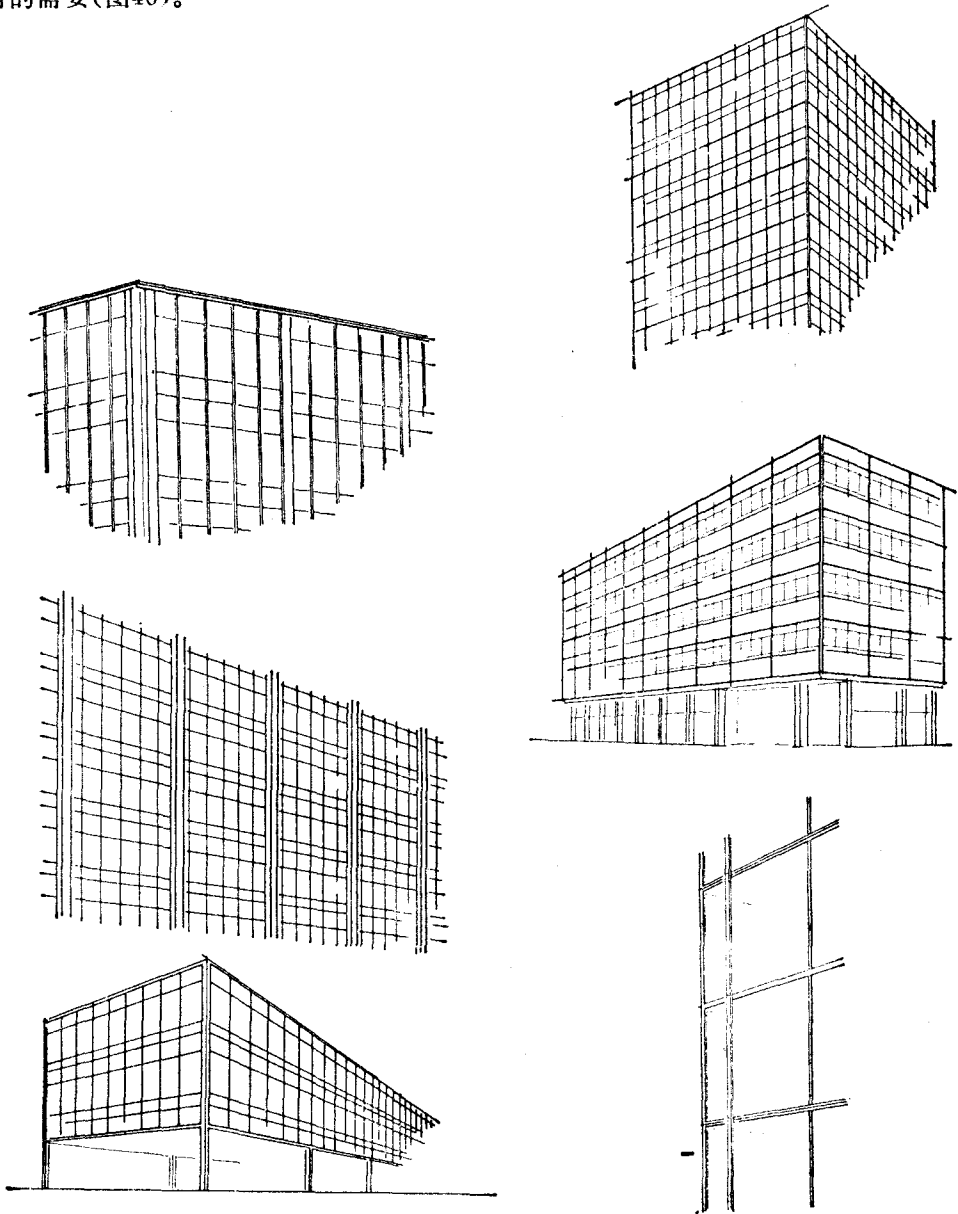


图 40 幕 墙



照 片：伦敦的一座办公大楼
建筑师：戈林斯（Gollins）、梅尔文（Melvin）、沃德（Ward）等

在力学上，幕墙只须承受一层楼高的自重，并将风力传到接触点。在骨架结构中，水平楼面带为幕墙提供最好的锚固条件。竖向单元明确地决定于楼层高度。进一步的竖向划分决定于楼面带的高度，窗的大小和上下窗间墙的高度。不论幕墙是由竖挺和板就地拼装，还是由大张金属板组成，或者是在安装前由若干部分拼合预制成更大的单元，幕墙的竖向格局是不受构造细部影响的。实际上网格的再划分总是与层高有密切关系。这里是一个与骨架联系的重要纽带。设计师可能认识这个关系并加以发挥，或者因忽视它而损害了结构造型(图41)。

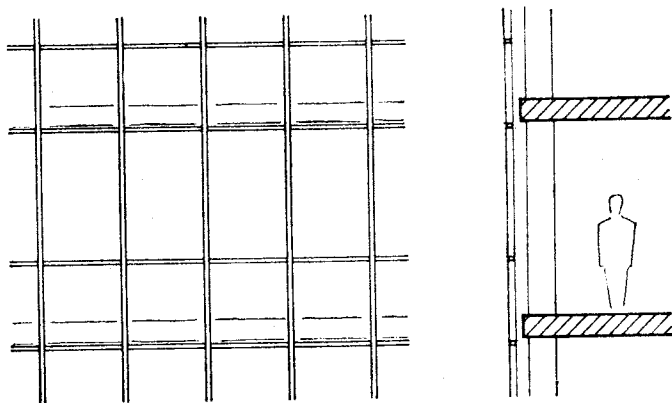


图 41 与层高直接有关的竖向幕墙的划分

幕墙在水平方向没有明显的自然而然的单元。唯一的指导原则是每个单元不能太重而不方便，它应当与柱距协调。在一些房屋中幕墙确实是任意再划分并和柱距毫无关系的，而这正和我们对幕墙与结构骨架密切配合的愿望相违背的。一般水平方向的模数介于1.25到2米之间。目前采用更宽的单元的例子比较少。所以幕墙在外形上都象是窄网格。其实它的功能是完全不同的。如果尺寸一律的幕墙单元在立面上无限地重复着，结果形成一个与结构无明显关系的质量很不高的格式(图42-1)。室内在柱与窗之间留下了死角。柱挡着光线，缺乏富于目的性的表现。至于墙角的细部设计，凡适用于结构骨架的原则同样适用于幕墙。粗壮的角柱可能暴露得比过去更显著(图42-2)或完全遮在玻璃后面(图42-3)。前一种情况，它是在立面上唯一看到的柱子，而与幕墙的细长窗框形成鲜明的对比。后一种情况，从房屋内部来看，在玻璃窗和角柱之间的死角不很恰当。图42-4所示的方案中，因为柱子退到幕墙后面，角柱就完全隐蔽了。这就避免了柱子遮光的不良印象。但另一方面，建筑物的内外关系的任何积极的表现又趋于消失了。

建筑立面也可以是幕墙和承重柱的组合。图43-1表示一个取平的立面，其中柱子立在一片特殊墙板之后，这片墙板与柱子一样宽。前述的幕墙和柱之间的死角就消失了。结构在立面上明显地表现出来。此外，幕墙的水平方向再划分，现在也与结构骨架相关联。但是，这个方案有一个缺点：平面布置所依据的网格须要包含有一柱宽的中断。这个网格上的不规则性不可避免地为内部隔墙进行划一墙体单元的设计复杂化了。坚持规则楼面网格的战士们将起来反对。

另一方面，不能低估网格的中断为立面组合和内部空间的组织所提供的方便。当柱子在外面时(图43-2)，网格中有柱宽这样的中断是特别适当的。实际上，如果柱子在外面

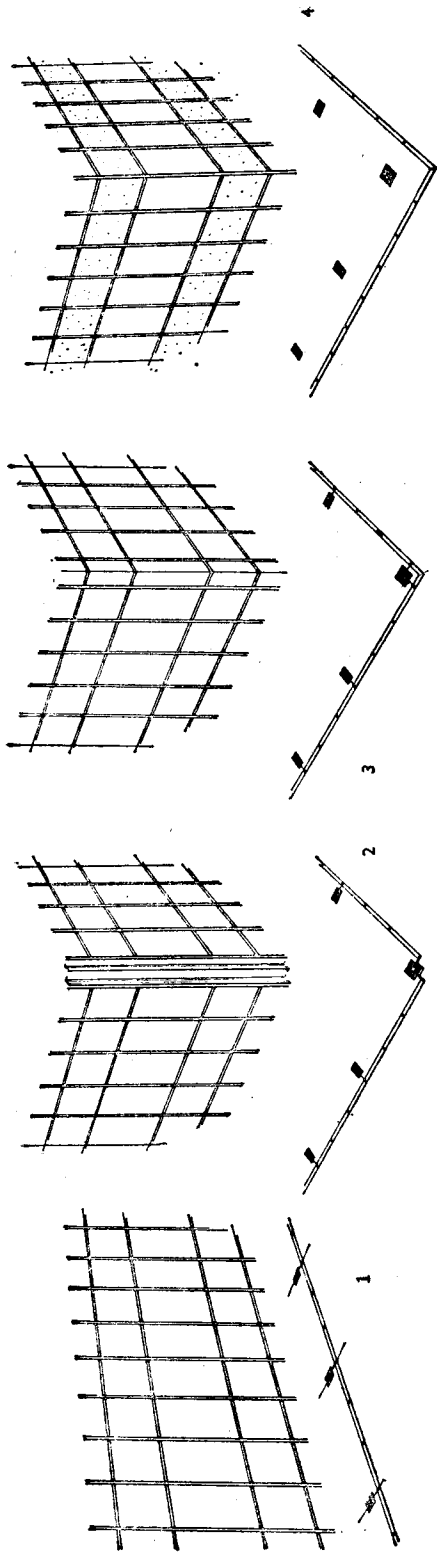


图 42 水平向与框架结构无关的幕墙

1—一律的窗框形成的单调外观； 2—笨拙的角柱；
3—以玻璃遮蔽的角柱； 4—两面挑出的墙角

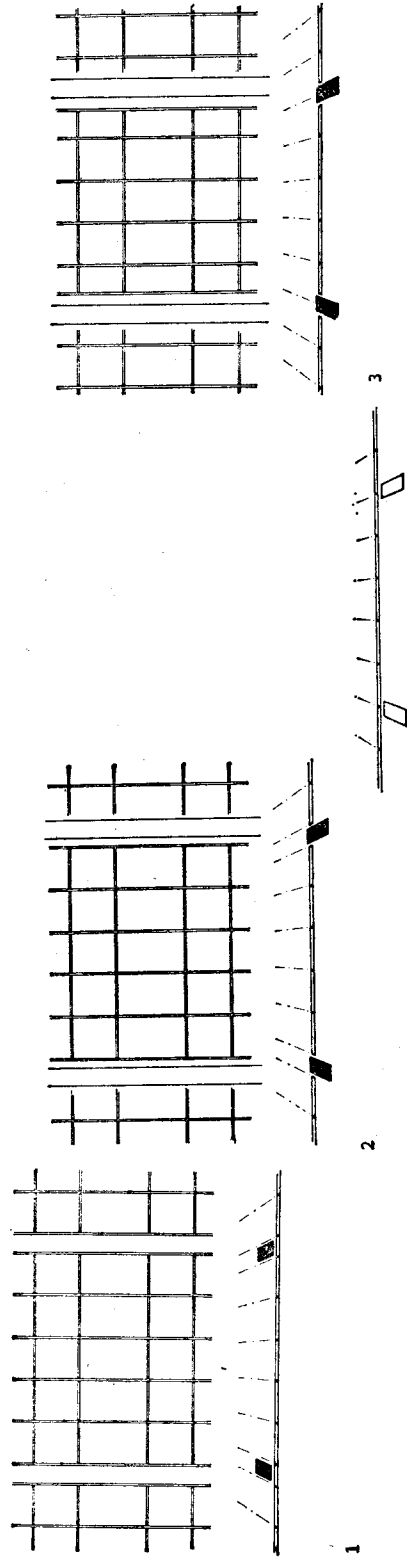


图 43 水平向关联的幕墙和结构骨架

1—柱子包在内但又清楚表现出来的取平的立面； 2—立面单元等距离布置在外突柱之间
3—立面单元不规则地布置在外突柱之间



照片：芝加哥内陆钢铁大楼[11]

建筑师：斯基摩（Skidmore）、欧文斯（Owings）、梅里尔（Merrill）

而网格没有中断时，柱间的净距就不是幕墙模数的简单倍数。某些窗将被柱遮蔽一部分，可以不必保留。为了避免这个缺点，同时保持网格的规整，有一些重要建筑的幕墙设计是在柱间不规则地划分的（图43-3）。紧邻柱子的幕墙单元比其他典型幕墙单元窄半个柱宽。结果虽是断断续续的节奏，但它是根据结构的尺寸体系而来的，所以避免了任何随意性或令人不安的效果。芝加哥内陆钢铁大楼的立面就是用再划分原则的一例[11]（参看第56页照片）。很清楚幕墙同样可以配合结构的体系而不一定会使立面枯燥无味。

迄今所讨论的限于竖挺划分的墙。如不谈各类不同的墙板系统，对幕墙的叙述将欠完整。象竖挺墙一样，嵌板墙关系到结构方面也有某些问题，例如，墙体单元的尺寸特点，结构骨架的伪装或强调，墙角的粗笨以及墙体单元的尺寸与平面模数的一体化或非一体化等（图44）。

幕墙同样也有非结构性的方案。特别是嵌板墙，看来招致了数量惊人的粗糙装饰（图45）。

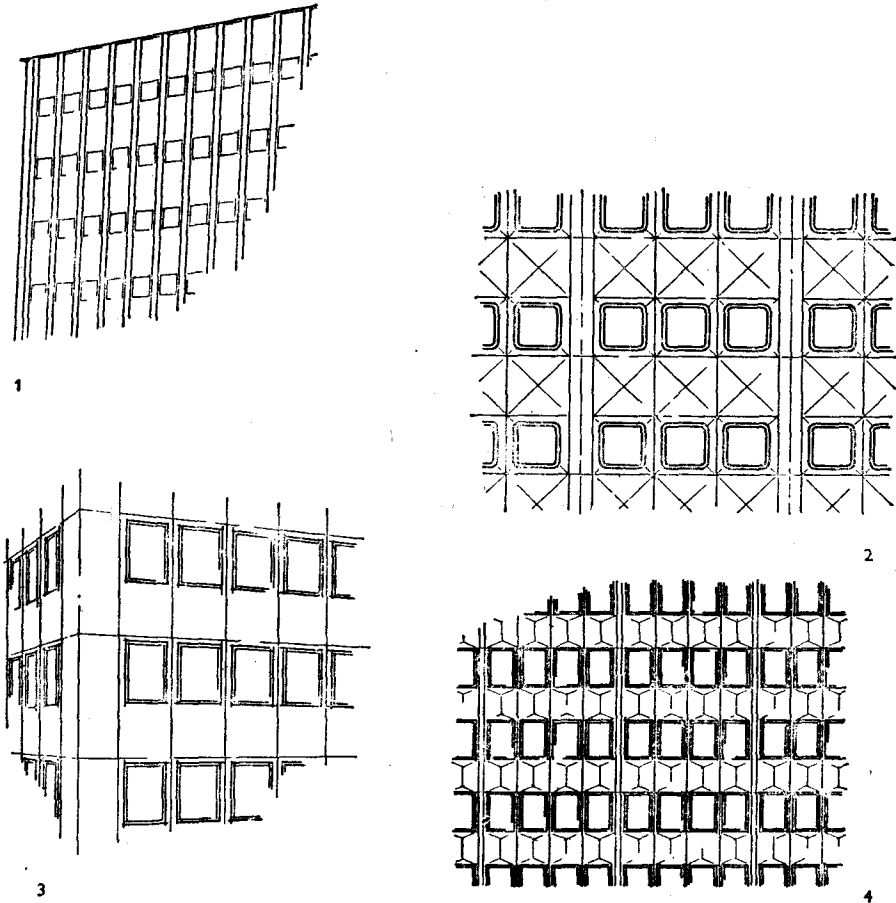


图 44 嵌板墙

- 1—有规则布置的嵌板单元立面外形显得单调；
- 2—在匹兹堡（Pittsburgh）的阿尔考（Alcoa）大楼清楚表现出来的结构。窗的圆角与嵌板墙构造是成整体的；
- 3—比例不称的粗重角柱；
- 4—通过表现骨架和采用具有三维图案的刚性压制的金属嵌板元件，使立面生动

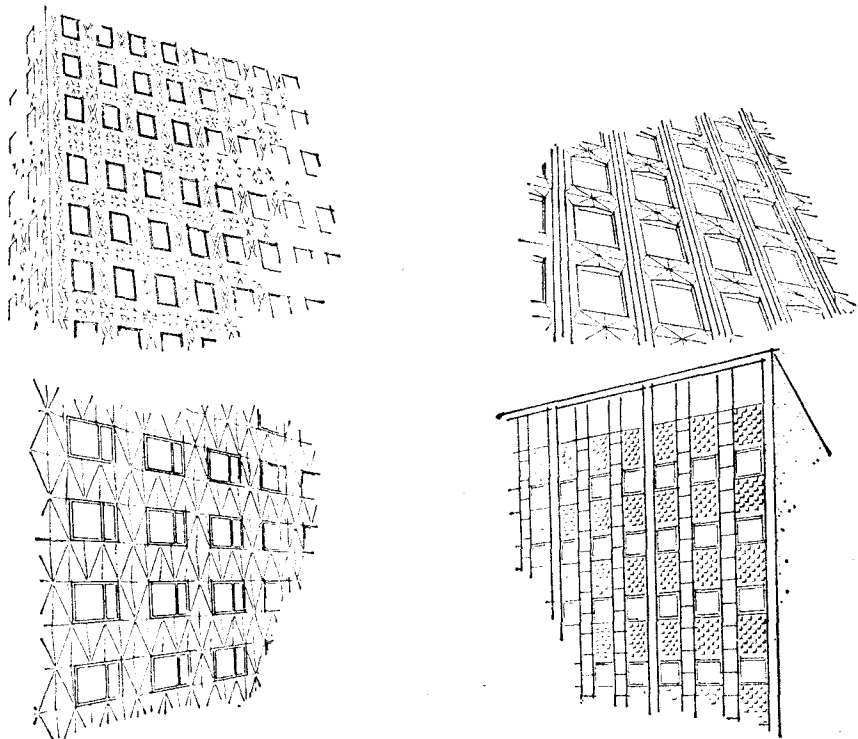


图 45 具有非结构性装饰的幕墙

一些矫揉造作的设计

本节谈一谈由于常见而足称典型的一些奇形怪状的造型，它们与真实的结构造型没有共同之处，而是误解结构原则的结果，

美化 借助“新奇的细部，昂贵的材料，明暗的效果，装饰性花格和图案性铁花”来取得骨架结构的“生动”，这就陷入与结构造型问题完全无关的整容手术之中。然而，如图46所示的这些建筑却经常吸引着成群的赞扬者。它们的造型语言不是从许多真正的根深的关系中推演出来的。这个领域受下列影响的统制到了惊人的程度：虚伪的浪漫主义，新折衷主义（工程形式运用不当），对低级装饰的欣赏，还有伴随暴发户而来的对宏伟性的崇拜。但是不管你怎样强调，没有一个网格和框架能蒙骗行家的眼力。

“有肉的”墙角 已经证明，要想设计角柱细巧的骨架是困难的。于是不到墙角就截止了骨架的手法不能不被解释为逃避上述窘境的一种尝试，结果就作成“有肉的”墙角（图47）。在砖石结构中这种“肉”是有充足理由的（参考第二章，图54-2）。拱形窗楣产生的水平推力在房屋的角部只能由相应的砖石实体的静重来抵抗。因此，墙角的细部对砖石结构的稳定性非常重要。而骨架结构不是这样，因为不产生这种水平推力。只有竖向力传到角柱，“有肉的”墙角结构上没有存在的理由。不管怎样，随意加上的墙面可以使骨架不到屋角就截止，从而避免了寻求墙角方案的困难。但这意味着结构严重地被冲

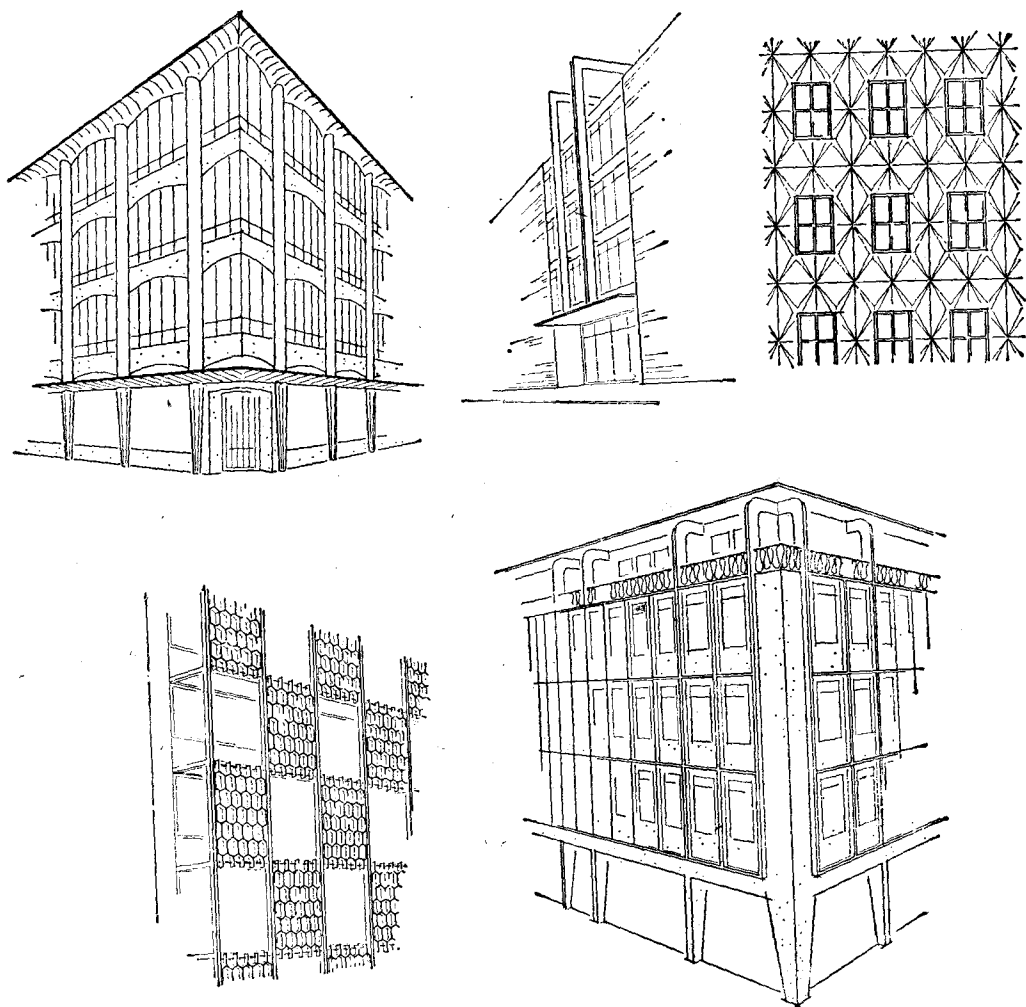


图 46 “装扮的”立面不属结构造型

淡。它为一种“构图”开了路，在这种“构图”中网格形成了一个与一片随意创造的墙面“相对比”的图案。不过这片墙面代表了一种从砖石结构借来的异样思想。

嵌入式的网格 骨架结构中结构造型最困难的问题是边缘问题。这是一些非常含糊的方案起源。显然不到屋角就截住了骨架远比费力地去寻找一个结构上整洁的墙角方案要方便得多。在网格的上下边缘也可以同样方式避免为难。这样骨架就好象嵌进四边的“肉”中。它浮在一个面上，而面的尺寸是完全取决于“对真正比例的肯定感觉”的。哈特(Hart)[12]指这种设计断定地说好象“镶嵌式的建筑艺术”。与结构的最后连系被放弃了。框架能见的部分，也就是结构性的象征，在随意定下尺寸的面上不稳地飞翔着。它好象是映在一个没有结构的画面上似的。立面变成图案设计的一个框格练习，这些“网格”常常作成抹面或斩假石。这也并不令人惊奇，因为它完全合乎那非结构的性质(图48)。

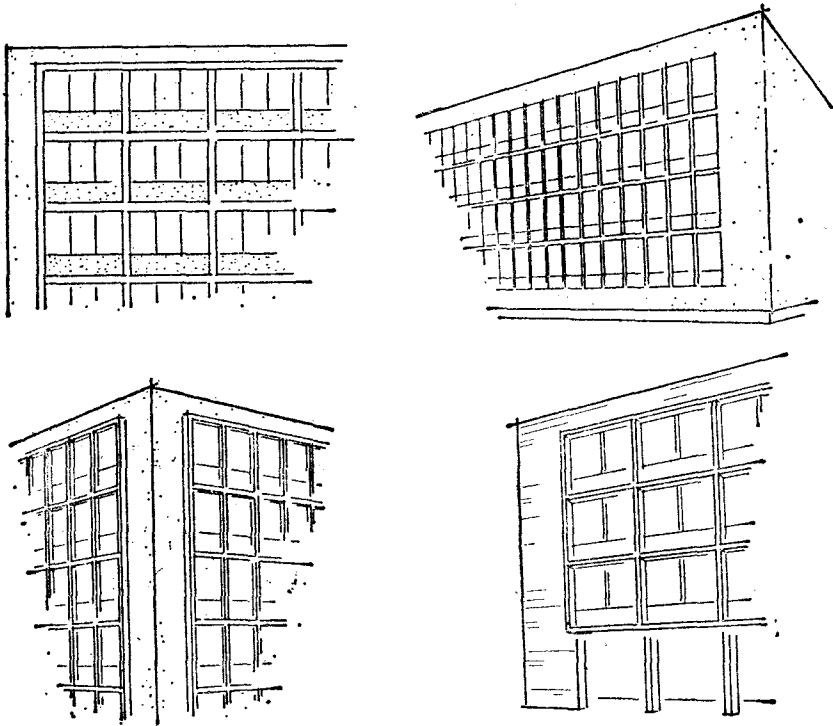


图 47 “有肉的”墙角是一个凑合的方案

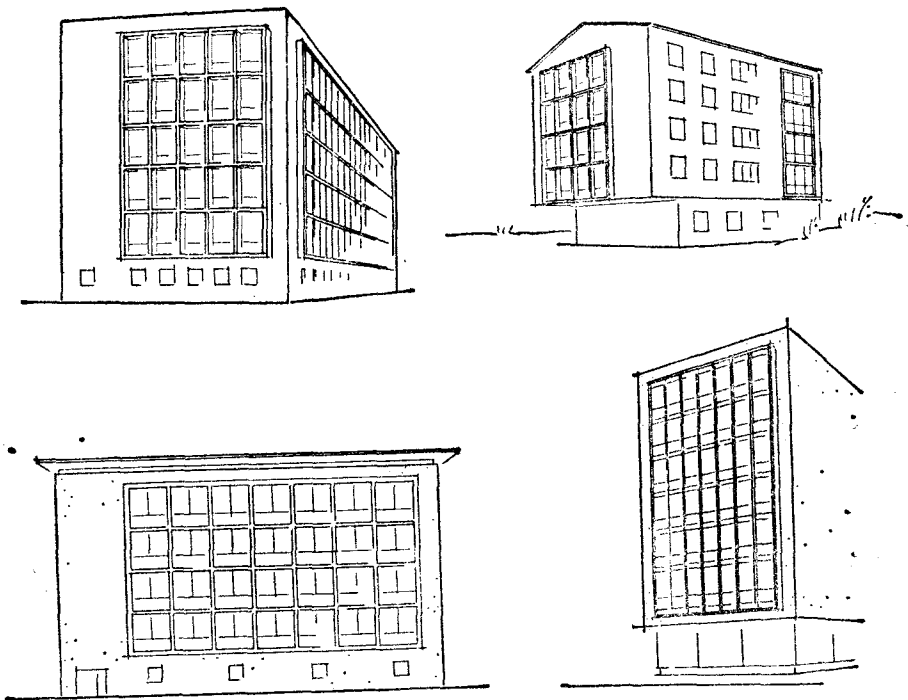


图 48 嵌入式的网格。实际上不是真正结构性的骨架而浮在墙面中间

橱柜式框架 “橱柜式框架”与镶嵌画中的框架有相似的前例。结构的边缘也缺乏明确性。立面用框架圈住，它们之间只存在虚假的有机关系。

这也是一个为了避免困难而设计的方案。使建筑师减轻了诚实解决边缘细部的麻烦。橱柜式框架将网格任意地圈在一个平淡而单调的范围中，而结构的逻辑性却被忽略。

“橱柜式框架”是一个想要吸引人的，但无从下定义的画面概念（图49）。它象一个箱子，因而使我们感到尺度上的严重错误。橱柜和画框都是家具而不是建筑艺术的元素。图49所示的建筑使人可厌地联想到有屈的橱和电视机。就象本书中多次表示反对的那样，这种形式是强加在不同的结构构件上的一种无精神的程式化的而又不顾及它们应有差异的结果。外立面的周围不论上、下、左右看起来都一样，这不是真正的结构造型。一个建筑的立面也不是可以框一框的画面设计。它的生命力不强，象屋角和屋檐那些难于处理的细部是不能勉强用相同的线脚的。这一切都是既与结构造型无关又与正确尺度无关的。

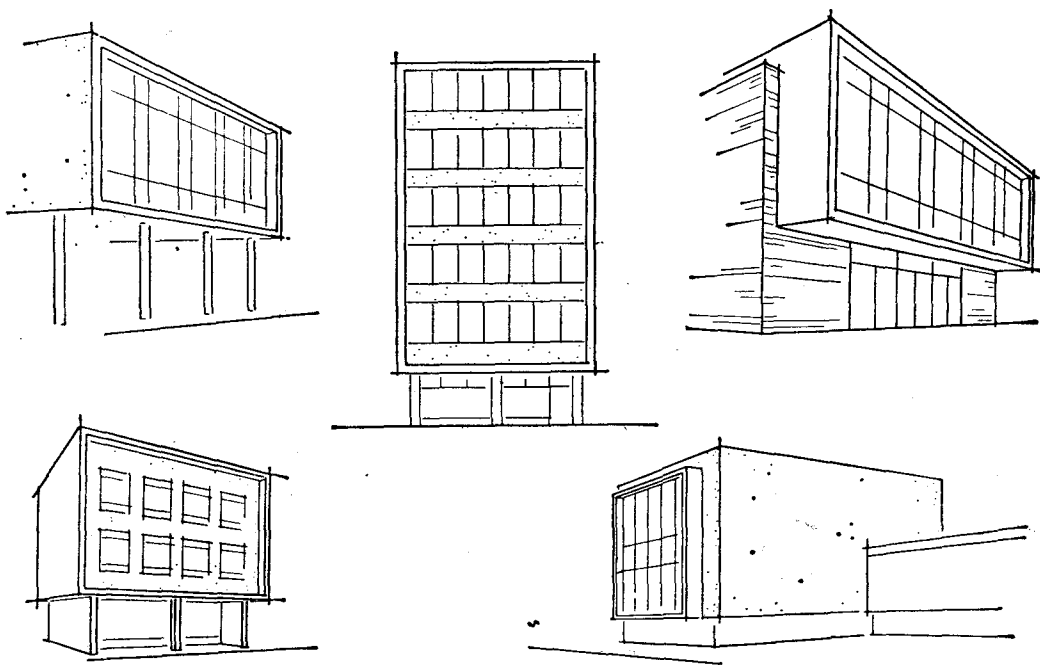


图 49 “橱柜式框架”是从家具制造那里借来的表达方式，目的是吸引人到某种非结构性框架立面的虚假比例上去

让我们暂时离题去谈谈尺度问题。建筑师们很随便地谈到“正确的尺度”，常用这个概念在议论中撑场面。但是，他们指的是什么尺度呢？支持这个概念的论点的源由，全都是纯属情感性的。很少人知道对服从力学定律的房屋来说，“正确的尺度”也可说“正确的比例”，在一定限度之内，实际上是可下定义的，甚至可以数学来表达的。不过，以“服从力学定律的房屋”是非常重要的。这意指各种材料和力学法则有一定的联系，没有它，房屋是不可想象的。在建筑艺术中这个联系是必不可少的。没有它，不可能有建筑艺

术，或者充其量是纸上谈兵。这与一幅画是完全不同的，一幅画留下的常常是一个式样，至于它的材料本质是没有什么重要性的。现在让我们谈谈家具，我们已经把它和带有“橱柜”式框架的房屋做了比较。一个架子的搁板20毫米厚100厘米长（图50）可以满足一切通常的需要，人人都觉得这是一个合适的造型。搁板的自重几乎不造成什么挠曲，并且能承受书籍等物的外加重量，外加荷载几倍于它的自重而没有看得到的变形。这是很容易用计算或实验来证明的。如果一块相似的搁板用同样木料制成但尺寸大一百倍，就是说2米厚100厘米长，仅由于自重在中跨的挠度将为5厘米，等于跨度的5%。如在书架将为5毫米，是一个不可能的挠度。此外，如果加在这个巨型搁板之上的荷载不到它的自重的两倍，它也将倒塌，而一个正常尺寸的搁板可以很容易地承担数倍于自重的荷载。

另外一个例子：在有石板的地方，居民自然发现石板的许多实际用途。约10毫米厚2米长的整块石板常适于用做跨越渠溪的小桥。这些石板很坚固，即或承受相当于它自重的活载也不大会超过它的应力能量的十分之一。如果，我们设想有一块石板比前者大100倍（10厘米厚，200厘米长），那么它的自重所产生的弯曲应力就比石板材料的极限强度大三倍，所以这石板就溃塌了。

因此，受弯构件的“正确形式”或“正确尺度”经常并不一样而在于它们的绝对尺寸，对于这种关联性是可以清楚地限定的。

如何解释这些观察出现象呢？

1. 上述结构中的弯曲应力，不但与它们的比例（高跨比）有关而且与它们的绝对尺寸有关。即使形式保持一样，材料中应力的增加与绝对尺寸成正比。因此，跨度有一个上限，超过这个限度则已知比例的结构构件就不能采用。

2. 即使比例（高跨比）保持不变，挠度是绝对尺寸的平方的函数；因此，挠度受到绝对尺寸变化的影响比应力受到的更厉害。

对此一切我们将做何结论呢？

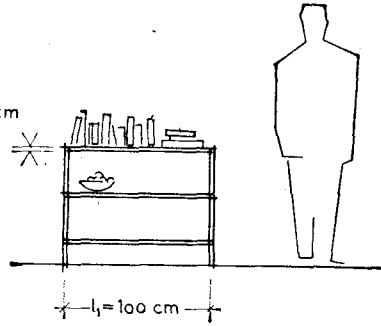
已知绝对尺寸和已知材料，每个受弯的结构都有个相当肯定的“适当的”形式。换言之，高跨比，即适当的形式，不是常数，短跨与长跨的高跨比不同。当然，假定经济利用材料是个设计中的决定因素。反言之，在受弯中只是对特定的绝对尺寸和特定的材料；已知的高跨比“才是正确的”。对其他材料或其他重力场这个高跨比就不能直接应用。但是，恰恰是那些把比例，模数和“最优截面”奉为想象上的普遍定律的公式化者时常作的假定。就这样建立的定律很快带上了神秘色彩，并做为建筑秘方流行于世。对结构造型来讲，这是很令人怀疑的，的确象我们已表明的那样它还可能是很误人的。

在具体进行房屋建造的时候，也就是比图案设计画面更有意义的真正的建筑艺术变为物质现实的地方，那些不能抽象化的由结构推导出来的比例上和造型上的定律也将被运用。如前所述，这些定律是可论证地随材料性质，力学法则，所在的重力场，当然也随绝对尺寸而定的。

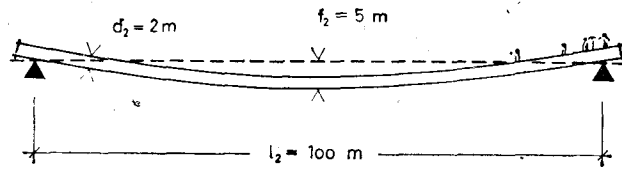
绝对尺寸对结构造型的影响在许多大自然产物上也可以看到。例如：矮草细而有弹性，它的材料是相对柔软的。高树依赖坚韧的木质和天生的强度去抵抗巨大风力。最小的动物是最优秀的跳高者。即使大自然竟然反常地强求，不可能创造出一个大象那种比例的跳高动物。老虎是众所周知的最大型的跳跃动物，它能跳跃的高度也只是身躯长度的二倍或三倍，而跳蚤却能跳一百多倍。昆虫和小鸟（鸣禽）振翅速度非常快，较大的鸟振翅的

$$\frac{d_1}{l_1} = \frac{d_2}{l_2} = \frac{1}{50}$$

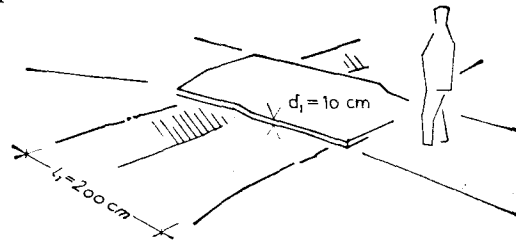
$$d_1 = 2 \text{ cm}$$



1



$$\frac{d_1}{l_1} = \frac{d_2}{l_2} = \frac{1}{20}$$



2

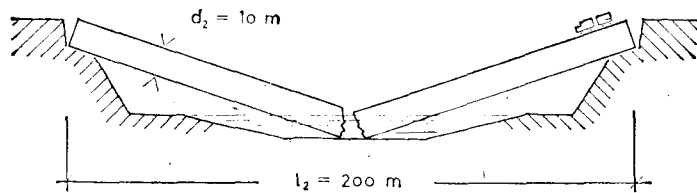


图 50 在任何情况下“正确的”结构造型关系到结构的绝对尺度

- 1—两块在比例上一样的木板，绝对尺寸不同，则作用是不同的。尺度小时可以忽略挠曲，但尺度大时挠曲可致结构于无用；
- 2—如果两块石板的比例一样，而绝对尺寸大不一样，小的一块可以承受它的自重加上活载，而大的一块仅在自重下也将断裂

速度慢得多。无疑，可以证明，我们所知的最大“鸟”人造的飞机，想使它振翅不但是很困难，而且是基本错误的。鉴于造型随绝对尺寸而定的清晰，明显和普遍的依赖性，我们要当心将比例的抽象分析应用到实际的建筑物上去。把蒙德里昂（Mondrian）构图与建筑设计混同起来的那种并不少见的企图，是基本上不正路的，表明对建筑的重要原理的认识相当肤浅。

不管怎样，在地球重力场之外，空间结构（或者我们可以大胆地称它为“空间建筑”）最终选定的造型无疑会与我们熟悉的造型完全不同。只有沿着上述思路，通过对什么才是结构上的“正确”的认识，才能发现并欣赏这些新造型比例及其焕发出的美学价值的新尺度。其他可能应用的美学根据和目前的讨论没有关系。我们必须坚持的只是上述判断也要，而且，在任何情况下一定要应用到实际的结构上去。因为它们是跟着而来的一切事物的基础。这个命题在数学上可表明的有效性只限于比例方面以及物质结构的形式方面。不论怎样，建筑本身总是一个物质结构。所以说优美的建筑造型与美好的结构造型不一致是难以想象的。更确切的是两者互相联系，互相补充，互相受益。

具体的例子：如果埃菲尔（Eiffel）铁塔被缩成原物 1/100 大的复制品，将失去作为一个设计的一切价值。它的比例也就不再是“正确的”，它将失去全部盛名而只成为一个玩具。

同样的，如果将帕提农神殿放大 α 倍或者从地球重力场转移到 α 倍大的木星上去，尽管谨慎地保存了各部分的几何关系，不论是哪一种情况，它的比例都不再是“正确的”。建筑物的尺度不再与荷载的力学和材料的性能相符合。如果这样，已经2000年的大理石过梁也会倒塌。离开荷载的问题，这么一个帕提农神殿作为建筑艺术将没有价值。整体性将消失，随之一切美学价值也将消失。

这段离题的议论是那个从家具设计者那里借来的“橱柜式框架”的尺度所引起的。这样的比例是不可应用到建筑上来的。但是图51的草图表明同样一个的建筑立面周边收束的题材是毫无疑问可以带着细腻的尺寸感加以处理的。这里，建筑的周边构件各个不同，每个都好象“正确”而与其特有的功能很自然地相关联。为了避免四边一样造成的单调是经

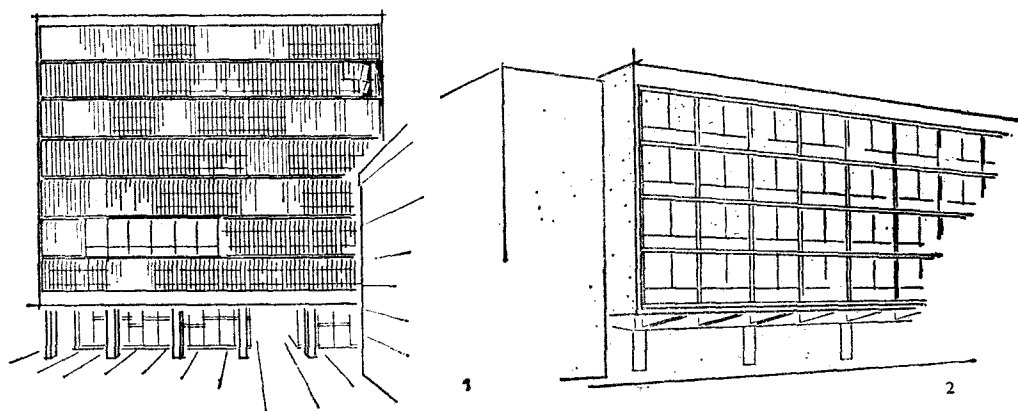
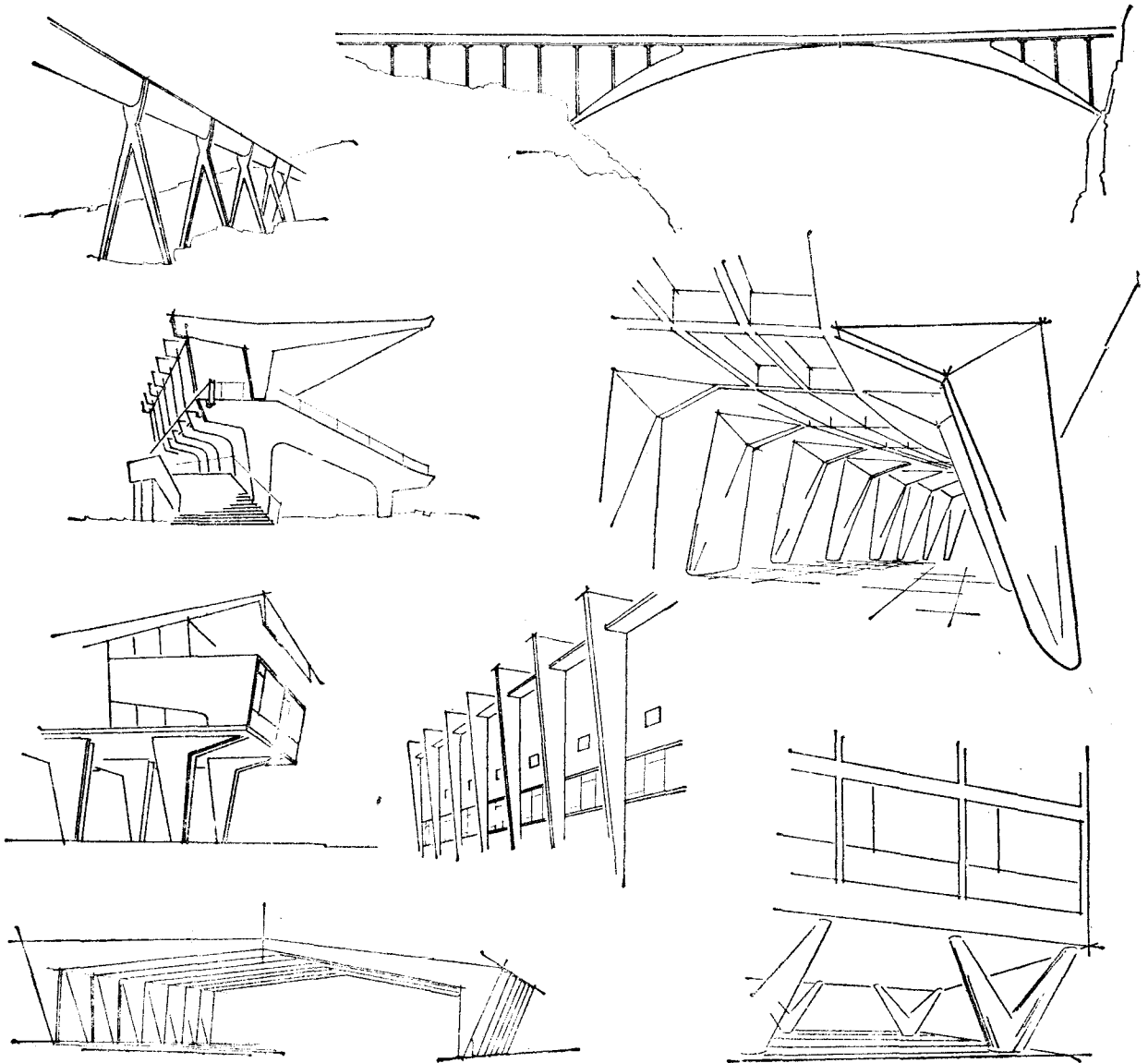


图 51 与“橱柜式框架”（图 49）对照，这两个立面的结构周边是从上下左右四边显著的不同情况有机地发展出来的

- 1—米兰的奥利费蒂（Olivetti）办公大楼[13]；
- 2—瑞士伯尔尼（Berne）的技术学校[14]

过深思熟虑的。

总括起来，将基本不同的构件勉强放进同一模子内就破坏了尺度，并使设计软弱无力。而强调真正的差异却使设计为之生动。按照各组成部分的特殊意义而区别对待，各局部将给整体带来“正确的”尺度。真正的区别对待在骨架结构中比其他任何地方更多地是从结构法则推导出来的，做到这一点就能创造出一个富有意义的结构造型。



第二章 V 形 支 座

前一页上的一些简图可使读者对作者所称的V形支座有个概念。这个名词适用于任何象V字的楔形支承构件。也可以包括古代倒V形的，向着基础逐渐加宽的扶壁。但是，我们更感兴趣的是近来向下收缩的V形支座。本章既是由于两种形式好象相互矛盾的现象，又是由于现代V形支座愈来愈普遍的情况这两方面启发而写的。

自古以来人们认为一个结构只能基础宽大而向上收缩，这个概念是很熟知的。所有挡土墙和扶壁都表现了这个概念。哥德式的柱自上而下不断加劲相当于这种形式的正确性的科学证明。多少世纪以来没有人相信还有比这再美的了。同时，向上收缩被认为是精心取得的平衡的表现（图52）。



图 52 古代的扶壁就是一个倒V形支座

古时结构形式的特点表现在笨重而底部宽大的砖石结构。它们是简单的，笨重的而且展现的问题少。材料结构组织的精细要紧密配合主题的变化。有控制的利用荷载与力量作为建筑艺术的表现是偏重于技术性的西方建筑的特色。这是不能轻易丢掉的。

在哥德时代完成了一个空前的结构变革，在扶壁中产生一种与我们将要探讨的支承构件有密切关系的形式，不过V形是倒置的。

中世纪的教堂中支承拱顶的柱墩截面逐渐向下增大。海特巴赫（Heisterbach）[15]晚期罗马式大教堂的唱诗班席的扶壁是一个杰出的早期例子(图53)。匠师对力学具有惊人的了解，他用斜坡的扶垛来抵抗拱顶推力的侧向外展。虽然省略了结构计算，但他对力的平衡有敏锐的眼力，他围绕着拱形唱诗班席布置了一圈厚实的墩子。海特巴赫教堂是个艺术作品，同时又是中古时期卓越工程的例子。用结构手段控制一个肯定的力系的必要产生了一个将艺术与技术成功地结合起来的造型。

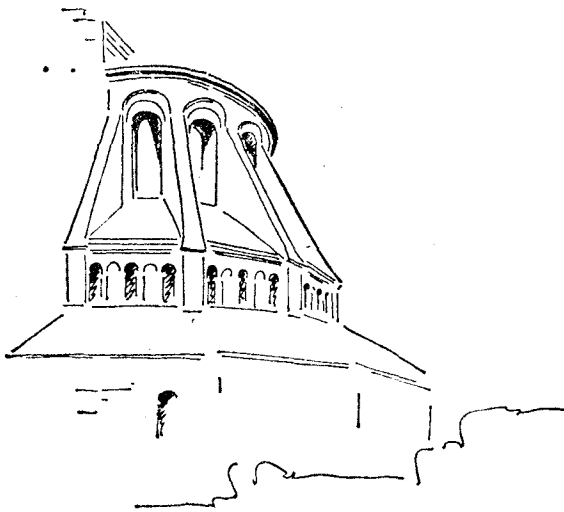


图 53 德国海特巴赫的大教堂中，倒V形支座形成唱诗班席的一部分[15]

在哥德式的全部时期类似的方案以更优美的形式一再出现。设计方案决定于力和力传到地基的方式。一点一点地不必要的材料被删掉，最后只留下精髓，就这样结构取得空前未有的重要性。与哥德式相比，古罗马的拱结构只是一个粗糙的未经加工的东西。在哥德式以前从未有过这样优美完善的建筑技术或者象这样规模的使人振奋的设计。哥德式建筑中技术成分对构思的发展提供了决定性的贡献。

没有拱的技巧和它渗到每个细部的影响，哥德式精神就不可能想出这样强有力的建筑表现。因为墩子抵挡拱传来的推力，在每个高耸的拱结构中，墩子成为不可缺少的部分。不可避免，它是向下加宽的倒V形。这是力学上的要求，确实，在砖石结构中这是技术上可能的唯一方案。在中古的教堂中这是我们所熟知的，但在非宗教性的建筑中也可以找到典型的扶壁形式。例如，伯尼尔（Berne）城景就是明显以这种题材为特色的(图54)。

所有历史上的实例都和立杆顶端承受侧向荷载相象。同样也可用来描述电杆加支撑以抵抗电线的拉力的情况。常见的例子有农场篱笆和电线杆。树木也如此，树杆的增长的情况就是有机地适应风力对树底增大的力矩的（图55）。

所有这些有关的形式不论是自然的还是建筑上的都同样遵从下列定律：

1. 任何构件下端固定，上端承受水平荷载，就产生弯曲应力。
2. 越向下弯矩越大。
3. 底端弯矩最大。
4. 越近底端尺寸越增大，这是适应弯矩分布的最佳形式。

以上阐明常见的砖石结构的扶壁在力学上的正确性和美学上的明确性，以及大自然中类似的形式。如底端锚固就需要可靠地生根于地下的形式。只有向上收缩才能被人接受。

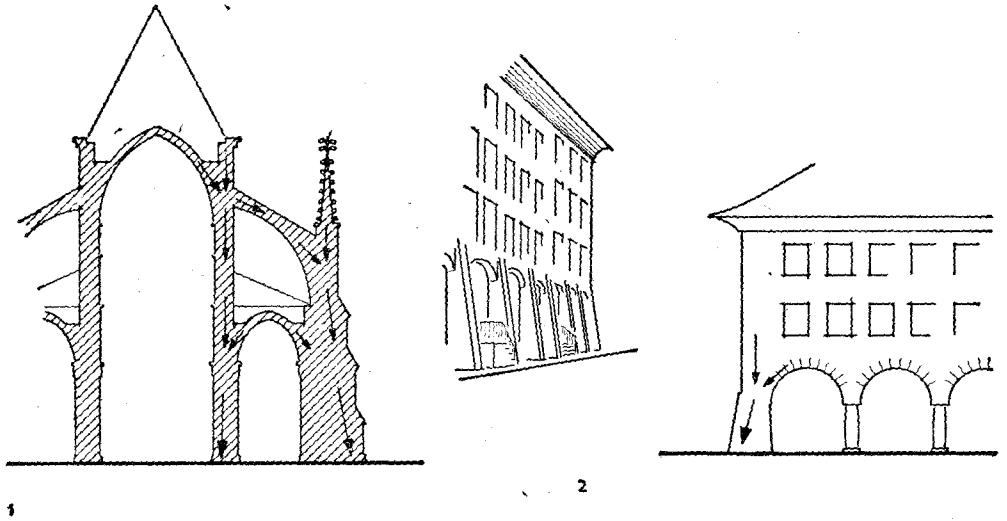


图 54

1—哥德式建筑中倒V形支座是结构原理的逻辑结果；
2—快壁作为纯粹实用的形式是具有拱廊的伯尼尔古城中的特色

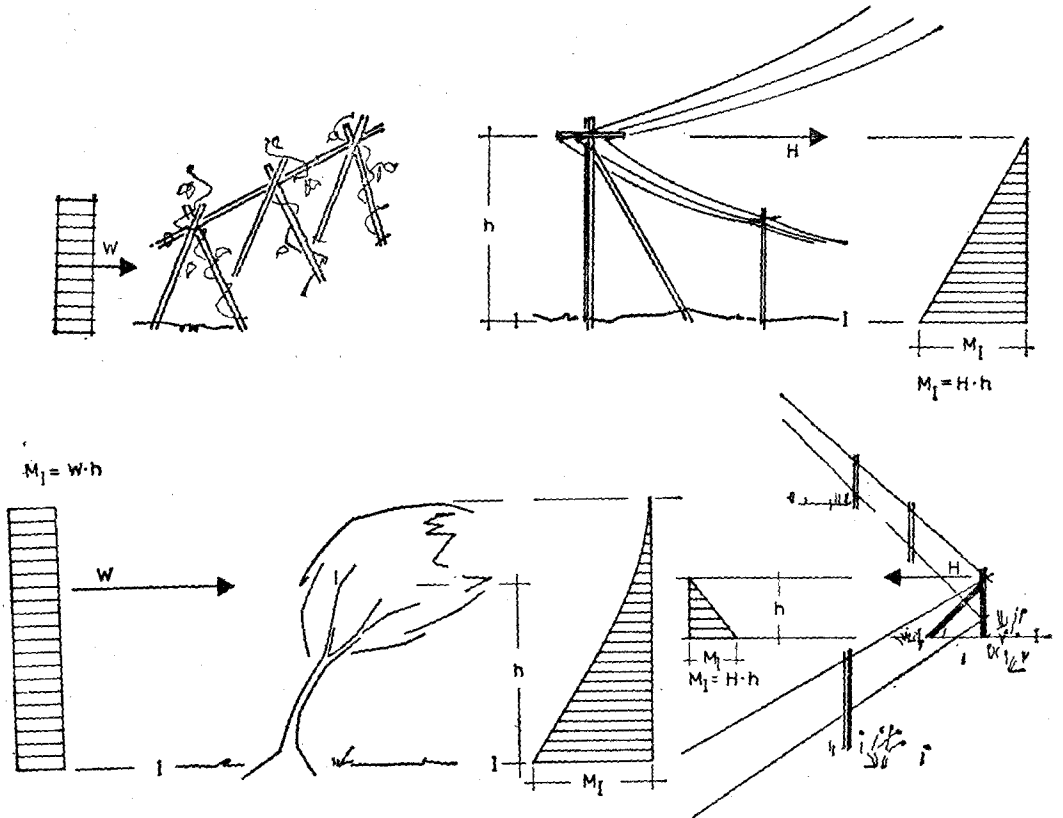


图 55 有支撑的立柱是V形支座的原始形式。树木完全能抵抗风力

因此，向下收缩的现代V形支座好象违背力学规律。在较古文化的建筑中是找不出一这样的痕迹的，可是，几十年间它忽然变得流行起来。本世纪初只有很少的工程师觉察到这个新形式在力学上的重要性而敢于付诸实践。今天，它却已成为太多的建筑师的拿手戏目了。并不是所有的建筑师能够正确地表现这种新形式，有些人不过是利用这种形式的外观特点，赋予他们设计的建筑以摩登的外貌而已。无疑地，任何不精通力学的人一开始会反对这种形式，因为它拼弃了历史上一贯采用的清楚而明智的秩序。

目前，现代V形支座已在许多方面出现，既用于家具设计，也用于桥梁工程，它既作为橱窗中的装饰品而出现，也作为一个建筑中力学原理不妥协的表现，而在结构设计的各个方面V形支座是经常反复出现的。象“点的支承”和“飞翔效果”等俗语很久以前已在新闻报道和技术出版物中出现了。但这些仅仅是空话，对这种结构形式深远的重要意义却缺乏公正的评论。对V形支座外形特点的肤浅评价太容易导致因果关系的混淆。因此对这类支座的结构性性能进行透彻的分析是绝对必要的。经过分析许多预料不到的和值得注意的问题将会显示出来。凡是锥形支座不论用于倒V形的哥德式扶壁还是用于现代刚架的V形支柱，首先它是技术功能的产物，它的形式是按照弯矩由零到一定最大值的 变化而确定的，这是首先要解释的问题。钢铁的或钢筋混凝土的V形支座的技术功能和结构关系比那些哥德式的扶壁或城墙要复杂得多，不能说只看一看或纯凭直觉就能够理解的。只有掌握了工程理论的某一方面和对结构实物的公平分析才能真正理解这些新结构形式的起源。只有这样才可能发觉那些无谓的虚伪形式，装做具有技术上的功能，而实际上是一个空心枕头。这种欺骗手法阻碍了以技术为根据的建筑造型语言的发展。它们只是沾污了有力的造型手段并危害了结构的真实。本书的目标之一就是要暴露和根除它们。

最初，V形支座的观念好象是一个那么原始的设计思想，任何深奥的阐述将是不必要的。例如，和保持二千年具有丰硕成果的潜力的希腊柱头相比，简单圆锥好象是一个拙劣的无聊的东西。的确，这个差别是最基本的。一个美的柱帽会直接唤起美感。如果此外，这个柱帽至少象征性地，由于标志着荷载从屋顶到柱子的传递点而表明结构性意义的话，这个结构性意义对直接感受来说是毫不相干的。直接感受完全来之于造型的美。可是V形支座构件并不如此。V形本身不说明什么，它不会使人感动，它连个象征性的含义都没有。但是，V形支座是个基本结构，能够提出结构性的判断，这一点就是它的重要意义，它并不象征任何东西，它就是“它自己”。谁要是希望发展对现代结构造型的感觉并体验它的美学的魅力的话，他就必须学会鉴别这一重要的差别。不认识它的结构内容，也就是不认识它的“本质”而想对结构造型有美的感受是不可能的，因此，只有谈到现代结构造型的“正确性”才是任何审美观念的必要条件。作为一个几何图案，V形支座并不比两条平行线或者一个方锥更美。它的比例，姿态和位置只能联系了它在更大的整体中作为局部的功能而作出美学的判断。

这里还有一个怀疑现代建筑中的形式主义的理 由，一方面，一个例如古典柱帽那样漂亮的细部将永远占有一定的价值。而另一方面对一个结构形式如果剥夺了它与功能的联系则是不公正的。不联系功能它就失去了一切美学内容而变成完全无意义的了。相反，如果一个结构造型既满足了两者又是从它的功能所塑造出来的，那么，它是有生命力的，可以认为是艺术作品。

虽然，没有建筑中运用V形支座的早期实例，但在家具制造中它早已占有一定的地

位。桌椅的腿也是侧向受弯，不过，这侧向力并不作用在上部而是在下部。这样弯矩向上增长。腿与桌框联接处弯矩最大，向下逐渐减小，到腿底端为零。因此家具制造者很聪明地将桌椅的腿向下收缩。

为什么桌，椅，凳腿的形式不是象茂盛的树和扶壁那样向上的锥形呢？如果一个桌子是固定位置的，桌面可以支承在支架上，支架锚固在地上，底部宽大稳定性好就如同扶壁与树木一样。显然这就与扶壁的形式相似。但是，因为家具是要移动的，最好将桌腿设计成一端与桌框刚接而另一端可以自由滑动，结果就是一个向下的锥体(图56)。

现代的刚性框架依据的原理与椅子相同，刚架的水平构件相当于椅子的座板，竖向构件相当于椅腿。水平构件与竖向构件相交的刚性接点合乎逻辑地形成我们所称的V形支座。虽然大型刚架不需要移动，但我们对一切能移动的轻巧的似乎自由地停放在地上的刚架有一种不知不觉的好感。一个支承在V形支座上有浮动效果的结构比那中世纪笨重扶壁加强的拱券更合乎我们的口味。

现代建筑材料提供的可能性与不断变化中的审美观是相协调的。刚架为一个崭新的完全明确的造型世界起了开端。从它进展到现代的V形支座，就是本书第二章的主题。

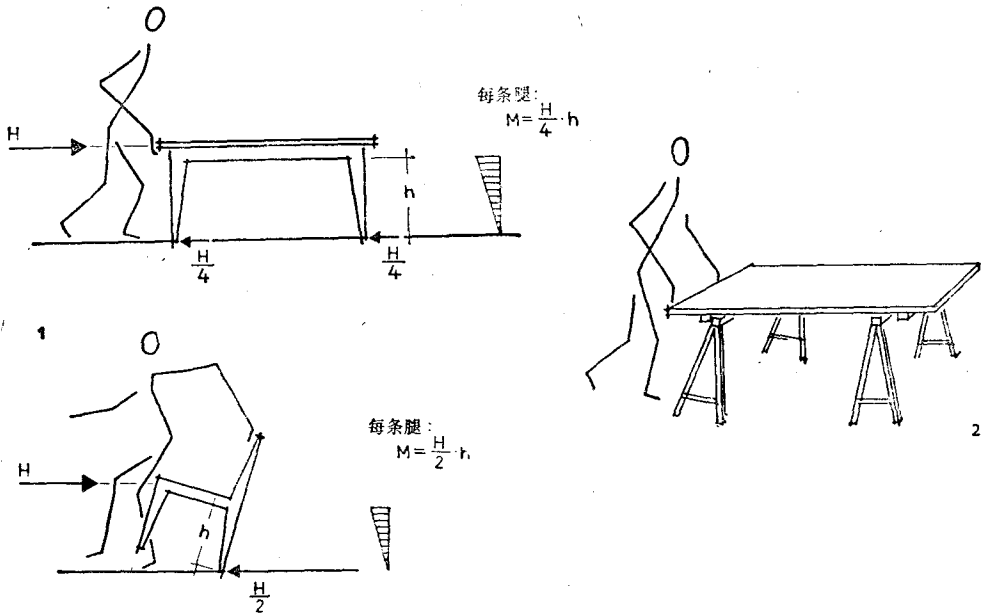


图 56

1—V形的桌与椅的腿是受力状况的直接反映，最宽的部分在上面，
2—腿向下加大的桌子不易移动

V形支座与刚性框架

向下收缩的V形支座起源于现代刚架的发展，两铰刚架是这类结构的典型。和椅子对照容易明白它的结构作用(图57)。如果一个相当柔软的椅子放在光滑的地板上，加上较大的荷载，椅子的腿将向外伸展。如果阻止椅子腿伸展，但是腿有刚度将在接点处产生相

反的转动，这样就减轻座板中的应力。应力被减轻的程度可由挠度的减少值来衡量。

图58为两铰框架承受均布竖向荷载后的弹性曲线和弯矩图。弯矩图表示框架所有截面发生弯曲的程度。弯矩图画在框架产生拉应力的一边。弯矩从框架的一边跨到另一边的地方为弯矩零点，也就是没有弯曲应力的中性点，也是“弹性曲线上的反弯点”，就是框架变形后曲率方向的转变点。

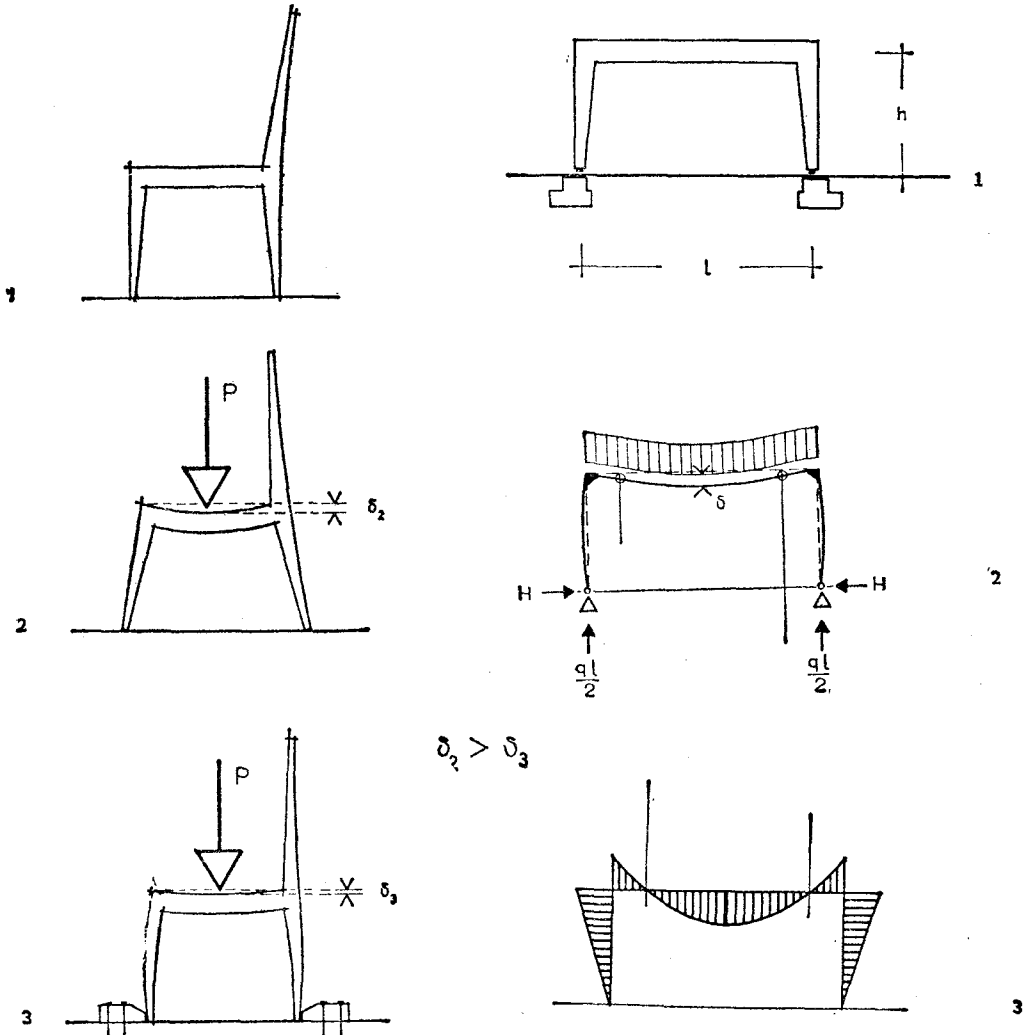


图 57 椅子作为刚架

- 1—没有荷载；
- 2—在荷载作用下，椅子腿将向外伸展；
- 3—阻止椅子腿向外伸展可减轻座板的应力。挠度比第 2 种情况的小

图 58 两铰框架

- 1—两铰框架可与椅腿向外展开受到阻碍的椅子相对照；
- 2—在竖向荷载作用下，框架受弯的情况与图 57-3 所示的椅子是相同的；
- 3—弯矩图表示弯曲应力大小。弯矩为零的点和弹性曲线上的反弯点相重合(图58-2)

如果使这样一个框架能使用，所用的材料必须能抵抗弯曲，节点必须是刚接的还不允许两腿向两边移动。

砖石材料沿着砂浆粘接面没有受拉强度，所以不适用于框架结构。木料的拉力与压力虽然较强，但不容易做成刚性连接。公母榫接点用于制做家具很好，但结构工程上用处不大。刚性框架可以用木料制造，但一定要用钢接件或胶合技术，这样的结构是很少有的。因此，刚架完全是现代的产物，因为它只能用近代发明的材料，钢筋混凝土和钢材。这些材料的弯曲强度相当大，可用以做成转角的刚性接点及有效的铰（图59）。

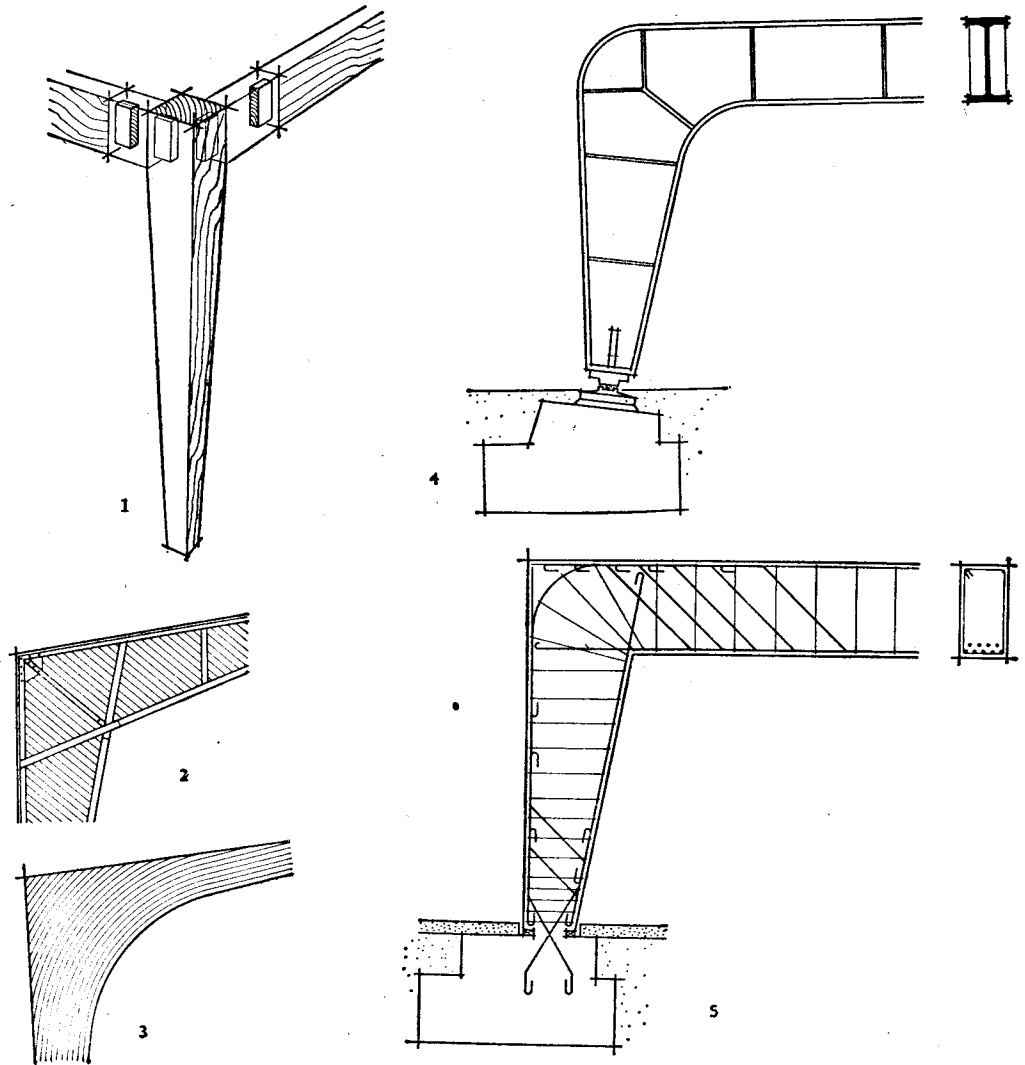
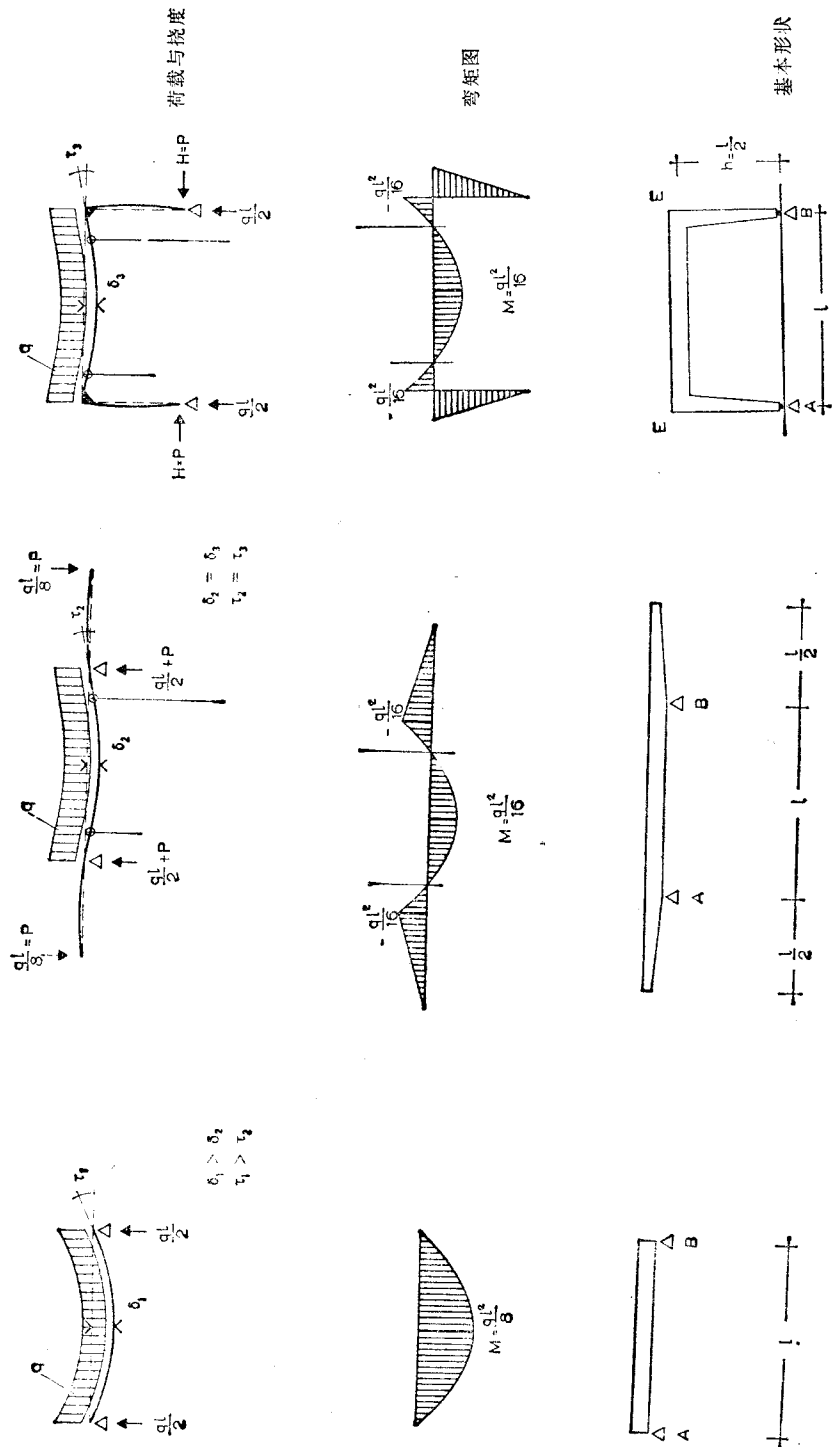


图 59 刚性转角构造

- 1—家具制造中采用的公母榫接点；
- 2—用钢连接件的木料框架；
- 3—胶合木料框架；
- 4—型钢框架；
- 5—钢筋混凝土框架

从图60所示的一系列图中可以明了两铰框架的结构逻辑。第一栏，是一根简支梁受均布荷载后的变形曲线和弯矩图（图 60-1）。第二栏是同样一根梁但增加两个挑出部分，



1 简支梁

2 挑梁

3 两肢框架

图 60 梁与框架的关系

1—简支梁的挠度和弯矩;
 2—对挑梁加荷载可以减轻跨中的应力;
 3—制止框架的两腿向外张开, 可以象图 60-2 对挑梁加荷一样减轻横梁的负担

两个挑出的自由端各有一个集中荷载（图 60-2）。这两个集中荷载的数值，是这样确定的：使挑出的两端回到未曾变形时的梁轴水平上去。如此，支座处梁经受一个反向转动，这就使梁的跨中应力减轻。支座处变形后梁轴的切线与水平线成一个转角 τ_2 ，无挑出的梁相应的转角为 τ_1 ， τ_2 小于 τ_1 。同样，跨中的挠度 δ_2 小于 δ_1 ，弯矩最大值也只有简支梁的一半。所以受荷载的挑梁使主跨减轻了负担。

图 60-3 中框架的腿与图 60-2 中挑梁长度相等。框架的最下端相应于挑梁的端部。对挑梁施加一竖向集中荷载 P 以保持它的位置不动，同样框架凭借基础的牢度阻止它本身水平向的移动。制止框架水平移动的基础阻力称水平力 H ， H 等于图 60-2 中对挑梁施加的集中荷载 P 。框架跨中的挠度 δ_3 和在节点的转角 τ_3 都同挑梁相应部分的一样。同样，框架横梁的弯矩也和图 60-2 挑梁的一样，也等于简支梁（图 60-1）弯矩的一半。

因为框架腿的作用与支柱相同，证明两铰框架是一个既经济又合理的结构形式。在这里我们对框架支柱的 V 形更感兴趣。这种形式主要是由弯矩确定的，框架的转角处弯矩最大，支柱底弯矩为零。因此两铰框架的 V 形支柱反应了结构中弯矩的分布。

值得注意的是框架立柱的结构形式并不仅仅是计算的结果，相反，计算同样是造型的结果。两者是彼此相关的。图 61 表示两个可能的极端。一个是粗重的收缩式立柱与横梁相比非常刚硬，另一个是细弱而柔软的立柱。在同一荷载作用下这两个框架产生不同的弯

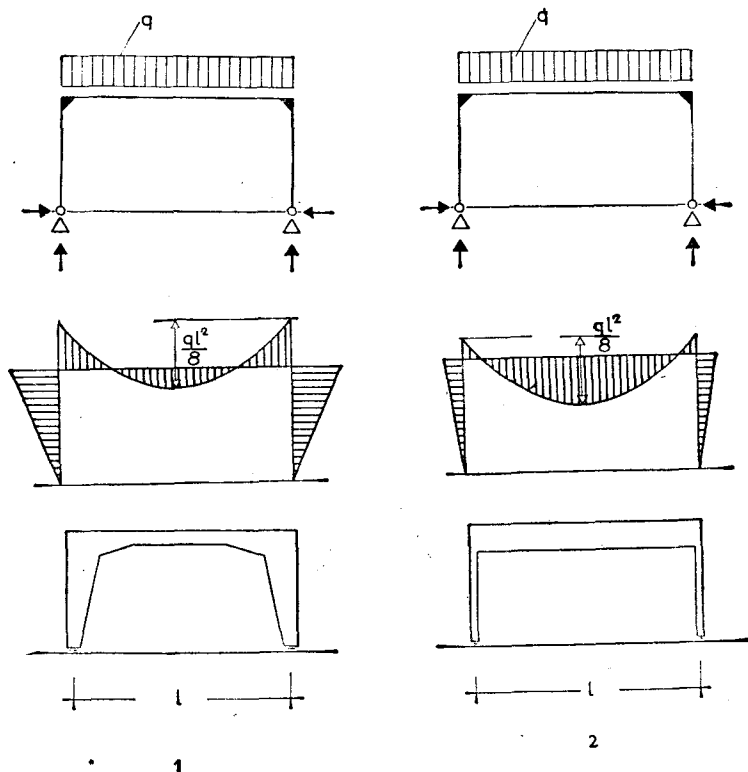


图 61 在两铰框架中构件的相对刚度

- 1—刚度大的立柱阻止转角转动，又减轻横梁的应力；
- 2—细弱的立柱阻止转角转动的作用很小。横梁的应力接近于相等的简支梁的应力在这种情况下，框架失去其意义

矩。而弯矩集中在刚度最大和抗弯最大的构件截面上。立柱越刚强越固定，就越能分担更多的弯矩，又更能阻止转角的转动。转角越固定就越能抵抗转动，也就越能减轻横梁的负荷（图 61-1）。反之，立柱越柔软，框架的作用越不明显，横梁的弯矩就越接近于简支梁的弯矩。这样，框架就失去连续结构的意义，实际上分解为梁与柱的独立作用（图 61-2）。

对造型的“正确性”本身有两种感觉：一种是完全凭感觉判断的人会立即认识到图 61-1 所示框架的优美感，对图 61-2 所示的框架相对地索然无味。另一种是很少受到审美观念支配的结构设计师则从另一途径而得到同一个结论。开始计算之前，他必须假定构件尺寸。只有运算结束时，才会发现原假定的尺寸与计算的应力是否符合或者是否要从头再算。值得注意的是，立柱刚度大的不如立柱细弱的框架对尺寸估计的错误和对构造上的错误那么敏感。因此设计师为了提高估计的准确性，缩短计算和使设计少受构造错误的影响，常优先选择立柱刚性大的框架。很明显，既对有经验的设计师也对纯从美学判断者来讲，上述的框架都是一个“正确的”形式。

除一般静荷与活荷外，房屋设计中水平的风力也占很重要的地位。风力对两铰框架的作用如图 62 所示。同样这里的弯矩在立柱下端等于零，弯矩也与 V 形支座很协调。

两铰框架的最终设计是由竖向荷载与水平风力同时作用下确定的。两种荷载使框架立柱承受三角形分布的弯矩。因此，在两种荷载作用下，V 形都是正确的。

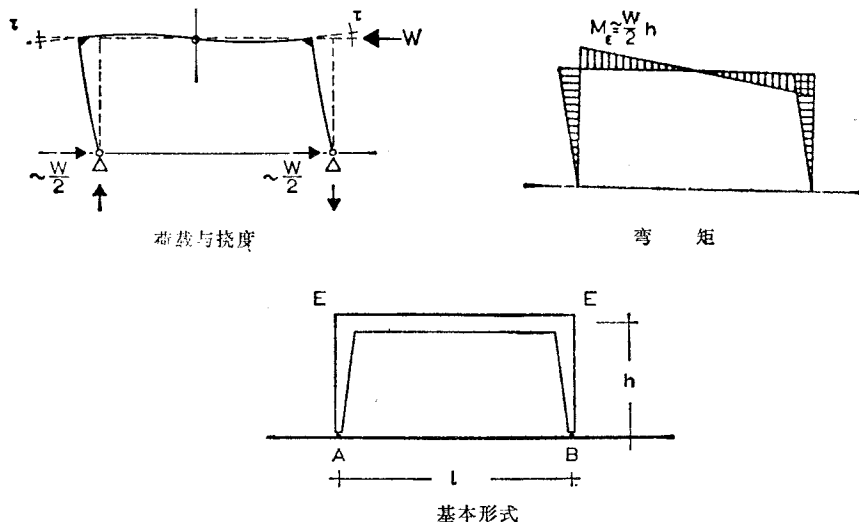


图 62 在风载作用下的两铰框架。两个立柱的收缩反映弯矩的分布

V 形立柱也适合于三铰框架（图 63-1）和半框架（图 63-2）。任何时候，只要框架的立柱与上面横梁是刚接的，而下端是铰接的；在一般荷载作用下经常产生三角形分布的弯矩，即在框架转角处为最大值，渐渐减小至下端为零。在这种情况下很明显 V 形支座是恰当的。如果框架下端是固定的。那么下端不能转动，情况就完全不同了。这时下端产生相当大的弯矩和弯曲应力；这就要求下端与框架转角截面相同。框架的弯矩变化图和相应的弹性变形图见图 64，再采用 V 形支座就毫无意义了。

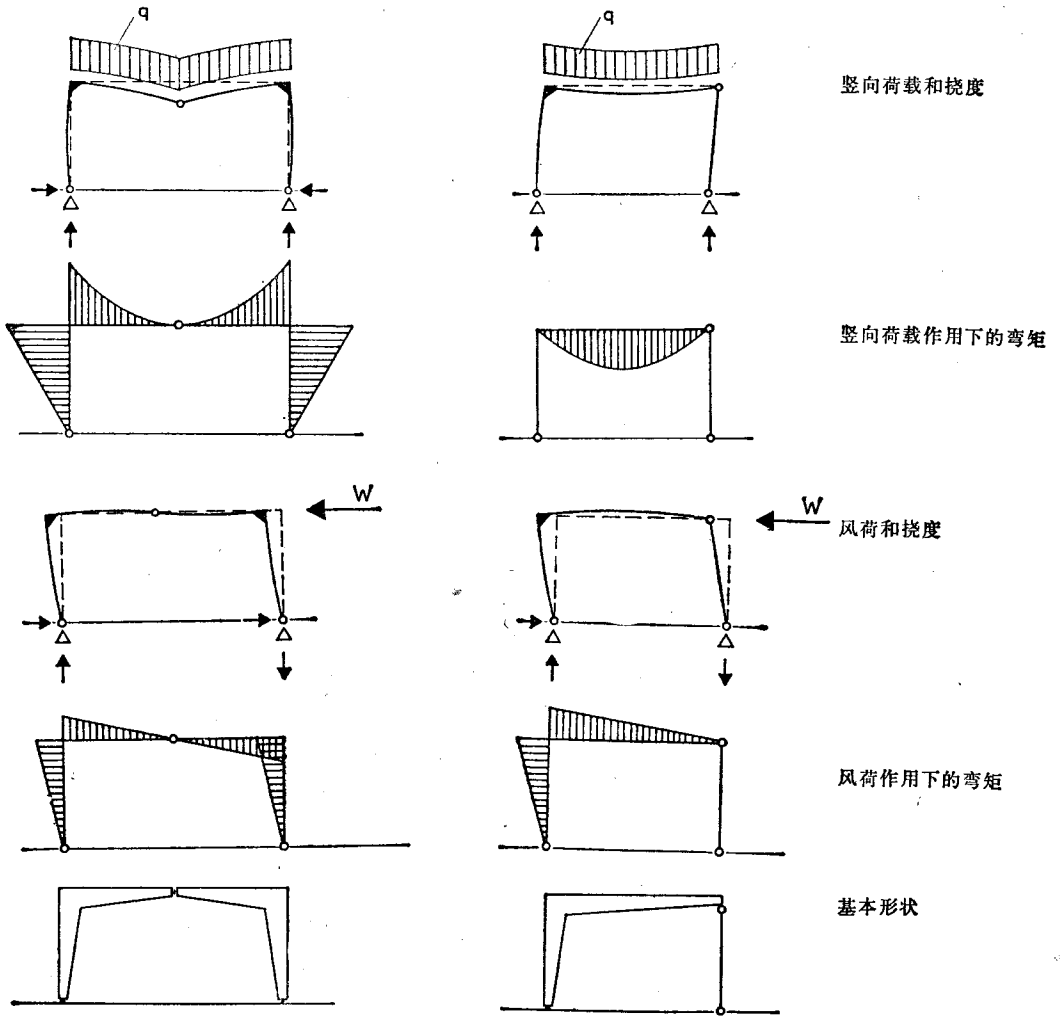


图 63 对三铰框架和半框架，在两种主要荷载作用下，弯矩图都是三角形的

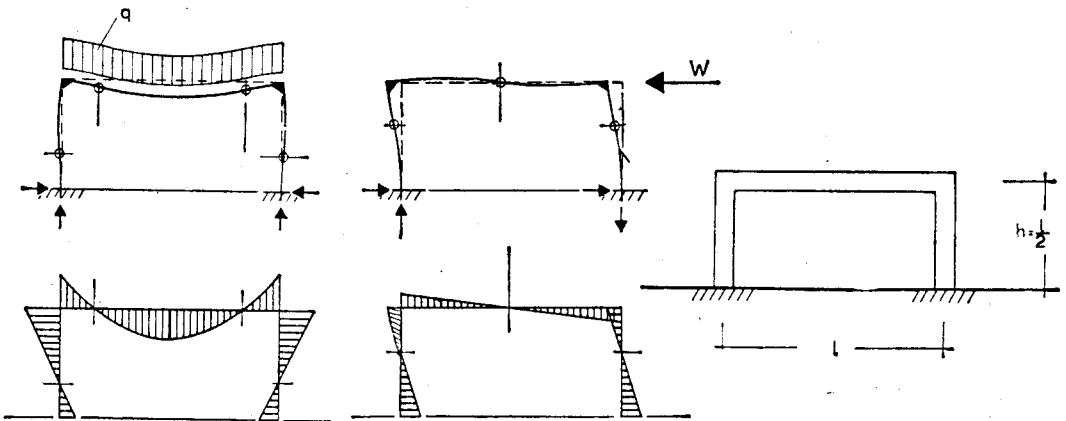


图 64 框架下端固定时，就没有理由将立柱收缩

两铰框架的一些典型例子见图 65。图 65-1 所示的桥用最经济的材料跨越河流。桥面越薄，竖向净空越大，结构的静重就越小。桥面系统的轻巧主要由于框架转角的刚度大和矮壮的桥台的重实。如果没有框架的作用，桥的跨中将需承受较大的弯矩，桥面就相应地较厚了。虽然重实的支座被路堤遮住了一部分，还是能强烈地感到支座与梁间刚性联结的力量。在卢尔德斯（Lourdes）的朝山教堂[16]框架的立柱分解为受拉与受压的杆件（图 65-3），它们的共同作用与一个收缩的立柱相等。图 65-2 是在杜伊斯堡（Duisburg）的铁路通道桥[17]的断面，这里 V 形立柱也是清楚地来之于框架作用的。另外两个例子是轻型建筑框架，因为荷载较小，跨度又较小，尺寸就比桥梁的小，但是收缩的立柱仍清晰可见，并且从建筑功能来看也非常合理。这类框架在工程与建筑中得到广泛的应用。凡是遇到大跨度，无柱空间或高楼需要显著的横向稳定等问题时，当然采用刚架结构。如果框架的下端是铰接的，立柱当然应该是收缩型的。

刚架可以很好地作为上面承托多层房屋的基座。上面这些层楼功能都相同形成一个闭合的立方体统一体。而底层则是和外界相通的。刚架是一种可使建筑物通畅的形式。同时又是将竖向荷载与风荷载集中到下面，在结构上印象深刻的形式。一些著名的现代建筑就是采用了支柱部分收缩得惊人的刚架的。最有趣的这类方案之一（图 66）是巴黎的联合国教科文组织（UNESCO）大厦[18]。框架的八字倾斜的腿和它那突出的收缩形式强调了底层的特殊功能，同时又为现代结构工程道出毫不含糊的语言。这是奈尔维设计的结构。各楼层只有两行内柱，将所有的荷载准确地传递到下面两铰框架的转角处。这些荷载大部分是轴向力只产生很小的弯矩。框架横梁所承受的竖向荷载完全来自第二层楼，与以上各层的荷载相同。从框架的设计来说，这些荷载不严重。底层框架的造型和功能取决于风力和房屋的横向稳定性。已经讲过，只有在内柱竖向荷载准确地传递到框架转角的时候，上述的论断才是正确的。框架的腿还有另一个重要的作用，就是加强房屋纵向抗风的能力。这点将在本书后面章节中第 136 页三维 V 形支座一节中详细讨论。

图 66-1 和 66-2 为建筑的剖面和底层框架由于风力引起的弯矩图。这些弯矩真诚地反映在框架腿的形式上。奈尔维说他所有的设计都是通过的对力的分布的认识不知不觉地浮现出来的，然后再去寻找一个简单而经济地表达它们相互作用的造型。这是恰到好处的论点。这样的造型不是“计算出来的”而是设计出来的。计算只是一个用来检查形式与应力是否相适应的手段。用另外的形式来抵抗这些荷载，也是有可能的。但是，只有一种形式是最优异的，或者象奈尔维所说的结构上是“正确的”，那就是最清楚地表现了经济原则的造型。探索和发现这种造型是一种创作活动，基本上与“计算”无关。“经济原则”我们指的不仅在于简单地“节约”造价。它是一个复杂的概念，渗透在全部的设计过程之中。要用最少的手段达到最大的效果，甚至美学效果。这个原则适用于创作活动的一切领域，包括技术和艺术甚至自然界。

这并没有“价廉”的含义在内，可以生动地引用密斯·凡·德·罗的一句名言：“不惜代价获取尽可能的纯朴！”

支承在有收缩支柱的刚架上另一个著名的建筑是勒·柯布西埃设计的马赛公寓[19]。猛一看，它的 V 形支座的作用没有联合国教科文组织大厦那样醒目，但是，它的结构设计还是根据同一原理的。

因为这是一个公寓建筑，设备装置复杂得多。横墙较密，这样每间隔一道的墙必须由

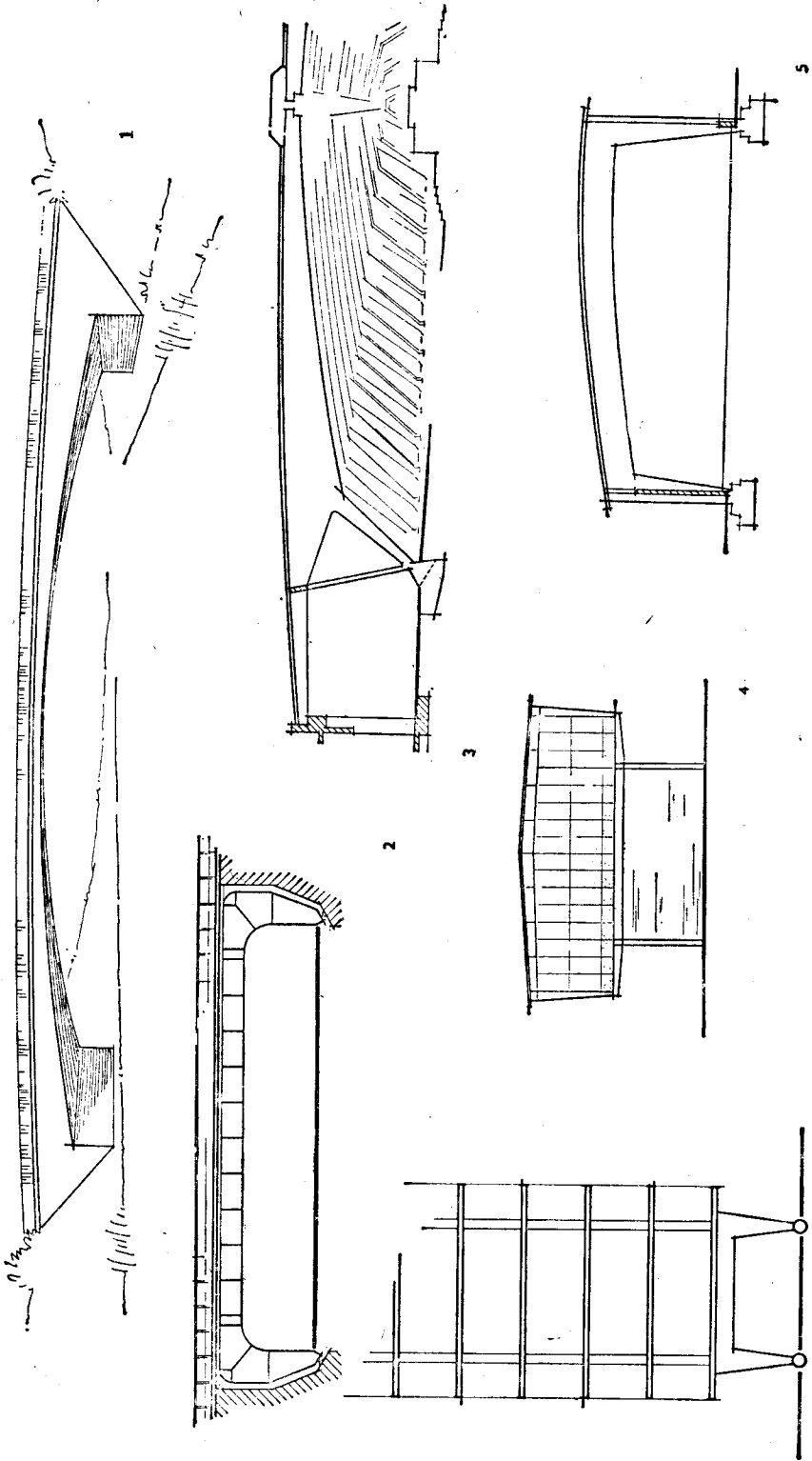


图 65 一些典型的两铰框架

1—钢筋混凝土桥；

2—人行桥下通道；

3—在卢尔德斯的朝山教堂；

4—展览馆；

5—体育馆

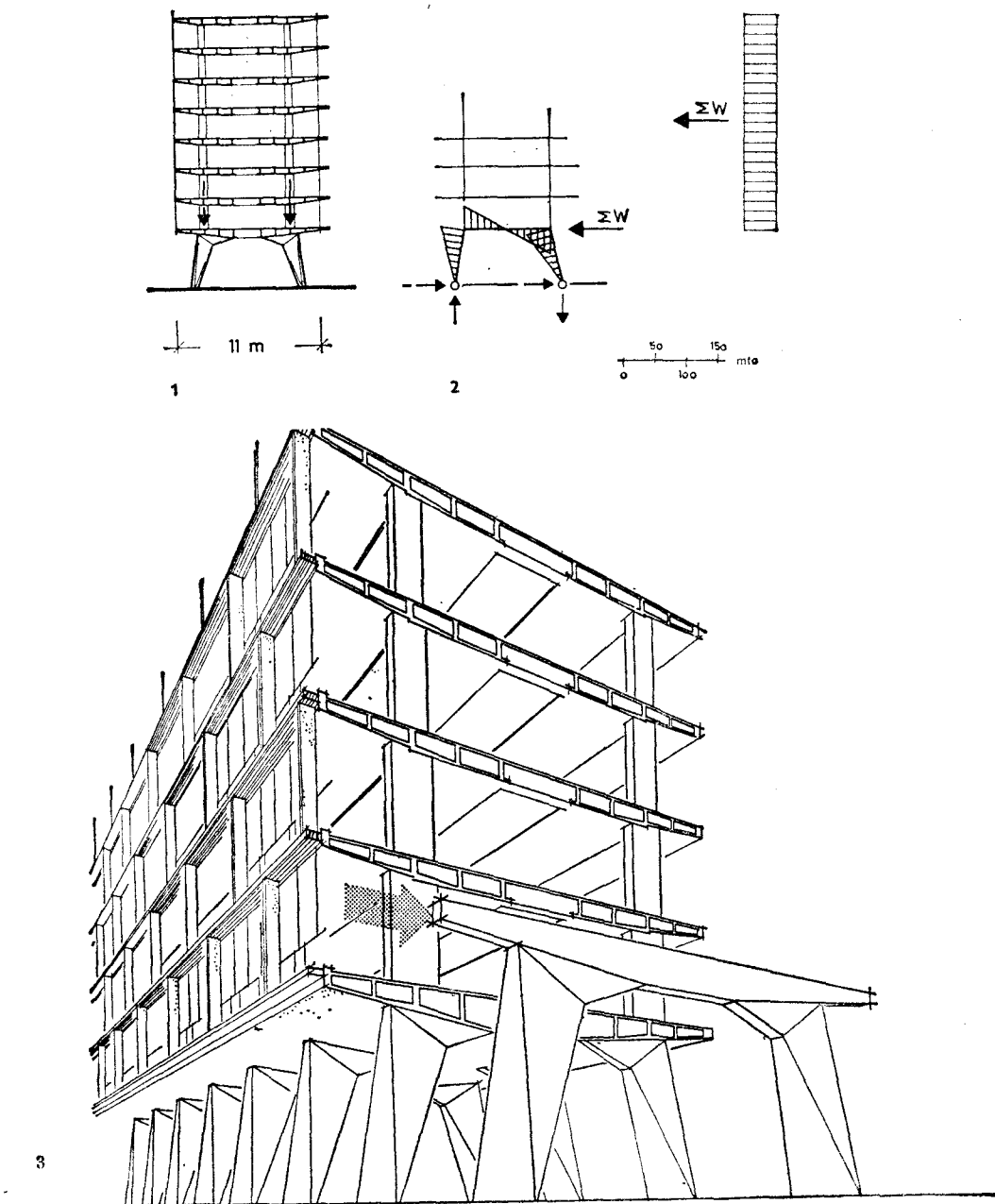


图 66 在巴黎的联合国教科文组织大厦[18]

- 1—在第一层楼具有削尖式立柱的两铰框架的剖面；
- 2—风力作用下的弯矩图；
- 3—透视图

下一层楼面托住。在底层上面有一层全部专为布置水平方向供给装置的设备层，框架腿的截面是特殊的空心形用来装置竖向的管道。

参阅图67-4的透视图可以明了这所建筑的设备装置系统。此图也清楚地表达了支承框架的形式。我们再次看到竖向荷载集中在框架腿之上，部分荷载是直接传递的，部分是由纵向大梁间接传来的。框架的作用也是由风力和结构横向稳定而确定的。从风载弯矩图和腿的V形上再次表明共同的起源。

因为这样的房屋荷载是很重的，难以将框架下端设计成真正的铰。用这样大的荷载由固定端的钢筋混凝土框架承受比较容易。支柱底部即使减到最小尺寸，依然很宽，这样一定的固定作用（图67-2）是不可避免的。

上述两个例子，联合国教科文组织大厦和马赛公寓表明高层建筑底层框架的设计是如何由风力来确定的。在两铰框架中将立柱收缩是很自然的。建筑越高，收缩就越突出地做为横向稳定性的表现。

同时，也有其他方式可以保证结构的侧向稳定。工程师喜欢采用的是实墙，升降机井和楼梯间。这些办法也明确地表达了结构原则，并导出完好的结构造型，可是，这些都与刚架和V形支座无关。然而不少建筑师只是为了吸引人的外貌而强调采用V形支座，即使抱有天地间最好的愿望，也不能为他们找到结构上的理由。这时形状不再是力学定律产生的，结果不过是形式的影子，它的真正本质却被误解了。图68就是这样一个相当普遍的错误例子。这里底层柱子的收缩是完全没有结构上的理由的。这个建筑是足够由楼梯间墙和升降机井稳定的。整个大楼被结实的楼板和楼梯间升降机井一起牢固地联接起来。风力永远也不会传递到所谓的“框架”。立柱只承受竖向荷载，并没有什么弯矩足以证明V形支柱是合理的，最简单的平行式就很合适。再说，如果这是一个真正的框架，为了抵抗大楼的侧向风力，框架的立柱似乎过于细长。为了安装管道，沿着大楼的全长在横梁上打穿许多孔洞，足以证明“框架”只不过是骗子。V形立柱仅仅是为了创造立体效果与横梁毫无内在联系，因为横梁的刚度已经受到破坏，这样，假想的框架作用完全是骗人的。以为支座向上加宽或者可以使上面几层相应宽度的柱子巧妙地过渡下来，这种臆想也是错误的。

“框架”上面一层柱的截面是大大减小的，V形立柱的一半支承的是空气。横梁完全被吊平顶遮住，吊平顶掩盖了整个构思的空虚性和支座V形的无关联性。巴黎的联合国教科文组织大厦和马赛公寓强有力的结构造型清楚地表现力学的作用。而图68高楼设计，相对照之下，其虚伪的病态只是靠误解结构原理和奢望一触现代风格而得以存在下来。

图68所示高楼在结构上的矛盾导致造型上的病态和毫无意义是显而易见的。但这并非经常如此。一个虚伪的结构也可以隐藏在好像是强有力的造型的背后。诡辩的设计不能保证结构的完整性。图69所示的框架给人最初的印象是一个坚固而明确的结构造型，没有人梦想到它会没有力学来历。在底层外表上象是为了保证大楼的横向稳定而设计的一个坚强的抗风排架，同时承受楼层传来的所有荷载最初的印象更被那力学上可靠的比例所加强，好似对结构设计有所了解。一旦发现风力根本不传给框架而是由在建筑物中心重实的设备竖井所承受时，这就格外使人失望。仅此一点就足以粉碎许多幻想。还不仅如此，框架的倾斜的腿把视线引到一些几何点，楼层的荷载应该从这些点传下来（参看图66联合国教科文组织大厦和图67马赛公寓）。实际上，楼层的荷载并没有传到这里，而是传递到外墙上的一行柱子和挑梁端部的一个巨大的纵向大梁上，而另一端将荷载传到竖井的承重墙。框架的转

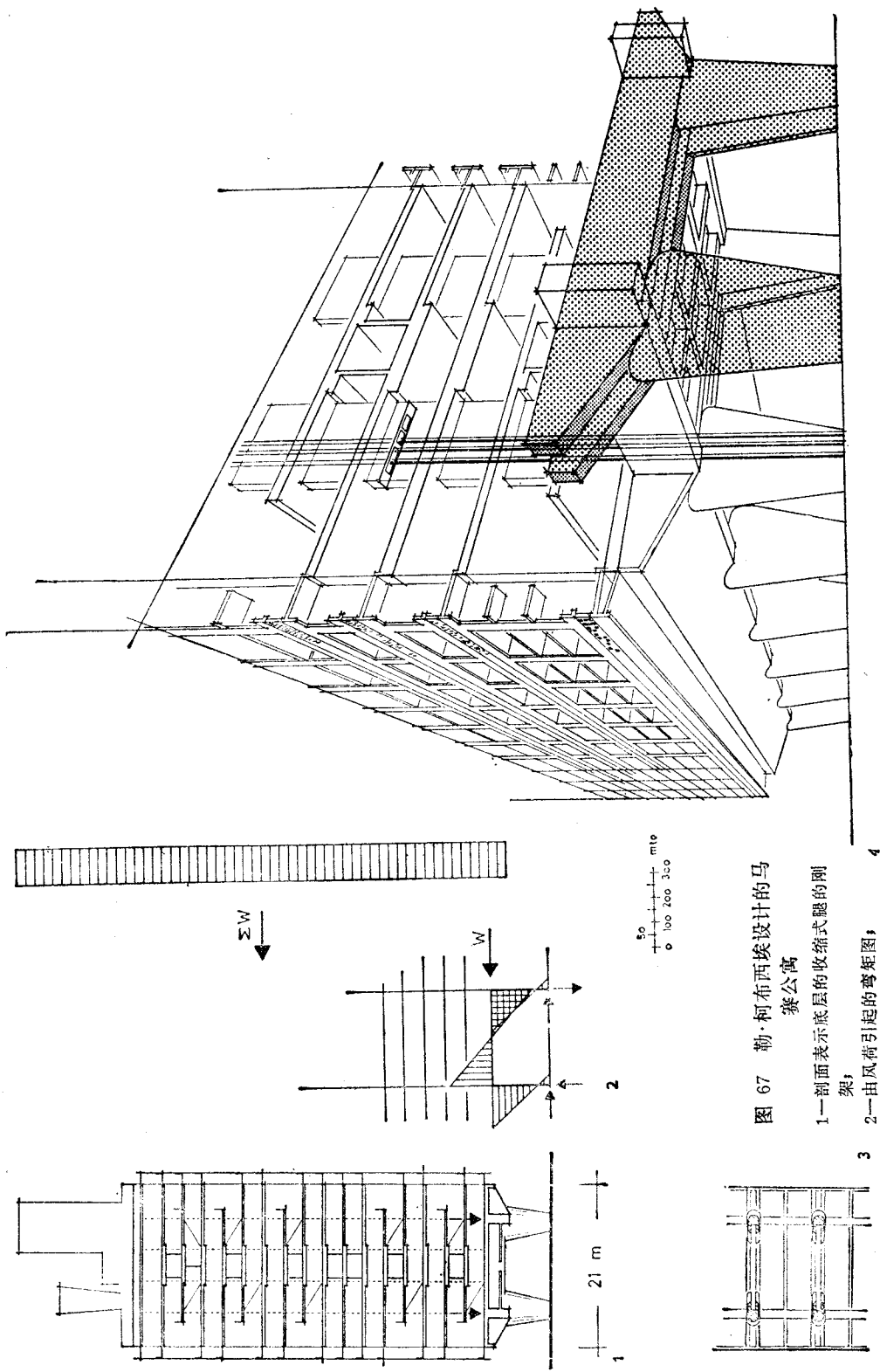


图 67 勒·柯布西埃设计的马
寨公寓

- 1—剖面表示底层的收缩式腿的刚架；
 2—由风荷引起的弯矩图；
 3—平面；
 4—表示设备装置的透视图

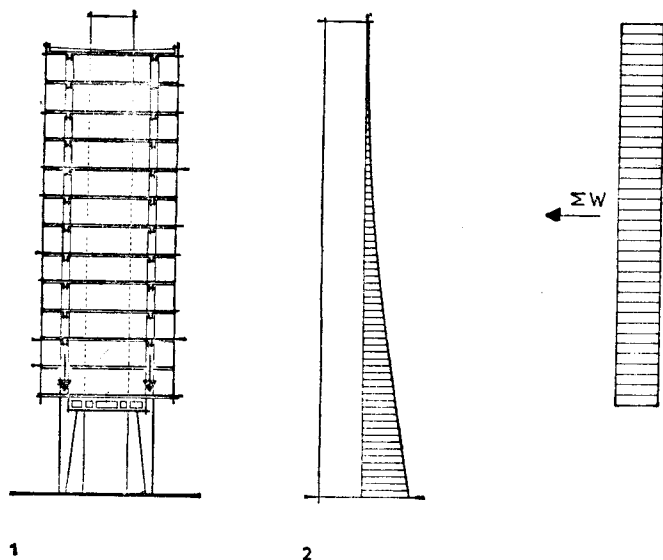


图 68 带有装饰性的收缩立柱的高层建筑

- 1—有孔洞的横梁证明这不是真正的框架；
2—风力引起的弯矩被升降机井和楼梯塔承担

角本来应当是一行柱子的落点，却不承受任何直接的竖向荷载。不论是支座的V形还是柱轴的倾斜，支座的巨大尺寸，或是总而言之，整个框架的虚伪造型都没有任何真正的根据。它们假装具有一个实际上并不执行的功能。交给工程师的是一个暧昧的任务，要他不管顺着什么途径，必须将楼层的集中荷载从挑梁的端部引开，设法传到基础。只要看一看所采用的实际力学系统及相应的弯矩图（图69-3），就很明显工程师如何痛苦地采取了这个方案。这个系统与真正的框架毫无共同之处。最大的弯矩发生在较弱小的挑梁上而框架的巨型腿的尺寸又过大了。好象有一个横梁，实际上等于不存在。

具有收缩形支柱的虚伪框架并不限于大型建筑物中出现，一般的结构也有分，实际上，纯形式主义的V形支座在后者中更占优势。事关原则，促使我们再举几个典型例子。我们已经阐明框架的支柱与横梁之间具有刚性节点的极端重要性。这种连续性对真正的框架作用是带根本性的，缺少它而将支柱收缩是毫无意义的。无论如何，当横梁没有支柱那样的刚度，或者根本没有按照横梁设计（图70-1）的时候，不管将支柱怎样地收缩，框架的作用也永远不会产生。图70-1的V形支柱具有铰接支点，暗示这是真正的框架，而这个印象是欺骗性的，支柱的底端实际上是固定的，并且是固定端产生最大的弯矩。支柱的固定性独自保证结构的稳定性。相对薄的顶板绝不能起框架横梁的作用。造型与功能是互相矛盾的。

图70-2的阳台支柱形式就使人产生误解，全部刚度都在主体结构中。实际上支柱与阳台板之间不存在结构的连续性，因为板太柔软不能从很坚强的支柱那里吸收任何弯矩。况且，在这样的薄板中安排不下很多钢筋。因此，V形支柱就丧失了结构的意义。它完全是虚伪的，只能算乱学时髦。

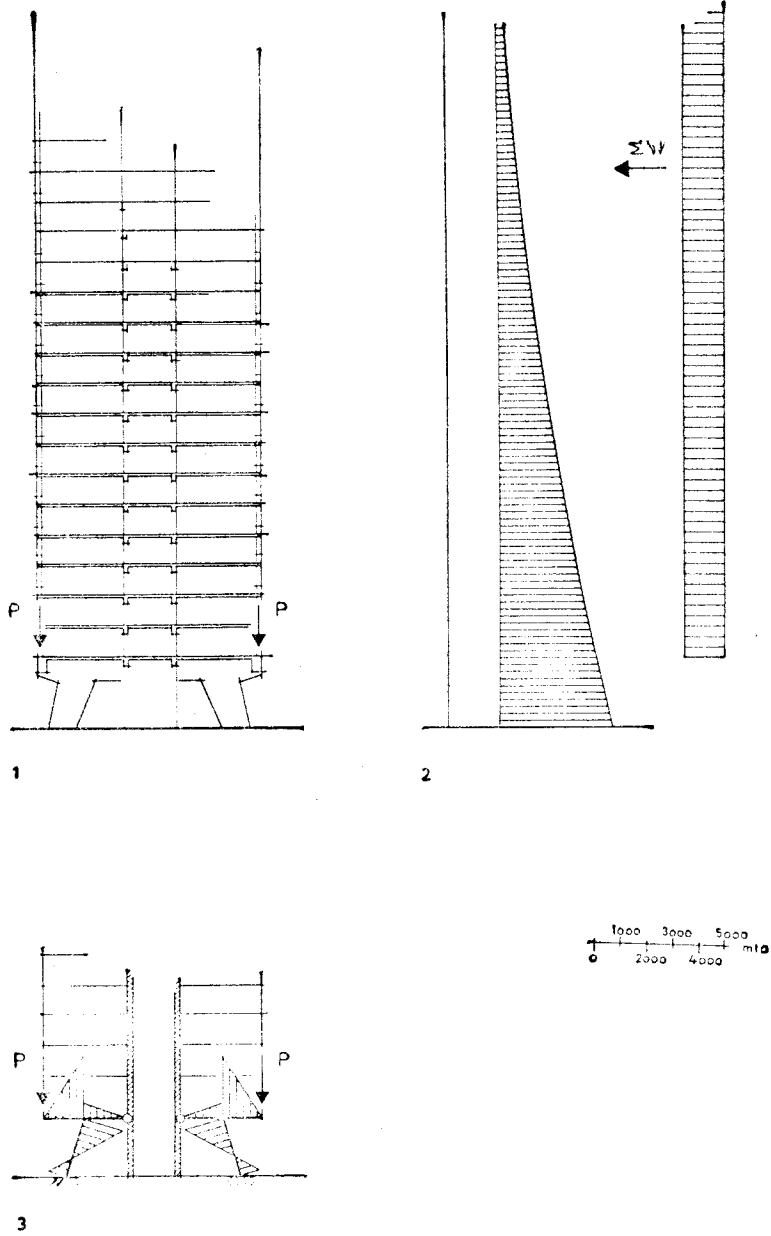


图 69 具有伪装抗风排架的一个高楼

- 1—竖向荷载并不直接传给最合理的点即斜柱的顶端，而是由挑梁的端部承托；
- 2—由风力引起的弯矩被升降机井所承当；
- 3—由结构图形和弯矩图表示出，在这种情况下采用V形柱的框架是没有必要的

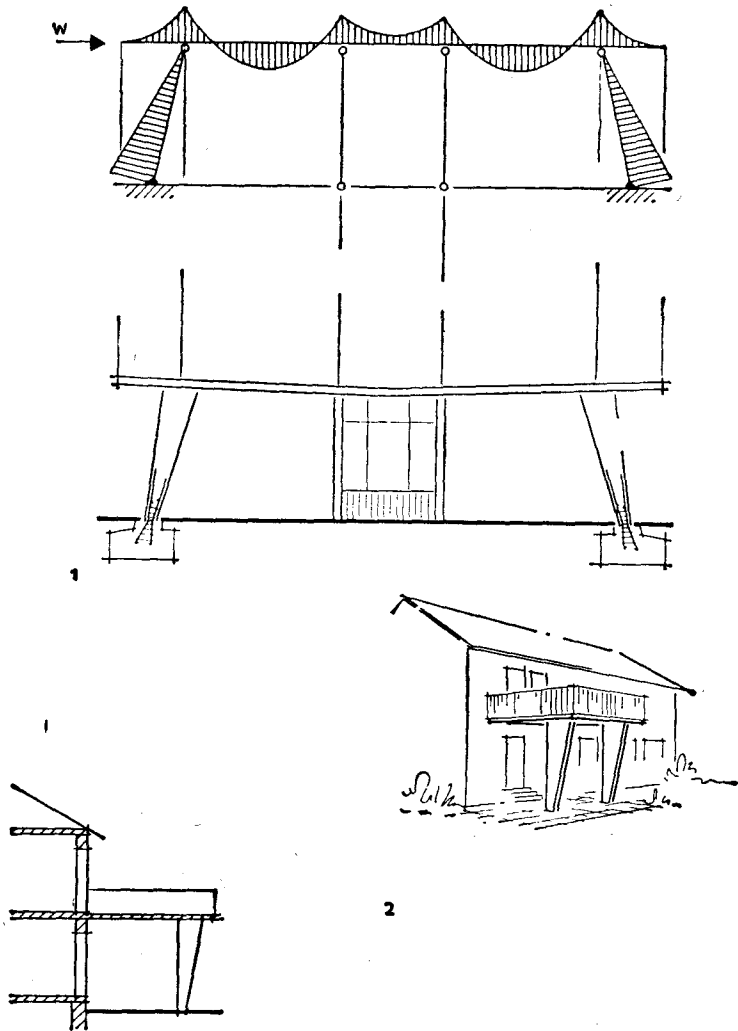


图 70 虚伪的V形支座

- 1— 在收缩形支柱与薄顶板连接处不可能建立刚性节点，柱脚固定，造型与功能是矛盾的；
 2— V形支柱承受一个阳台薄板，只是技术上的形式主义

图71-1所示的大厅有许多收缩形的支柱好象是刚架的腿，而刚架的真实性是可疑的。如果是的话，两个方向跨越是不合逻辑的。沿建筑物的长边安排V形柱就足够了，而另一方向完全不需要支柱。两个方向布置V形支座泄露了纯形式的追求。一个不懂得框架结构意义的建筑师可能很随意地在各立面上均布置V形支柱作为装饰构件。

既然可以沿着建筑物的长边与短边不分青红皂白地用V形支柱来装饰，而非执行任何相应的功能同样也有用来装饰墙角的（图71-2）。如果建筑物的直角两向出现类似框架，那么角上也就只有放上一个对角方向的框架了，可是单就对角线框架的想法来说，本身就是荒唐的。V形角柱是披上技术的外衣来取得装饰的效果，这种手法产生的恶果是混淆了

原本应该采用的明朗的结构形式。图71-3是一个建筑师做作地用V形片装饰顶层的立面。这是不动脑筋地从V形柱的语言中借来的一鳞半爪，它仅仅表达了一个既虚伪又窒息的“宏伟性”的感觉。图71-4的一般二层楼房用V形柱装饰立面也没有增加它的美感。剖面上更清楚地暴露出这个着重于表现技术的形式主义的愚蠢性。屋面伸到宽顶柱的上面，在柱的宽大上端悬挑出来，微不足道的檐板却由那夸张的过大柱支撑着。

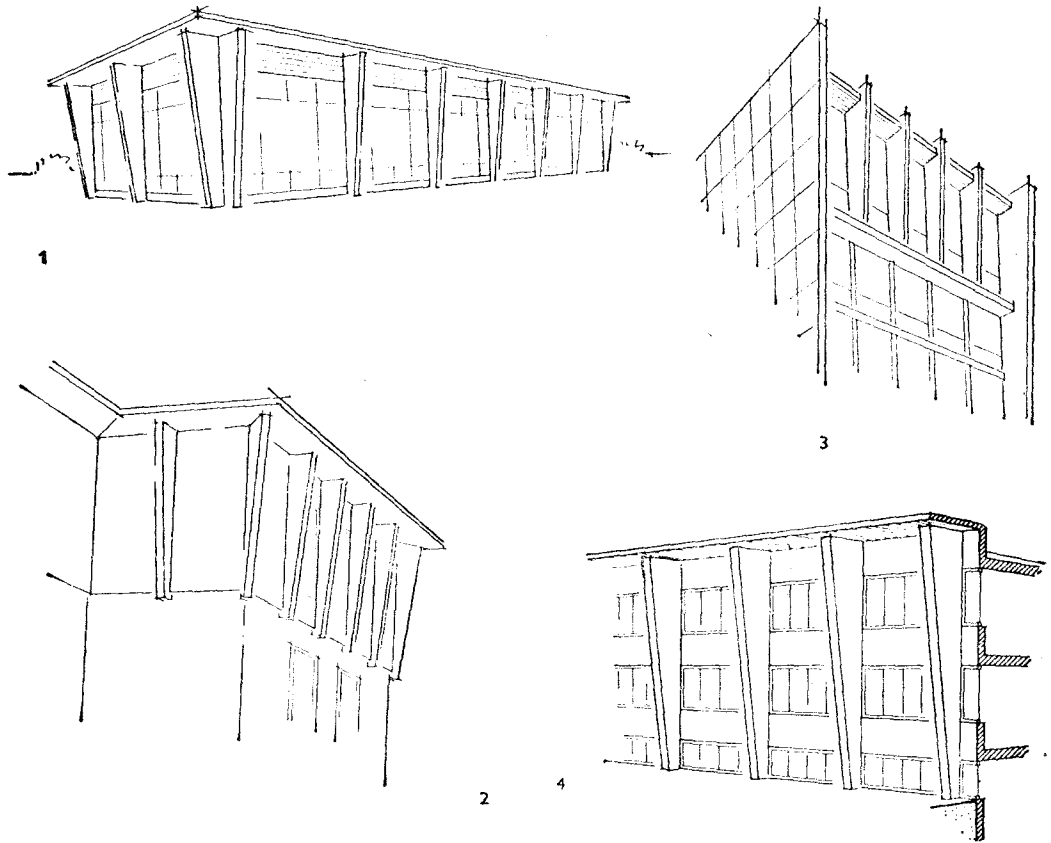


图 71 装饰性的V形支柱

- 1—按照真实框架结构的概念，V形柱应布置在建筑物的长边，短边不应当有柱；
- 2—如果转角的V形柱名符其实，表明框架的跨向应是对角方向，可是荒唐的是，其他的V形柱却又表示框架的跨度垂直于建筑物的两面外墙；
- 3—V形柱用来造成一种虚伪的“雄伟感”；
- 4—画蛇添足的V形柱

独立的V形支座

前一节阐述了V形支座，作为框架的腿，它的形状是由功能确定的，不然是冒充的框架。现代V形支座是点的支承，表示在铰接的底端不存在弯矩。如果没有框架作用，一个孤立支柱的稳定性要依靠底部的坚强锚固。要有巨大的基础才能竖立起来。侧向力，例如风力，产生弯矩，最大值在基础处。因此，很自然地将柱底做得非常宽大。桅杆、塔、标杆和烟囱（图72）都相当于独立柱。在大自然中可以找到这个“结构问题”美满的答案，那

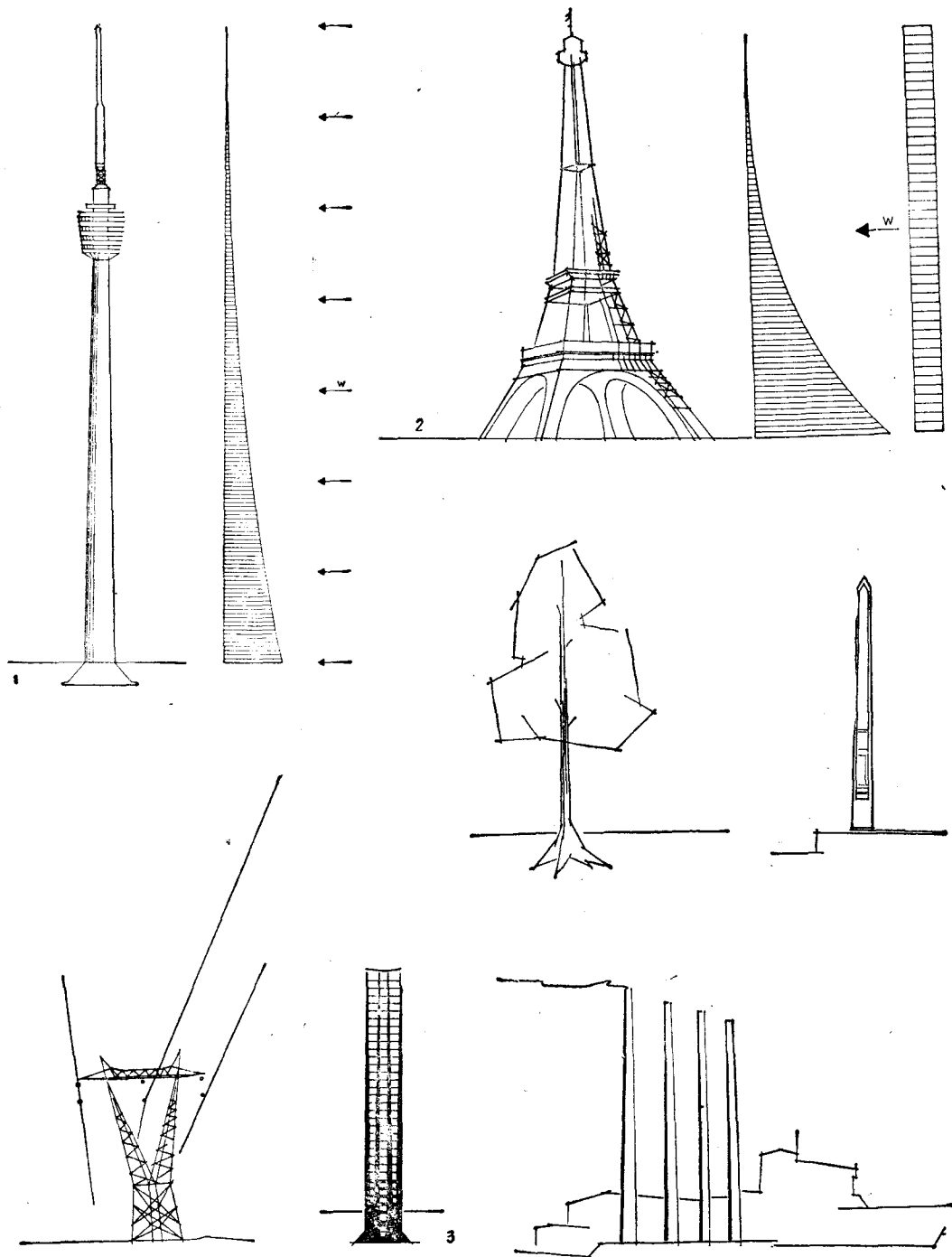


图 72 倒V形适宜于独立的塔和桅杆，因为宽大的基础提供有效的锚固

1—德国斯图加特电视塔[20]；

2—巴黎的埃菲尔铁塔；

3—意大利米兰的皮雷里(Pirelli)大楼的剖面[21]

就是树木的生长。工程师也只能希望做到这种程度。埃菲尔铁塔和斯图加特电视塔[20]就是工程师最突出的成就。将这两个结构物的造型和风力弯矩图相对照结构的原理是明显的。米兰的皮雷里(Pirelli)大楼从剖面就看得出整个结构物是如何受到这一概念的启发的。因此,在没有框架作用的地方,倒V形还是合理的。从宽大的底部及坚固的根基,立刻令人回忆起古代的扶壁(参看图52至图54)。

如果不是在实践中经常被忽视的话,这个独立支座的简单问题至此已经谈完了。

月台和加油站雨棚支承在向下收缩的支柱上,可是它们的作用很明显是和独立支柱一样的。如果一系列孤立的支柱一个紧靠一个地排成一排,就不能和刚架结构混为一谈。从图73可以明显看出,V形的平面没有框架作用,支柱的作用都是独立的。即或在纵向即垂

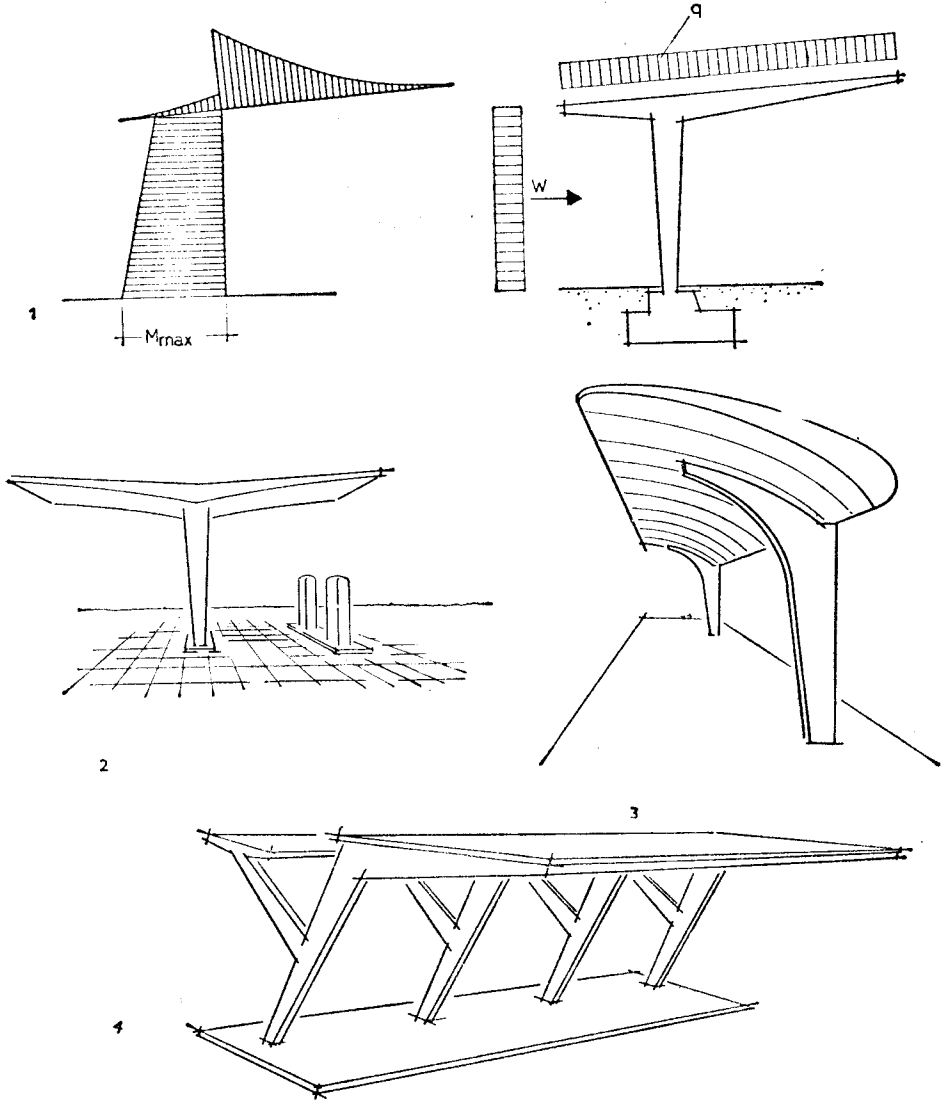


图 73 独立的V形支柱

1—下端固定的独立柱,弯矩逐渐向上减小;
2、3、4—各种形状不恰当的独立柱,下端都有虚假的铰

直于纸面的方向有框架的作用，但是它对结构的侧向稳定性无关。在横向即V形作用的平面，稳定性完全决定于下端的固定度。图73-2和图73-3的V形支柱孤立地起着作用。如果下端是真正的铰接，结构将是不稳定的。实际上，这样的结构不会倒下来，就是因为下端不是真正铰接的。相反地，柱底截面缩小处的应力最大。在实践中，这些地方的截面尺寸是根据刚度需要的，整个结构由附加配筋保证它的稳定性。虽然如此，外形和力学性能是互相矛盾的，它就不是一个真诚的结构造型。

图74一系列简图说明这个论点。典型的两铰和三铰框架是稳定的。一对T形架可用铰接形成三铰框架，单独的T形架，必须外加一个支点，在一边撑住或在另一边拉住都可以使它稳定。由于下端是铰，如果不加支点，就会倾倒。

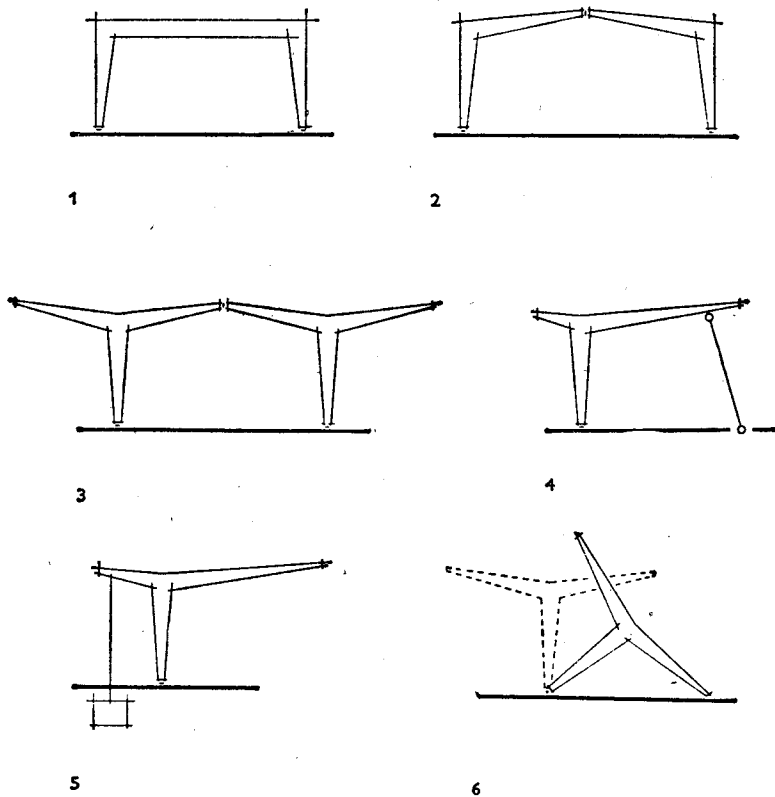


图 74 保证稳定性的几种措施

- 1和2—两铰和三铰框架总是稳定的；
- 3—铰接使一对T形架稳定；
- 4—单独T形架需要撑住，或者后面拉住；
- 5和6—如果下端接点是一个真正的铰，没有外加支承的T形架就将倾倒

图75-1中的结构为一长列T形架用以支承一个长的屋面，如果不是屋面设计成刚性的跨于两道重实体之间的平板或具备其他同等刚性构件，因而不会产生任何侧向移动的话，这个结构也将是不稳定的。不过这时，它不再是一个只靠本身刚度的孤立支柱的问题，而是一个空间结构系统，在这个系统中具有V形支柱和铰接底端的T形架很好地发挥

正常作用。在没有横向加劲构件的情况下，这个设计的稳定性完全依靠每个框架下端的固定程度和下端足够的截面。

怎么能使框架中受力最大的地方做成象铰一样？肯定是方向性错误的构思。为什么我们很少见到能真实反映传力的动态的方案如图75-3？是不是这种方案过于浅显和粗糙？当然许多现代加油站的出挑雨棚，其V形支柱显然是不稳定的，这样的结构肯定不能代表优美的结构造型。但是，它们的外表却能取悦于人。那么这样大惊小怪又为什么呢？任何了解一点结构设计的人都会反对这样的结构，不必多费唇舌。纯粹出于尊重结构原理不能阻止任何人去做他“喜欢”做的事。另一方面，结构原理绝不会因为由于人为结构造型的存在而被推翻，不论它如何地讨人欢喜。

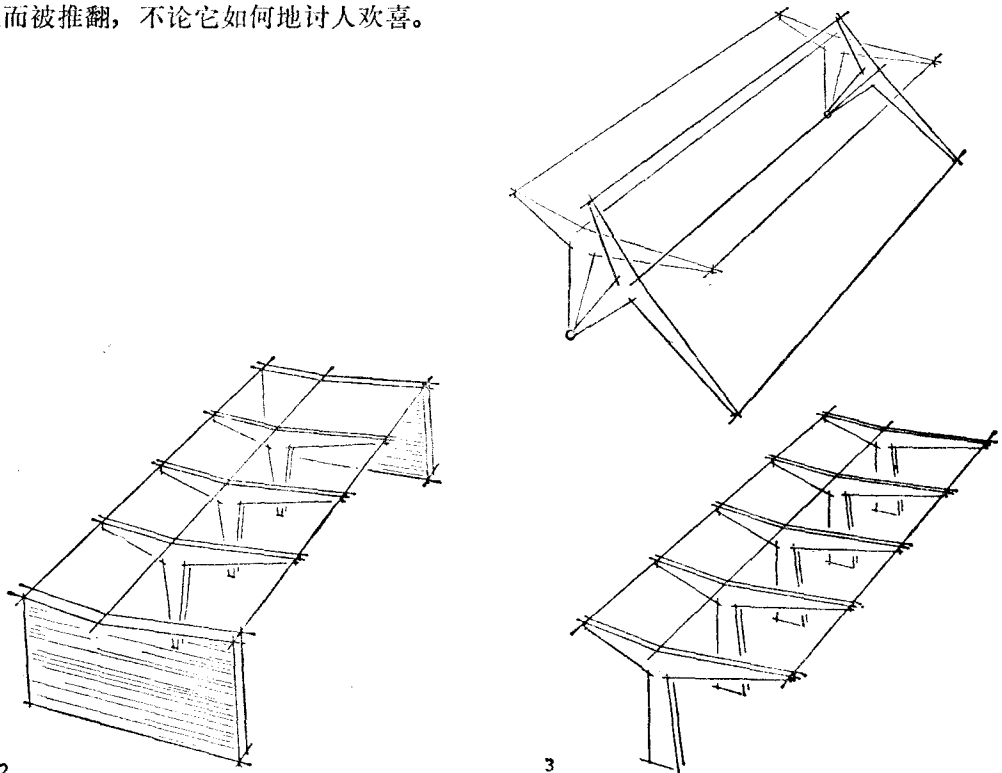


图 75 一系列铰接的 T 形架

- 1—除非外加支撑，否则这个结构将与单独 T 形架一样倾倒；
- 2—将屋面板和两道山墙连接起来，使这个结构稳定；
- 3—将 T 形架锚固于基础

不能不加区别地，凡事都可以采用同样的尺度。对加油站适合的雨棚不一定对摩天大楼恰当。当一个大的结构物平衡在收缩形支座之上时，不稳感就比较明显。假设一个单层建筑物架在一排单柱架上如图76，向下收缩的V形支座的全部问题非常清楚。让我们假定把建筑架高是为了功能和便利，但我们只谈那个铰接的T形下部结构问题。向下收缩的孤立支柱似是铰接的下端，但是，这绝不可能，这样建筑物将会倾倒。这些框架必须牢固地坚强地锚于基础。在弯矩图中最大的弯矩在支柱的底部。在1-1截面的应力达到极限，配筋很多。在2-2截面的应力反而小一点。支柱的上部较宽，并不是由于此处的弯矩较大，而是由于要尽量减少悬臂的长度。支柱的顶部越宽，悬臂就越短，3-3截面的悬臂弯矩也

就越小。减小 3-3 截面的应力是非常重要的，因为此处的应力也达到了极限。这是使支柱向上加宽的真正理由。在这个设计中 2-2 和 4-4 截面的应力比 1-1 和 3-3 截面的应力小得多，所以 2-2 和 4-4 截面的尺寸肯定过大。如果这些截面的强度得到充分利用，框架将成为另外的形状（图 76-3）。大自然也是经济设计师，这是她更赞赏的形状，这样就不致使人担心下端可能会铰接。每个尺寸都与内力的动态相协调。这个设计作为一个整体具有符合其职能的一股生动的力量，然而又体现出稳定感。真实地反映了结构的逻辑性。此处可看出向下收缩的 V 形柱将是多么地不合理，不用它难道在美观上就是那么了不起的损失吗？

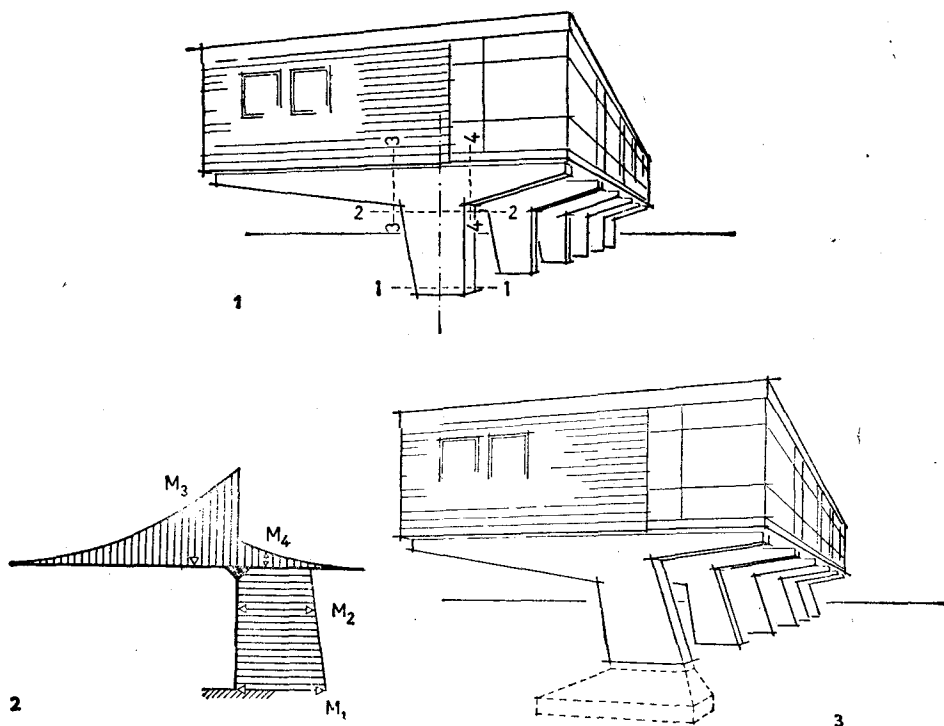


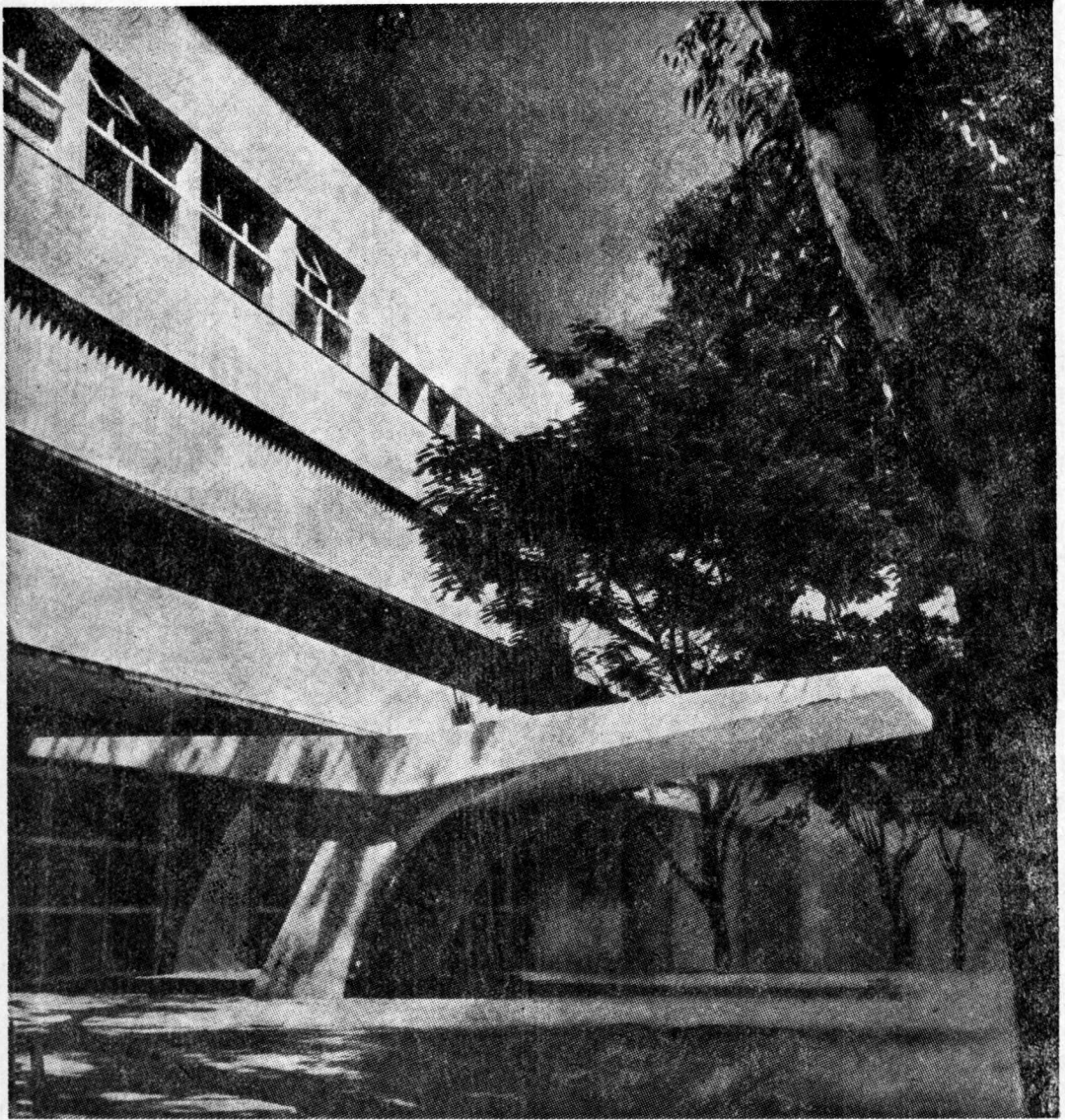
图 76 架在独立支座上的一个建筑物

- 1——眼望去感到不稳定；
- 2——弯矩图表示最大的弯矩在支座底部；
- 3——与力的实际分布比较密切符合的一个设计

偏置的 V 形支座

市区建筑物将底层缩进是有一定理由的。底层一般开向街道，交通和行人（橱窗），起着联系房屋内外的作用。楼层避免街道的照攘而另有用途，所以，将它们隔开是合理的。

这种退缩的想法并不新鲜，而是中世纪木构架常见的特色。结构方法和建筑细部的限度，在尺度上都是技术性“正确”的，这是木工朴实古老艺术的特点。现代框架结构这种惯常的约束是少见的。



照片：在巴西，卡塔瓜塞斯（Cataguazes）一所学校入口处雨棚[22]
建筑师：奥斯卡·尼迈耶（Oscar Niemeyer）

按照跨中的最大弯矩而设计的搁栅，将承托由上面偏置的一层楼面传下来的悬臂荷载，如果挑出的长度“ a ”保持在合理限度之内的话。古老的房屋，“ a ”的尺寸一般小于梁的高度“ h ”。这个经验估计法一般可以使悬臂能承受好多层楼的荷载。楼面搁栅和墙肋也比较密布。如果墙筋不是直接落在搁栅上，那就要利用槛将荷载均匀地分布到整个楼面上去（图77）。

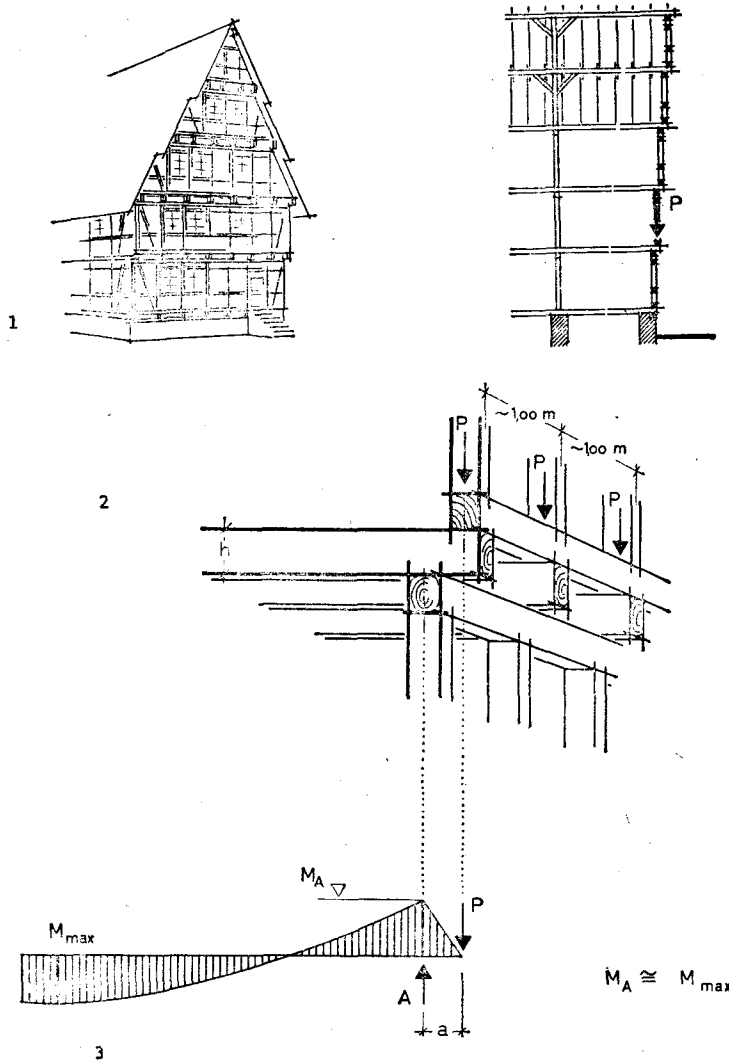


图 77 露面木构架房屋中，逐层挑出

- 1—透视和剖面图；
- 2—搁栅端部承受差不多相同的荷载；
- 3—悬臂弯矩与跨中弯矩大约相等时，则有效地发挥了楼面系统的强度

钢筋混凝土结构柱距可以大一些。每个支柱承受的荷载的增加大约与柱距成正比。荷载不再是均匀分布在楼面的外缘，而是集中在柱底狭小的区域之内。然而在古老的木构房屋中，外墙起线性荷载作用，沿着木搁栅楼面的外缘均匀分布。在混凝土结构中，挑出的

楼面必须承担相隔较远的比较重的集中荷载。但是，楼板抵抗集中悬臂荷载的能力有限，也不能用增加钢筋的办法使板的能量无限地扩大。悬臂楼板的应力随着下列因素的增加而增加；悬臂长度，柱距和楼层层数。对一般厚度“ h ”的楼板，上述的应力将难以处理。这样情况下，就不再是一个密柱距的木构和混凝土房屋那种外墙偏置的问题，而变成个别支柱之间的偏置问题（图78）。

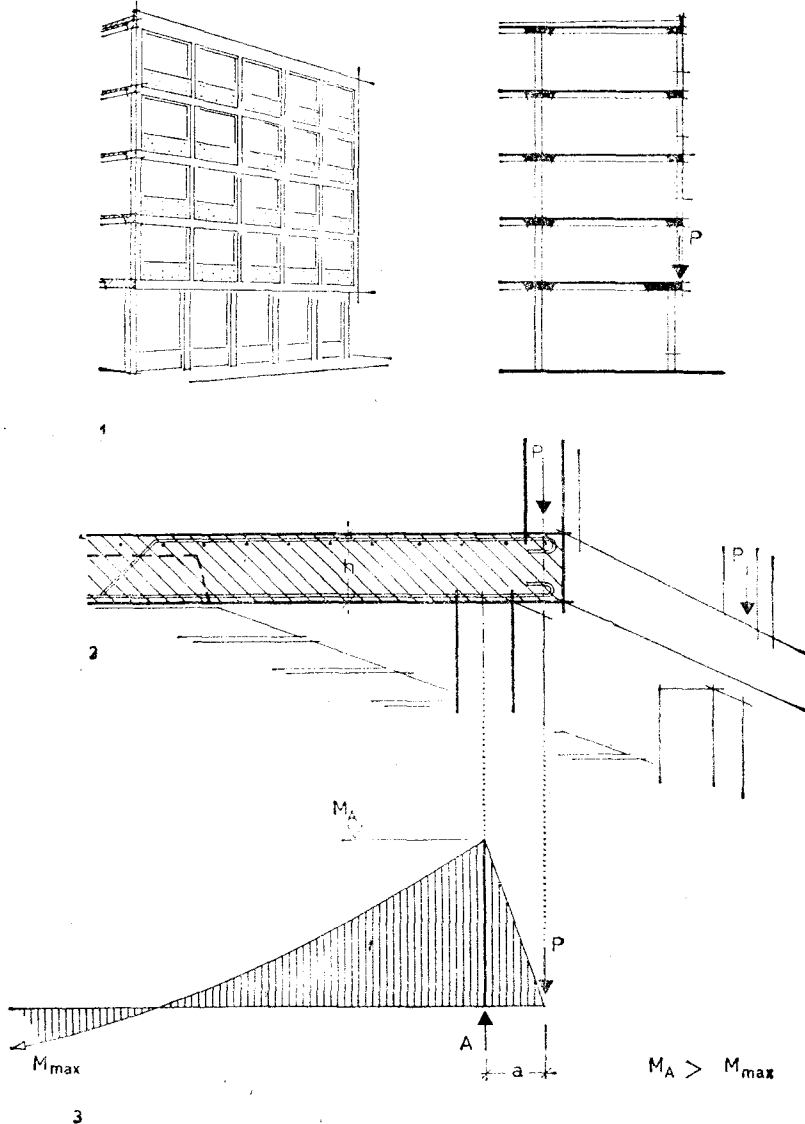


图 78 钢筋混凝土结构中的收进

- 1—透视和剖面图；
- 2—出挑楼板的荷载集中在支柱上；
- 3—悬臂弯矩比跨中弯矩大得多，楼板的局部是超应力的

在这一思路结尾，我们发现一种新的V形支柱（图79）。这种支座一般用于楼层，明显挑出于底层，同时一般强度的楼板不足以作为悬臂来承担柱距较宽的集中荷载时，这种

偏置V形支座必须被拉牢以抵消由竖向荷载的偏心而引起的倾覆力矩，需要一个相等而反向的弯矩以取得平衡。按一般规律，在楼板中拉力被抵消，但是楼板必须拉牢以免发生侧向位移。这是偏置V形支座必备的条件。多层建筑中这些条件经常都能满足，因此，象上述的偏置V形支座完全是合理的。

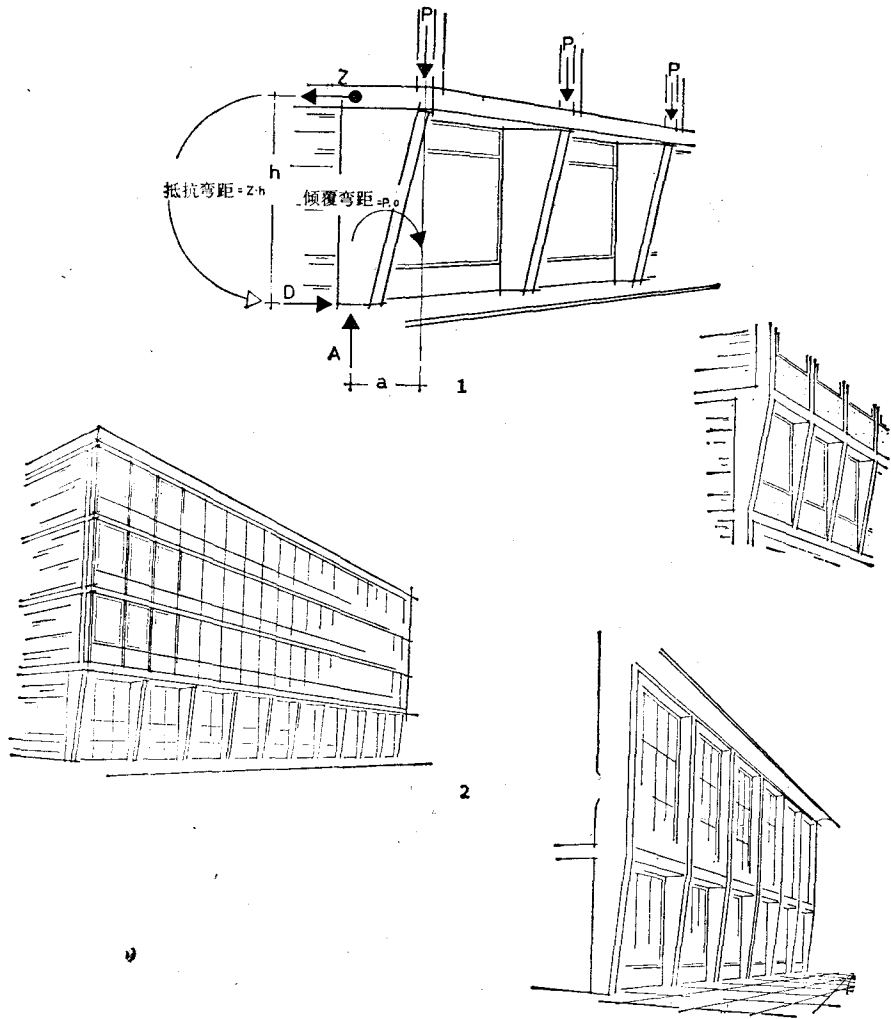


图 79 偏置V形支座

1—偏置导致倾覆力矩，必须为楼板所抵消，
2—一些典型例子

不幸这种偏置V形支座的结构形式经常被人在不理解它的作用情况下加以模仿。图80-1所示建筑底层有V形支座，好象是偏置的。然而，剖面图上泄露出楼层的承重柱实际上与底层的V形支座是连续的，不过荷载传到支座的内缘。外缘没有荷载，但托着一条楼板带以表现似有荷载。这条板带连到建筑物两端折向上与挑檐板相连。形成纯装饰性的“框子”，和工程师所理解的框架毫不相干（参看本书72页）。它仅仅是一个画框。因此，泄露了这个设计的反结构的性质（参看本书第一章61页）。

因为迫近街边，观察者只看到虚假V形支座的前面。但是从建筑的转角看到支柱旁边，如图80-2，那么这个造型含糊不清的性质就暴露无遗了。这里再一次表明楼层实际上并不是偏置的。转角透视显示这种处理是模棱两可的，不合理的。观察者的不安和结构分析者的不满评论是一致的。

图80-3建筑物的入口是用两个收缩形片“建筑性地”加以强调的，这两片不承受任何荷载，上端与屋顶挑出的薄薄的雨棚相接触。图80-4和80-5的愚蠢例子极易看出这种造型的不合理。出于结构上的考虑希望避免柱与楼板之间的刚性联接。为了采用预应力混凝土楼板，必须简支。工程师在柱顶设了凹槽形成有效的铰，建筑师同意这样做，可是没想到他所迷恋的V形却显得无意义了。

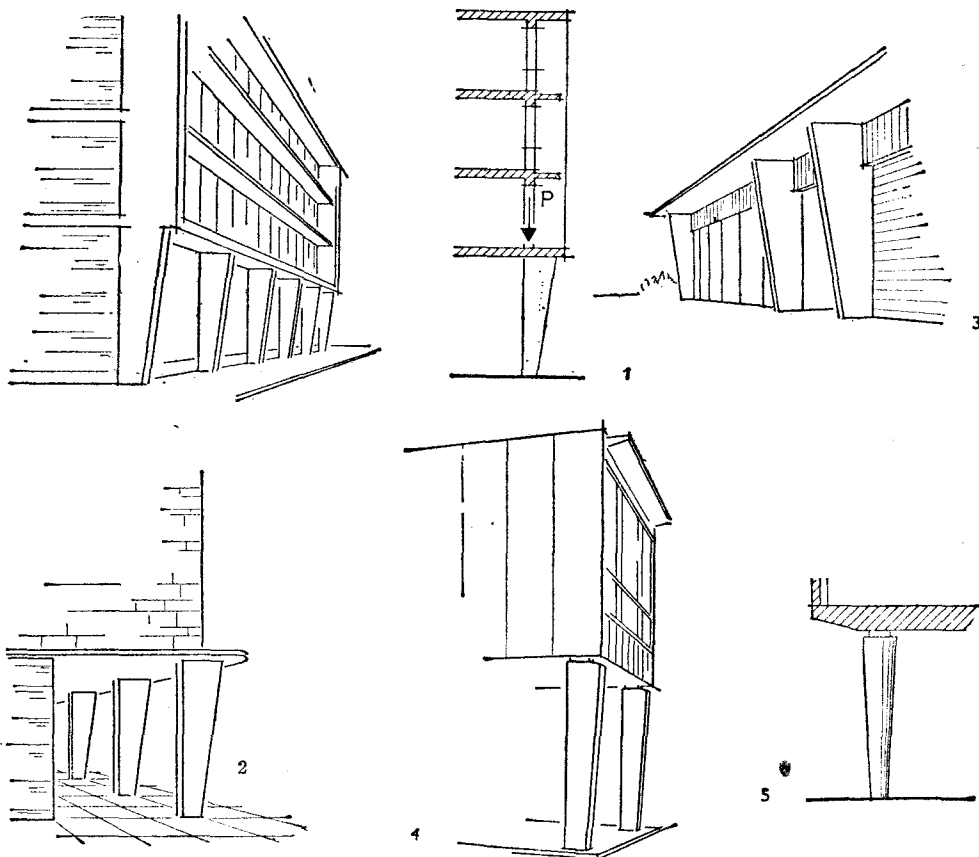


图 80 虚假的偏置V形支座

- 1—楼层荷载传递到支柱的内缘，因此V形在结构上是毫无意义的；
- 2—转角透视清楚地表明V形支座是不恰当的；
- 3—反结构的装饰性的V形支座；
- 4及5—V形支柱的顶端设槽是自身矛盾的

如果两个偏置V形支座方向相对，使荷载分布对称，力将获得平衡。勒·柯布西埃在他的柏林及兰特（Lantes）的高层公寓建筑中采用了这个手法[23]。在这两个建筑中楼板支承在分隔居住单元的承重墙上。如果承重墙一直到地，则有用的空间将不能得到充分利用，而且缺乏观赏趣味。因为在底层墙体的全部截面是超过结构上的需要的，因此勒·

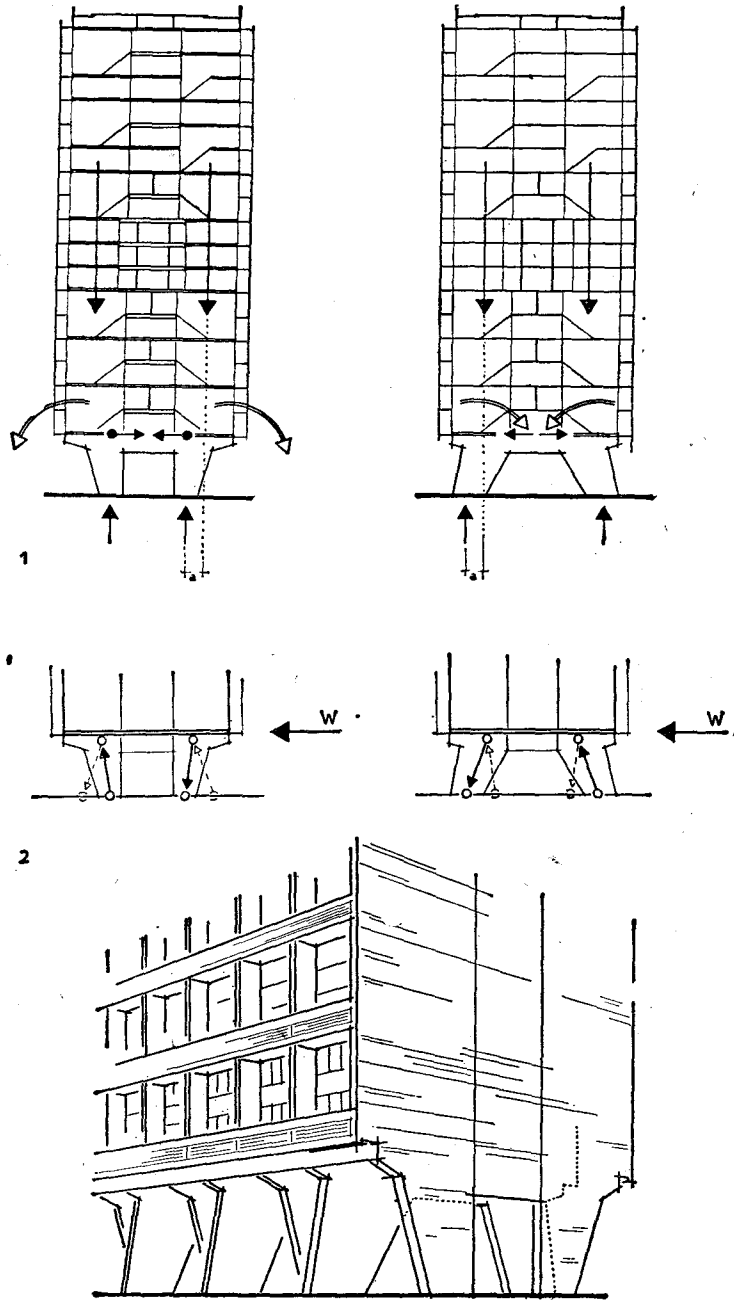
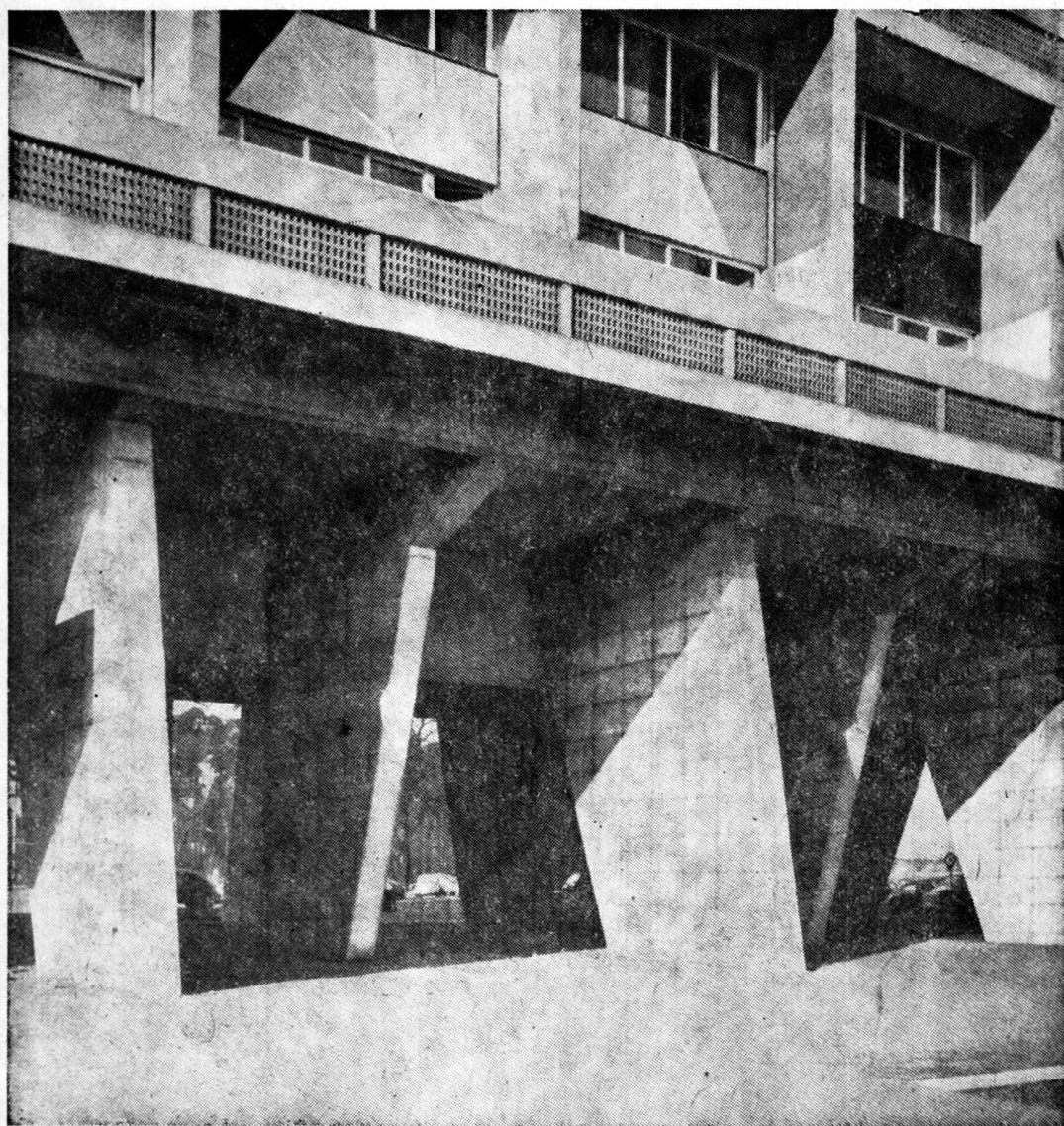


图 81 勒·柯布西埃设计的公寓建筑中成对布置的偏置支座

- 1—向外倾斜的支柱相拉，向内倾斜的彼此相挤；
- 2—相间的成对支座和刚性楼板一起组成一种三角形空间框架，保证了结构的侧向稳定；
- 3—透视图



照片：在柏林架高在倾斜支座上的多层公寓建筑[23]
建筑师：勒·柯布西埃

柯布西埃将墙体缩减成为一系列倾斜片，向内倾斜和向外倾斜相间。这样他开畅了高楼的底层。结构垂直于长轴是对称的，从而向外倾的支座彼此相拉而向内倾斜的彼此相挤（图81-1）。所有的支承构件共同抵抗横向风力，起一个空间刚架的作用。这里向内倾斜片和向外倾斜片相间证明了结构上的用处。如果这些片一个方向倾斜的话，对竖向对称荷载是完全可以的，一旦荷载不对称就不稳定了。在一对墙体之间引进一个能承受剪力的水平构件或者把墙体下端与基础固定，这样就可以取得必要的横向刚度。不过图81-2的结构系统简单得多稳定得多，它的特征是刚性构件组成三角形状。

带悬臂的V形支座

在某种情况下，带托座的支座发展成为一个新的结构单元。同刚架一样，它的效力依靠梁柱之间的结构连续性，只有用钢铁或钢筋混凝土才可能。参看图82的一系列示意图可以明了它的作用。当悬挑加长，倾覆弯矩即增加，支柱的斜度随之加大，这样的比例关系就不再令人满意了（图82-2）。图82-3和82-4所示的形式是从荷载与悬挑的作用完全有机地发展出来的。最后得出的是一个V形支座和一个悬臂。结果，悬臂支承的不再是一个集中荷载而是屋顶的均布荷载。很难肯定，按一般原则，什么时候恰好用那一种形式适当。在不违背结构原理的情况下，形式可以相当自由地变化。但是，一条原则是清楚的：悬臂和支柱的弯矩与荷载及跨度两者都成正比。因此，只有短悬臂才可以承受多层建筑传来的重荷载，而长的悬臂只能承受轻荷载。图82下面的一系列图表示荷载与跨度的关系。

V形支座和悬臂的组合适宜作为背靠着较大结构的雨棚（图83）。雨棚越是与主要结构分得清楚，同时拉结的细部越是简练，就越一目了然，因此，这个设计就更意味深长。如果雨棚与主要结构分得模糊不清整个印象就缺乏明确性。

例如图84的悬臂，究竟是与V形柱组成一个结构单元还是屋面的延续是不肯定的。观察者对此感到不明确，单单这个事实就表明前述设计的优越性。剖面图（图84-2）画出悬臂的配筋伸进屋面结构，所以V形只起装饰作用。

图85为长悬臂与相应轻荷载的几个例子。图85-3为一个轻型风雨棚有两个结构单元连在一起以保持平衡。这是带悬臂的独立支柱，它的结构原理与图83的结构相同。

图86中二楼的深悬臂好象与上面五层非常重的荷载不相称。从剖面图分析这个道理就很清楚了。那片山墙使人误以为所有楼层的荷载都集中在这悬臂上，实际上它并不是一个承重墙，相反，是各层楼面承托着各自一段的；而担负承托的各层楼板是从一排退进的支柱上悬挑出来的。这排退进的支柱的内缘和底层V形支柱的内缘齐平。二层楼面的悬臂不承受上面楼层的任何荷载，也不支承上面楼层任何一根梁。它那收缩的形式是十足的累赘，貌似与之延续的V形支座毫无结构意义，是个典型的虚假的结构形式。本想达到现代风格的愿望，结果仅仅做到一个装饰的外观。有经验的人很容易看出，那样夸大的悬挑所固有的含混性，与这样高度的建筑物是多么不协调。然而外行人理解现代建筑是有困难的。没有专业知识怎能认识如此微妙的区别呢？怎能做出独立的判断呢？滥用结构造型所造成的混乱，特别使外行人无所适从。当他相信结构上必要的造型，结果发现原来是华而不实的装饰品，他将怎样想呢？特别是在他被劝告说，现代建筑的重要原则是反对形式主义之后！

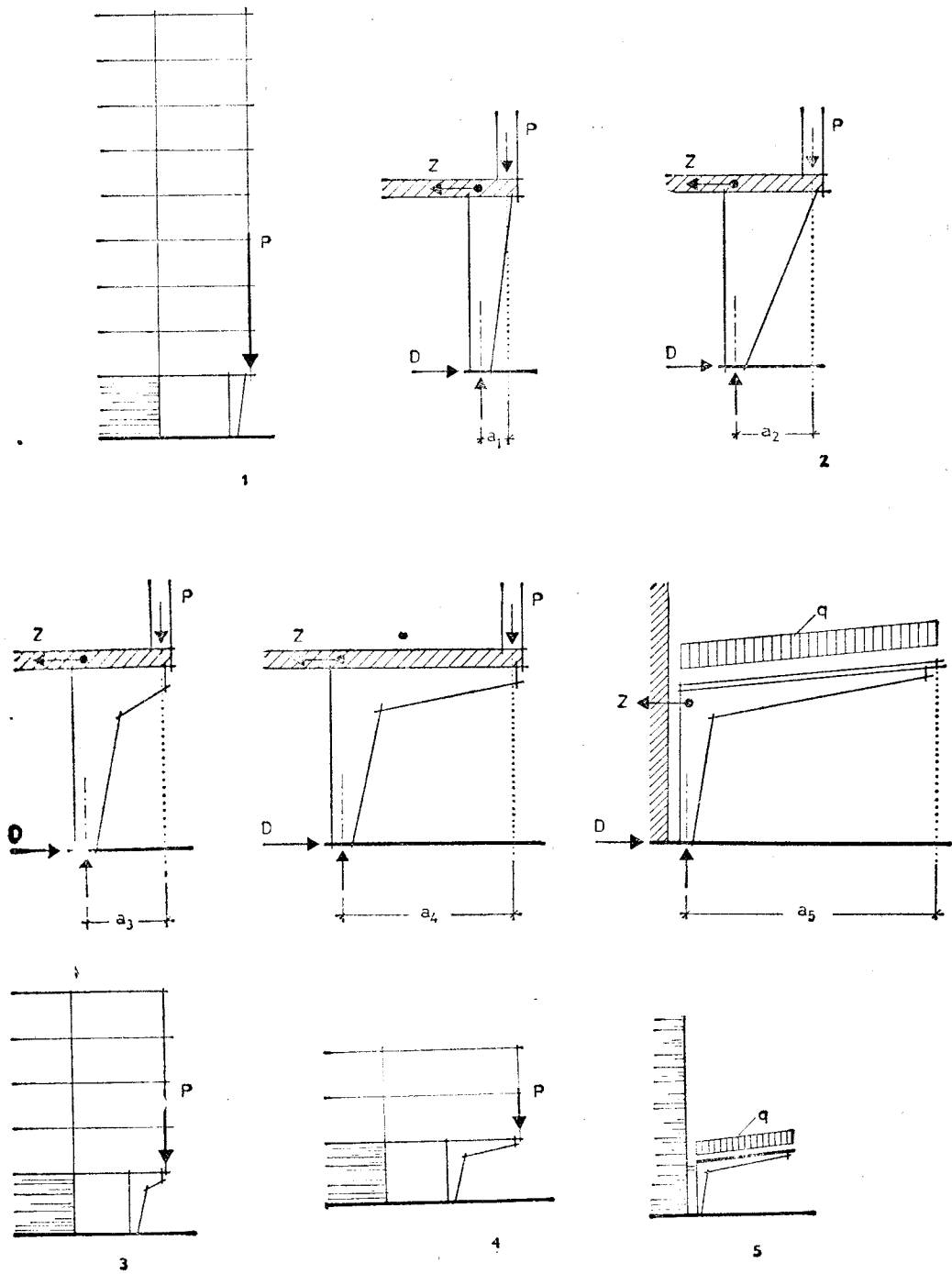


图 82 有悬臂的V形支座

1和2—当偏心距“ a ”增加时，偏置柱的比例变得不那样；
 3和4—“ a ”继续增加就形成带有悬臂的V形支座；
 5—长悬臂只能适用于轻荷载，对多层建筑就不适合

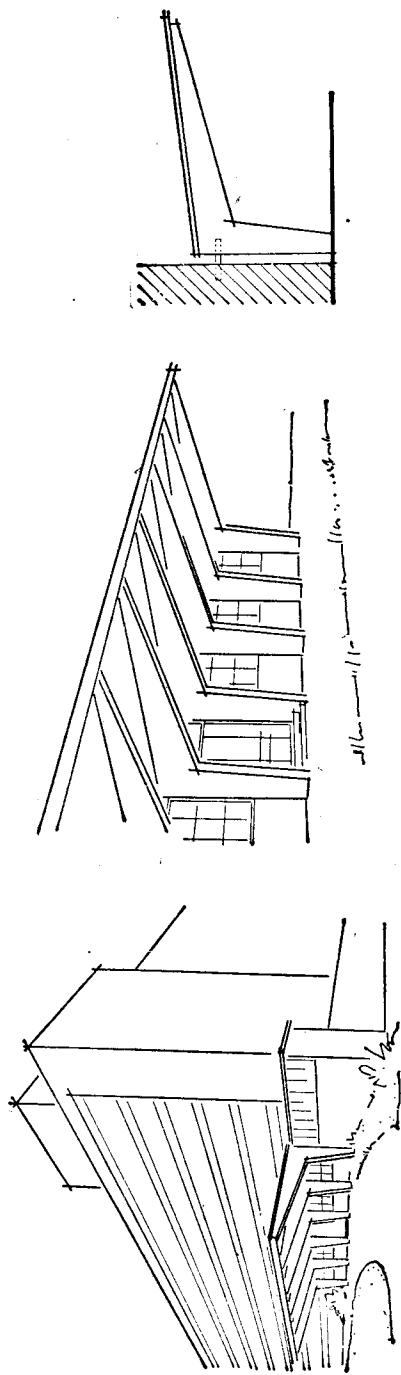


图 83 雨棚简练地与主楼分开，它的结构清楚地表现出来

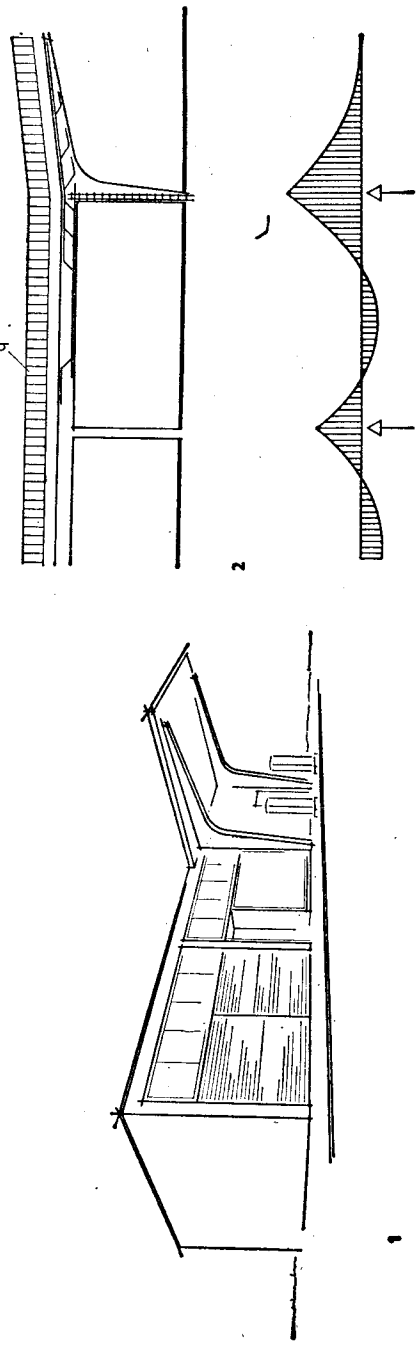


图 84 主楼和雨棚没有干净利落地分开

1—不清楚悬臂弯矩究竟传给支柱还是屋面结构；
 2—剖面图和配筋布置表明悬臂是和屋面而不是和支柱相延续。支柱的收缩是无意义的；
 3—弯矩图

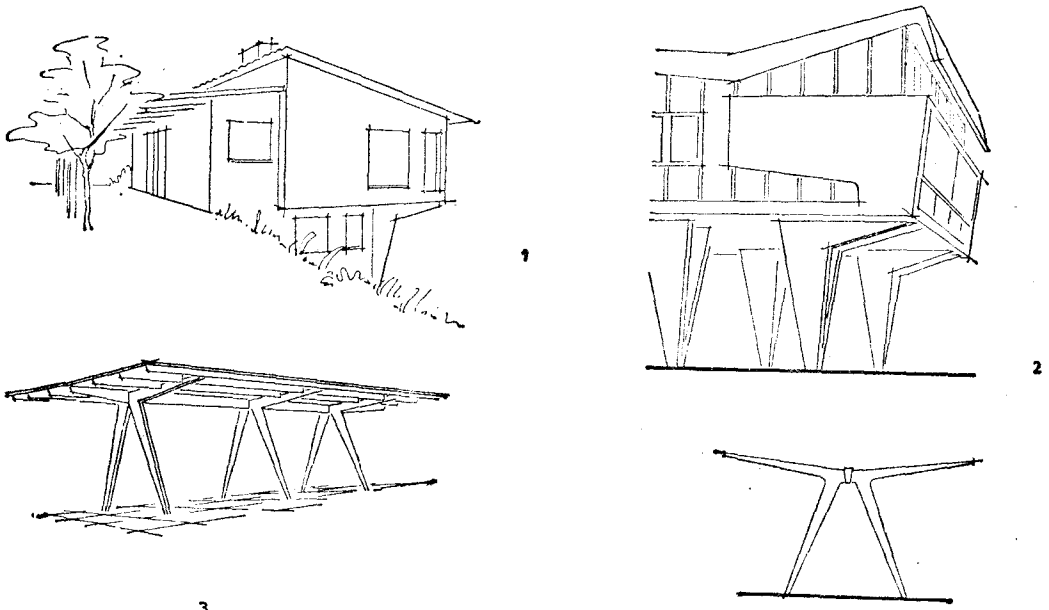


图 85 具有长悬臂和轻荷载的V形支座

- 1和2—悬臂只支承一层楼；
- 3—雨棚屋面的轻巧使这悬臂非常优美

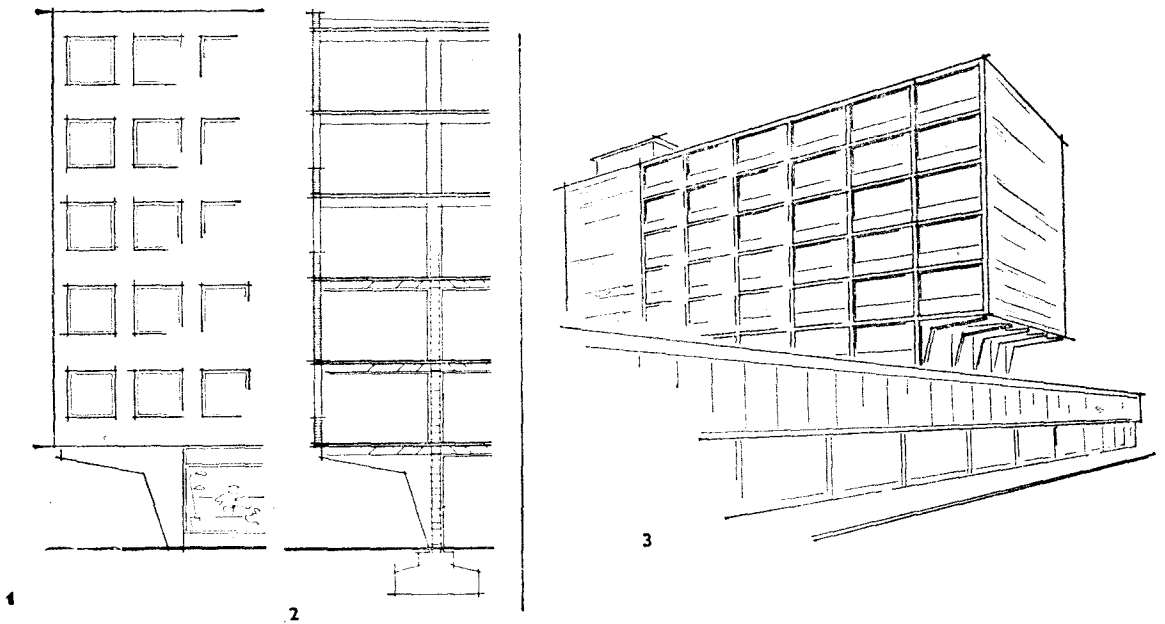
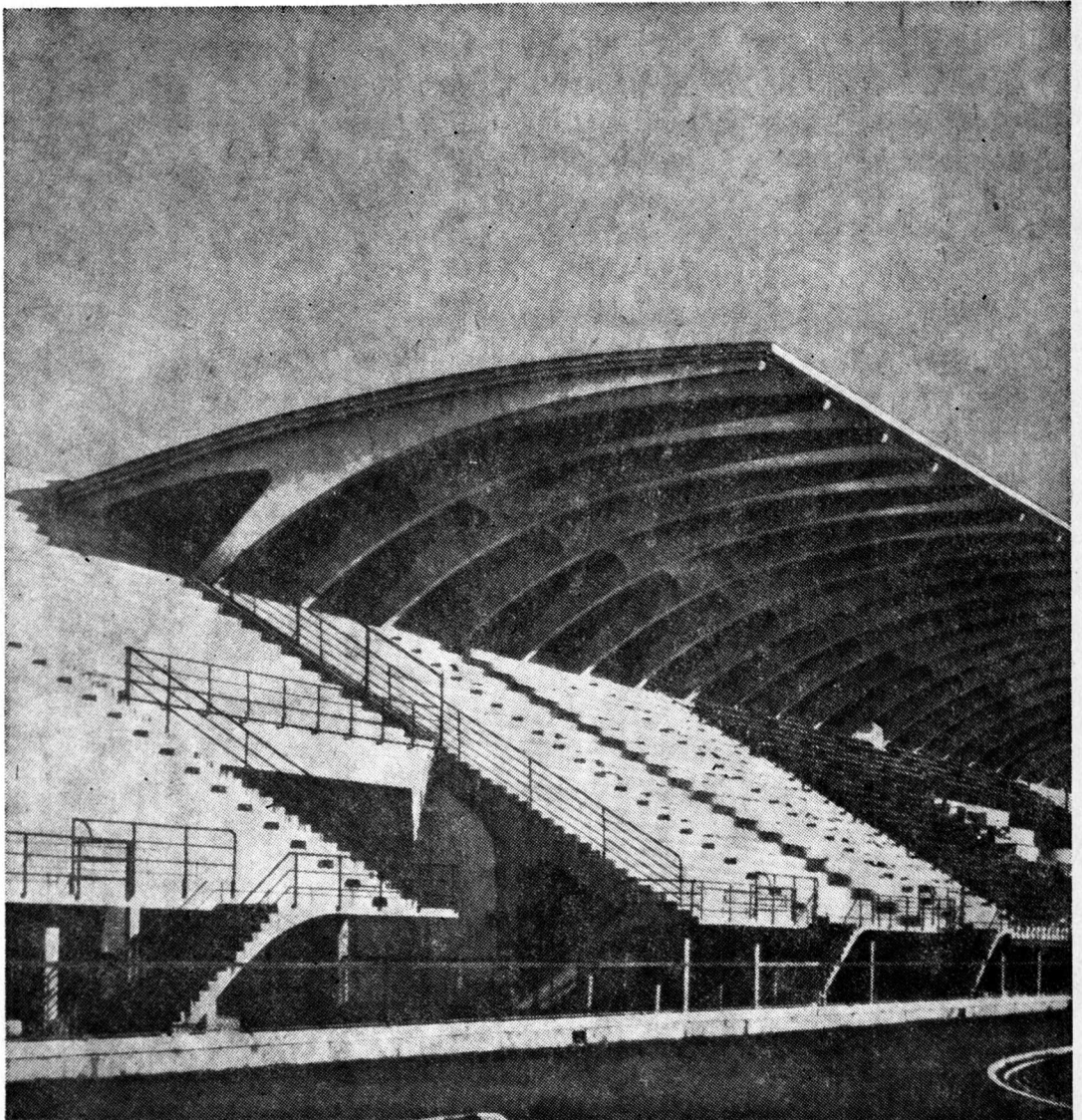


图 86 多层建筑中的长悬臂

- 1—从外表上的荷载来看，悬臂的长度是不合比例的；
- 2—实际上每层楼结构都是出挑的。在第一层楼的V形支座和收缩形悬臂并非严格需要的；
- 3—推测悬臂不承受所有楼层的荷载。悬臂的高度与它所承受荷载的关系不合理



照片：在佛罗伦萨的运动场[24]
工程师：皮尔·路易吉·奈尔维（Dier Luigi Nervi）

运动场的挑棚

前节中曾表明在某种情况下，V形支座适于和悬臂结合。事实上，运动场的悬臂挑棚就是常与V形支座联系在一起的。在这类的许多结构当中有一些是很有影响值得用专节加以讨论的。

让我们从一个在顶部拉住的V形支座和悬臂说起（图87-1）。用前面的压杆代替后面的拉力不影响荷载图和力的分布（图87-2），即或将压杆与V形支座的接触点下移（图87-3），力学系统仍然不变。奥格斯堡（Augsburg）（图87-4）和巴塞尔（Basle）（图87-5）的运动场看台就是这类结构的代表[25][26]。

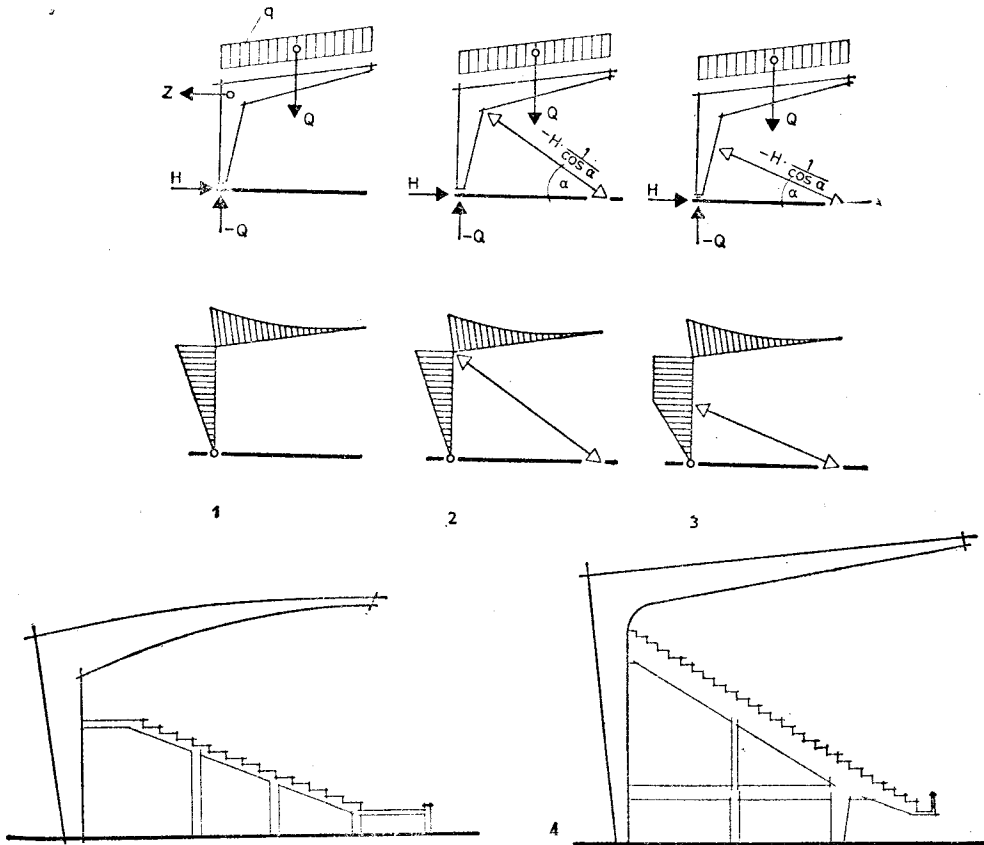


图 87 V形支座与悬臂组成的运动场结构

- 1—刚架可以在后面拉住或者；
- 2—在前面撑住；
- 3—支撑角度减少；
- 4和5—在奥格斯堡[25]和巴塞尔[26]的运动场，撑件也是看台大梁

但是，压杆还另有重要的功能，它可以承受一层层的座席。一方面是原来的单独构件即V形支座和悬臂挑棚，另一方面是倾斜的压杆，现在融合成为新的功能统一体。原来这两个单元只是互相依靠以取得平衡。现在，V形支座，悬臂和斜坡组成一个新的力学整

体，当然，这个新整体需要新的适当的结构造型。显然，图87所示的造型还不能与力的传递动态完全协调。压杆与V形支座的相遇的重要接点尚未充分表达出来。

图88指出这个形式是怎样发展出来的。最初按结构分析建议两种可能性（图88-1和88-2），两者都表达了V形抵抗弯矩的确切性和V形与压杆交接点的重要性。图88-2引进了弯折的支座标志着这个形式已接近成熟。当看台梁即压杆和支座折点以下的一段相结合而形成一个单构件时，出现一个新的形式如图88-3所示。这个系统还是不稳定的，为承受看台座席的V形腿的倾斜部分还嫌太短太陡。将这部分加长并减小坡度就达到运动场可以采用的形式[27]。将结构作为一个整体架在框架上，因而取得了稳定的令人悦服的结构造型。

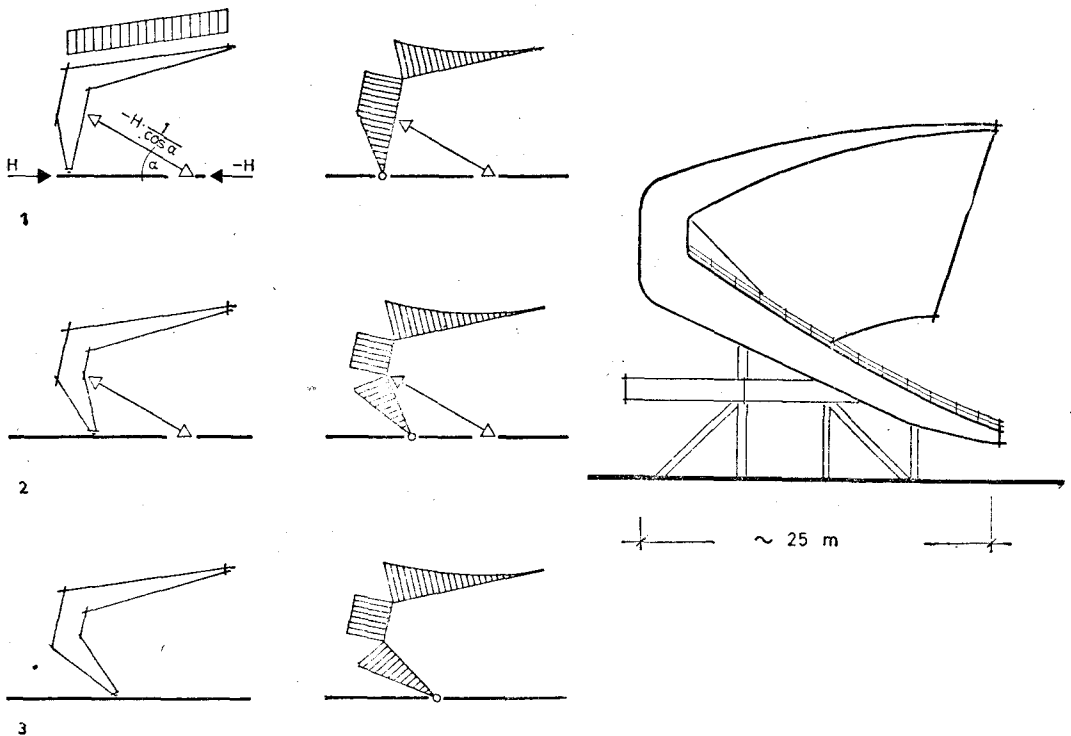
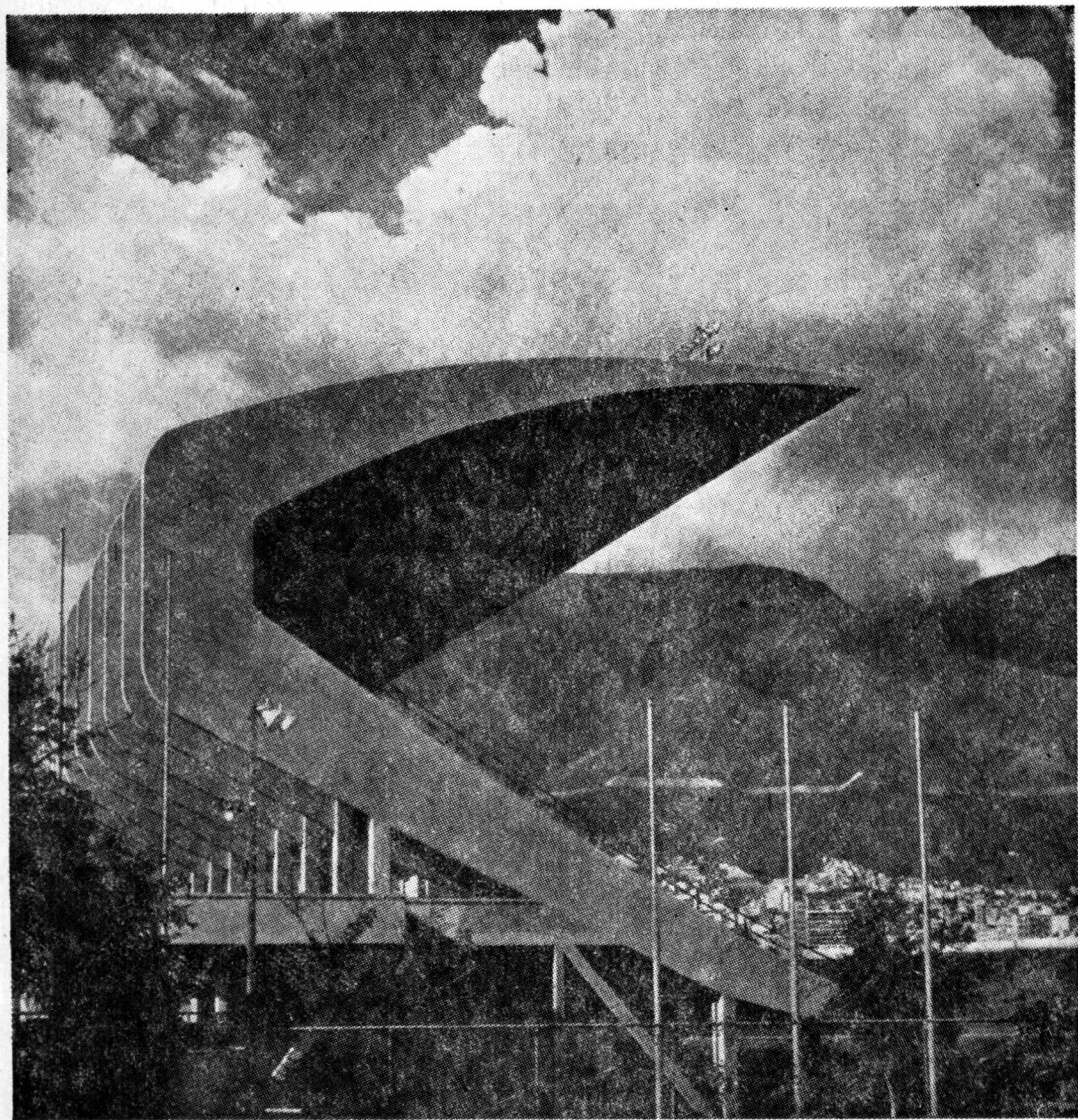


图 88 加拉加斯 (Caracas) 竞技场大看台的设计过程[27]

- 1—V形支座反映弯矩图；
- 2—作成弯折支座强调了支点；
- 3—V形支座下面一段和撑杆及倾斜的看台梁结合，结构基本上仍不稳定；
- 4—将结构支承在框架上取得了最终稳定的形式

图89所示的一系列图提供另外一个重要例子[24]。看台设计的起点和前述基本结构一样，是一个V形支座和悬臂，前面撑住而不是后面拉住。为了理解这个结构，有必要设想组成悬臂和支座的实心片被挖成三角桁架。撑杆保持以前的作用，仍然具有辅助构件的特征。存在主要构件与次要构件之别。还缺乏整体性。为了使设计有条理，将斜杆与撑杆放在一条线上。这样，撑杆和看台梁的作用结合起来了，同时，结构系统的各个构件取得了协调。将悬臂和支座分解成为桁架，这样，弯矩就转化成为上弦的拉力和下弦的压力。结构被划成三角形符合经济原则。如果构件具有必要的高度，采用桁架形式可以节约材料。



照片：在委内瑞拉，加拉加斯的运动场[27]
建筑师：维拉纽瓦（Villanueva）

但是，在上下弦汇成锐角时，例如在悬臂端部，那么合在一起较为有利。这样，最后的设计就不是从形式出发而是逻辑思维进展的成果。关于这一点，奈尔维在他的佛罗伦萨运动场设计中运用得极其完美。这个结构乍看来与加拉加斯的运动场完全没有关系，但是，我们应该承认它们来自同样的灵感，有踪迹可循，而又各自得出独到的成果。这个建筑物的质量在于结构的明确性和材料、造型、功能的统一性。

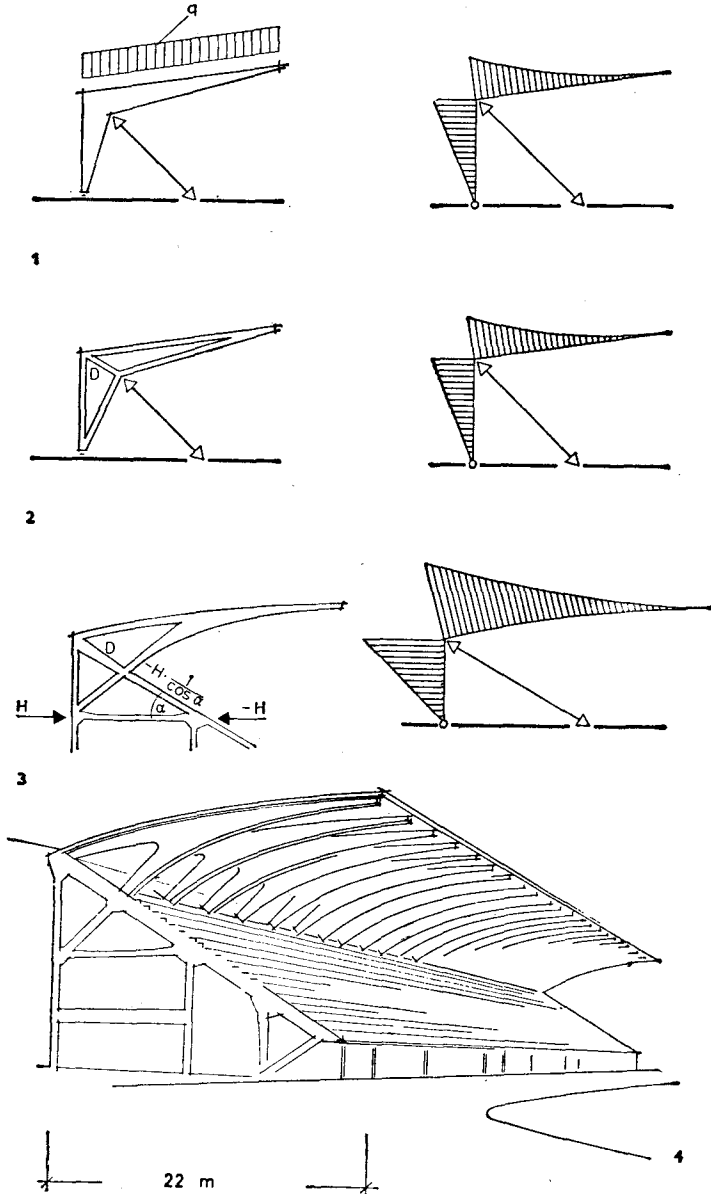


图 89 意大利佛罗伦萨大看台设计的过程[24]

- 1—基本形状是一个具有悬臂及前撑的V形支座；
- 2—将V形支座和悬臂分成三角形；
- 3—在悬臂端部上下弦杆合在一起，斜向看台梁和“D”构件连在一起；
- 4—最后的形式

拉巴 (Rabat) 运动场 (图90) 的看台结构是用另一个原则设计的[28], 令人回忆起已阐述过的铰接T形刚架。图74-5表明后面用系杆拉住使铰接V形柱上的悬臂挑棚获得稳定。设若这个拉巴看台在前面布置一排支柱, 则将遮挡视线, 因此, 采用后面系杆比较合适。即或遇有上掀的大风, 长悬臂是可以保证结构的稳定的。后面短的悬臂的长度恰够遮盖走廊并锚住系杆。V形支座底部有明显的钢筋混凝土铰, 为了在形象上强调结构的重要性, 使铰稍许高出于走廊的地坪。看台所有功能上的和结构上的因素均很自然地结合在一起。

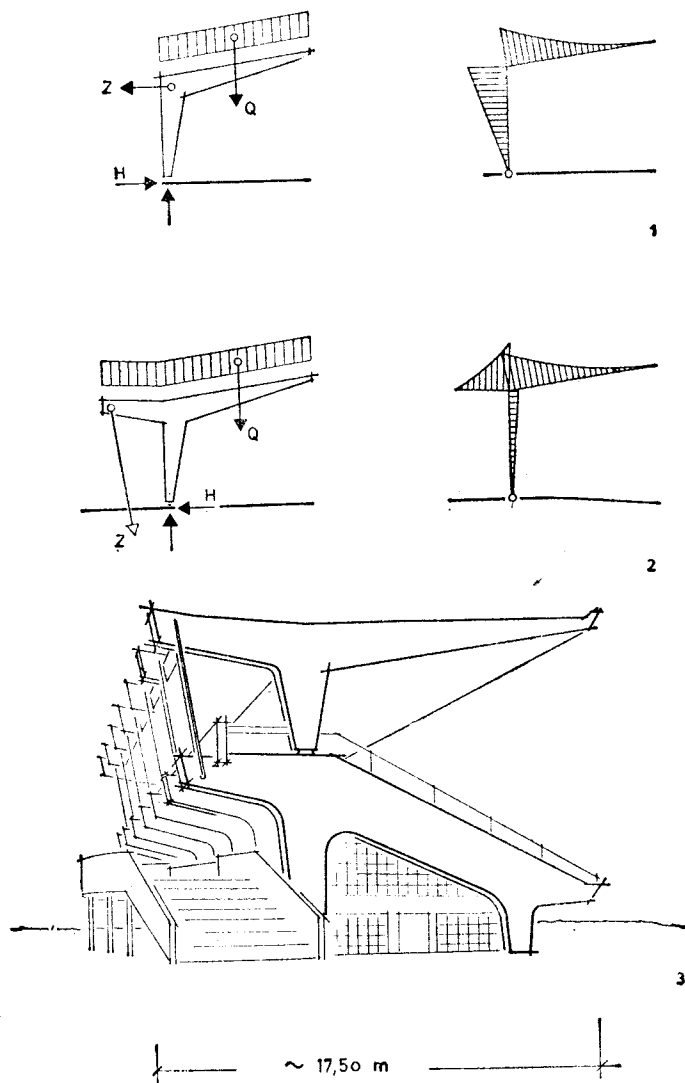


图 90 摩洛哥拉巴大看台设计的过程[28]

- 1—后面拉住使基本刚架保持稳定;
- 2—水平的系杆可以代以连在后面短悬臂上的竖向拉杆, 这个拉杆与荷载保持平衡;
- 3—最后的形式是一种T形刚架(参看图74-5)

叉形柱

奈尔维的大看台设计(图89)启示一个桁架式V形构件的概念。即原则上将悬臂分叉。这种极为动人的屋顶结构可以与任何V形支座相组合,结果就形成一个叉形柱。

很久以前就有叉形柱的原始形式。攀缘植物的交叉撑竿,带撑杆的立柱和桅杆(图55),都是叉形柱。不过这些粗糙的例子又是向下的。在结构造型的新领域中却是反向的,现代的叉形柱向下收拢,也就是叉枝向上。从结构上看,它就是V形支座。但是,这个基本概念是如此富有成效,其运用又是如此之广。因此,另立一节加以阐述,看来还是必要的。

如果我们拿叉形柱直接作为V形支座的变体来看,因而放在本章中,那么,当然它也可以用作刚架的腿,如图91[29]的桥梁方案。这个桥是纯实用性的结构,没有任何形式上的虚伪性。

大跨度,重荷载和桥台的大刚度与桥面相比意味着那矮壮结实的支座中的应力相当高。如果V形支座是实心的,它将是一个庞大的宽与高几乎相等的三角形板。所以用三角形框架代替沉重实心板是有利的。这样弯矩变为力偶,结构清晰地分解为受拉和受压杆件。

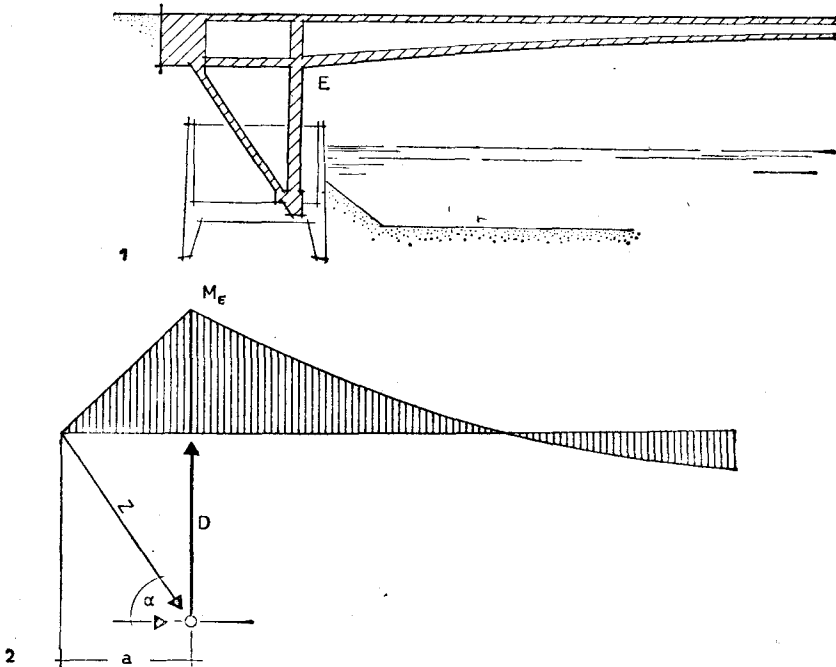


图 91 当沉重的刚架V形腿变为三角形时,叉形柱就形成了
1—柏林的罗尔达姆(Rohrdamm)桥是一个具有叉形腿的刚架[29];
2—叉形腿的弯矩和内力

在桥梁结构中作为刚架腿的叉形柱承受很大的应力。然而,完全同样的形式也用在荷载很轻的家具设计中。唯一的区别是:在桥梁中优先考虑工程问题,而在家具制造中更重

要的是着眼于美学价值。桥梁结构支柱设计是从限制梁高和减小跨中应力出发的，它之所以能够做到这一点，主要是靠那宽的三角形的巨大刚度和它的立于刚性基础上的铰。至于桌子就没有减轻水平构件应力（桌面）的问题存在，更不必去阻止桌腿的横向位移。当桌面挠曲时，桌腿横向屈服，然而，横向刚度还是非常重要的。家具设计师只要用叉形桌腿与桌面形成的接点类似刚架的转角（图92-1）就很容易地取得横向刚度。

框架结构的基本原则对桌子（图92-2和92-3）是适用的。如果桌面太薄，即使用叉形腿也不能使长桌刚劲。首先，桌面（水平构件）与桌腿（竖向构件）相比过于柔软，其次，桌腿的下端（框架的铰接端）不可能固定在光滑的地板上。

从桌子设计上也很好地表明三向稳定性的必要性。过去讨论过的基本结构都是“平面”结构，就是说只作用于二向（长与高），在平面结构中默认第三向的稳定性要由另外办法来保证，不在所谈的结构范围之内。

桌子是一个简单而醒目的例子，表明一个叉形支座对与它的作用面成正交方向的刚度的影响是多么小（图92-4）。叉形柱在一个方向提供很大的刚度，而在另一方向几乎没有。为了弥补这个缺陷，家具制造业发展了一种两个方向都有效的叉形腿的变体（图92-5）。

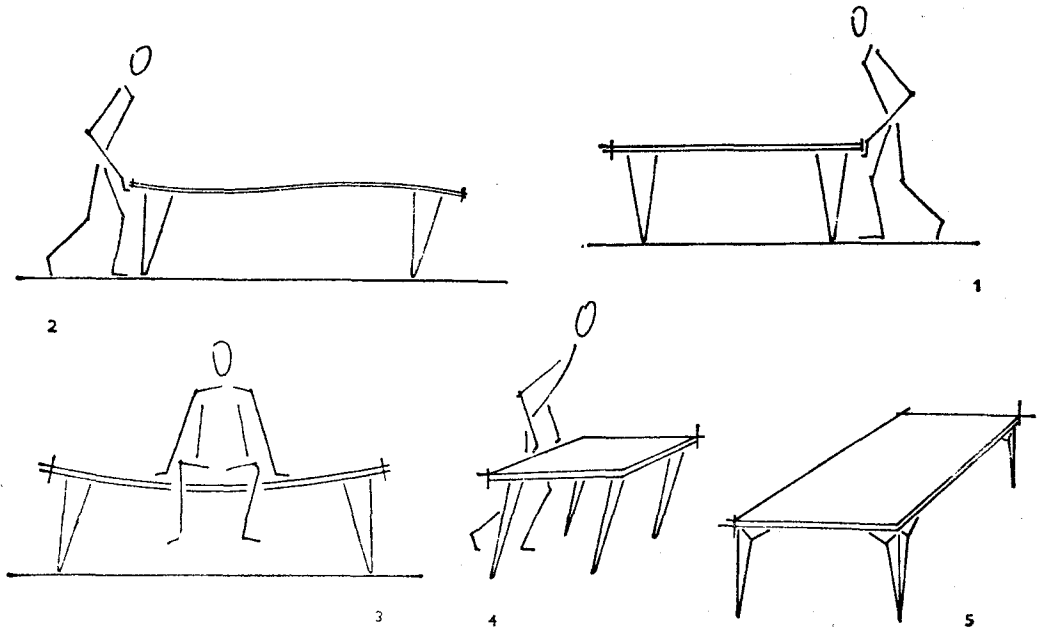


图 92 具有叉形腿的桌子清楚地形象化地说明刚架结构的基本法则

- 1—叉形桌腿顺叉形作用面对桌子提供很好的刚度；
- 2和3—如果桌面太长太薄，即使是叉形腿也不能使它稳定；
- 4—叉形桌腿对与本身作用面正交的方向不能阻止变形的发生；
- 5—双向都是叉形的腿才能使桌子多向稳定

和许多结构形式一样，叉形柱也可能被用来纯为取得装饰效果。由于忽视了真实结构意义，使许多商业建筑、学校、旅馆入口处的雨棚结构带有很不自然的特征（图93）。

例如，我们经常看见叉形柱与建筑物相垂直，似乎表现加强的作用，实际上是画蛇添足。建筑物本身远比叉形柱刚劲，再者，雨棚一般太柔软，绝不是作为刚架的水平构件，

图 93 与图 70-2 比是多么相似。结构上，此处的叉形柱与阳台板下的 V 形支座是同样不恰当的。许多情况下它的朝向、位置、叉枝、夹角等都不发挥什么作用，而是纯粹为了装饰效果。然而，叉形柱主要是一个结构形式，对有技术概念的人来讲，三角叉形表达一种加劲的概念，如果连这个概念都不能表达，就什么也没有表达。

和这些虚弱的装腔作势的结构造型相比，十九世纪维奥来·勒·迪克 (Viollet le Duc) [30] 的富有朝气的形式主义设计是多么印象深刻。他以幻想般的力量，在一百年前就已掌握了叉形柱的结构逻辑，从外观来看，这个建筑物确实是当时流行风格中的佳作，但结构是真诚有力的。现代的叉形柱常常单纯是对时兴的“工艺上”口味的一种让步，结构虚伪，效果又软弱无力。对比这两种形式既是有趣的也是重要的。看来现代技术性形式主义是所有这类祸害中最大的。这是我们批判的主要对象，并决心把它打倒。

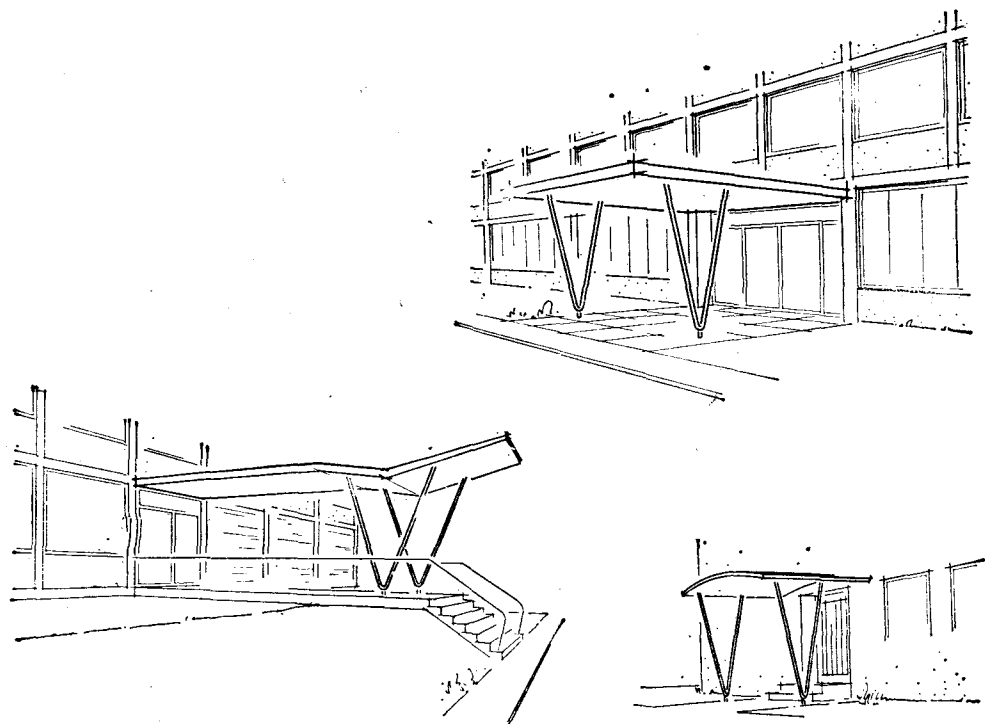
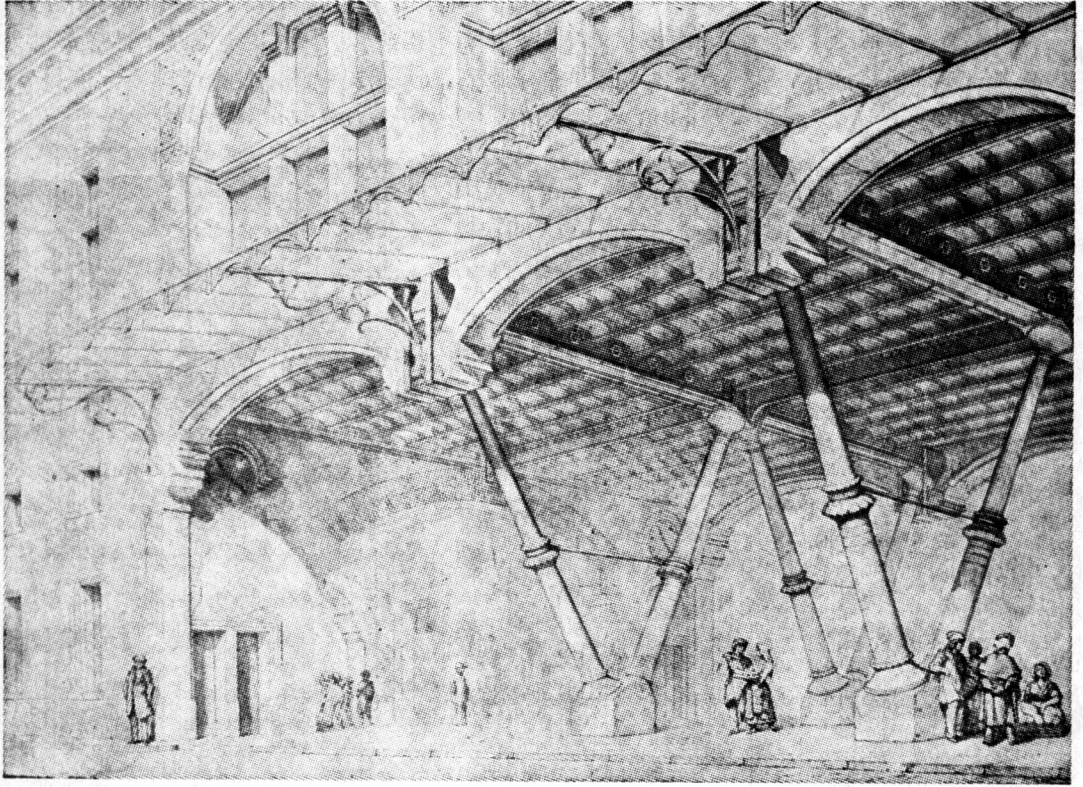


图 93 形式主义地滥用叉形柱

既很清楚领会，又巧妙应用叉形柱的佳例是法维尼 (Favini) 设计的通往米兰公路上的一个加油站[31]，屋顶是波形钢筋混凝土薄壳。后面支承在一个稳定而坚固的房屋构架。因此，前面的支柱在“Y”向不需提供任何刚度。在“X”向情况不一样，额外加固是必要的。因此，叉形柱和一个高的横肋组成一个半框架（参看图63）就能保证结构的横向稳定。当然，也可以代以两个叉形柱，那样就形成了两铰框架，在“X”方向的刚度就更加大了。不过，半框架的刚度完全足以抵抗风力。没有必要减轻水平构件的静载应力，因为由波高确定的水平构件的高度已足足有余。半框架的引用使结构简化成为基本形式，它的作用与稳定性都是完美的，堪称是一个清新明快的设计（图94）。



照片：维奥来·勒·迪克在1864年的设计[30]

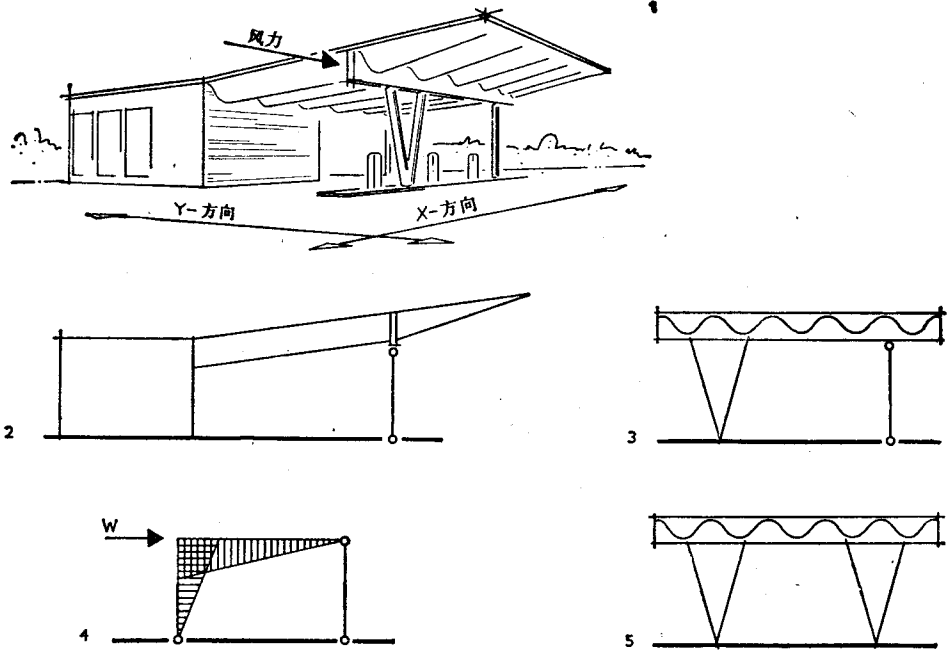


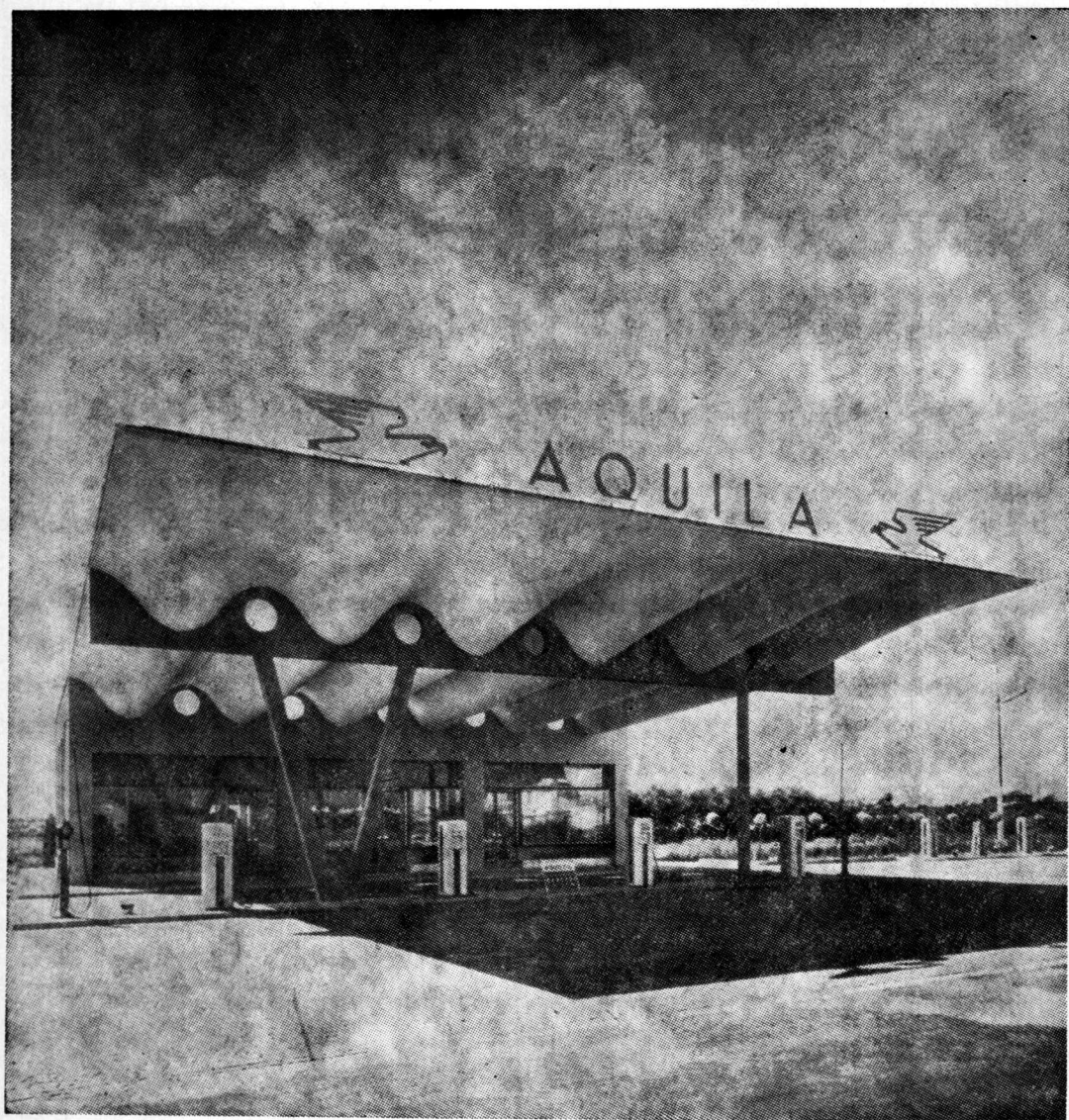
图 94 意大利米兰的一个加油站，它是在两个方向用不同方式取得稳定的一个建筑物[31]

- 1—在Y向，屋顶在后面受重实的砖石结构拉住。前面的支柱起铰接柱的作用。在X向，叉形柱、单柱和水
平构件组成一个半框架可以抵抗风力；
- 2—结构系统的侧面；
- 3—结构系统的前面；
- 4—半框架中风力引起的弯矩；
- 5—也可以用两铰框架代替半框架，但是没有这个必要，因为水平构件已经足够高，就不必再减轻它的应力

参照已阐明的几个例子，为了使两铰框架刚劲，不仅要加强支柱和转角还要加强水平构件（图95-1）。如果后者太柔软（图95-2），不管支座如何刚强都没有用，这样的结构对横向荷载是没有抵抗能力的。

但是，叉形柱可以用不同的方式组成。如果放宽叉枝的夹角直至相邻构件在上部相遇（图95-3），而组成一系列的闭合三角形框架。这种情况下，水平构件可以相应地柔软一些，因为它不再受弯。水平荷载只在这框架的所有三个杆件中产生轴向拉力或压力。这就是1951年为伦敦博览会设计的铝制的科学发现圆厅下部结构的深刻意义（图95-4）。只有把那拱顶相当薄的边缘（图95-3）看作是它与斜向撑杆共同形成三角系统的组成部分，才能懂得这个道理。这些撑杆的连续性使人感到结构明确而镇定。图95-5所示的另一个形式就不能令人信服。

奥斯卡·尼迈耶经常采用叉形柱支承高层建筑。它们的作用相应于图95-1的系统。每个叉形柱在第二层楼面的厚度范围内承受上面两行支柱的荷载，再传到共同的基础上去（图96-1）。在叉形柱上面巨大的梁是有些料想不到的。虽然，可以假定这个大建筑物的刚度大部分来自升降机井，楼梯墙等等。但是用一个相当刚强的水平构件将柱顶连在一起，感觉上更加强了设计的稳定性。为了比较，图96-2所示的水平构件细弱而无劲，就差得太多了。留下一个不平整薄边的印象，而真实的结构造型应该是有个自然的收头的。



照片：米兰的加油站[31]
工程师：法维尼

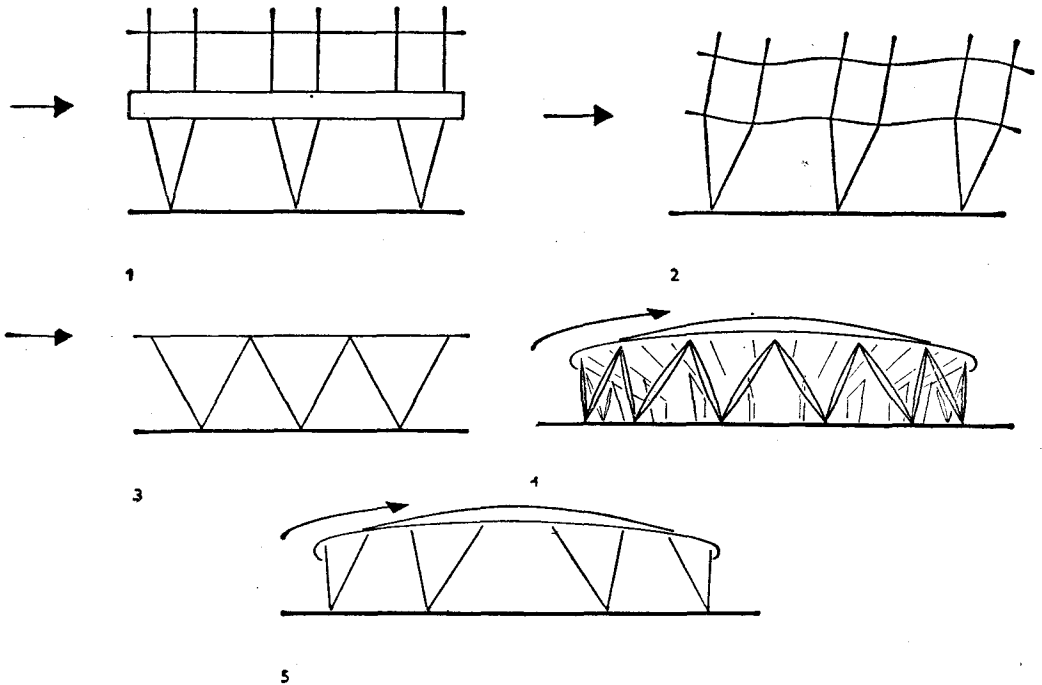


图 95 叉形柱和水平构件之间的刚性连接

- 1—有了刚劲的梁保证了侧向稳定性；
- 2—如果梁是柔软的，即使采用了叉形柱也不能保证稳定；
- 3—如果叉形柱互相连接形成一串三角形，在水平荷载作用下，水平构件将不受弯；
- 4—1951年在伦敦博览会的科学发现圆厅拱顶的薄边也同样由于组成三角形而加强[32]；
- 5—一圈互不相关的叉形柱在美学上，结构上都不能令人满意

关于叉形柱本身，尼迈耶运用简单的叉枝前后面平行的典型叉柱成功地塑造出一些印象深刻的创造性的造型。这些造型的紧凑性、用非常经济的方法取得了高度的表现力，即使是喜欢挑剔的工程师也必须认许，虽然，他有时候容或发现结构上的些许弱点。尼迈耶设计的在里约热内卢的医院所采用的叉形柱的配筋详图（图96-3），显现内部系统清楚得象 X-光照片一样[33]。两个叉枝之间缺少腹部配筋是没有结构上的根据的，纯属建筑外形上的需要。上部与下部缩小截面暗示三个无力矩的铰。亦即斜杆只承受轴向力而没有弯矩。因此为什么斜杆收缩在这里是绝对站不住脚的。

以后，联系到尼迈耶在柏林设计的另一建筑，我们将看到在某种情况下，这个相当偶然的方案可以成为真正的结构造型。

在1957年尼迈耶为柏林“观摩建筑”新区设计的公寓从外观上好象和在里约热内卢设计的建筑物相似（图97）。但是，这个设计中的叉形柱更有力，叉开的角大些，上端的铰更突出，底部的宽度更显著，两个斜叉从底部象嫩芽破土而出。这就很清楚，底端并非铰接（里约热内卢那个设计在这一点上使人怀疑）而是坚实地锚固在基础上，并能有效地抵抗倾倒。这里外观真正是实际结构的反映。配筋详图（图97-2）显示力的真实动态。收缩形叉枝的整个宽度布有钢筋，底部承受很大的弯矩，这些叉形柱对结构的侧向稳定起了决定性的作用。结构的造型确实是由它必须抵抗的力的性质而决定的。

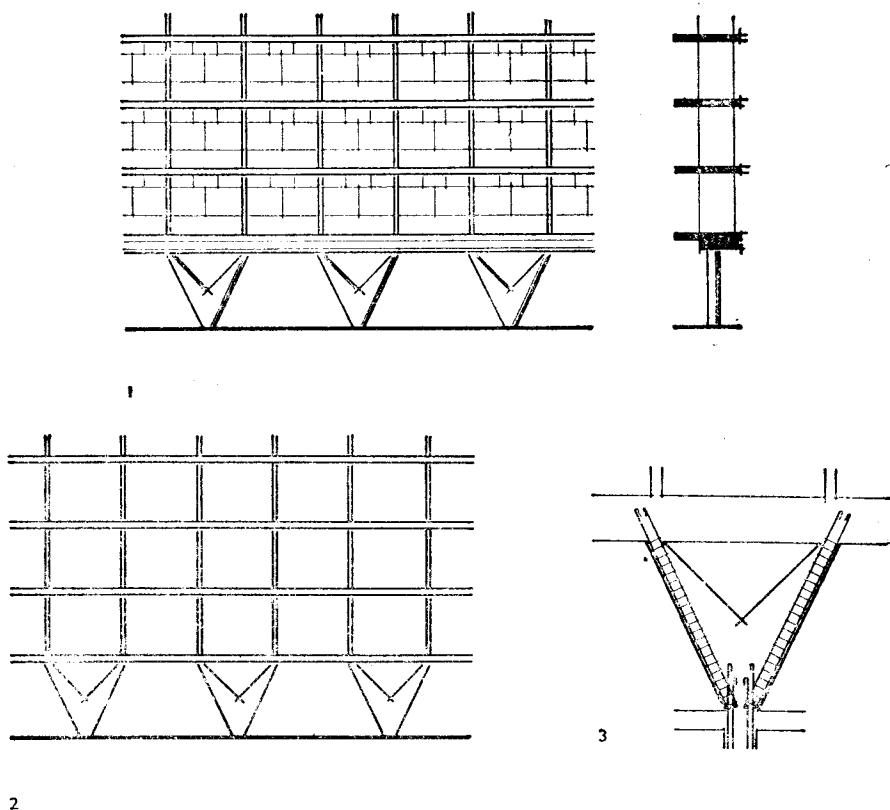
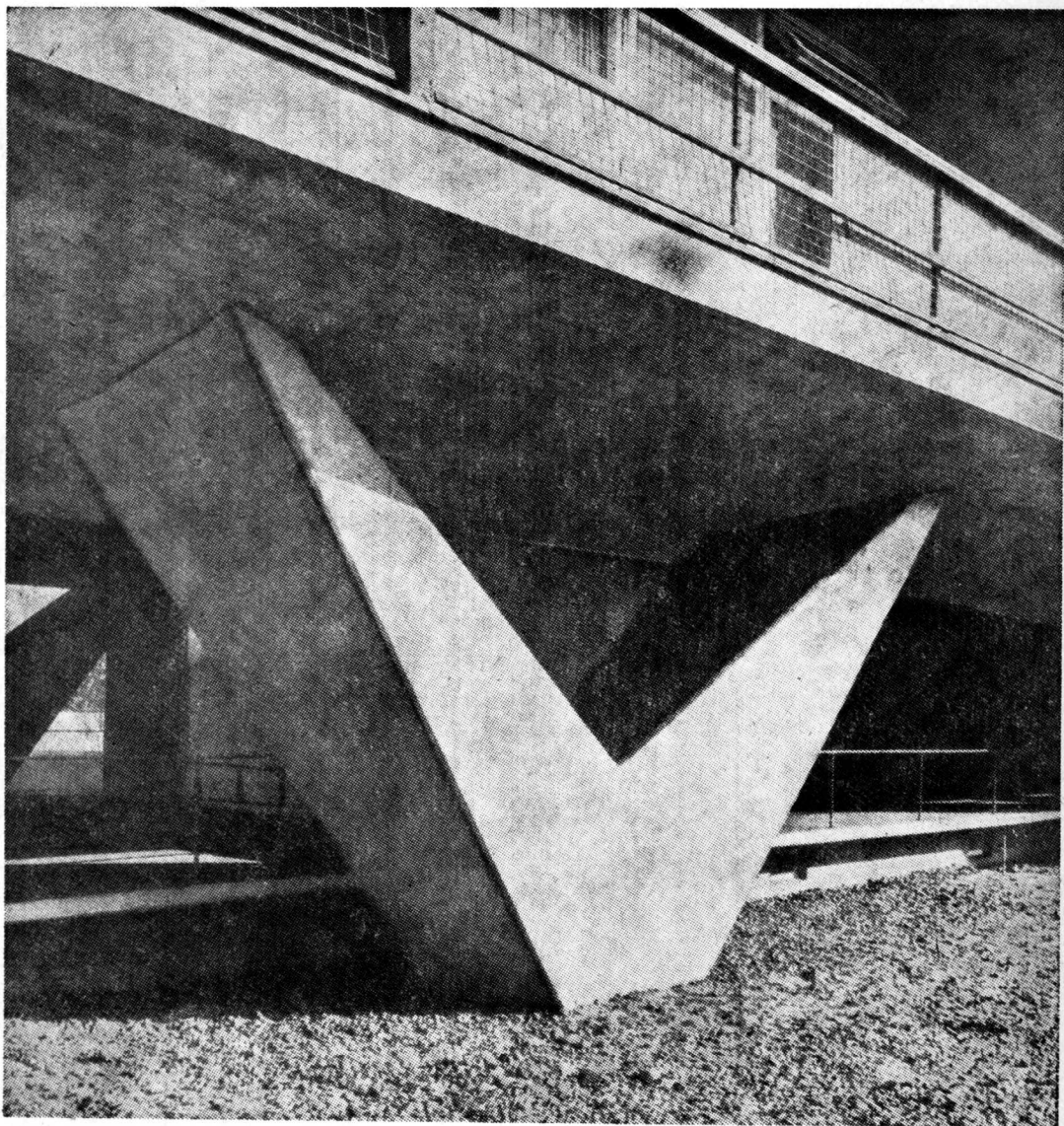


图 96 巴西里约热内卢的一个医院的叉形柱[33]

- 1—在叉形柱顶端的刚劲梁是一个满意的稳定构件；
- 2—一个相当细弱的梁在结构上不能令人信服；
- 3—支柱配筋详图。叉枝的锥形既非结构导出的也非力学推定的

在贝洛-霍内重特 (Belo-Horizonte) [35] 尼迈耶采用了三叉柱 (图 98)。这个造型又表达了另一种语言。虽然, 作为一种结构形式, 它的表现力没有在柏林的叉形柱那样强, 但它的立体轮廓美妙地画出这个大建筑物的独特面貌, 叉尖的位置, 明晰准确, 在楼面和承重墙交接处, 是结构上唯一可能的位置。

有些设计中传递荷载的点决不是都象尼迈耶的设计那样恰好落在枝尖之上。与尼迈耶的设计相比, 图99的建筑物给人的第一印象并不是在设计上较偶然或者在结构上缺乏一致性。柱列和楼板带将立面分成整齐的网格。荷载集中点很明显, 但是, 与叉形柱的位置好象完全没有连系。荷载传到叉枝之间, 显然落空。实际上, 由一个隐藏的大梁, 将荷载传给叉形柱, 这根梁在二层楼面是为了抗扭而设的, 在剖面图中才看得出(图99-2)。这样, 力的真实传递路线被歪曲。真实结构形式的明确性也丧失了。更有甚者, 支柱的底部缺乏优美感。弯曲的管子只能适用于家具, 但是, 很难接受来自建筑物的荷载。因为管子是弯曲的, 纵向力对它 有偏心距, 由此产生的弯矩远远超过它的承载力。当然, 如果建筑师坚持这个形式, 工程师总是可以想出办法来的。将弯曲的截面用铸钢制成, 但是, 这算是真正的解决问题吗? 是不是这样就能驱除可疑因素, 使结构变成“正确的”? 这类技术上虚伪现代化的建筑是多么无能, 结构形态又是多么空虚。



照片：柏林的公寓建筑，底层叉形柱[34]
建筑师：奥斯卡·尼迈耶

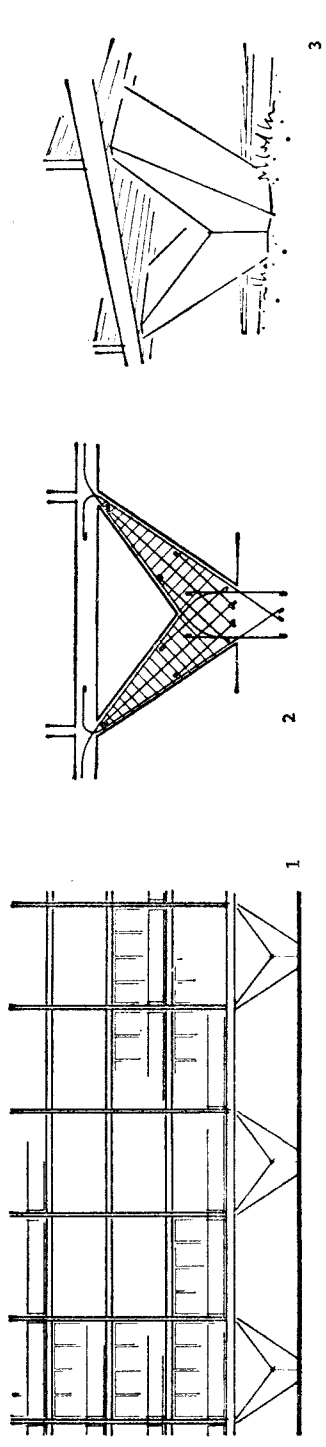


图 97 尼迈耶设计的柏林公寓建筑中的叉形柱[34]

- 1—支柱的宽底座表示弯矩可以传递到基础；
- 2—配筋详图显示固定支座的加劲作用。锥形叉枝是真实的结构形式；
- 3—透视图

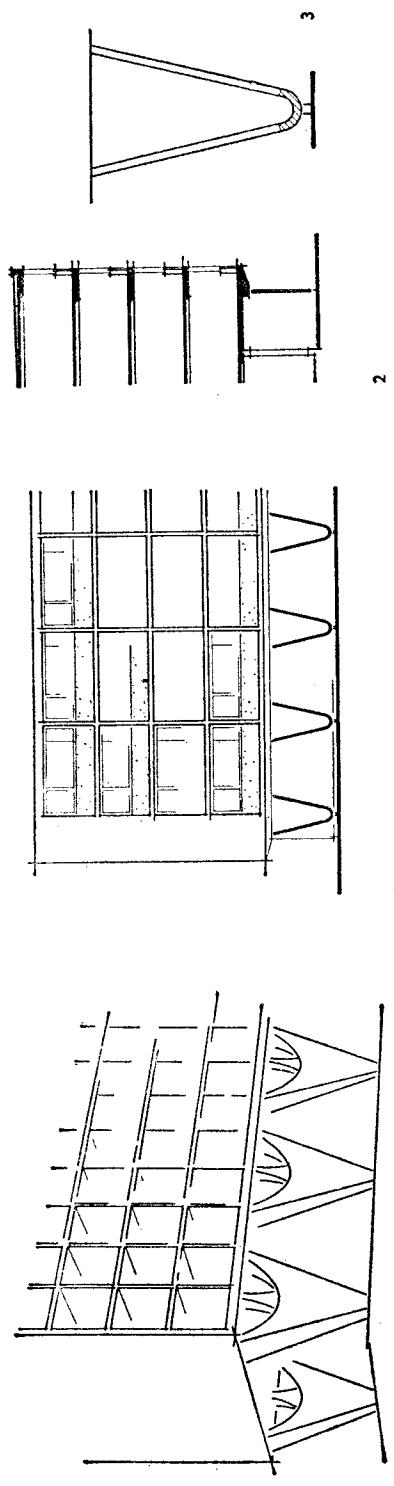


图 98 在巴西贝洛-霍内重特尼迈耶设计的三叉柱从楼层承重墙下来的荷载传递到枝尖

图 99 用钢管错误地使用叉形柱

- 1—支柱的荷载传到两枝尖中间；
- 2—用一个隐藏的抗扭梁将荷载传给枝尖；
- 3—将柱的下部弯曲使应力情况更加严重，因此，必须用一块铸钢来代替弯管

除尼迈耶的较为精致的造型外，具有叉枝前后面平行的简洁而经济的叉形柱也已成风。图100为一箱形框架，其中每一个横向承重墙由两个叉形柱来支承[36]。同时叉形柱与非常刚劲的承重墙相连接，使建筑物得到横向稳定。它们的作用比一般的竖向立柱好。确实叉形柱对结构的纵向稳定不起什么作用（参考本书109页和图92）。必须采取其他措施，例如：纵向加劲墙，重实的升降机井等等。

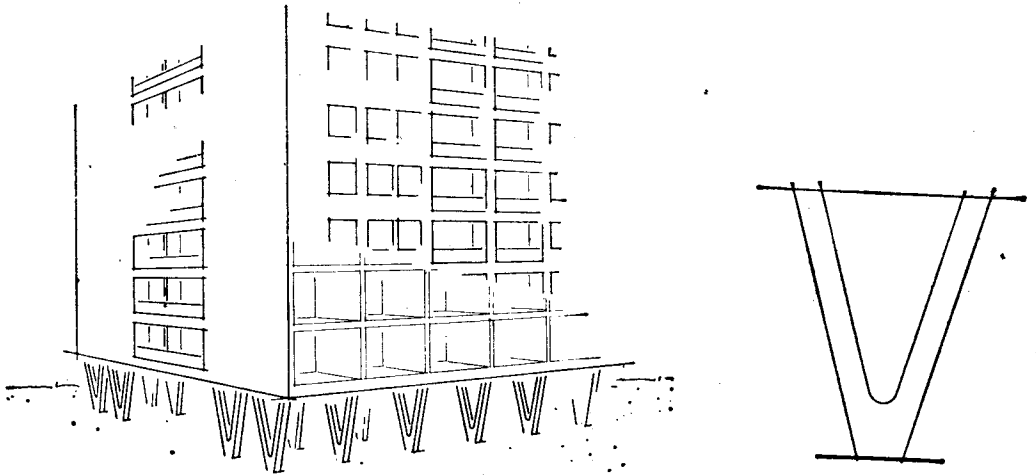


图 100 具有平行面叉枝的简单叉形柱与承重横墙配合[36]

单层工业建筑有时采用平面为矩形的壳体屋面，只支承在四角上。结果，在这些支承点形成叉形柱组。结构上按原来定义的概念，这些不是叉形柱，因为它们是由相邻壳体的四个独立柱形成的。设计上应当如何解释呢？若干壳体可以方便地用伸缩缝处理成各自的独立单元（图101-1）。边梁的间距是由能通行的天沟所需宽度或两个对面采光带必需的距离来确定的。下部结构必须为这些相邻但又显然独立的构件分别提供支承。荷载传递点过于靠近以致难于布置四个独立的竖向立柱，可用的空间又太狭窄。然而，四个支点相距较远，不可能将四个支柱合并为一个。唯一的答案是采用立柱组将四角的荷载集中传递到一个共同的基础上去。因此，不论是由叉开的支柱支撑独立的栈架形结构如图101-1所示[37]，或是一节间的四角支承在四个立柱组上[38]（图101-2），一群这样的柱组，看来都是差不多的。必须对这类支座的作用彻底理解才能处理出这个结构造型的恰当的细部。

如果壳体的边梁和两个叉开的腿组成一个闭合的系统，它们的作用就象一个框架。在这种情况下，其目的并不要减轻水平构件的负荷（边梁已足够刚劲），而只是要增强结构的侧向稳定。因为屋面的截面不大能抵抗风力，侧向力将很小，这样，框架叉开的腿可以做得细小一些。值得注意的是这些叉开的腿并不是收缩形的，也没有形成叉形柱。完全由于相邻斜柱靠近造成叉形柱的形象，实际上并不存在闭合叉形柱的问题。所以处理细部时，要明显地分清各个叉枝之间，使其各自独立地明显地并列支承在下面结构之上。

如果斜支柱不做为框架的腿来考虑，它们和壳体边梁之间不是刚接，那么，就必须在底部固定，否则，结构将失去侧向稳定。因此，相邻的支柱就很容易并在一起，形成如图101-2的形式。在这种情况下就没有必要将各斜柱的底部分开。相反，好的造型要求底部加厚象一节子。另一方面，上端可将截面相应地减小来表示铰接。对大型库房这是很好的

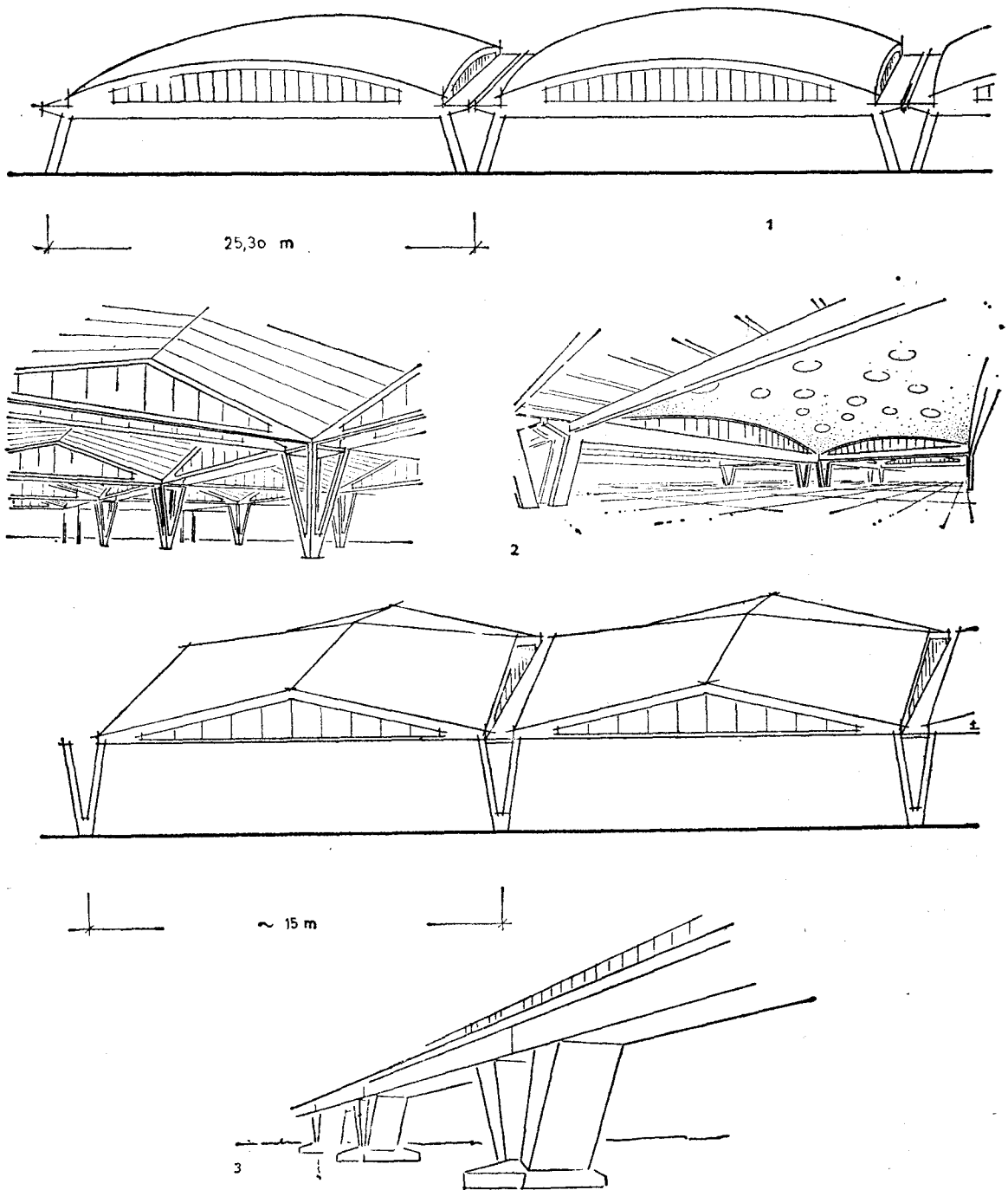


图 101 柱组

- 1—叉开的腿和壳体边梁组成刚架。这种情况下，各柱是明显分开的[37]；
 2—四个薄壳的角相遇而形成二向度的叉形柱。屋顶荷载通过铰接点传递给支柱；
 3—毗连的桥梁框架的腿给人的印象是叉形柱[39]

解决内部空间问题的方案。但它的周边是无法按照同样原则的。那么图 101-1 的布置优点明显。罗恩 (Rhône) 大桥 (图 101-3) [39] 的设计可以与图 101-1 的建筑差不多一样地说明, 框架斜腿的宽度与大梁相同, 一个接着一个地排列着, 每一对腿象是一个叉形支座。因为它们的下端铰接, 所以, 腿向下收缩而框架转角加厚以承受最大的弯矩, 这些考虑都是正确的。

至此, 似乎应当再提起另一种形式, 虽然在目前它的应用并不广泛。这个形式的特点是在支柱的半中腰分叉, 这样, 支柱包括上部的叉形和下部粗壮的立杆。在设计比尔斯菲尔德 (Birsfelden) 发电站时体现了这个思想 (图 102) [40]。立杆部分是结实的而且底端是刚性固定的。和一根重的吊车梁一起共同保证结构的纵向稳定性。另一方面叉开的枝却非常细小。但是, 它能承担折板屋面传来的荷载而又枝上面不要一般常见的水平构件。这是相邻的枝尖彼此相连组成三角形构架, 就象科学发现圆厅一样 (图 95)。这就说明为什么圆顶的细巧边缘和折板的弹性边缘都没有水平加劲杆件。与折板垂直的方向 (就是沿建筑物长向) 仅仅依靠折板是不稳定的 (参考本书第三章 164 页)。稳定是由吊车梁和细小而刚劲的三角叉保证的。折板、叉形柱、吊车梁和固定的支柱组成一个结构统一体, 其中每个部分各有其功能, 又合理地综合成为一个整体。

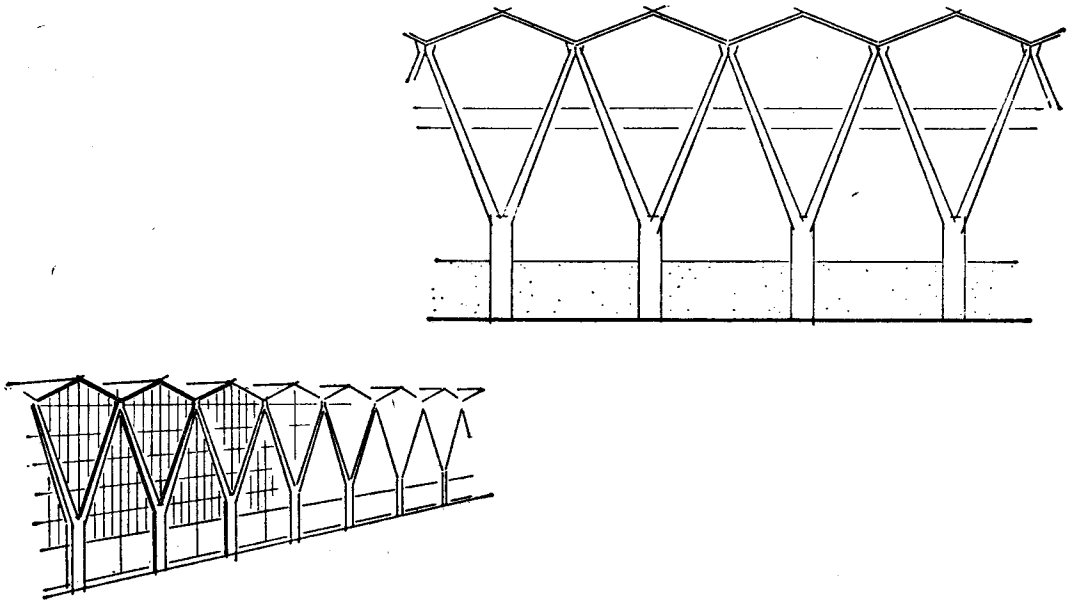


图 102 在比尔斯菲尔德发电站[40]的设计中, 用 Y 形框架使折板固定, 框架的支柱下端锚固, 上部叉枝顶端相连。屋面荷载传递到这些枝尖上

在罗马奈尔维设计的运动场采用的 Y 形支座 [41], 原理与上述的相同 (图 103)。不同于比尔斯菲尔德发电站的是所有构件都是收缩形的。上下三个端点为铰接, Y 形三个杆件相会的中部接点为刚接。在比尔斯菲尔德发电站支柱“平面”系统意味着立柱底部必须固定并和纵向吊车梁拉牢才能使支柱加强。在奈尔维的设计中就不需要这样的措施。每个 Y 形架本身就是刚劲的, 许多 Y 形架共同形成一个锥状的底座, 尽管这个底座的上下端点是铰接

的，却是一个非常稳定的结构。Y形支座对埋在地下的一个圈梁有推力。Y形支座比从基础上面就开始分叉的叉形柱好，因为叉下留有空的地方。在Y形支座收缩的叉尖上支承着圆顶。轻微的呈波浪形的屋檐标志着传递荷载的各点。这个呈波浪形屋檐帮助阻止圆顶的边缘在支座之间下垂。而且它还强调了在这个设计中，圆顶边缘在与叉尖相遇的固定点处不必刚性连接（参考图95所示，在伦敦的科学发现圆厅和图102的比尔斯弗登发电站）。除此以外，屋顶的波纹还增加了额外采光。每个部分都配合得很利落。结构、功能和造型浑然一体。必需的东西都已齐备而且没有一样是多余的。在不牺牲经济和实用的条件下，结构本身也是富于装饰性的和优美的。

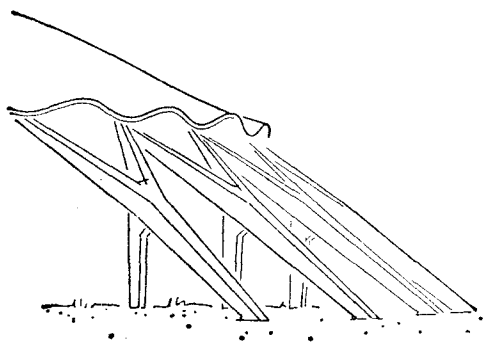
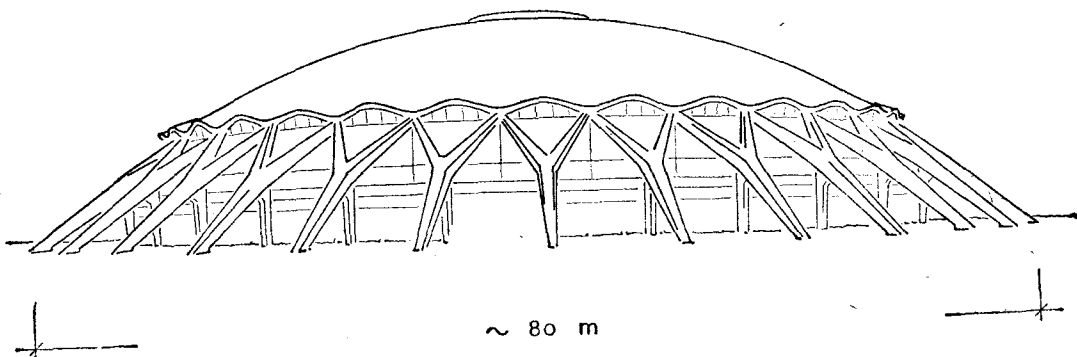


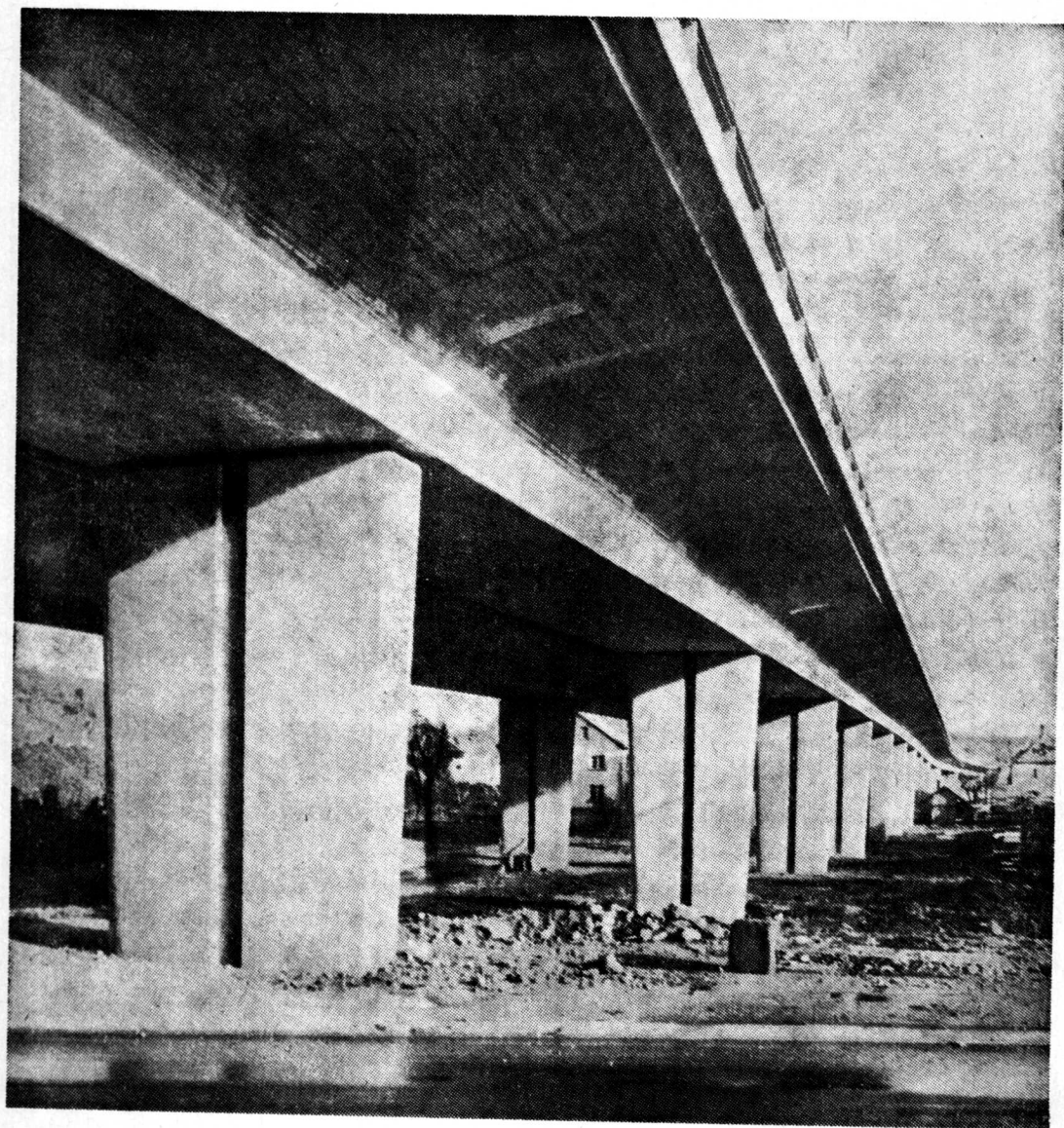
图 103 奈尔维在罗马设计的体育馆中[47]的Y形框架，上下端都是铰接的。这个结构仍然是稳定的，因为它组成一个具有三向刚度的空间结构



著者还想在叉形柱这一节中说明V形支座有了不起的多面性。就是因为这个多面性使V形支座难以处理。真正强有力的肯定的造型如上述的一些不是一般通例而是例外。工程师们对自己设计的结构，在美学方面不一定常常感兴趣。他们经常想到的是计算上如何完善无缺，只要计算正确，差不多任何方案都会感到满意。但在实践中，这仅仅是工程师职能的一部分。工程师不应只做到使建筑师的设计付诸实现就算了。因为即使最蹩脚的结构在力学上也可以是无缺点的。但这无济于事。相反工程师应该对建筑师起有所批评的合作者的作用。只要建筑师的设计违犯了结构逻辑时，工程师就要尽力反对。他的抱负不应该是把什么东西都塞进他的计算书，而应当把结构的意义和作用向建筑师讲明白，使建筑师将他的理解放进他做出最后方案的灵感中去。另一方面，多数建筑师好象对待力学问题惊人地冷淡。尽管现代结构设计的深刻问题是当代建筑的本质问题，而这些建筑师却很不欣赏。许多建筑师们还需要多加学习，应当认识到单凭美学灵感是产生不出真正的技术造型



照片：在罗马的奥林匹克体育宫（小馆）支柱的细部[41]
工程师：奈尔维



照片：在巴登·巴登（Baden-Baden）跨越奥斯·托尔（Oos-Tol）的桥[43]

的。反之，具备领悟其间合理关系的能力是懂得灵感的必要条件。在这方面存在一个错误的概念，认为系统性的方法态度，会妨碍人们的想象能力和自由思路。如果只是对琐碎计算而言这是对的。但对于那些支配力学和支配真实有力的结构基本理论的探索绝不会拴住人们的思考能力。相反，它会激发人们的思考，从而去发现新的造型。关键问题是个人对待技术科学的态度，特别是技术科学对现代建筑的重要意义。所以，这是一个时间问题和教育问题。因为现在的一代人是能够认识结构问题的，至少，从本世纪初已经迈前一大步（在那时现代结构造型的问题尚被装饰的怪念头遮蔽着。）即使现在我们还不能奢望取得普遍的理解，新技术的基地每天都在被破坏。另一方面，现代建筑的生命力和非凡魅力主要归功于那无穷无尽的设计能量。

V形支座上改进的支承

V形支座还有另外一种特殊功能，虽然与前面所讨论的内容很少联系，但是如果我们略而不谈，将使V形支座的全貌不够完整。本章前几节中，我们的注意力完全限于在横断面，即表现V形的面上V形支座的作用。本节我们将讨论V形支座在纵向提供的改进支承。V形支座上部较宽，这就对与V形成正交方向的宽梁提供有利的支承。在圣加仑（St. Gallen）[42]的一个车库建筑（图104-1），在巴登·奥斯[43]和巴黎的桥墩（图104-2）和在维西·日内瓦（Vessy-Geneva）跨越阿尔维（Arve）河的马亚（Maillart）桥的非凡的桥墩（图104-3）都是这种V形支座用法的实例。然而，阿尔维河上的桥[44]中每个V形支

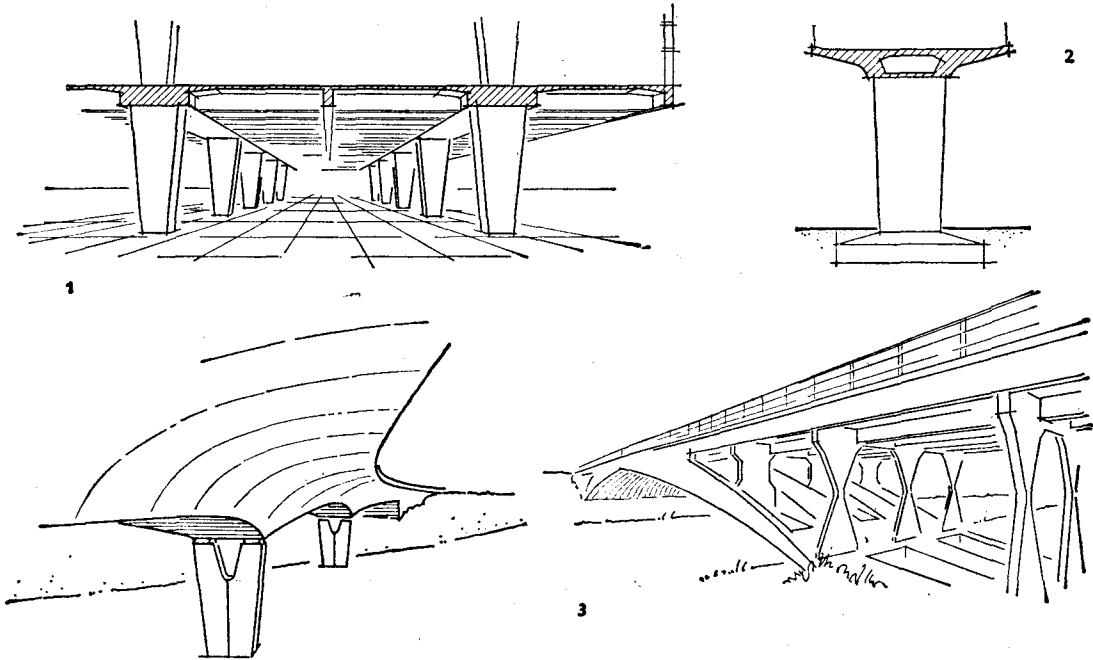


图 104 V形支座上改进的支承

- 1—宽的平台需要相应的宽支承。V形所在的平面与梁跨正交，所以不产生框架作用[42]；
 - 2—在巴登·奥斯（Baden-Oos）和巴黎的桥墩断面示意；
 - 3—跨越阿尔维（Arve）河的马亚桥；
- 注：英译文缺 2 及 3 由译者补注

座支承的是两个窄梁而不是一个宽梁。要彻底地了解这些形式,必须把结构作为一个整体来考虑。孤立的形式无助于事。重要的问题在于全部设计中是否正确地逻辑地把它结合进去。

一些特例

曾试将V形支座按照功能与外形进行分类。但是,收集到的资料并不合乎严格的分类。某些很有趣的特殊情况很难安插进去。因此,准备涉及一些例外情况以结束这方面的讨论。……

奈尔维设计的飞机库的扶壁[45] 本章开始时曾简略地谈到一些历史上著名的V形支座(图52~54)。它们都是向上收缩的。可是,上面所讨论的现代V形支座却都是向下的。这好象是一个基本的差别,密切关联着对待房屋的构思的历史的和现代的差别。但这是不完全对的。即使今天我们还是可以找到同中世纪的扶壁有某些相似之处的V形支座,用来作为现代刚架中的部件。无偏见的无成见的技术性设计是不受历史的约束的,尽管历史上有可对照的根据。不论什么只要是技术上可靠,结构上确切和经济,同时也方便施工,那就是好的设计,即使对造型的现代概念来讲也是如此。

奈尔维的作品是不受这些限制的。他设计的飞机库扶壁所获取的造型很明显而大胆地脱离了公认的意见。其结果不是随机应变也不是对形式先入为主,而是遵循结构法则的必然结果(图105)。如采用向下收缩的V形支座,就会使人感觉有点现代形式主义的味道。这里完全没有可能在V形支座和屋顶结构某个水平构件之间形成刚性的连接。因为机库屋

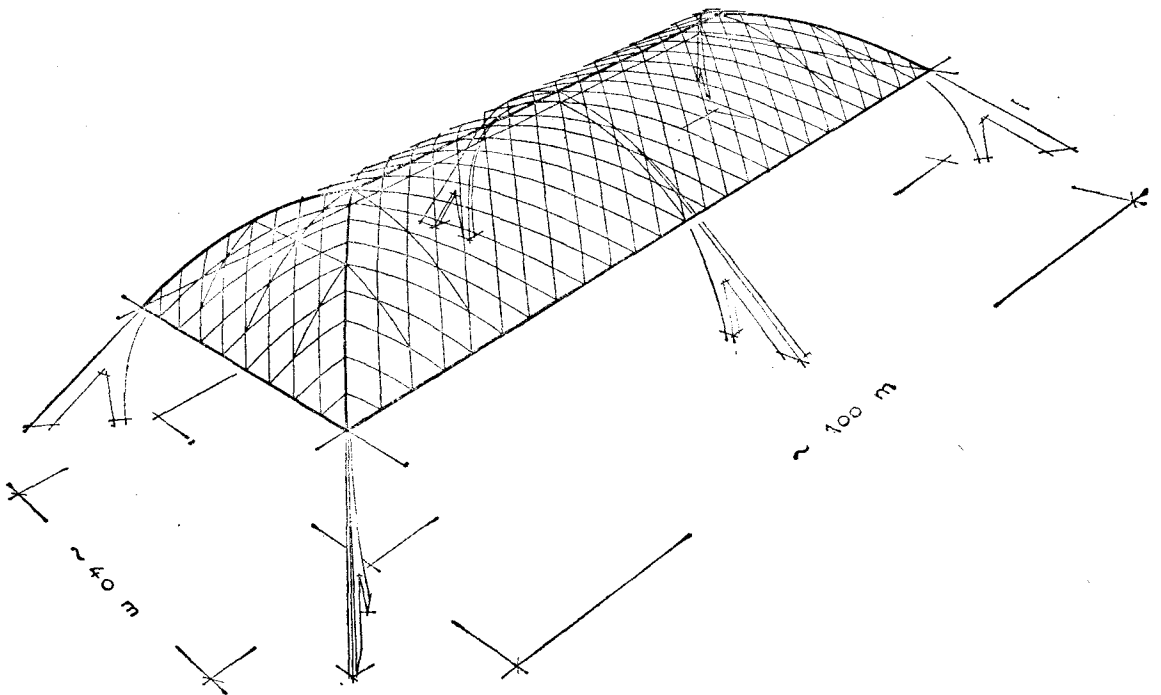


图 105 奈尔维设计的飞机库的扶壁,下部宽上部窄这些扶壁是倒V形支座,与刚架毫无关系[45]

面是由预制构件组成的精巧结构。预制件拼成拱状的交叉肋，形成空间网架。从力学上看，全部结构的作用部分象筒拱，部分又象薄壳（参看第三章本书158页）。不管怎样，屋顶形成如此天衣无缝的紧凑的统一体，以致把任何构件单独抽出来，例如把支柱抽出来，都既不会是合乎结构逻辑的也不会是令人理解的设计。受力点支承在适当形状的扶壁上是唯一可取的答案。

一个刚架的强度有赖于截面的弯曲刚度。一个拱顶，壳体或悬索有赖于它的形状。如果有了正确的形状，即使截面的刚度不足，一个拱顶可以竖立起来。拱本身支承荷载，悬索在刚强支座之间下垂，如果选用了正确的形状，两者都不产生弯曲应力。这个极简单的说明也许可以引起对拱和刚架的区别的注意。

由于拱只有很小的或完全没有弯曲刚度拱就不能象两铰刚架那样形成一个刚性角，因此拱不能将弯矩传递到支座上去。没有刚性的转角结点又不能将弯矩传递到支座上去，向下收缩的V形就失去意义。在拱的起拱点产生的推力主要是斜向的，其方向大约与拱的曲线相切。扶壁必须抵挡这些斜向推力。这就是设计中的主导因素。

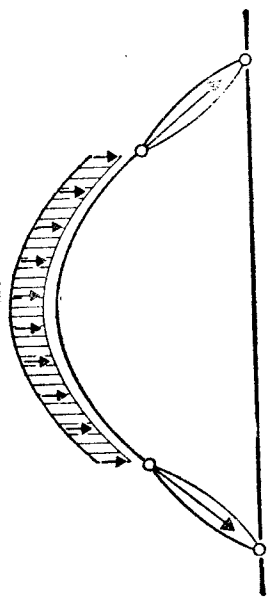
在这种飞机库结构中，主要的荷载为静荷载和风荷载。由竖向荷载决定拱的形状。如果是倒转的拱则接近悬链或悬索的形状，由竖向荷载分解成拱肋中的正向压力，不产生弯曲应力。扶壁就应该承受这样的推力如图106-1所示。竖向荷载决定拱的主要尺寸，因而承受竖向荷载是经济的。同时，绝不能忽略风力的作用。在高层建筑中，风的影响可能起决定性作用。风力是不对称的，忽左忽右地轮流作用着。因此它经常改变正向力和推力的大小和方向。图106-2表示由竖向荷载单独引起传到扶壁的推力和由静荷载与风荷载共同引起的极限值。扶壁必须能适应这些推力的方向变化。最后得出的形状是倒向收缩的V形支座。这是一个悬臂构件的形状，结实地固定在基础上，上端承受一个变动方向的侧向荷载。结构由静重引起的推力方向决定扶壁设计的重心。风力的变动影响将扶壁改变成为一个倒V形。

最后，奈尔维设计的扶壁形状（图107）也可以用下述三者的关系来表达：荷载，由力学原理确定的力的分布和设计的施工可能性。如果忽略其他因素而只考虑力学即力的最后方向，那么扶壁的内肢就显得太陡了。为什么这样还难以了解。不过，在全部荷载作用下，力的方向并不是影响设计的唯一因素，在拱顶未就位前，施工时力的方向也很重要。这时，必须防止扶壁向内倾倒。这就是选用这个特殊形式的原因。

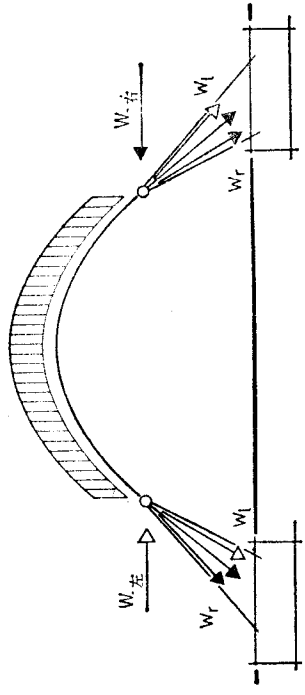
关于这一点，再参考奈尔维在罗马设计的体育宫。它的叉形柱和从圆顶来的推力方向一致，倾斜锐角很少。图103示出这些叉形柱支承在竖向撑杆上，撑杆的方向和作用在扶壁上的力的方向偏差很多。这个撑头也是施工时的助件。奈尔维说他不能不表示遗憾，因为考虑到施工使这个附加物成为不可缺少的。虽然叉形柱的三个端部都是铰接的，建成后的建筑物并不需要这个撑杆。从二维的剖面上看来如果缺少这些撑杆，结构看来好象不稳定，但在三维空间上它是非常稳定的，因为这些叉形柱互相锁住形成一个刚性的环。

对于拱形的飞机库，那些扶壁并不是刚性空间结构的一部分，因此图106-1的结构就不稳定。为此需要倒V形支座，它的底部很宽而且又固定牢靠，可以防止倾倒。

这就是为什么我们必须阐明奈尔维飞机库的扶壁。造型的力量与逻辑有直接的感染力。然而仅仅着重造型质量而忽视技术要求是不够的。这种由功能所产生的造型，只有认识到它的恰如其分的性质和严格的技术性原由之后，才会使人感到它丰富动人的美感。

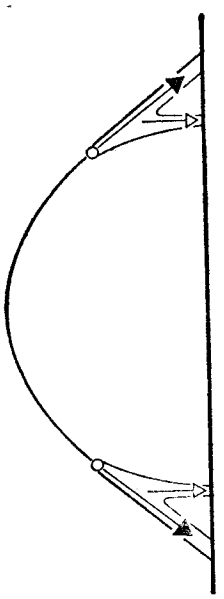


1

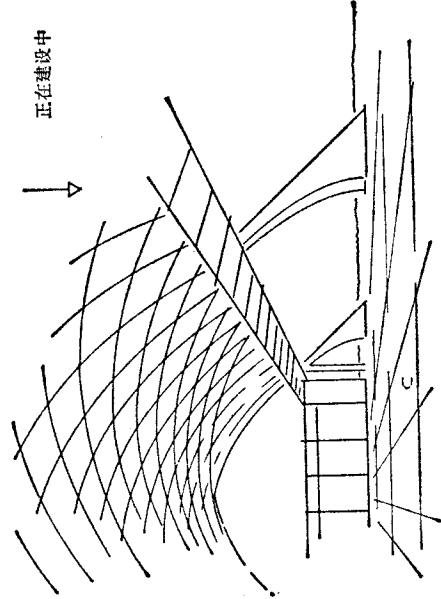


2

图 106 扶壁的形状是依照力的作用方向而形成的
 1—对称的静力决定支座处受力的主要方向。如果两端支座是铰接的，这个结构就不稳定，
 2—从各方向来的风荷载使支座处受力方向在一定极限范围内变动。这个夹角决定了扶壁的形状，扶壁因下部固定而取得稳定



在满荷载情况下



正在建设中

图 107 为了施工方便，扶壁必须加上一个辅助压杆或是一个陡立的拱腹。否则在还没有拱顶时，扶壁是不稳定的

一个教堂的设计 本书以一节的内容来讨论一个未建的教堂设计，这可能会使一些人感到奇怪。认为终究不缺乏已建成的值得讨论的建筑物。但是事实上并不完全如此，有意义的结构确实不寻常。所以，我们觉得应当提出意大利建筑师卡斯蒂略尼(Castiglioni)的两个方案，在蒙特卡蒂尼 (Montecatini) [46]的教堂设计，及在那不勒斯 (Naples) 拟建的火车站。

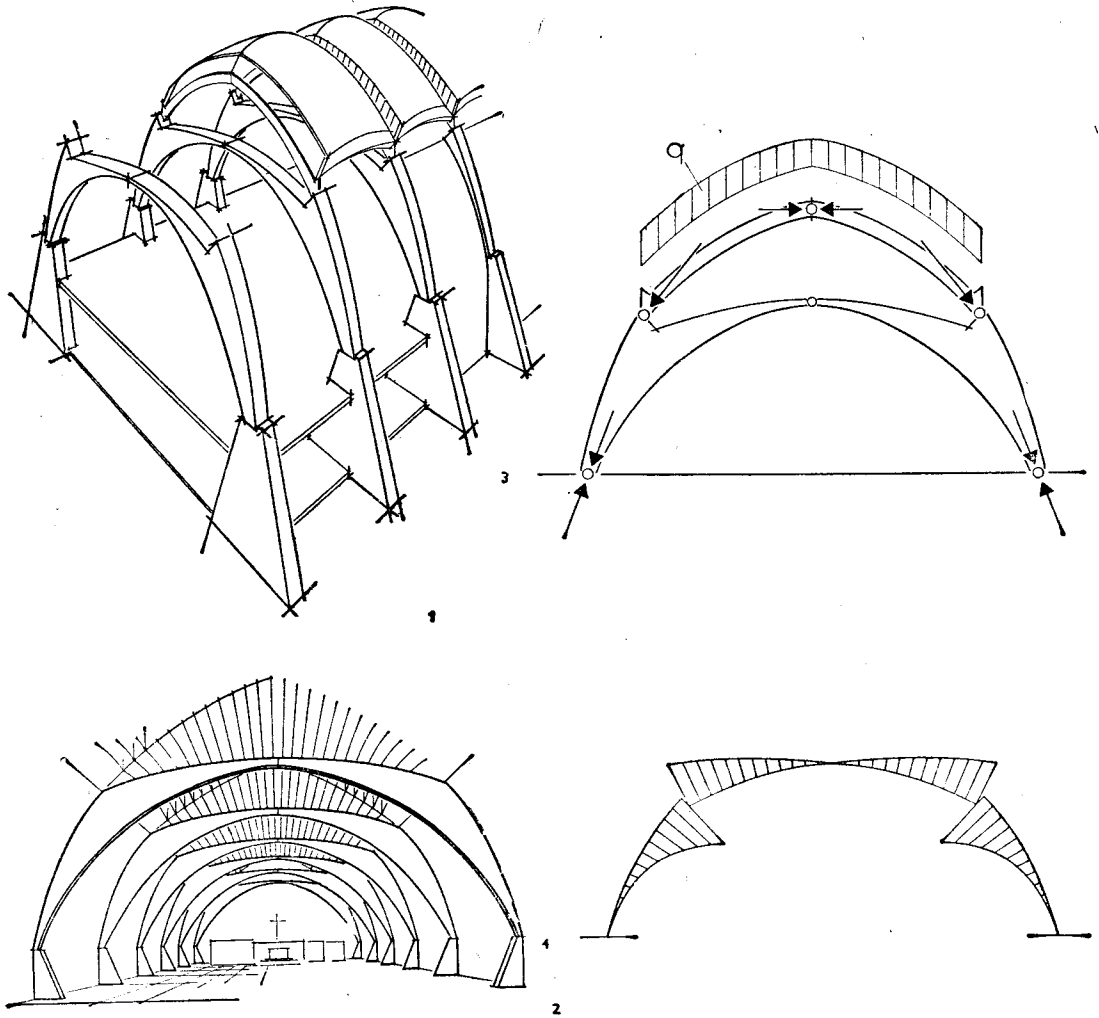


图 108 卡斯蒂略尼设计的教堂采用具有收缩形柱的三铰刚架[46]

- 1—鸟瞰图；
- 2—室内透视图；
- 3—蜂窝形的格子，形成上面的拱顶，它支承在三角刚架的腋部。刚架的作用是抵抗拱顶的推力；
- 4—结构的形状在弯矩图中清楚地反映出来

卡斯蒂略尼是少见的多才多艺的人物，他曾做过画家、雕刻家，建筑师和工程师。前三者的才能合并在一起还算常见。确实加上第四者，工程技能，才使他成为特殊人物。因

此艺术表现与技术表现的统一是他的作品主要特点之一。

鸟瞰图和室内透视图（图108-1和108-2）显示由一个三铰刚架那种具有丰富想象力的造型所支配的中殿。而且，这个刚架不仅限于覆盖空间和支承屋顶，它跨越中殿又明显地将中殿分成上下两个区域，下面是做礼拜者走动的地方，而灯火辉煌的上部则好象飘浮于下部分之上。从上面射进来的断续的，散开的，弥漫的光线是由巧妙构思的蜂窝形格子造成的。这些格子的翱翔效果又是由上层一系列拱顶取得的，这些拱顶的起拱点隐藏在教堂里面的拱的上面。拱顶推向刚架的肩部。为抵抗这个推力而采取的措施形成框架设计的主题。不用显眼的拉杆来直接牵住推力的方式，建筑师将推力转移到收缩形腿上去。这个优美而又有力的方案既证明收缩形的正确又赋予整体结构以别具风格的妩媚。

力的分布如图108-3。上层拱顶在起拱点的推力方向明白地显示下面刚架所起的支撑作用。作用的荷载包括自重，风力和蜂窝形拱顶的重量。前两者都很小，而从拱顶传来的荷载却最厉害。在最不利的荷载组合下的弯矩图，画在刚架的受拉边如图108-4所示。这些图对专家是最宝贵的资料。即使对外行来说，也懂得这个轮廓与刚架之间的关系。这个关系反映问题的复杂性，它涉及潜在的数学定理，一直到最终的建筑表现。

马亚的桥梁 马亚（Maillart）在瑞士建造的桥梁[47]包括一些现代工程中最优美的例子。它们是完善的技术形式经过艺术提炼的模范（图109）。

值得令人注意的是马亚的成就在业余艺术界比在工程界更多地获得赞许。然而那种偶然试图站在建筑师们的一边，把马亚仅仅介绍为一个艺术家是相当错误的。没有人会承认一个普通的工程师能够创造这样的美。他肯定是一个伟大的艺术家，甚至他自己也未意识到这一点。如果拿他的桥梁之一和一些构成主义者的绘画作品相对照，则单就表象来看可能具有相似的印象。此外没有任何共同之处。这样对照不会使我们更为理解马亚，也不会加深对他的成就的欣赏。

马亚是一个天才的工程师，但不是艺术家型的，他也从不认为自己是艺术家。他的创造才能和设计中对经济有把握的感觉是无可争论的。虽然他的“经济”概念是否与本书第78页试述的定义吻合，还是令人怀疑的。他可能把设计中的经济直率地和良好价值及简化施工等同起来了。至少，这是曾认识他的一些人的意见。

一生中他受到不少有名工程师的猛烈攻击。他的严肃性曾被质问，他自称为一个回避严密结构理论的“简单化者”。在一定范围内可能是对的，因为他不去计较所谓的“准确”然而繁琐的计算方法。他宁愿粗略，然而透彻的简化。他喜欢静定的简单体系。而这个对简化的喜爱正是他的力量源泉，使他成为真正的设计师。如果说马亚的作品来之于艺术冲动，那是错误的。他的相貌和书法都否定这一点。我们应当设法去了解他的作品特别是他设计的桥，应当从他的个性和他的思想方法、工作态度去认识他的庐山面目，而不是你喜欢他应该是怎样的一人物。

不从美学评价开始，让我们看看他设计的桥。我们相当简单地问：那是什么？为什么那样？什么目的？在这些非凡吸引人的结构的下面含有那些力学原理？力学原理和外形之间有些什么关系？设计者是怎样求得这个答案的？

只有这样我们将为美学评价铺平道路，将发现，通过对这些结构的作用方式的了解，会加深我们的洞察和对它们的美的欣赏。

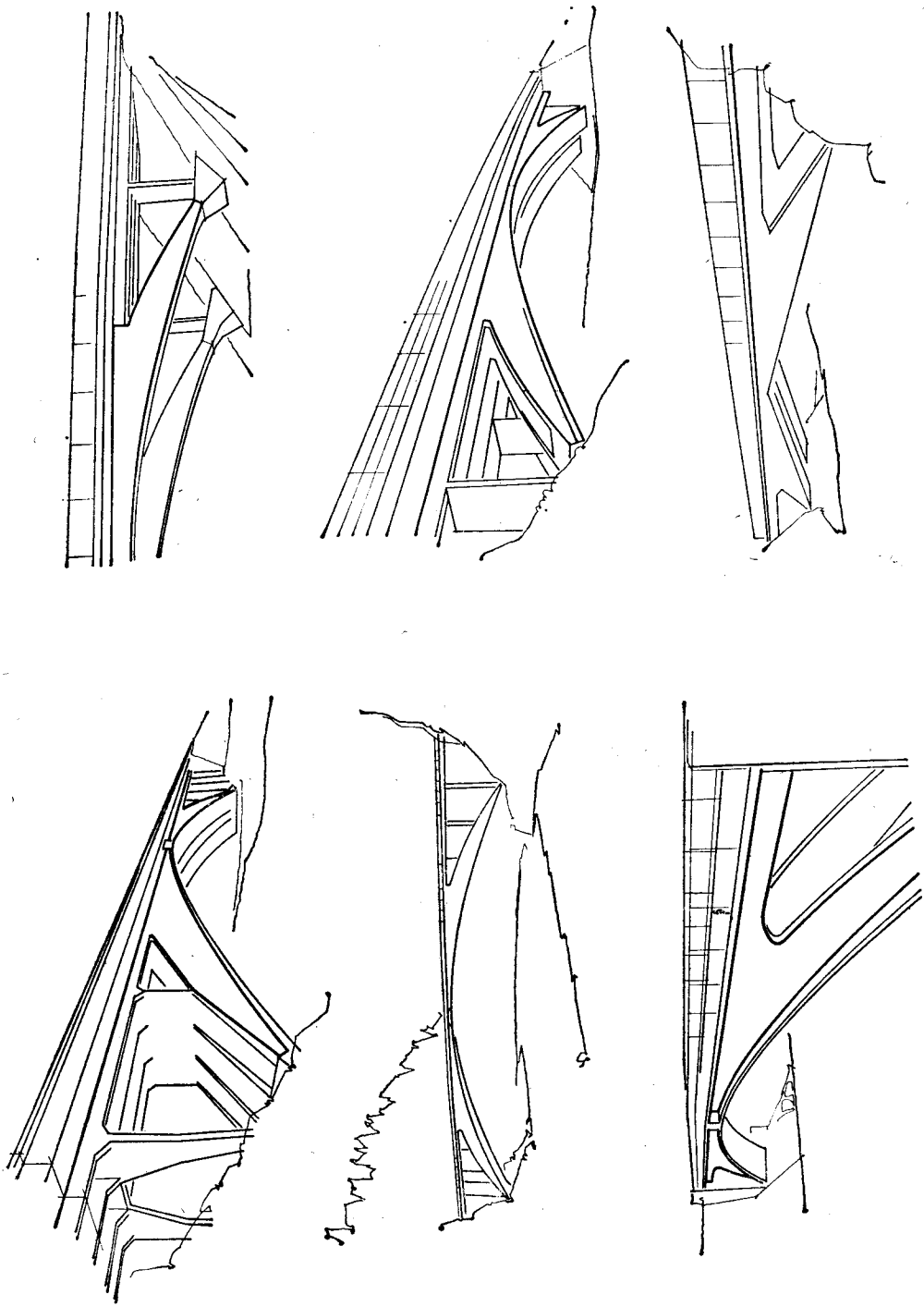
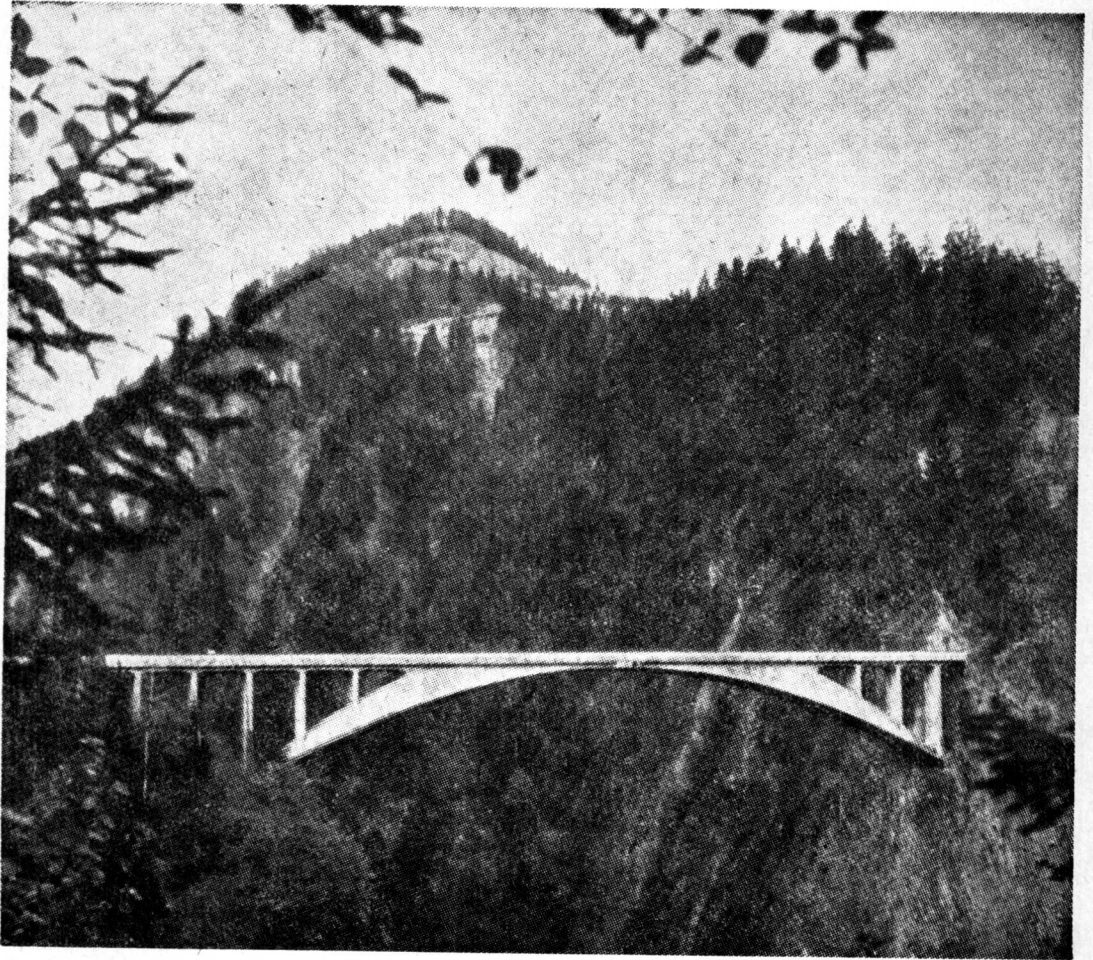


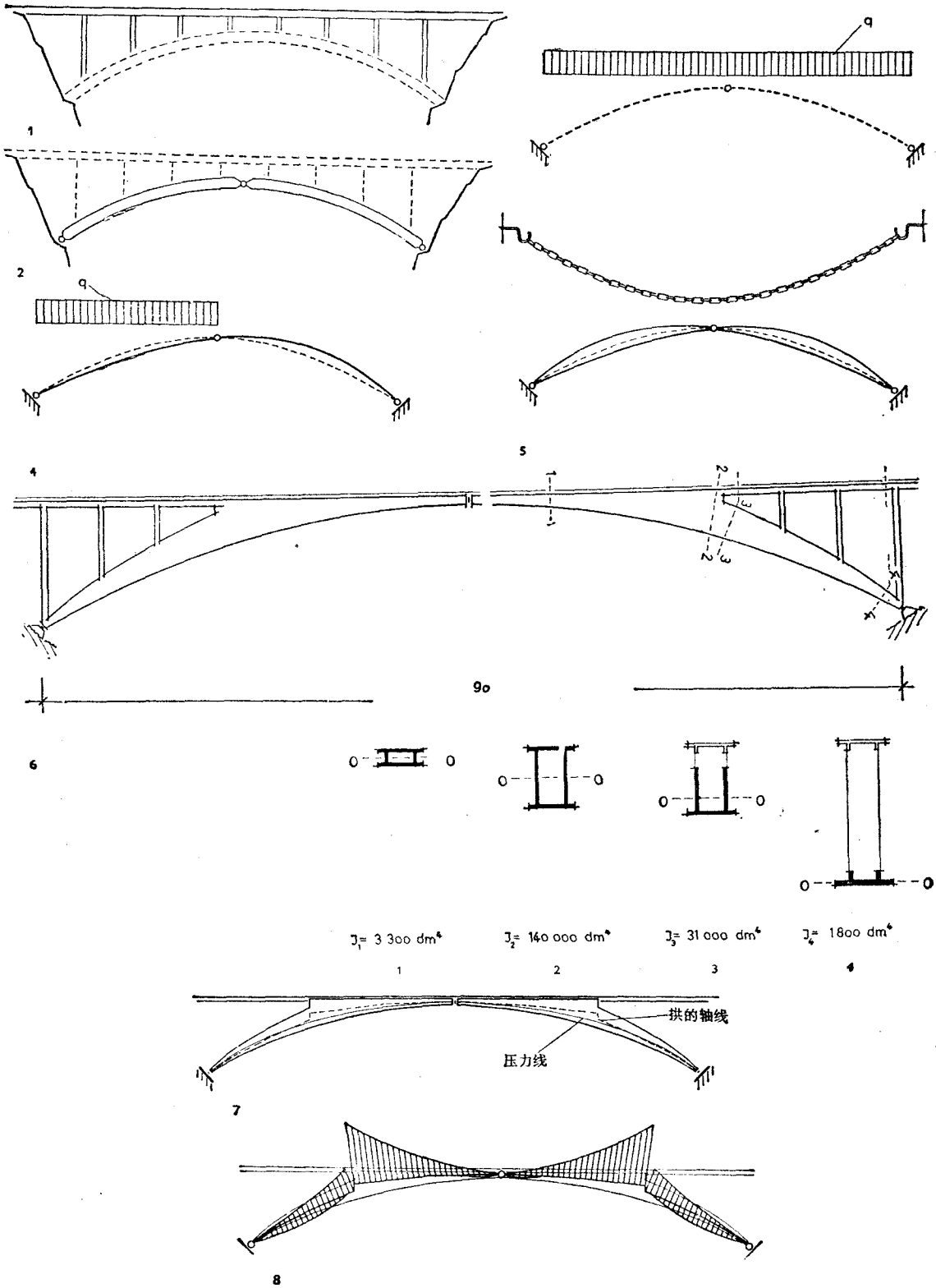
图 109 马亚设计的各种三铰拱桥[47], 其中 V 形支座式的结构造型是最突出的特点



照片：瑞士的图尔（Thur）桥[44]
工程师：罗伯特·马亚



照 片：瑞士的萨金纳-托贝尔桥（Salgina-Tobel）[44]
工程师：罗伯特·马亚（Robert Maillart）



首先将桥的结构按功能分成两部分。从桥梁的预定目的着眼，桥面系统（图 101-1）比较重要。桥面必须与交通路线密切配合。如无其他的阻碍，桥面应当是平坦笔直的，因为它主要是公路的一部分，还不是桥的一部分。为了使路面系统越过深谷，须有一个支承结构，即事实上的桥（图 110-2）。这两个单元，即桥面系统和支承的拱融合为一个整体。马亚的宗旨就是要获得这个统一体，他这样做完全是为了经济的理由。对他来讲桥面不是这么大的分量，他把它当作支承结构本身整体的一部分。

为了理解他的三铰拱，必须考虑最优形式是怎样按照力学定律构成的。任何拱如果只承受自重，也就是沿全跨静载差不多均匀分布，它的最优形式是相当于一压力曲线接近一个抛物线（图 110-3）。这条压力曲线酷似一条倒的悬链，即两端吊着的锁链。锁链中的各链节在自重作用下下垂，形成曲线，所有链节都受拉，而拱的组成段形成压力曲线，沿着这条线所有力都受压。任何偏离这条压力曲线，就会在拱中造成弯曲应力，就必须加强截面。严格遵守压力曲线就能取得最经济的比例。压力曲线决定一种造型，而这种造型必然符合结构的真实。古时的建造者始终没有利用这个原理。罗马人喜欢用半圆形，这只是一个几何图形而不是结构造型。哥德式尖拱差不多接近于压力曲线。但这个形式，还是首先由现代工程师发掘出来的，特别是用于桥梁设计。在实践中它显然是“正确的”，因而看起来适当而又美观。

压力曲线和拱的相互关系只适用于对称的静荷载，例如，只有桥梁的自重。变化的活荷载可以无限多样的不对称的组合方式作用于桥上。如果活荷载只作用在桥的一边，拱将变形，使受荷载的一边下垂，而另一边却上凸（图 110-4）。如果荷载颠倒过来，则过程适相反。如果两种不对称荷载的作用叠加起来，则在桥每边的弹性变形曲线将形成一个透镜状的区域（图 110-5）。这些区域就表示桥梁承受最大的不对称荷载时变形的范围。最大的变形产生在起拱点与拱顶之间的中部，即约在跨度的四分之一处。变形大表示弯矩大，弯矩大需要的截面就大。

图 110-5 所示的透镜状和拱的造型（图 110-6）有明显的相互关系，这个造型是悦目的。它清楚的表达拱的强大力量，特别是，承受拱设计中最严重的不对称荷载的能力。

一旦掌握了原理，形式必须适应实际的需要。其中最主要的是桥面系统的支承，上面已经讲过，支承的造型，位置和比例早已由它的功能确定下来。靠近桥梁的中部、即桥面和拱汇合处，变成箱形截面。它的上翼缘是桥面，下翼缘为拱板，以双腹板相连系（1-1截面）。箱形截面越高，刚度越大。在 2-2 截面靠近桥跨 1/4 处，也就是弯矩最大之点，它的刚度最大。透镜状表达沿拱弯曲的程度（图 110-5），如果为了反映透镜的形状，截面

图 110 用萨金纳-托贝尔桥的设计的详细分析来表明结构造型和力学原理之间的密切关系

- 1—桥梁包括不同功能的两个主要部分；
- 2—桥面和支承桥间的下部结构；
- 3—在全静荷载作用下，下部结构的最优形式（压力曲线）是一个倒的悬链，这个曲线与抛物线非常相似。在这种情况下不产生弯矩、以纯受压的方式传递荷载；
- 4—在不平衡荷载作用下，一个最优形式的拱肋承受增加上去的弯曲应力，相应地产生弹性变形；
- 5—如果每半边桥梁交替地承受荷载，它的变形将在上下两极限内变动。极限规定出透镜状的单元，这两个单元概略地表示出变形的程度，弯矩的大小，因此也就是拱的合理形状；
- 6—从截面 1 到 4 示出桥面如何与下部结构组合起来；
- 7—由于施工的要求从截面 2 到截面 3 有一个突然的转变，使拱的轴线不连续，这样轴线就与压力曲线偏离开；
- 8—轴线的不连续性相应于弯矩图的不连续性，反过来它与截面的突变又非常符合

的刚度应当向着桥台方向逐渐降低。实际上，在 2-2 截面过去一点，桥面与拱就脱离开来。箱形截面变成双倒 T 形。这种突变大大地减小了拱的刚变（参考 2-2 和 3-3 截面的惯性矩）。为了补偿这个缺陷，3-3 截面双倒 T 形的腹板比 2-2 截面封闭形的腹板要厚得多。这些部分的高度渐渐向着桥台方面减小以符合透镜削小的形式。在桥台处拱的截面降到最小。观察者立刻就认识这是 V 形支座的轮廓，虽然，此时它另有功能。

从箱形截面到双 T 形的突变，有另一个对造型与力学原理之间关系的有趣的运用。图 110-5 所示在交替的不对称荷载作用下透镜状和拱轴的弹性变形区域大略是一致的。同时和拱在这种情况下经受的弯曲强度大致是相应的，因为过去经常假定在静荷载作用下拱的形状应当紧密地服从压力曲线。由于现实需要（例如，要求桥面板与其他结构结合为一体）实际的拱有时偏离压力曲线。相邻的 2-2 和 3-3 截面的重心偶然错开，因此在这里拱的重心轴线有一个明显的凹凸（图 110-7）。拱重心轴与压力曲线脱离开后，随之而来的弯矩就直线上升，弯矩图就不再象透镜状那样平滑，它在 2-2 和 3-3 截面之间突然改变就象拱本身的形状一样（图 110-8）。由结构决定的形式的不连续性意味着在弯矩图中也有相应的不连续性。不连续的弯矩图就是这个造型的明证。问题的诸种因素，如桥梁的功能，桥面系统和下部结构之间的必要划分，拱的作用及其对实际需要的适合性等，这些都老练地按照经济原则彼此溶和在一起，最后形成了一个整体，使部分存在于整体之中，而整体也寓于部分之中。正是由于实际需要、力学定理和材料的结构可能性三者的密切融合，因而创造了这样一个非常和谐和非常完美的作品。许多人把它归功于马亚个性中的艺术气息，那是荒谬的。这个结构格局是如此完善，如此精确，如此鲜明地“真实”，这种真正的工程成就任何人无法把它和假想的艺术冲动混为一谈。实际上，这个成就证明工程技术和实事求是的富有目的的建造，它们本身就存在美的可能性。

这清楚地说明单纯地灵活掌握和善于运用技术知识也能创造相当美的作品，还可能是设计杰作，马亚谈到他自己的体会说：“这样，工程师……可以摆脱传统结构的陈旧形式，有绝对自由地充分发掘建筑材料。然后或许象飞机与汽车工业一样，我们将获得美和一种新的风格，以适合于我们所用的材料。然后，可能达到这样一个转折点，使公众的喜爱变成习惯，认为用传统方式建造钢筋混凝土桥就如同本世纪开始时制造汽车一样，那时汽车的原型是马车”[48]。

为何要如此重视马亚，因为他的作品对我们所讨论的主题非常重要。它证明我们所称的“结构造型”可以单独生存，还可以启发具有非凡价值的方案。它证明结构设计主要取决于必要的各种关系的知识。当然建筑学是比桥梁设计复杂性更高的一门学科。但是建筑学包括结构造型，而结构造型则如同设计桥梁一样是严格遵守力学定律的。其实假使能够孤立考虑结构，就会出现与桥梁同样的问题。既然它们不可能被“分解出来”，所以它们可能就更难了解，也更难掌握。无论如何，简单否定它是绝不可能掌握它的。如果没有工程师或者缺乏现代建筑材料和技术，现代建筑师是无法进行工作的。他必须承认和尊重建筑学中的“结构原则”。否则，他将会感到自己无力参予发现马亚的“适合于所用材料的新风格”。

三维 V 形支座 巴黎的联合国教科文组织大厦[18]的钢筋混凝土框架已经在本书

第78页中提起过。现在再来讨论它的收缩形的柱腿，这是个不寻常的可塑性的造型处理。(图111)。它们显示的活力并非完全来之于起框架组成部分的作用。它们是两个方向功能明显不同的立体造型。在框架的平面(图111-1)柱腿的上部宽大,在转角处弯矩最严重,向下收缩象V形。在建筑物纵向却是下部宽大,向上收缩。锚固在基础上保证结构纵向的稳定性。如同奈尔维的飞机库一样,弯矩图证明倒V形是个合乎逻辑的结构上有意义的形式。

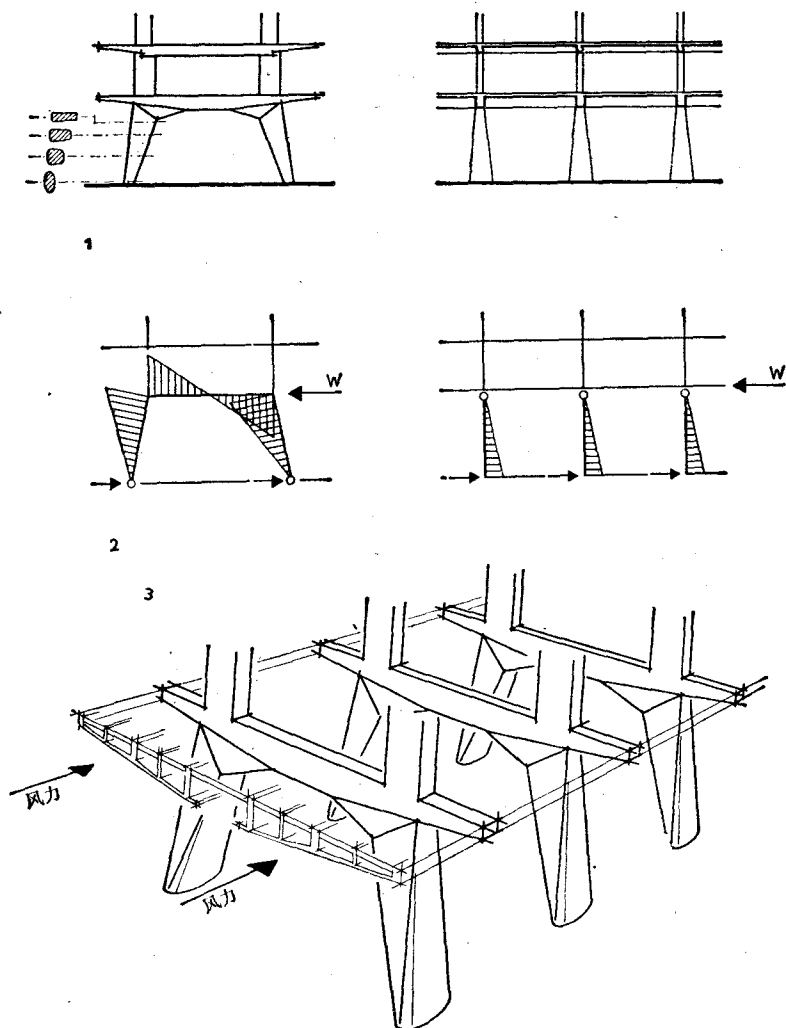
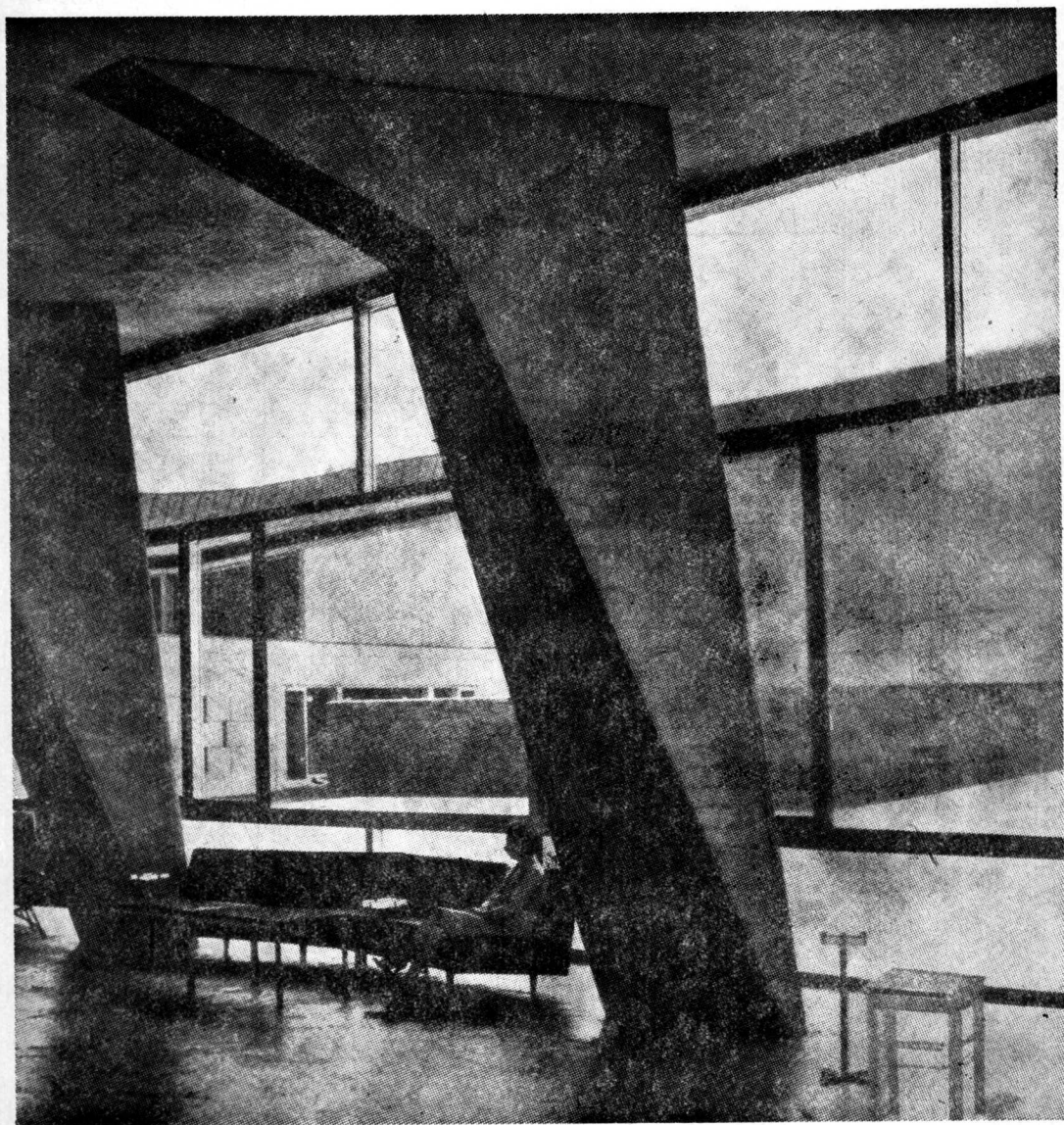


图 111 联合国教科文组织大厦中V形支座的形状[18]表现不同方向的不同功能

- 1—在横向, 支座作为两铰框架中收缩形的腿;
- 2—一在纵向, 支座抵抗风力, 它的作用象下端固定上端铰接的柱;
- 3—斜向显出造型的可塑性

奈尔维的设计是空前的。完全由结构定律的理解启发了他的灵感。他认为纵向与横向的稳定问题是不可分割的。两者在他的思想上是同时存在的, 是把它们做为一个整体想出来的。这样, 他就求得了一个综合答案, 即利用支座在两个主要方向的V形相反的办法,



照片：巴黎联合国教科文组织办公大楼刚架腿的细部[18]

建筑师：布诺依尔，策尔富斯（Breuer, Zehrfluss）；工程师：奈尔维

使两个功能区别明显。支座边缘统长而流畅，和对角线的干净细部给予这个不平凡的成功方案以很大的贡献。奈尔维曾说过，造型主要不是“计算”的产品。只要对结构的力学完整性不存在任何偏见，也可以采用其他的比例。例如，为保证纵向刚度而设计的支柱如此之多，那么就可以将底端的宽度减小。引用奈维自己的语言，结构不仅仅是一个正确计算的问题，而且是一个设计，它能提供最有力和最意味深长的说明。

另外一个了不起的例子是在密尔沃基（Milwaukee）的战争纪念馆[49]。在一个极好的基地上，沙里宁（Saarinen）和工程师安曼（Amman）及惠特尼（Whitney）采用了相仿的形式，做为设计中最突出的特点。其中，V形柱并不是两铰刚架的一部分而是承重实墙的支座，作为在顶部向后拉住的偏心柱。在另一方向是倒V形柱用来加强结构的抗风能力（图112）。

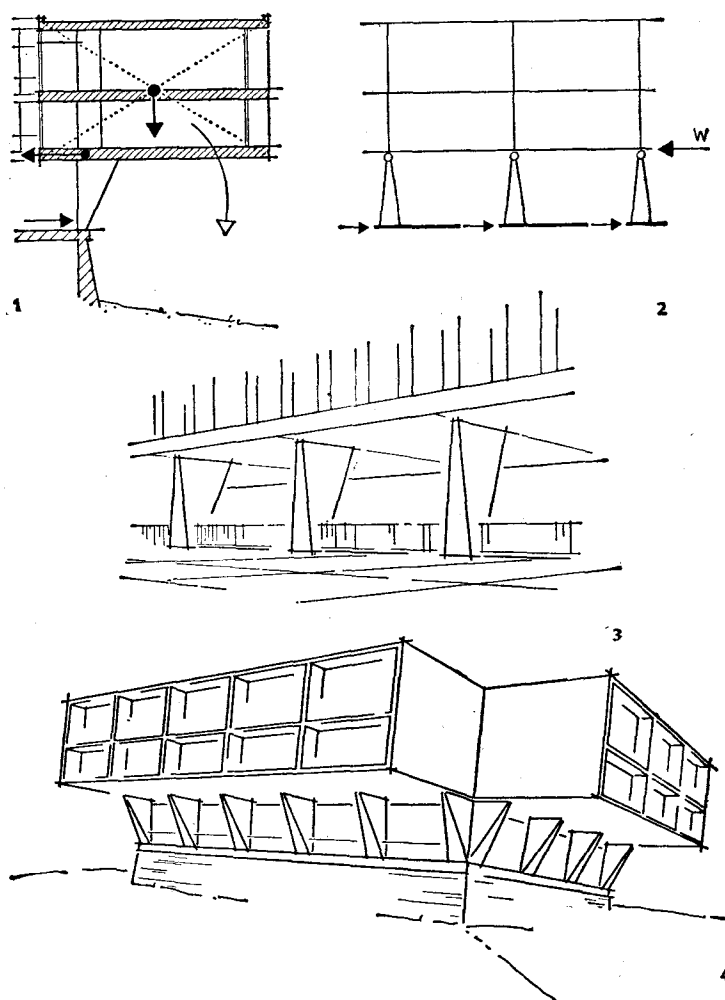
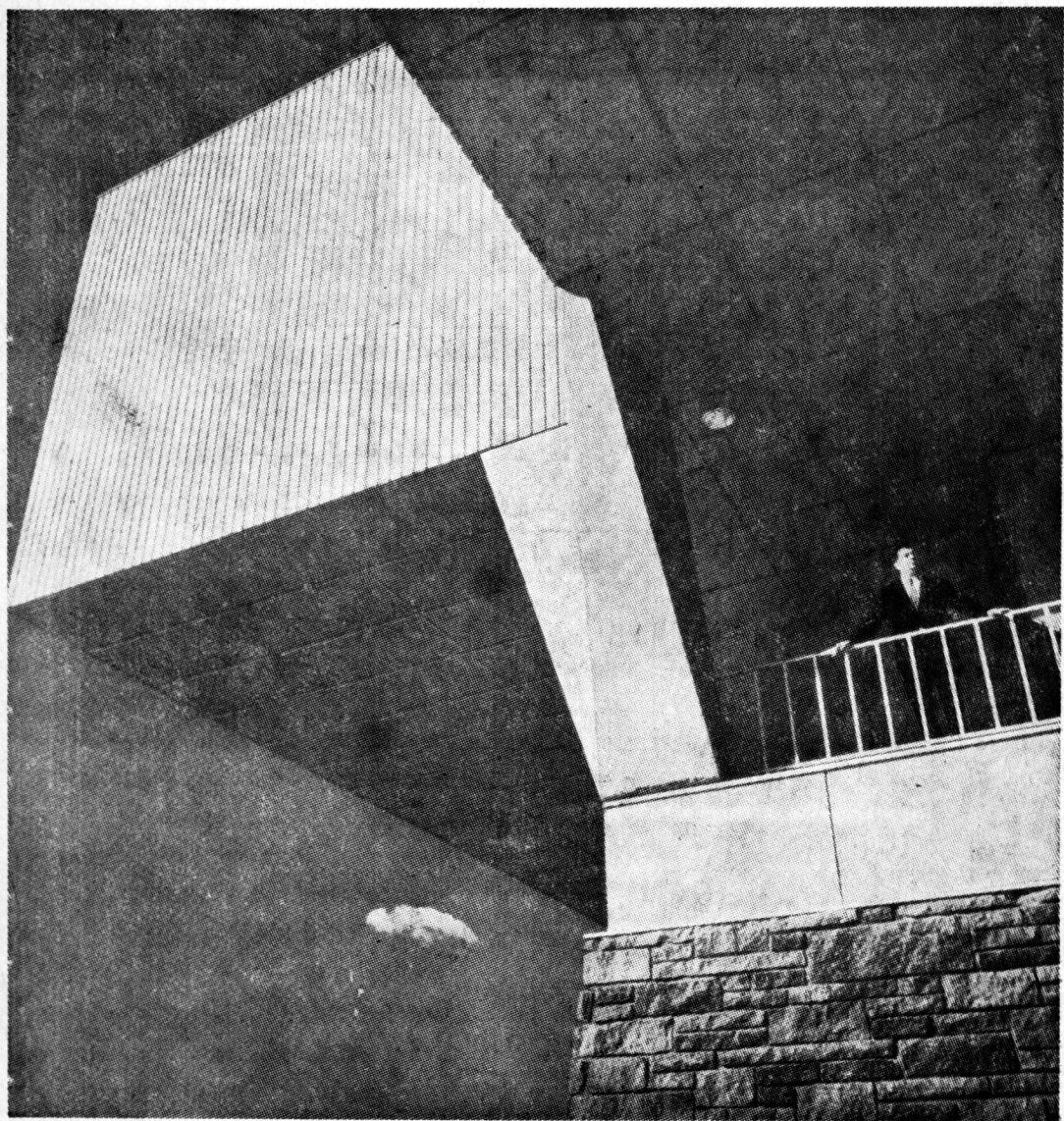


图 112 密尔沃基战争纪念馆中的V形支座

- 1— 在剖面中支柱看来象是上面向后拉住的偏置V形支座；
- 2— 在纵向剖面中支柱底端固定；
- 3— 从庭院看的侧视图；
- 4— 透视图显示纵向和横向的不同功能



照片：密尔沃基战争纪念馆[49]
建筑师：伊罗·沙里宁

至今，V形支座好象成为欧洲和南美特有的结构。多数美国建筑师忽视这种形式，这引起人们的怀疑，V形支座是否是稳重的北美人所不相容的轻浮手法。南美的建筑师们认为北美的建筑师们对有生命的活跃的结构造型这样反感，这是由于安格鲁撒克逊族人对大胆的可塑性的发明普遍不信任的态度所造成的结果。一本美国建筑杂志[50]中以自我批评的精神建议采用V形曾经引起辩论，或者这就是以后在审美力方面有了变化的预兆。这种态度的转变也反映在最近的发展中，包括密尔沃基的战争纪念馆(图112及第140页照片)。在美国钢结构占优势，其次为钢筋混凝土，这好象是排除V形支座的主要原因，其实，V形支座是理想地适合于钢筋混凝土的形式。由于钢筋混凝土的应用越来越广泛，V形支座也必将成为美国可接受的结构造型。

那不勒斯火车站的设计 在讨论V形支座的特殊形式时，我们最后以描述那不勒斯火车站设计竞赛中卡斯蒂略尼独创性的设计[51]来结束关于V形支座这一题材的特殊变化的讨论。这个设计并没有得奖，但曾被广为报道和讨论。

卡斯蒂略尼想创造一个亲切的无拘束的空间，试给陌生人对这个城市一种温暖而自然的引介。他要的正和那种混凝土和钢构成的关卡感相反。为此，他设计了一个柔和的波浪形的薄壳屋顶，这些薄壳从一群三尖叉形柱有机地生长出来。就是因为这些叉形柱我们才将卡斯蒂略尼的这一设计放进本节中讨论。它们是不能从整个设计中割开的。它们与屋顶形成一个统一体，而且只有从这个统一体来看才能了解这些叉形柱。

这些三尖叉形柱布置在一个三角形网格里。每个叉形柱支承一个薄壳屋顶单元，同样基于等边三角形。在每三个叉形柱及其所支承的屋顶单元(图113-1中的1、2、3)之间悬挂着第四个屋顶单元(4)(参看由下向上看的图113-1)。这样，相同的格子重复地组合成屋顶的格局。

我们已谈了不少来说明这个系统的几何图形。这个空间体制各部分之间的互相联接，特别是从三叉支柱端部有机地发展出屋顶薄壳这种方式等是难以用文字形容的。它的剖面(图113-2)，壳体单元的透视图(图113-3)和本书第143页的照片都更有说服力。不管精巧交织的可塑性的造型是多么复杂，几何概念的明确性和多种单元组合的自然都是完全令人信服的。从一个草图(图113-4)发展起来，最后成为有机地完善的形式(图113-5)。从整体来看，叉形柱是这个结构中很重要的部分。每个叉枝越近根部越厚。表明三个叉枝互相压紧并在底部牢固地联接在一起，支承在一个特殊设计的抬高的底座上，形成了一个铰。三个叉伸向三个方向，它们的上端与屋顶的壳体单元舒顺地连成一气，尽管底座和支柱是铰接的，叉形柱的空间作用保证了整个系统的稳定性。这里可能要问叉形柱收缩是为了什么目的。如果叉形柱支承在铰上，收缩形的优点不是很明显的。可以对照本书第113~116页有关尼迈耶对叉形柱的论述。

在结构上这是很关键的一点，对于整体来讲它是非常重要的设计因素。柱叉枝和屋顶的接触的效能保证了空间稳定性，这是对的。但是，这不是一个明确的接点，因为两个因素溶成柔和的曲线。屋顶的凸面、凹面、凹口和透光孔加强着屋顶可塑性的直观效果，因此，屋顶的可塑性，要求从支座那里获得高度的刚度。选择这个型式，将三个叉枝向着一个刚性结点处渐渐加宽，就满足了上述的要求。

本章题名“V形支座”。对许多读者来说一开始也许就觉得这个题目不说明什么甚至

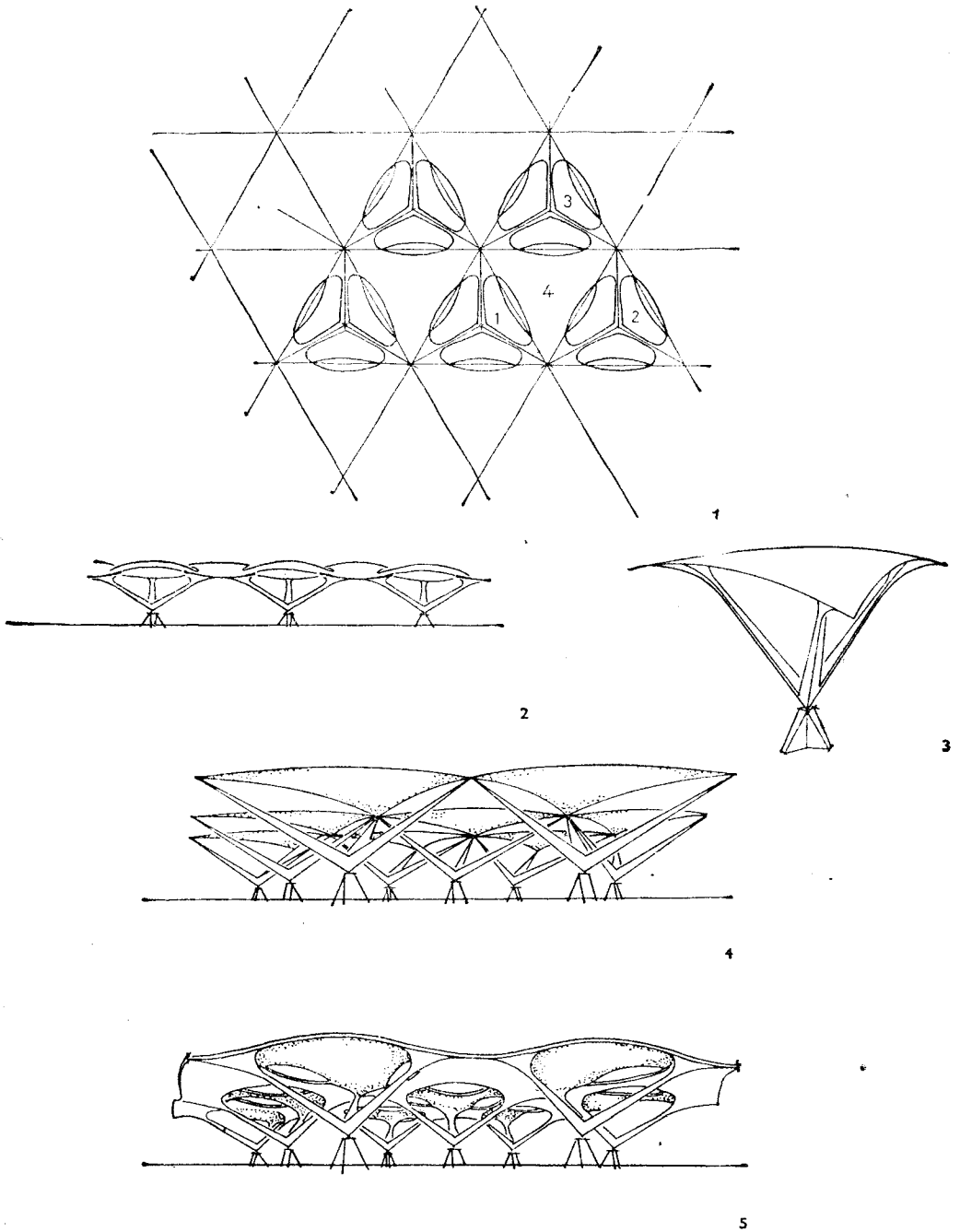
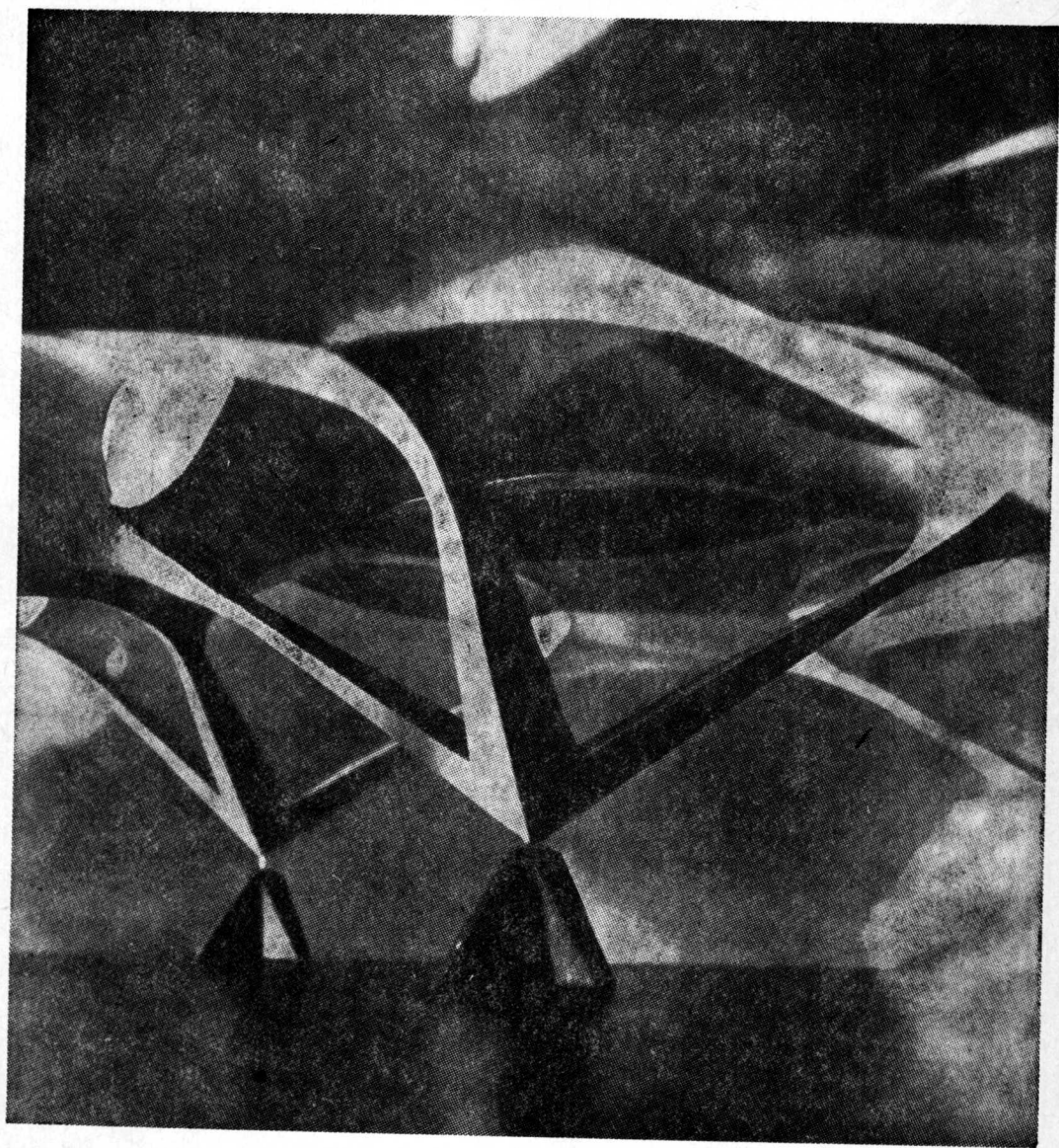


图 113 意大利那不勒斯火车站的设计[51]

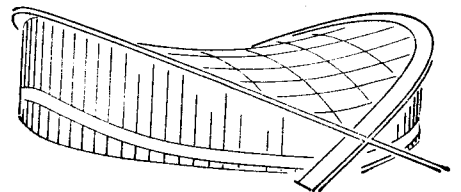
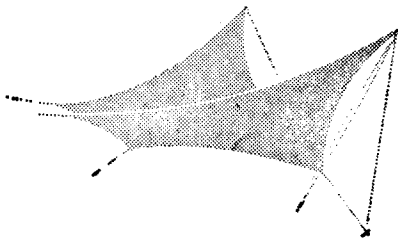
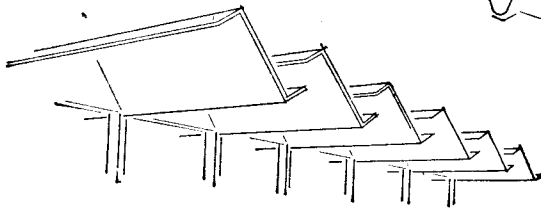
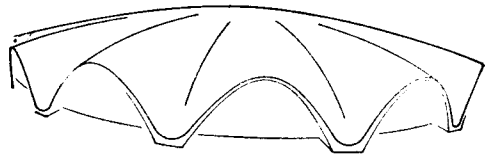
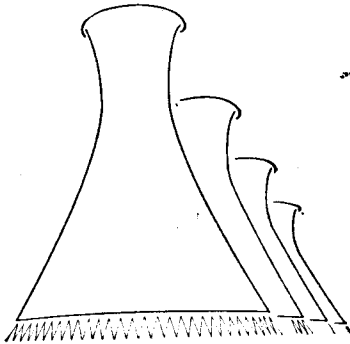
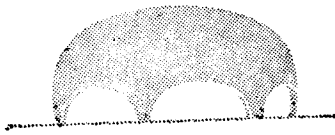
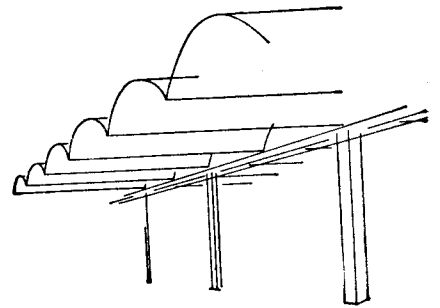
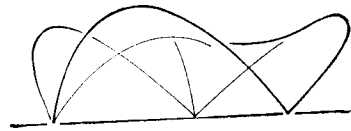
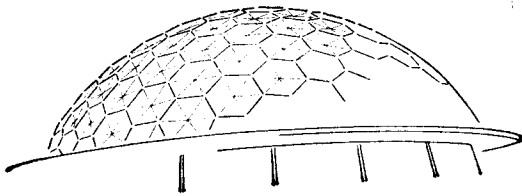
- 1—从屋顶下看叠加的基本三角形网格。三叉的支柱支承三角形的壳体单元(1)、(2)和(3)。第四个壳体单元(4)、悬吊在那三个单元之间；
 2—剖面图；
 3—一个单独的三叉支柱及其相应的屋顶单元；
 4—简化图；
 5—试图表达由前面看到的情景



照片：那不勒斯火车站的设计[51]支座的细部
建筑师：恩里柯·卡斯蒂略尼（ Enrico Castiglioni ）

毫不说明什么。作者自己也承认最初对V形支座的想法只认为是一个勉强合格的题目。但是，当他更深入地占有资料并将笔记累积起来的时候，他开始认识到V形支座绝不是一个表面的现象。一方面由于它的普及性与多样性，另一方面却又常被胡乱对待。因此，作者认为值得对这个造型尝试进行一次基本的广泛的分析。不过为了不使读者感到厌烦，因此有必要将讨论的内容限于一定范围之内。为此把材料集中起来按照各种形式进行分类，而不是按一个抽象的理论。坚持要对这些模棱两可的标题进行严格的科学处理的读者或许会反对这种探讨的方式。他可能认为从力学定律出发，理论性地草拟设计的许多可能性是不行的。他可能争辩说这样一个任务的目的和范围将是不明确的，以致于难以避免这种令人遗憾的印象，那就是试图单纯用科学的方法去解答设计的问题。

作者赞成将实际的结构物放在突出的地位。让敏感的观察者天天注意到的典型的形象，决定题材，从而得出图解分类系统。当然还有许多不足之处。我们所作的解释也不一定是唯一的解释。若要声明它不是单纯考虑技术和计算的结果，因此它没有 $2 \times 2 = 4$ 那样的明确性。所以，不是所有的结论都富有论证力，实际上这不是关键。不如说明，技术科学与艺术之间的边缘领域也是在结论性的论证中有一定分量的，“正”与“误”不含糊的解释也必须放到判断的天平上去。说明一个严肃而明智的分析将为发现和理解更重要的结构造型铺平道路，在发现、判断和理解那些真正印象深刻的新造型，例如V形支座之前，必须首先弄清它们的结构原理。



第三章 空间结构

每个结构天然的是物质的和三维的，因而，实际是空间结构。那么本书中所叙述的“空间结构”有什么特殊意义呢？它们与其它体系，例如骨架或V形支座有什么不同呢？

在本书开头两章所叙述古老的木结构与砖石结构的房屋，骨架和刚架结构的建筑物，尽管它们本身具有三维性，但并不是“空间结构”。木结构屋顶，现代钢筋混凝土骨架，即或古时的穹窿都可以假想将它们分解成为非三维的平面系统。在设计传统木屋架时，第一步先计算横向“y”平面的椽子(1)的尺寸。第二步求檩条(2)的适当尺寸檩条在纵向“x”平面与椽子成直角(图114-1)。实际上，现实中椽子与檩条在空间中交叉，但是我们有意不去考虑。这样做法不但简化计算，而且因为在“古典的”结构中，将三维效果是否放进去，实际上对最后结果没有差别。计算上耗费时间，得不偿失。

我们所讨论过的结构，例如骨架及刚架都没有必要按照空间作用来考虑，从经验上按照平面设计是完全足够的，工程师可以信心十足，这样分析出来的结构有很大的安全度。例如，尽管墙体损坏到对屋架已经不起多少支承作用，但木屋架仍然牢固地拉在一起。又例如，当砖石房屋已经烧坏，具有坚固的箱形截面的高耸烟囱和墙角都依然屹立在那里，这是因为它们有额外的三维刚度，在古典的结构物中甚至在现代骨架结构中空间刚度不是经常发挥作用的。

除去一些例外的结构例如中东薄泥圆顶，在世界建筑史上一直到现在都没有建筑物把空间刚度做为设计重点，这正是现代空间结构新颖而具典型意义的所在(图114-2)。在“空间结构”中三维性是必然存在的，三维性是如此的重要，如不顾它等于抛弃设计中合理的基础。这种结构的内在秩序和外部形式主要是空间作用的结果。

今天，当结构造型的研究才刚开始，特别是当技术训练发展得如此迅速时，就敢于为空间结构的外形特点提出定义，这未免太武断。虽然如此，一些偶然实验性的讲课，和思想非常开朗的年轻一代的反映，鼓舞作者去冒这场风险。如果他能引起人们对这个课题的兴趣，仍然算是取得不小的成功。为了向时髦的形式主义作斗争，认识上的提高是首要前提，因为形式主义已经开始影响空间结构的设计。

经常可以在一般家庭用具中找到三维结构的例子和许多其他东西一样，这种物品是根据创作思想和适应特定材料满足特定用途的情况下，设计出来的。例如，瓦罐、钢精锅、汤匙、钢盔、有斜辐的车轮，这些都是古代简单的造型，它们的作用是和空间结构一样的。不但如此，还有更复杂的东西，例如，锻造的盔甲和独木舟之所以能取得相当大的强度，完全归功于它们的三向的刚度，证明人类已经掌握早期造型的技术性(图115)。

今天我们周围都充满了用这个原理设计出来的物体。自承的车身强度就来自压制成型的金属薄板。同样的概念也应用于船舶和飞机设计。电话机的听筒和灯泡也是同一题材的

变化。任何地方只要由薄片或薄板做成刚劲的形状，灵感就来源于“空间结构”的三维性。

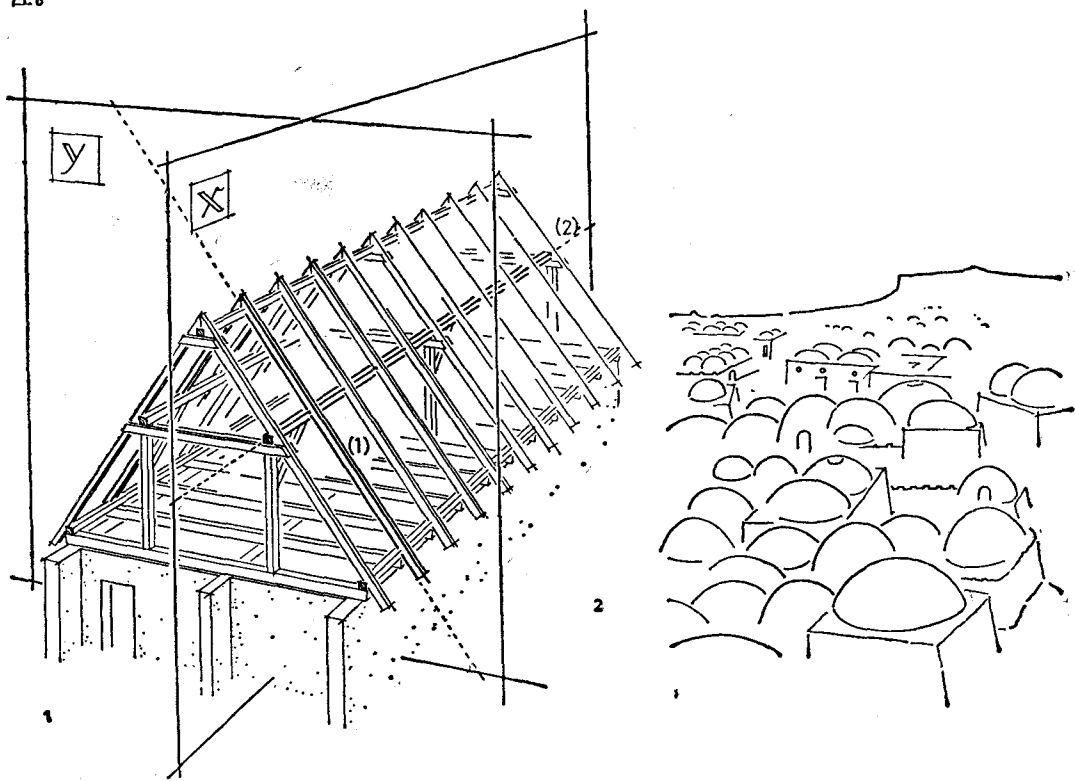


图 114 “平面”系统与空间结构的主要区别

- 1—工程师并不将传统的木屋架按空间结构来处理。他首先设计在“y”平面的椽子(1)，然后另外计算在“x”平面的檩条(2)。每个构件都按承受它自己的荷载来独立设计；
- 2—中东的泥制圆顶是历史上少有的空间结构之一。它完全是从它的空间作用取得稳定性。这些圆顶既不能分解为几部分也不能分成平面系统来设计

就是这同样的灵感鼓舞着建筑师和工程师发展了新颖而非凡的建造造型。钢管的网络，自然波浪形的壳体，或是在无柱的竞技场上象一个巨大的帐棚那样的悬索网，都由于具有三维作用的效能而站得住。我们面临一个造型的新世界，其边界还很难确定，规律还摸不透，许多设计原则还是个谜。在这些新的可塑价值中，革命性因素是无可置疑的。但是我们在应付它们时，还不能充满信心和充分理解。以下的叙述只是澄清这个看法的一个尝试。

优美的造型是发展新结构的关键。当技术性方案还在激烈争论的今天，在许多情况下不可能通过最后的判断。不过，对结构造型的讨论，总可以对澄清某些尚未回答的问题有所帮助。实际上，结构设计者从超越结构理论所能达到的阶段，而进行的造型分析那里完全可能取得益处。正确的造型是力学定律的一面镜子，有时，镜中的影象比物体本身更易于看清，这完全在于我们是从什么角度去看。

这里有必要将有关的因素集中起来，分四个大类加以介绍：

1. 空间网架 由大量单个构件组成。这些构件都是轴向受拉或受压，它们彼此撑连而成一个空间体系。

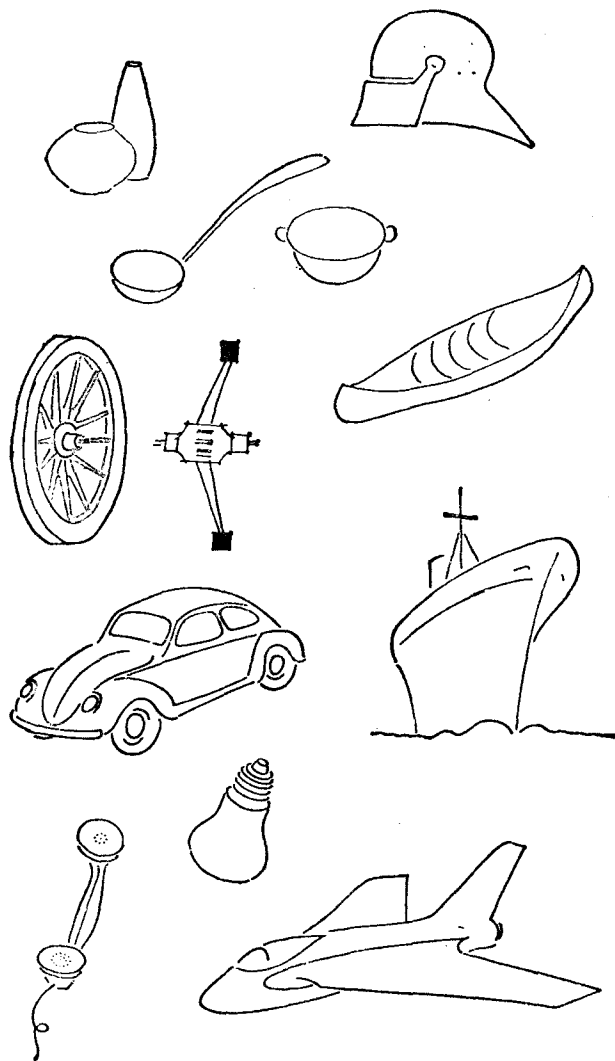


图 115 一些古代的用具和现代的工业产品都利用空间结构原理制成。瓦罐和薄金属板的车身，两者都具有很大的刚度

2. 折板结构 由折叠的刚度取得强度。基本薄板是在板本身平面受拉，受压和受剪，与板平面正交方向受弯。

3. 壳体 是薄的曲面，在理想的情况下，它的应力限于正向应力和剪应力，排除弯曲应力。

4. 悬吊屋顶 由缆索，钢丝网，织物或薄片形成。完全受拉。受压和受弯支承件是整个设计构思中必要的部分。

不同的结构是按形式分类的，然而，精细的分类是不可能的。因为界限太易改变。将来会发现是否还有严重脱漏，是否今天看来已清的界限又会变成模糊不清。不过，目前采用的分类系统对我们阐述的题目是足供充分全面说明问题的。

空间网架

桁架由竖杆，水平杆和斜杆组成。中古时代常见的桁架是屋架和木栈桥，现代的建筑师很少采用平面桁架，有少数人尝试用桁架作为建筑设计中的一个元素，密斯·凡·德·罗在曼海姆（Mannheim）设计的一个剧院[52]就是这种尝试之一。建筑师们确实被采用钢结构有可能做到细部干净利落而越来越吸引住了，他们正倾向于在学校，大礼堂等等民用建筑以及工业建筑中采用桁架；然而，还不可能设想桁架作为一个结构型式而能满足最苛求的建筑艺术要求（图116）。

以上谈到的桁架在我们限定的概念中还是“平面系统”。特别在半露木结构和栈桥结构中不同的结构平面，很容易区分清楚。每个平面规定一个独立的力系。同样原则用于现代木屋架倒不是很明显，因为木屋顶各方向都有椽子和支撑给人以具有三维刚度的空间网架的印象。实际上这种刚度确也存在，但是，由于结点的粗糙和分析的困难，不允许我们把这类屋顶当成真正的空间结构来设计和计算。因此，即使是现代的工程师和设计师一般都把木结构屋顶作为二维的而非三维的力学问题来考虑。将结构和作用在它上面的各种力分解为两个正交的平面系统，是应用力学的基本规定之一，但是，本章将讨论的空间结构不用这个规定。

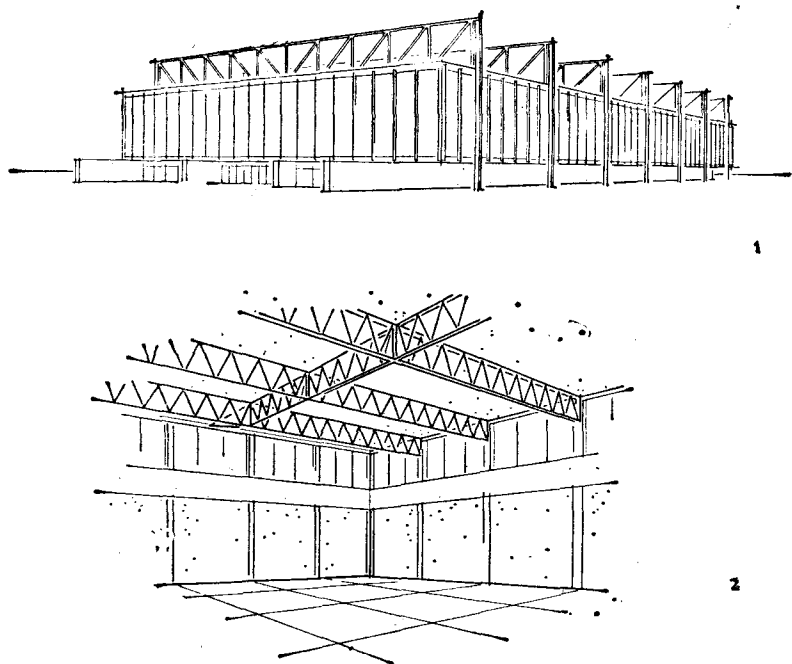


图 116 平面桁架不大用于现代建筑

1—密斯·凡·德·罗在德国曼海姆设计的一个剧院[52]，这是桁架作为建筑艺术元素少有的例子；
2—英国的一个学校建筑采用暴露的花格梁。

人类髋骨的结构是个突出适合于用来说明空间网架作用方式的一例[53]。身体的重量落在“悬臂”端部的一个圆头上，相应髋骨的轴线产生弯矩 $M=p \times a$ ，这个弯矩值并不是固定的，它随着身体转动时力的变化而改变。身躯的位置和骨节转动的角度影响这些重量

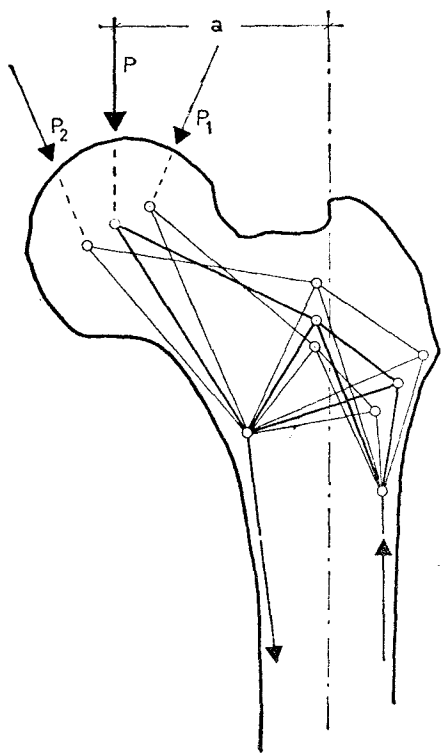


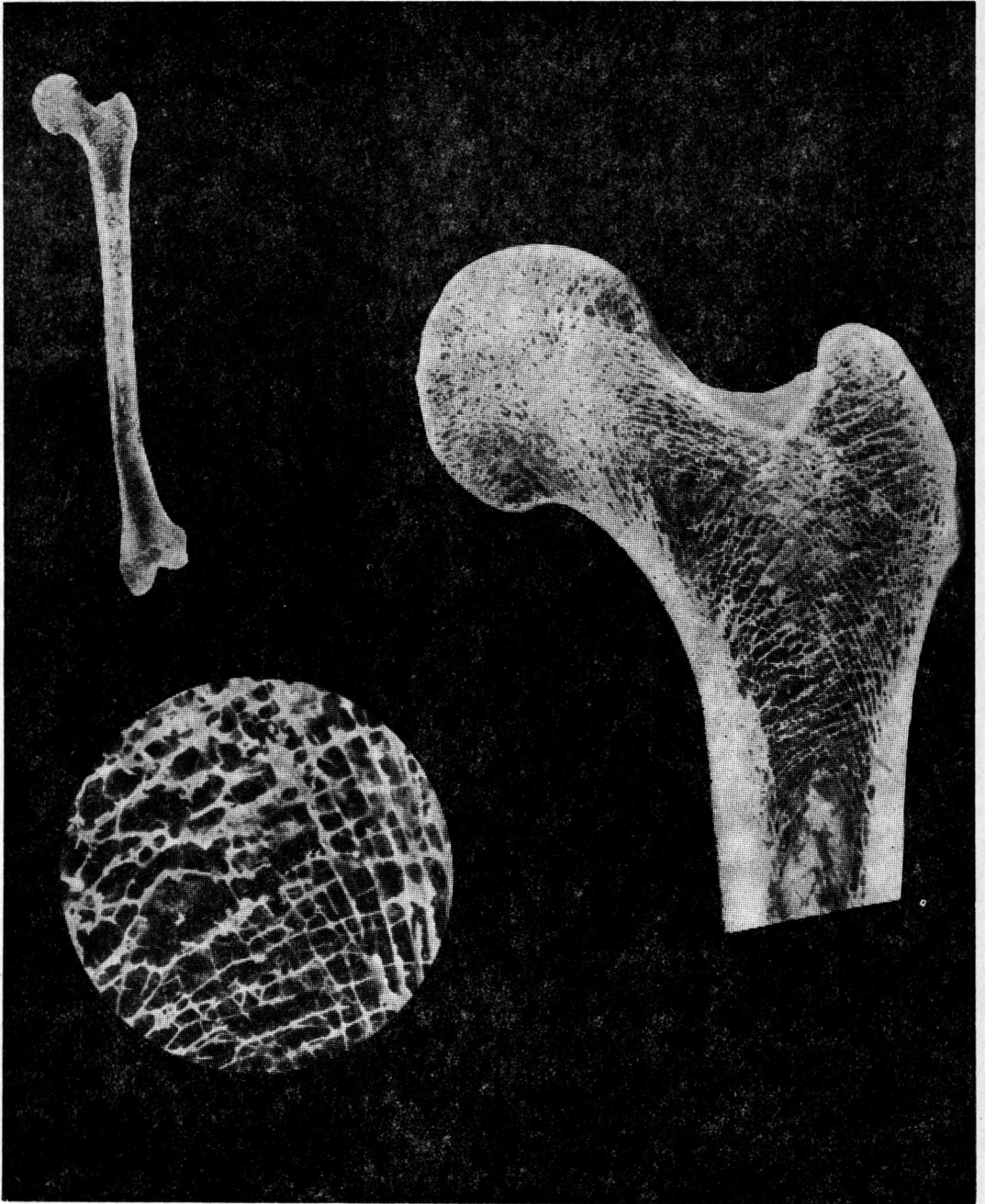
图 117 人类的髋骨是具有高度表现力的空间结构。示图说明髋骨是如何有机地适应施加力的方向的变动[53]

合力的方向。髋骨是生来很理想的足以承受所有这些波动，因为它有一个适应任何荷载形式的支承系统。这些多重系统融成一个三维单元。它们相互贯穿，从而缩短单个元件的有效长度，使元件加强分担部分荷载，因之帮助增大了整个单元的强度（图117）。

大自然不需要高等微分方程的演算，而赋与这个复杂的网构以正确的比例。每样东西在不断适应变化着的静与动荷的过程中有机地发展。这是完全清楚的，骨骼结构不是作用在单一的平面上，而是依靠身躯的动作和位置，灵活适应来自各方向的力。所以，大自然不用直角也不用一条直线便创造出一个最美妙的空间构架，也许它的经济效果是人们无从做到的。骨骼中的“构件”不象结构的断面，而更象硬化的角膜，这一事实只说明有机的大自然喜欢更复杂，更美妙或许更有力的结构元件。当然，从一开始，设计者就受到了局限。他的数值技能与大自然成长的微妙力量相比是很差的代替物。他的作品也许永远落在大自然成就的后面。无论如何，大自然生长的和人类设计的空间结构的相似性是惊人的，同时也是鼓舞人心的。

大自然喜爱的“三维”造型比人类设计的“平面”结构更富有表现力，它们是理想的物质的更高级的创造。对这一事实的公认是和当代工程思想的方向改变有联系的。将来历史学家或者会谈道从二维设计到三维设计的“突破”。这就把工程师引到建筑师领地的边缘。也就是空间的塑造。我们希望未来的建筑师与工程师会越来越地进行合作。

曼内斯曼（Mannesmann）体系[54]的钢管脚手架采用任取长度的标准直径的管子以夹钳联成任取角度。虽然单独一根管子和单独一个夹钳的强度是有限的，可是有效地钳在一起，管数是不受限制的。因此，这个体系对不同的用途和不同的荷载有高度的适应性。因而它可能组成一个有些类似有机生物所具有的灵活性。用这种方式，简单的杆件组成一种预制的集合体，可以出现生动的富于表现力的结构造型。但是，长时间管状结构只被用于临时性的结构和脚手架。显然建筑师们还需要进一步发展这类造型美学上的魅力和丰富的变化。其中的一个原因，可能是为重复使用而设计的节点细部仍然带有不稳定的柔韧的性质，尚未达到应有的细致程度。最后，从结构的角度来看，这个体系有一定的缺点，因为这些联结件总是偏心传力，所以管状杆件总是不能避免受弯（图118）。



照片：人类髓骨的剖面图

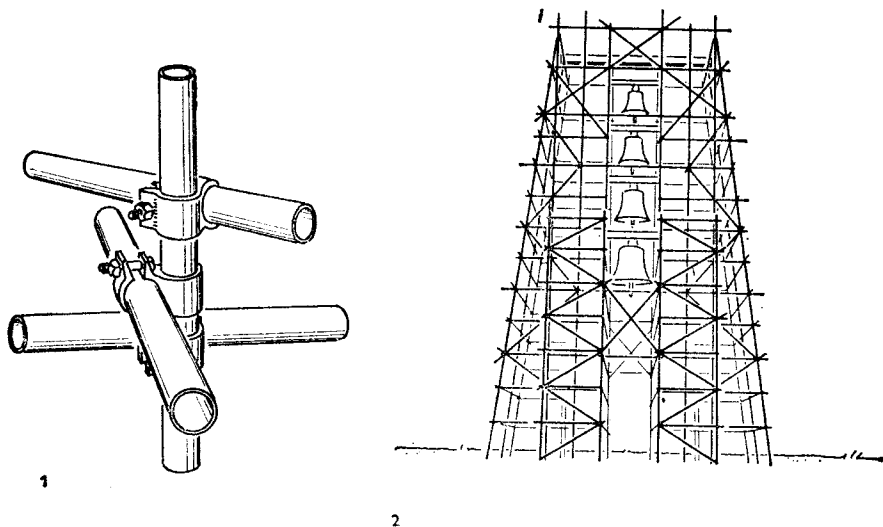


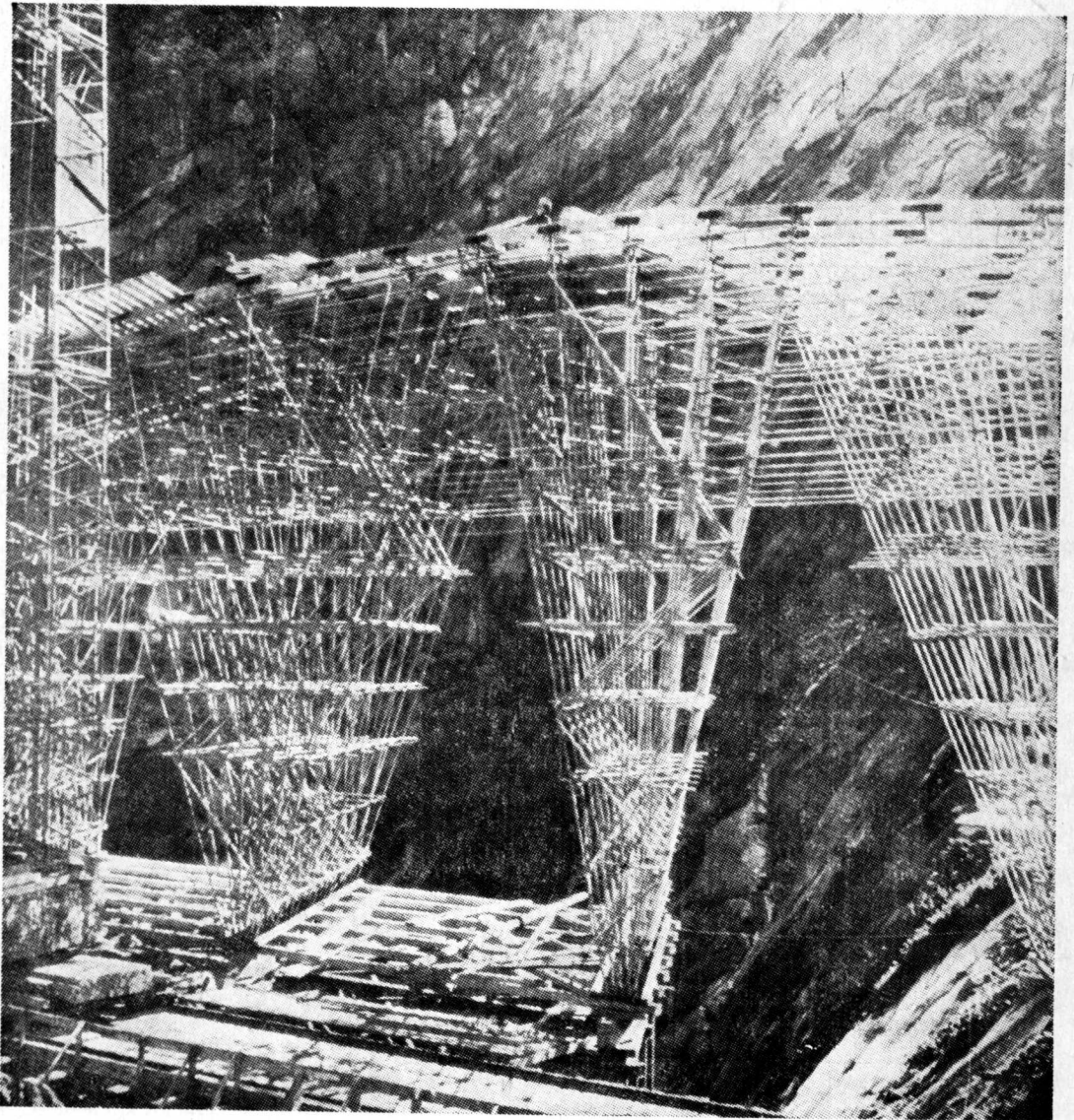
图 118 具有夹钳结点的钢管脚手架(曼内斯曼体系)[54]

1—钢管可以联成任取角度，可以利用任取长度的任何数目的钢管；
2—钢管搭成临时钟塔

梅罗 (Mero) 体系采用一定数目的杆件和设计得很好的球状联结件用螺钉旋紧形成“节点”，不会产生弯矩。每个节点可有18根杆件汇在一起，这些杆件的方向清楚地分为三个互相正交的主轴和中间的 45° 斜轴。最后结构造型的特点是，严密的几何规律性被重叠的透视效果所活跃。在一些临时性的展览馆有时可以看到令人感兴趣的组合。从力学上这种体系的承载力有限，由于杆件的标准化，所以同联接件一样，只能承受规定的荷载。很明显，这个体系作为整体的强度是由受力最大的元件确定的 (图119)。

在美国尤尼斯托 (Unistrut) 体系[57]采用轻质槽板做的预制部件，是为永久性的而不是为临时性的结构发展的。例如，曾用于密芝根 (Michigan) 韦恩 (Wayne) 大学建筑学院的扩建部分，也曾用作儿童游戏场的屋盖如图 120-3。实际的结构是个空间网架多向系杆，高度超过三英尺，特殊制成的联接件是简单可靠的，用螺栓接合。体系的承载力纯粹根据实验的结果。据称两向净跨12.5米的结构能承担300公斤/平方米的荷载。用于两向跨度15米的结构也是可行的。结构的承载力由实验确定，暗示理论分析是不容易的。这类结构的特点是把反力集中的支柱顶部的棱锥形加宽，这就引起困难。如果屋面结构支承在较狭支座的点上，那么紧邻柱顶的构件必然会产生超应力。至今这个体系尚未推广。是否因为与一般结构相比，造价太高，或美观上的偏见还是个障碍，或者对这种“灵活性的”结构的优点还缺少洞察，仍很难讲。无论如何，这是一种新型而又富于表现力的结构，所以值得在本章中加以介绍。

这里还有1953年，密斯·凡·德·罗为芝加哥会场[59]做的设计。虽然这个设计不象尤尼斯托体系那样采用大量生产的预制部件，因为两个方向的跨度约为220米，虽然不可能采用足尺比例的试验来确定应力，但是，结构原理是一样的，仍旧是把荷载分散到各向的空间网架的原理。屋面结构原来设计为9米高，整个建筑物高36.5米。结构造型和尤尼斯托的一样，只是规模大些。这么多细巧构件纵横交叉产生的很有吸引力的透视效果，将



照片：曼内斯曼脚手架[54]

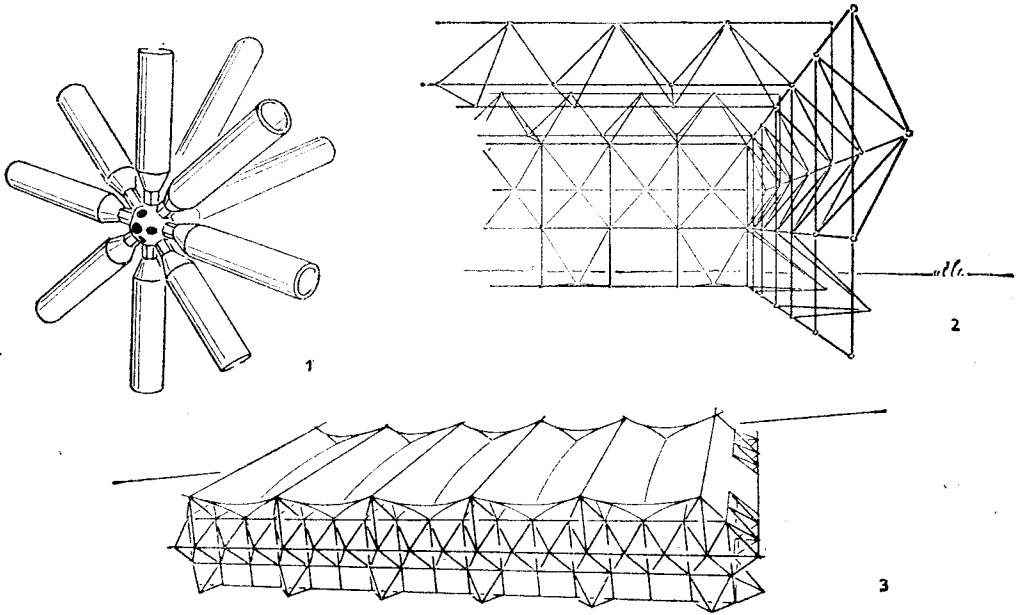


图 119 采用钢管和螺纹联接件的结构体系(梅罗体系)[55]

1—任何结点可以联接多至18根钢管;

2和3—1957年在柏林的观摩建筑(Interbau)展览内建的结构物

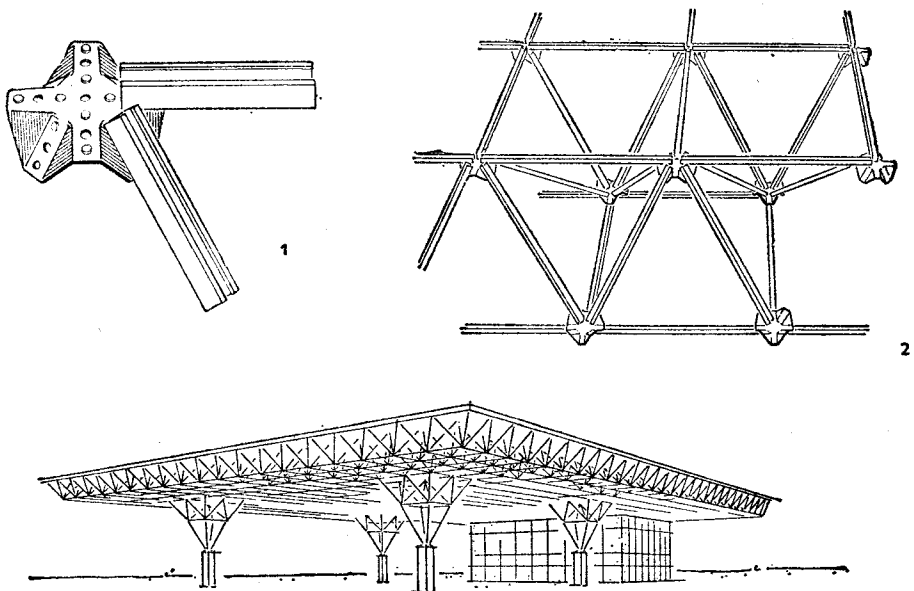


图 120 预制结构采用螺栓联接的轻型截面(尤尼斯托体系)[57]

1—一个联接件;

2—空间网架细部;

3—密芝根韦恩的儿童游乐场[58]

会在建成后表现出来，其效果的大小主要要看屋面结构下缘如何处理。也要看照明要求如何以及屋架本身占有的9米空间的建筑处理如何。比较方案的立面清楚地表明密斯·凡·德·罗试图使内部结构能从外面看得见（图121）。

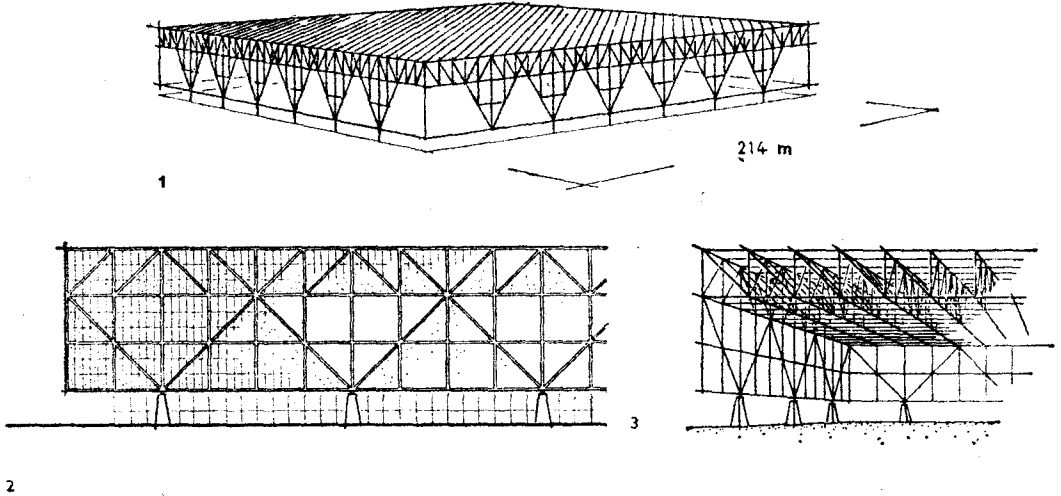


图 121 密斯·凡·德·罗设计的大会堂[59]

- 1—模型斜视，建筑面积大约214米×214米，建筑高度36.5米，桁架高度约9米；
- 2—比较方案的立面暴露结构；
- 3—内部透视的钢网架。

现在在美国工作的康拉德·瓦克斯曼（Konrad Wachsmann）为巨大的悬臂式飞机库，发展出一种易于安装的预制管件体系[60]。设计是按空间网架设想的，他想覆盖一个116米×245米的大面积而只在结构中部设少数几个支座。这个设计令人印象深刻的地方是结构由预制部件拼装而成，所以易于拆卸、运输后，又在另一基地重新安装起来。那惊人的模型照片曾经在全世界的建筑和工程杂志上发表过，这些照片也曾激发许多人去思考和设计这类的空间网架。这么大胆的设计能够实现的程度怎样至今尚难断定。其基本困难是活动性与如此大尺度的结构之间的协调问题，这是个本质问题。这个基本困难可能受挫到什么地步还难以看清。经验还实在太少。不幸得很，尽管进行了大量的宣传，对于这种方案或有关问题至今我们尚未听到有什么进展（图122）。

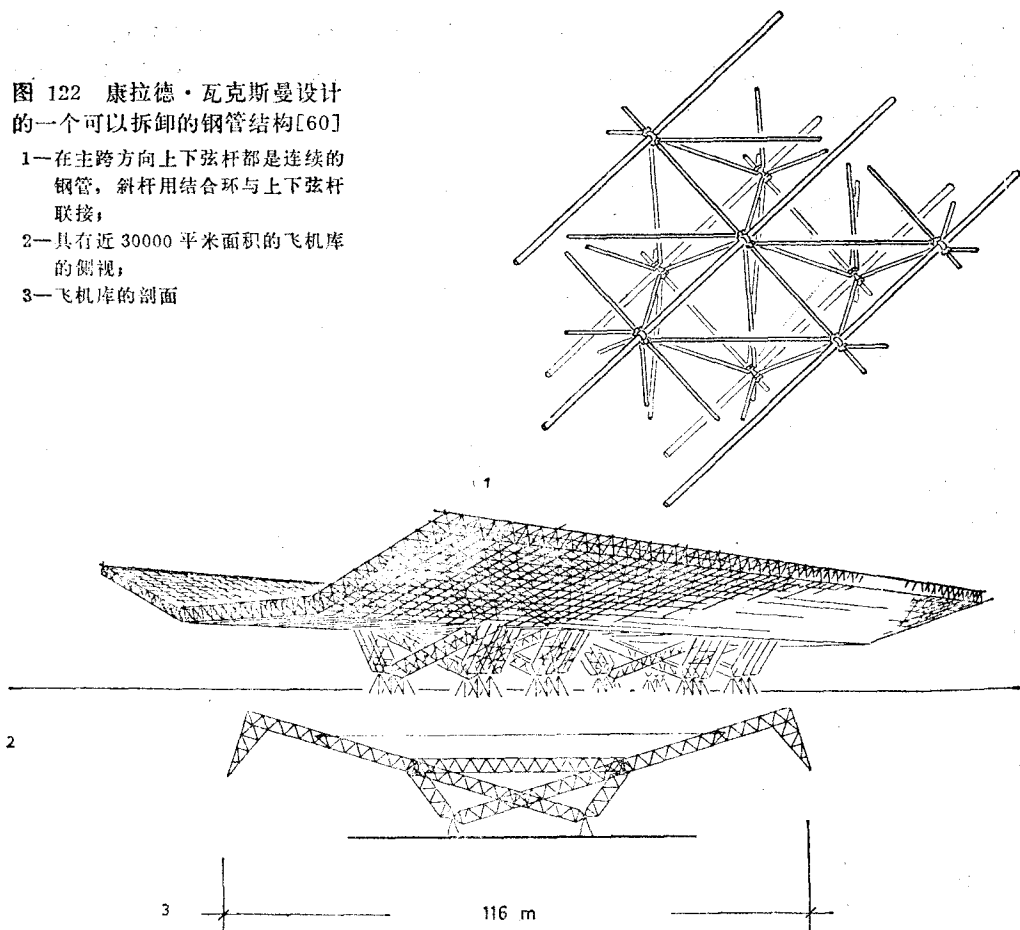
总之，我们试图对预制部件装配而成的空间网架的典型性能提出几点看法：

1. 如果在一个特定结构中所有杆件完全相同，或者只有少数标准型号，除去纯粹的重合及有意的重复之外，只有某一特定型号中的一个杆件是在力学上和经济上被充分利用了的。例如，结构中用于不同位置的1000个相同杆件，999个将不会充分受力。因此它们的截面尺寸都嫌过大。为了对比，我们注意到骨骼中没有两根纤维是一样的，各根的形状完全符合各自的功能。所以用完全相同的预制部件装配一个建筑物显然不是利用材料的经济办法。主要受弯的网架尤其如此。因为个别部件的应力悬殊很大。但奈尔维设计的拱形体系并不如此（参看图105和124）。

2. 为了安装准确，个别预制构件的配合公差必须小于完工结构所保证的准确度，每个从事生产的工程师都了解，要求最小公差造价是非常昂贵的。他尽可能想避免掉。仅为了

图 122 康拉德·瓦克斯曼设计的一个可以拆卸的钢管结构[60]

- 1—在主跨方向上下弦杆都是连续的钢管，斜杆用结合环与上下弦杆联接；
- 2—具有近 30000 平方米面积的飞机库的侧视；
- 3—飞机库的剖面



安装的原因，设计师不得不采用小于 1 厘米的公差，这个数值比完工建筑物所要求的高得太多。一般几个厘米的公差就足够了。无疑，现在每个工业生产部门都有条件做到高质量的技术标准，这对发展这类结构是有魅力和促进作用的。但是，不要忘记，不恰当的精细和过分的准确性是与经济原则相矛盾的。

3. 个别结点中不可避免的滑动，在整个结构上累积起来。由结点变动引起的永久过大变形的危险是不可低估的，所以在可拆卸的体系中，节点滑动问题要特别加以注意。

4. 在这么多次超静定结构中的弹性变形以及结构性能，即使是可以分析的，也是非常难以预测的。求应力就是用电子计算机也不是万灵妙药。

这种方法的耗费和收效之间必须成一定的关系。虽然，小规模体系可以用实验的方法确定其强度。而大型结构就不可能了。

5. 由于整个屋盖空间的施工技术不断地复杂化，就有必要采用吊平顶。由于桁架结构积灰太多，也必须如此。当然，这样地把空间网架遮住是会牺牲造型的表现力的。

6. 如同骨骼一样，空间网架的优点是能适应不同性质和不同方向的荷载。受力大的面积可以由相邻材料很顺当地分担过去。结构具有较大的安全度足以应付局部的超载。在一般建筑物中，空间网架的这一特殊性能很少被利用。楼面和屋面承受均布荷载，象桥梁设计中那种局部集中荷载是不常见的。

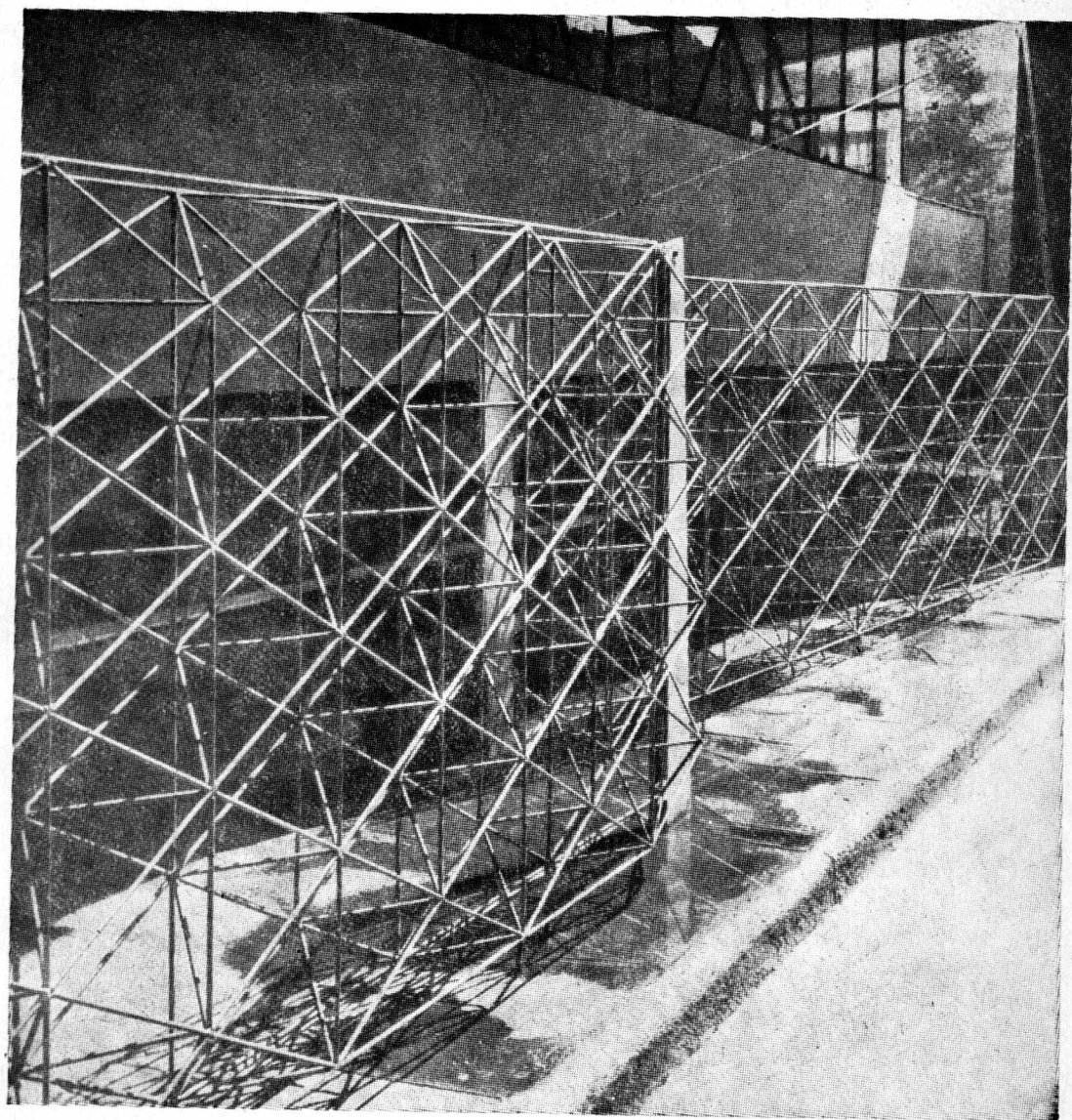


图 123 照片：焊接钢杆空间网架做栅栏或门
建筑师：卡斯蒂略尼[61]

7.空间网架唯一无可置疑的优点,是装卸迅速,所以它们经常用于最需要活动性或是最值得的地方。小的可移动的建筑物可能比较大的结构物更受欢迎。只要活动的空间网架真是合理的,自然就会采用有它自己特点的结构造型。

图 123 的结构为本节做了一个合适的结束,它和前面谈的那些雄心勃勃的设计适成对比。这是意大利建筑师卡斯蒂略尼设计的,说明空间网架是多么丰富多彩。他用焊接钢杆结构做栅栏和门[61]。因为他合理而自然地应用了空间网架的原理,成功地取得一个既雅致轻巧又非常刚劲的结构。

以上的叙述局限于虽然构件交叉的角度变化,但整个结构形成象平屋顶的空间网架。可是,空间网架可以用来创造更为精巧的形状,可使杆件沿着曲面布置,直接地定出结构的形式。如果表面只在一个方向弯曲,完成的形状则是圆柱形。二十年代,德国工程师们设计了许多圆柱形钢联方网架,做为钢筋混凝土壳体施工时的自承重脚手架(图 124-1)[62]。奈尔维也采用过同样的体系,但是他用的是预制钢筋混凝土肋做为永久结构。他设计的飞机库的屋顶[45]即属于这类空间网架。第二章谈过这个建筑的扶壁。其“杆件”都是预制钢筋混凝土的,节点处联结在一起,然后灌浆。这些建筑物的屋顶轮廓为曲面而不是多角形,产生了由大量元素组成的曲面效果。

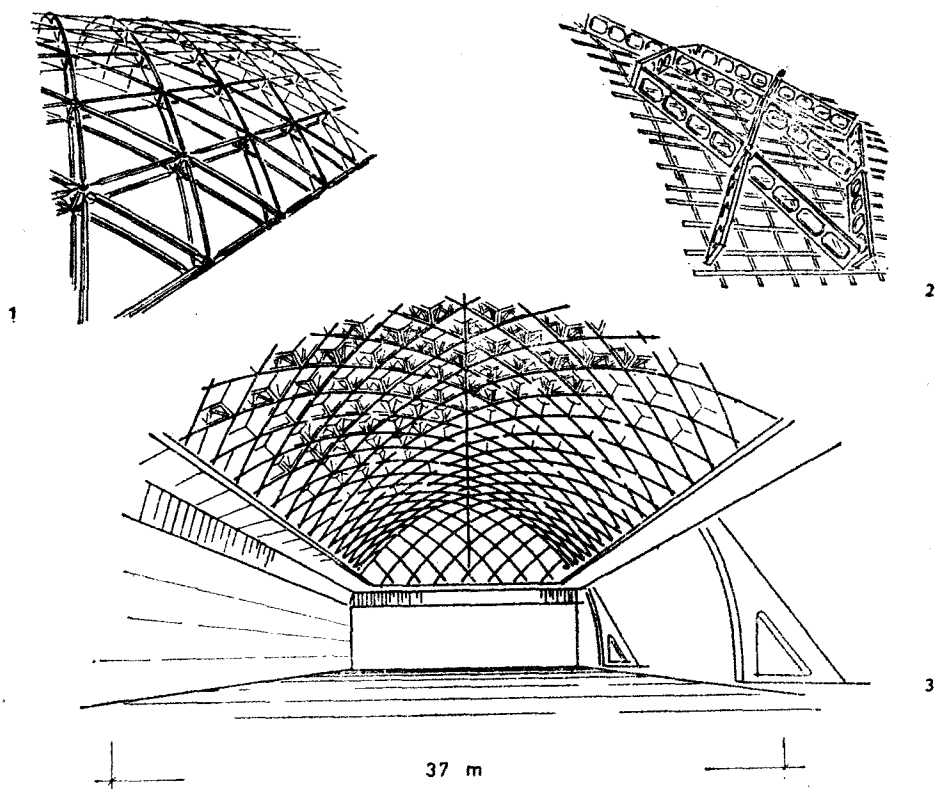


图 124 圆柱形空间网架

- 1—1927年在德国美因河畔法兰克福(Frankfurt-am-Main)的批发商场是用钢肋拱顶做为脚手架建成的早期圆柱形混凝土薄壳结构之一[62];
2和3—奈尔维设计的预制混凝土飞机库[45]

下一步我们谈一谈双曲面。它使空间构架具有最大的刚度,完成的建筑造型是一个圆拱顶。值得注意的是,在二十世纪初叶,通过一条曲折的途径,这类结构的潜力才被发现。在叶拿(Jena)的蔡斯(Zeiss)工厂需要一个尽可能准确的半球体,以便在它的曲面上投射天空的影象[63]。鉴于当时的技术水平,这决不是一个轻而易举的提议。鲍尔斯费尔德, (Bauersfeld)教授,天象仪概念的创始者,对解决结构问题也提出一个方案,他设计一个由杆件组成的网状系统,(即空间网架),做出设想的半球形。他以数学的精确度计算出每个杆件的位置和长度,然后以最小的容许误差制成一个铁网架,在网架的表面用细铁丝网覆盖,最后在上面喷浆(图125-1)。

这是现代薄壳结构发展的开端,起源于钢空间网架设计。嗣后,这类网架有时用做脚手架(参看图124-1),当较简便的圆钢筋被引用之后,这种网架就失去了在实际的壳体结构中作为一个因素的重要性。

同时,巴克明斯特尔·富勒(Buckminster Fuller)正在从另外一个角度来探讨网架圆顶的问题。他的思想,主要带有预制概念和易于装配的色彩。他相当正确地预期空间网架是可以覆盖大面积的最轻结构,为达到他的理想,多年来他努力工作,他也很有才能去罗致一些热心苦干的青年协助他进行工作(图125-2)。

今天,富勒可以指出全世界有相当多的圆屋顶是按照他的概念建成的[64]。他喜欢用一层模压金属板或者塑料薄膜垂挂在实际网架内面做为屋面,这种布置使结构形式更看得清楚。许多展览馆,包括在底特律著名铝制的福特·罗通达(Ford Rotunda)展览馆,更不用说还有许多吸引人的雷达结构,都是受富勒的空间结构原理所启发的。关于富勒体系还有一点值得提出的是材料的最大节约(这正是天然结构的特征)加上球面顶的固有刚度,有可能采用一些不寻常的架设方法。富勒圆顶[61]是从桅杆顶端开始逐渐向下安装的。由于也能转动,可以从一个架设坡道达到悬吊圆顶的任何部分。

嗣后利用充气气球的帮助成功地建了其他一些圆顶。充气气球代替脚手架,从圆顶顶部开始逐渐向下安装,随空间网架的逐渐变大而将气球充气使它越来越高,安装完毕,将气球放气移去(图126-1)。

尽管空间网架优点很多,也有它的固有缺点,在富勒的设计中,我们赞美球面上规则的划分,其实,球面绝不可能成功地依照几何的定律完全等分。让我们看一看大玃的甲壳,它说明如欲解答这类问题,大自然也那样地无能为力。在球体中可以内接不规则多面体的几何学绝不是个直接了当的简单问题。我们知道,二十面体是可以内接最大的正多面体。想用一个等边正多边形的细密网络去覆盖一个半球,和想把圆形弄成方形一样困难。众所周知,许多正六边形可以组成一个平面。如果试图放在球面上,那就不得不将它们扭曲成为不规则的三维曲线。本书第161页的照片中清楚可见,要准确地求边长在球体几何学中是个难题。边长不都是相等的,因此在建造这种圆顶时不可避免地要采用不同长度的杆件。最后的形状和架设程序对于个别部分尺寸上的不准确都是非常敏感的,由于这个原因,必须做到,误差精度都要大大超过建筑作为整体要求的准确程度,这样一来,当然使制造程序复杂化了(图126-2)。

可能的形式是有限的,至今已建的结构没有例外几乎全是球形圆顶。在功能方面,球形圆顶是个不可变动的形状;除了用于巨大中心型建筑的屋顶,例如展览馆,竞技场之外,应用较少。

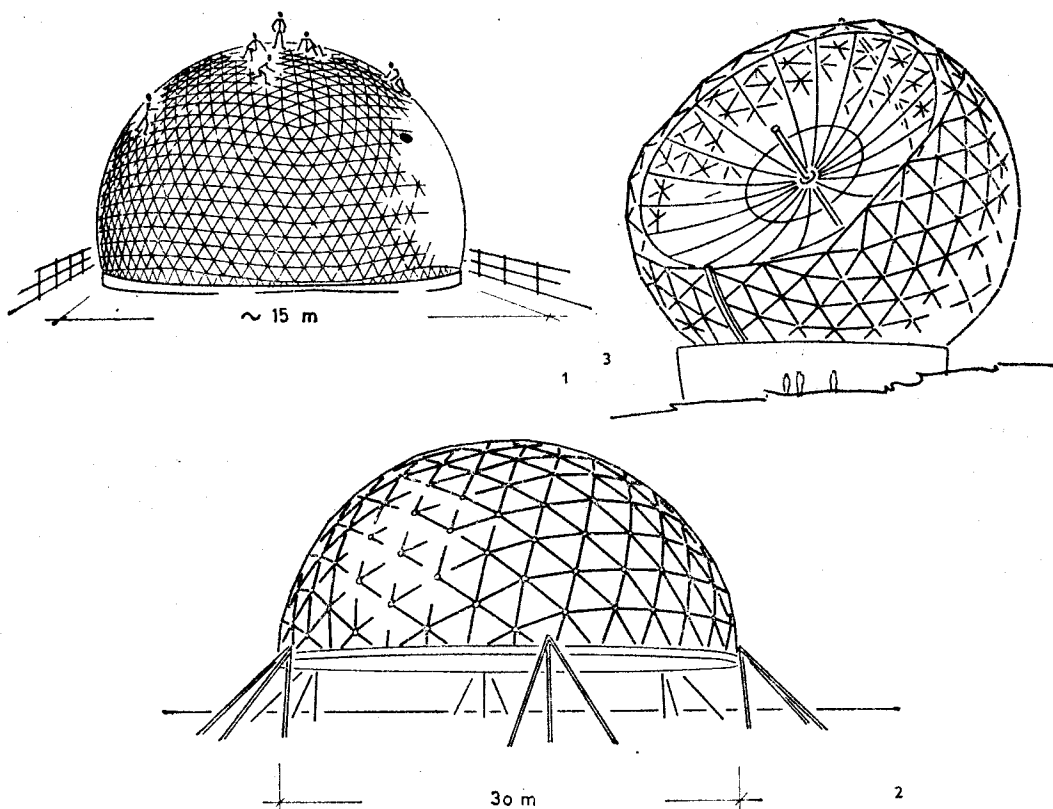


图 125 空间网架圆屋顶

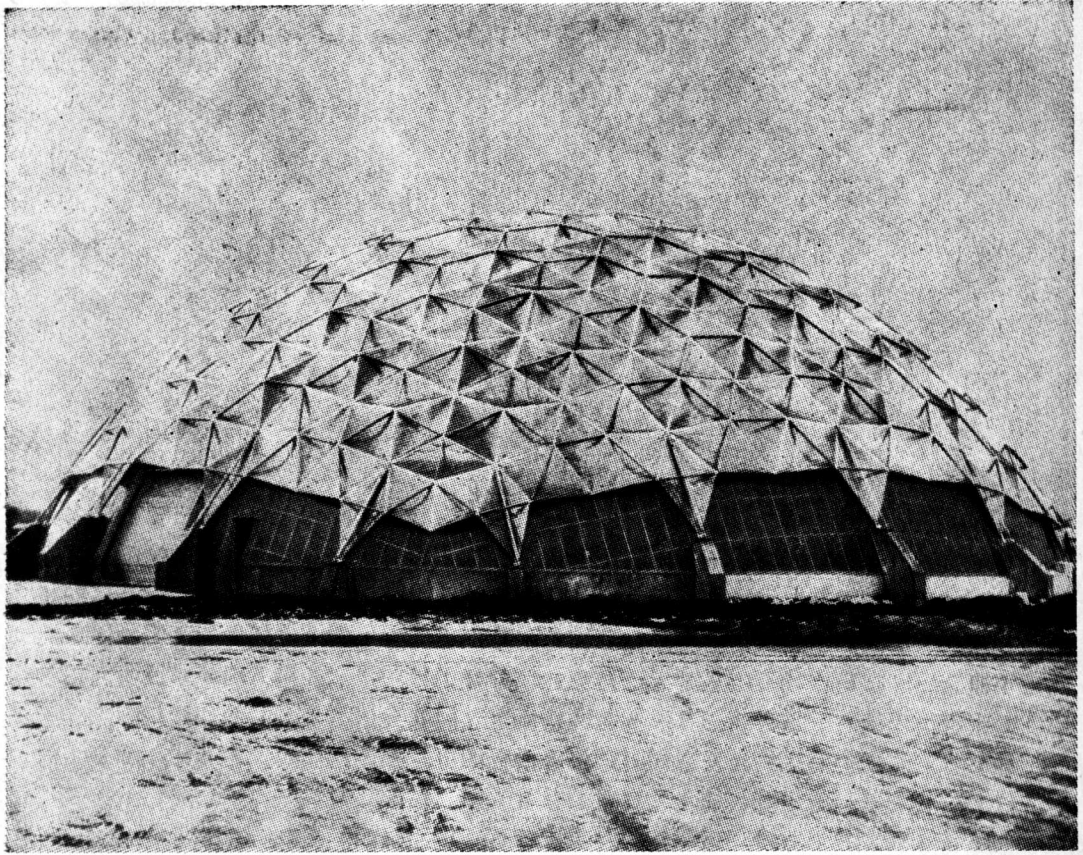
- 1—叶拿[63]第一个天文馆圆屋顶的骨架，可以看出曲面不规则的划分；
 2—一个巴克明斯特·富勒圆屋顶；
 3—雷达结构

无论如何，如果我们对空间网架沉迷于些许工程技术上的乐观主义，那么我们也许可以想象，未来将如下述：

1. 个别杆件的长度是可变的，可以简单地调整到任何需要的尺寸。
2. 采用调整截面或是几个杆件联成一组的方式，可使个别构件的强度在合理的限度内变动。
3. 采用万能结点使任何数目的杆件联成任何角度而不产生弯曲。
4. 用计算机掌握双曲面的几何学，这样个别构件的长度可以方便地按制造和架设需要的准确度计算出来。
5. 可以断言，空间网架所有杆件的应力都能计算出来。

如果上述条件得以满足，将能由预制部件制造任何形状的结构，并且可以准确地预计结构的力学性能。如果设计师拥有他所需要的材料，如果他又热衷于探索真正的结构造型而不是追求形式主义，那么可以想象人工空间网架将会前进到更接近有机结构的理想境地。

今天这些预测似乎仍是乌托邦。不论怎样，工程技术尚能达到这个目标，那将归功于那些现在就在努力不懈地试求实现空间网架的想法的人们，尽管他们的工作条件距理想还很远。



照片：用铝质薄板垂挂在内部的巴克明斯特尔·福勒圆屋顶[64]

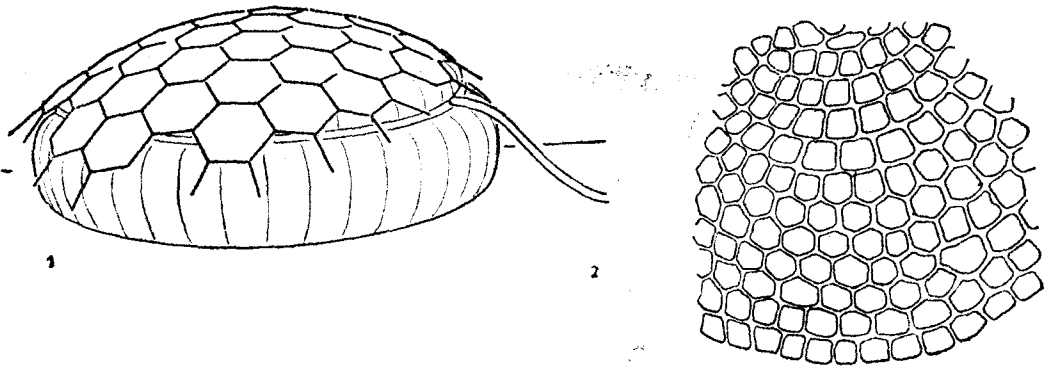


图 126

- 1—以气球代替脚手架自上而下安装圆顶；
2—大自然都无能为力将球面分成大量相等的部分(大犰狳的甲壳)

折板结构

折板结构是个新的东西，不属于历史的形式，在日常用品中只有折叠屏风和手风琴的风箱使人联想到类似的原理(图127)。少数植物生长有助状主脉或扇形叶片。在自然界其他地方还很少看到与折板相似的结构物。因此，难以用历史上的或自然界的类似物体来说明这个概念，一些理论性介绍还是无法避免的，最好是用一系列的模型实验来说明问题。

一张纸由于没有一点弯曲强度，搁在两块板边之间就会掉下来，(图128-1)。

如果将这张纸沿着它的跨度方向打成许多平行的折，象手风琴的风箱那样，就有了强度。这种形状的纸足能承受百倍于其自重的分量(图128-2)。

如果荷重增大到突变点，这个结构就由于折页下坍而破坏(图128-3)。

有一个简单的方法可制止折页的坍坏，即在纸张的两端用一条硬纸板加强(或称加劲板)，这张折叠的纸就能承受更大的荷重，这是假定加劲板搁在支座上面，在折板结构中这类横向加劲板非常重要(图128-4)。

纸模型的性能和足尺结构物相符。但是，必须增强材料的弯曲强度，这就是要同时能抗拉、抗压、抗剪。在理论上，没有理由不用木材。但是，在实践中，很难制造大块的木板，同时板脊和板谷的细部设计太复杂。因此，至今相当少的折板结构是木制的。由于钢和铝的强度高，所用的截面薄，对于制造折板结构所需要的大尺寸的板，可能会有发生局部屈服的危险，除非采用特制的双层板。在这方面的发展还仅仅是个开端。所以，目前只用钢筋混凝土制造折板结构，它是较理想的材料。

为了易于分析，折板的作用可以分为三部分：

1. 在横向，折线之间板的作用

在横向，折板的作用象一个带褶的连续钢筋混凝土板。它横跨一系列一高一低的支点(图129-1)。可以假定那些就是板的支点，因为上面板脊和下面板谷的折角具有加劲作用。

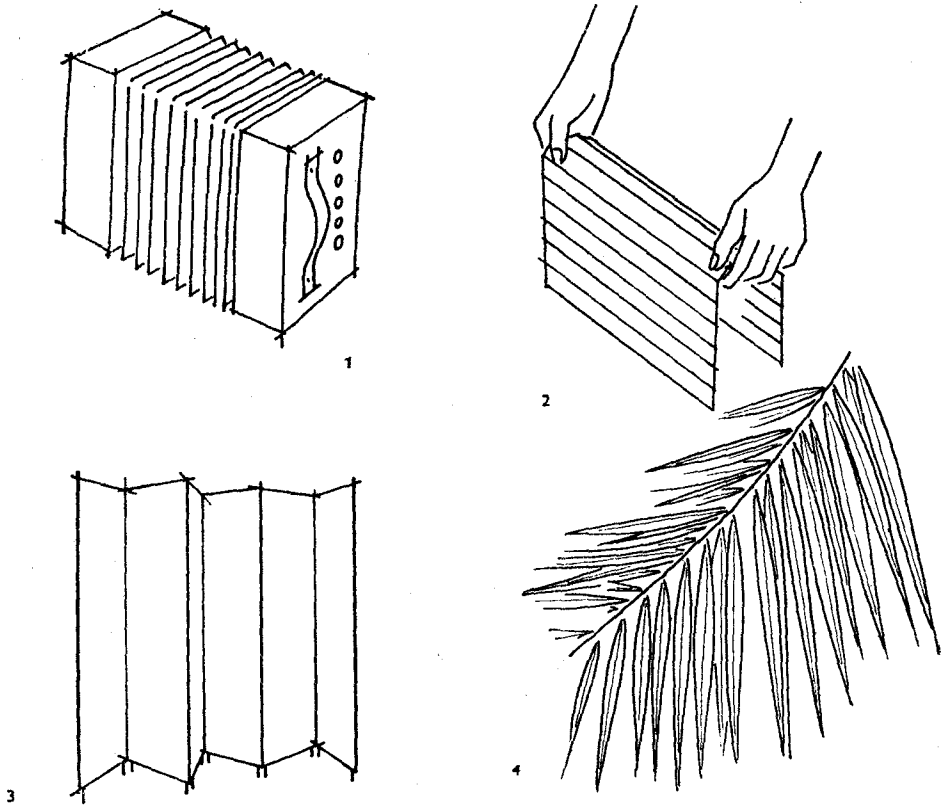


图 127 自然的和人工的折板形式

- 1—手风琴的风箱；
- 2—餐盘垫；
- 3—折叠屏风；
- 4—折而挺劲的叶片

2. 在纵向，平行于折线的板所起的作用

折线板脊和板谷作为支座，担当从连续褶板传来的荷重。这些荷重分解成为分力，分力的大小由基本斜板的斜度来确定，折板就是由这些斜板所组成的。这些基本斜板可以假定为互相依靠的薄腹深梁在纵向跨越两个端点支座之间。这些深梁的强度随着板的高度而增加，也就是随着基本板的斜度及其投影高度而增加。如果斜度太小，板作为整体就失去它的有效性。在典型条件中，以简支梁来类推也足够准确，可以实验证明。但是，折板端部的板或是不对称的折板就不能按简支梁考虑。在这种情况下，邻接的基本板的两个边的变形趋势不同，但是这种对向的趋势被板脊和板谷的连续性所抵制。典型空间结构的安全度是比按平面弯曲设计的结构优越，这才真正发挥了作用。这一点将在圆柱壳体一节中详细讨论。

3. 横向加劲板的作用

加劲板的作用是将折板在支座处牢固地结合在一起，假如折角被压扁，板的高度将降低，结构将坍塌。最简单而又可靠的加劲板是一个连续的完全封住折板端部的膜板，这种膜板有效地保持折板的形状不变。

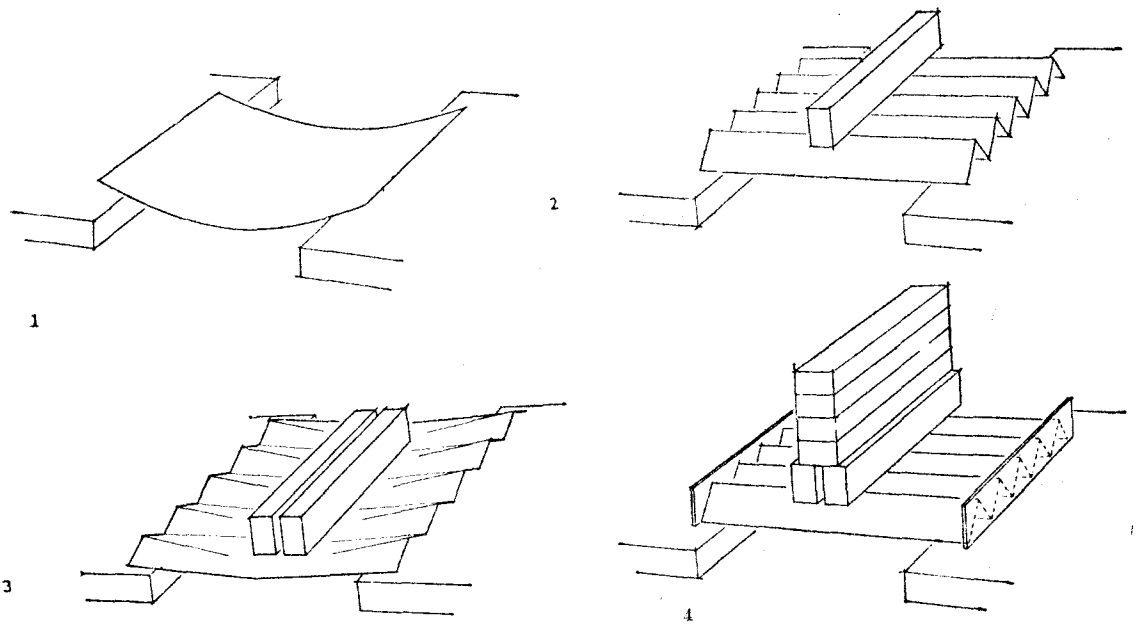


图 128 纸做的折板模型

- 1——一张平的纸几乎没有一点抗弯能力；
- 2——折叠之后它能支持一定荷重；
- 3——如果超载，折页就坍坏；
- 4——两端胶以膜板，加劲了折板也就增加了它的承载力

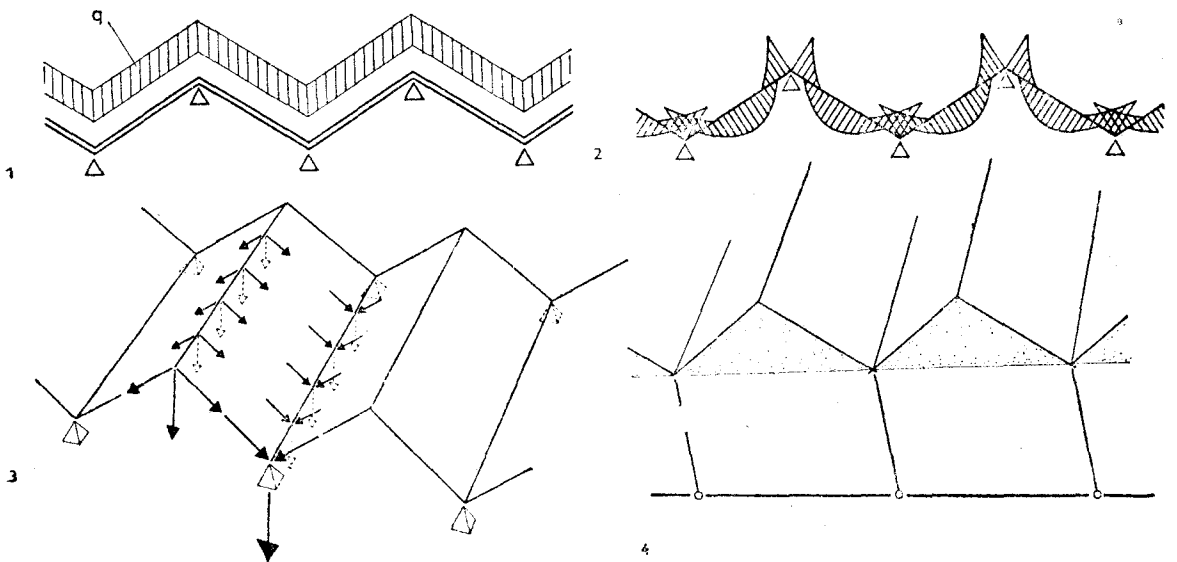


图 129 折板如何发挥作用

- 1——在垂直于跨度方向，折板的作用如同连续的带褶的板支承在折角；
- 2——带褶的板中的弯矩；
- 3——沿跨度方向在折线之间的板面，其作用如同互相依靠的斜梁；
- 4——必须在支座处采用加劲板以保持折板的形状

具有上述三个基本作用的构架有许多可能的变化。最重要的因素是折板的性能，折板的高度、斜度和跨度之间的关系决定结构的刚度和强度，个别折板的比例加劲件的形式和边缘的处理方式，三者是用以表现折板作用的因素。正确地运用它们就可以取得真正的结构造型。

如果折板在低点支承，也可用拉杆取代加劲件。折板边适当加厚的地方可以用拉杆，也有可能用好象具有两个刚硬倒刺的宽箭头形式，这是隔膜与拉杆之间的折衷形式。图 130-2 是学生设计中的这类边缘件。在海法（Haifa）的水力学院大楼（图 130-3）[65] 可以看到稍加缓和的类似因素。在学生设计中（图 130-2）折板支承在低点，而海法学院的结构则挂在高点。两者都是可行的。

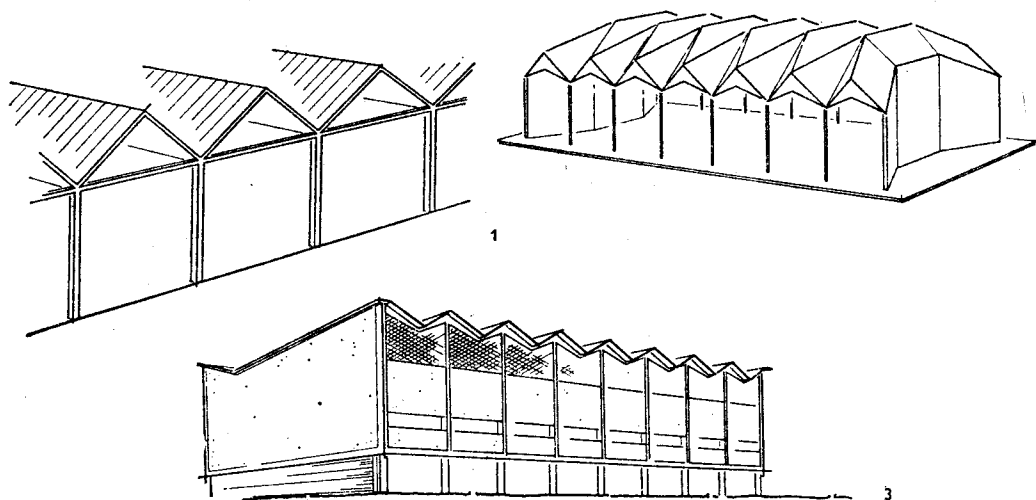


图 130 各种形式的加劲件

- 1—支座间的拉杆；
- 2—支承在低点的箭头式加劲件；
- 3—支承在高点的箭头式加劲件

这里，我们必须回述第二章提过的比尔斯费尔登（Birsfelden）发电站的折板，把边缘处理成干净利落的波形方式没有加劲构件，也没有用拉杆遮盖薄板，非常轻巧美观。引用边缘构件的主要理由就是为了阻止折板的横向张开，从上述发电站，我们看到这个问题已经另有手法解决了。即用叉形柱在顶部交接形成一系列固定点，从而制止了折板的任何侧向位移。在图 131-2 的学生设计中，看台所用的折板屋顶的支承方式可以使一端不需要加劲构件。底层结构的稳定性仍然是依靠那些叉形柱，这些支柱互相联接，组成一系列刚性的三角形构架（参看第二章叉形柱，第 115 页）。在另一端屋面支承在铰接支柱上而不是三角形构架上，因此，需要一根边梁加劲折板。

折板结构最简单的形式是板都平行（图 132-1）。如果平面图是梯形的，折板结构本身就成为扇形。折板叉开，板就越来越宽，边就越高（图 132-2）。假如需要板高保持不变，板面将会翘曲，这是否意味着牺牲了折板结构的主要特性，是值得探讨的。如果折板完全由平面板组成，可能较好地保持造型的晶体般的爽利和含义的丰富性。无论如何，将

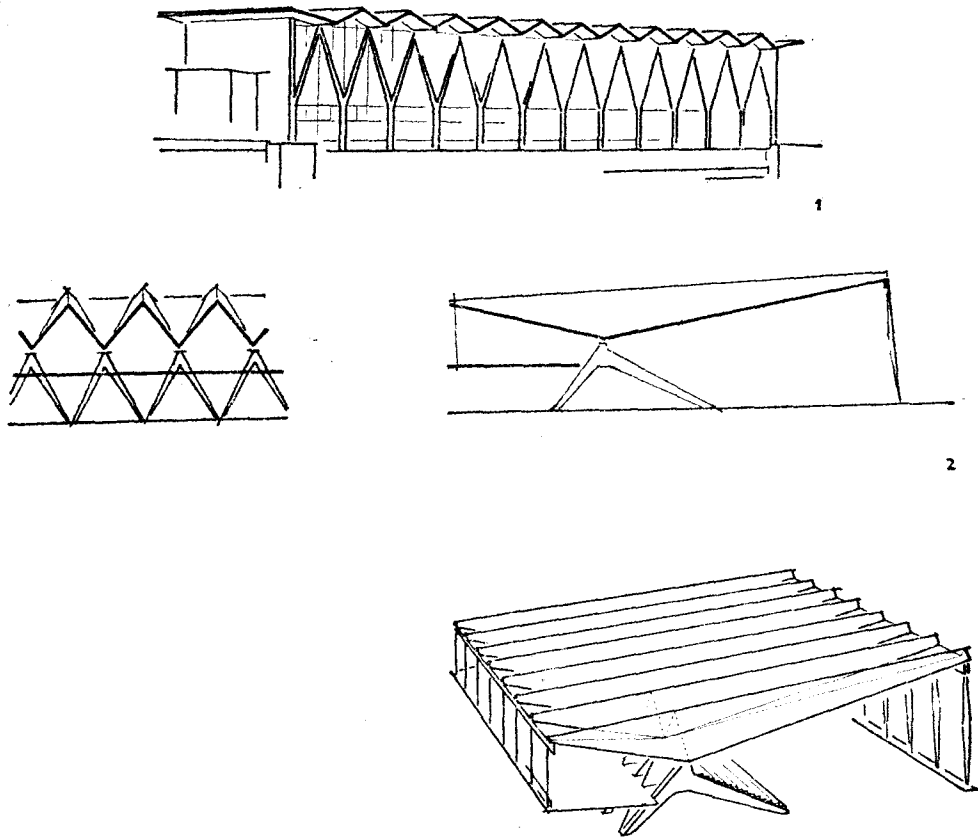


图 131 固定支座代替加劲件

1—瑞士的比尔斯费尔登发电站的Y形构架[40]组成一系列稳定的支座支承屋顶；
2—运动场看台的底部结构(学生设计)为折板屋顶提供一系列的稳定支座

来会看出正确的途径是哪条，也会看出究竟这种变形是否也有什么重要性。假如，板面翘曲会起取代平板弯曲的薄膜作用（参考壳体第200页）带来力学上的利益，相应使结构更为经济（板较薄）的话，那么上述论点无疑只好在新结构形式使人非信不可的逻辑面前退却了。

除了平行折板和扇形折板，还有相互反向的折板（图 133）。它们或是跨越支座间的全长，或是较短段落交贯形成结构中的折结（图 134），这些折结可以变成有棱角的弯折。结果是一个刚性转角，折板变成一个刚架。不过，这有赖于在框架的转角上采取维持折板形状的措施，如同纸制模型在支座处被约束住那样。

巴黎的联合国教科文组织会议大厅[18]就是这类设计的一个例子，扇形是出于梯形平面。框架结构是由屋面和折板形墙体相接而得的。这个例子中框架具有三个腿。弯矩图总的形式和我们熟习的两铰架（第二章）的弯矩图不同，但是，转角处的图形是差不多一样的。较大的弯矩集中在转角和较长跨的跨中，在中间支座上弯矩最大。部件的设计主要决定于下列情况：在转角和中间支座截面下部受压，而在两者之间，特别是在长跨的跨中截面上部受压。板脊和板谷的抵抗弯矩很有限，因此，它们是在折板之间顺着最大压应力线

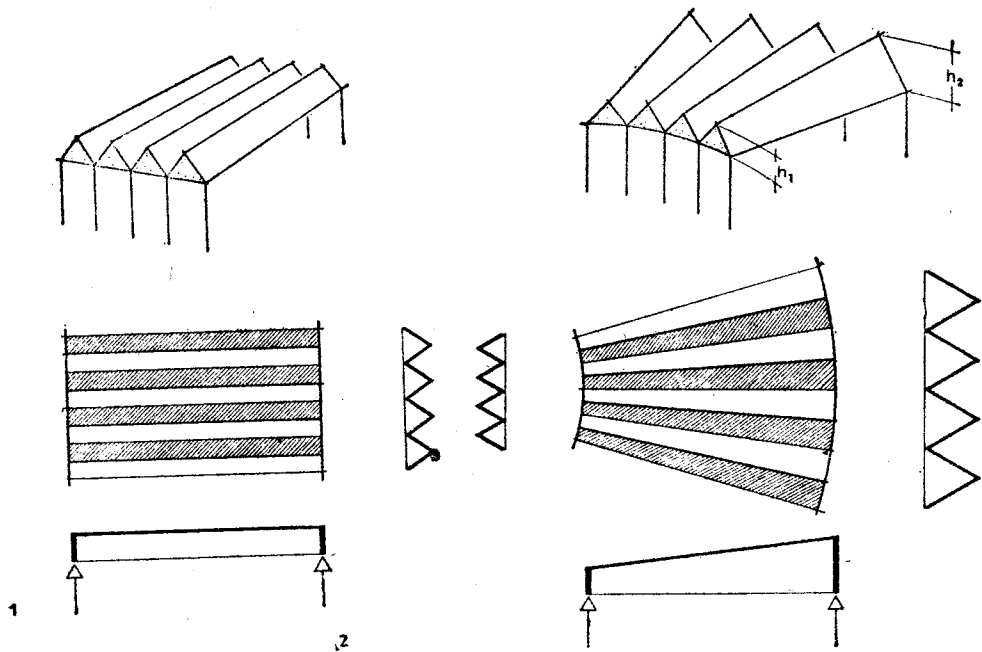


图 132 折板的变化

1—平行折板；

2—扇形折板

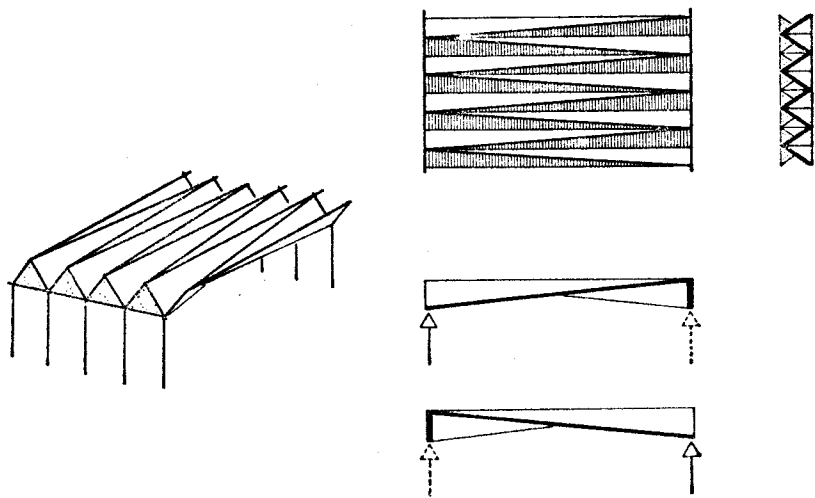


图 133 折板结构的另一种变化——相互反向的折板

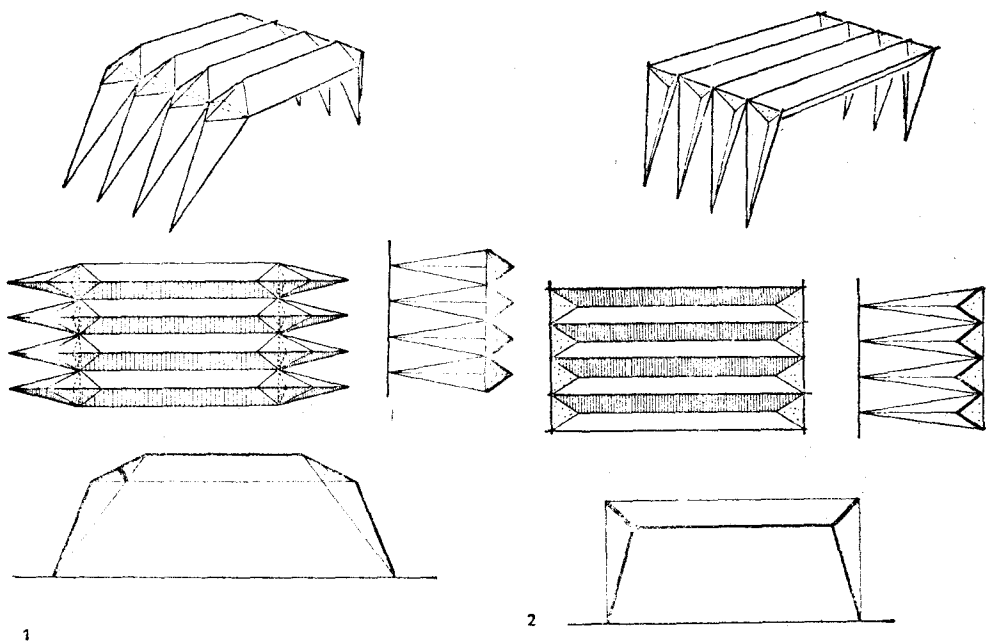


图 134 折板结构发展成为刚架

- 1—刚架的脚和板脊同面；
2—刚架的脚和板谷同面

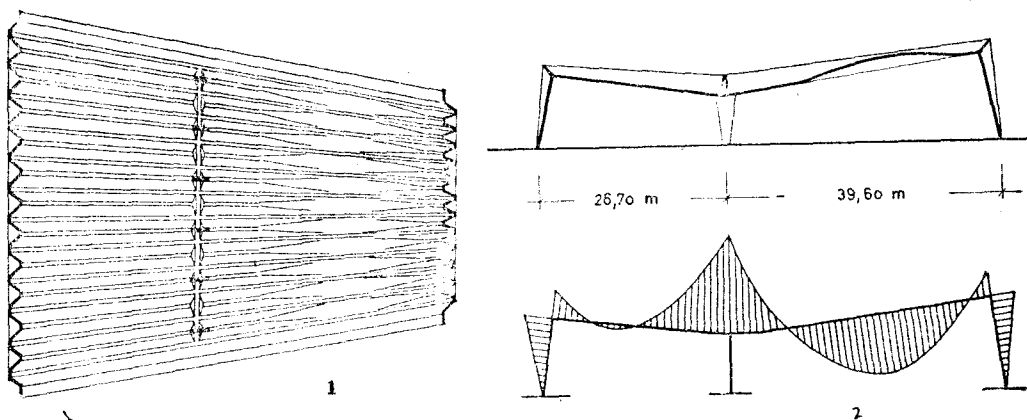
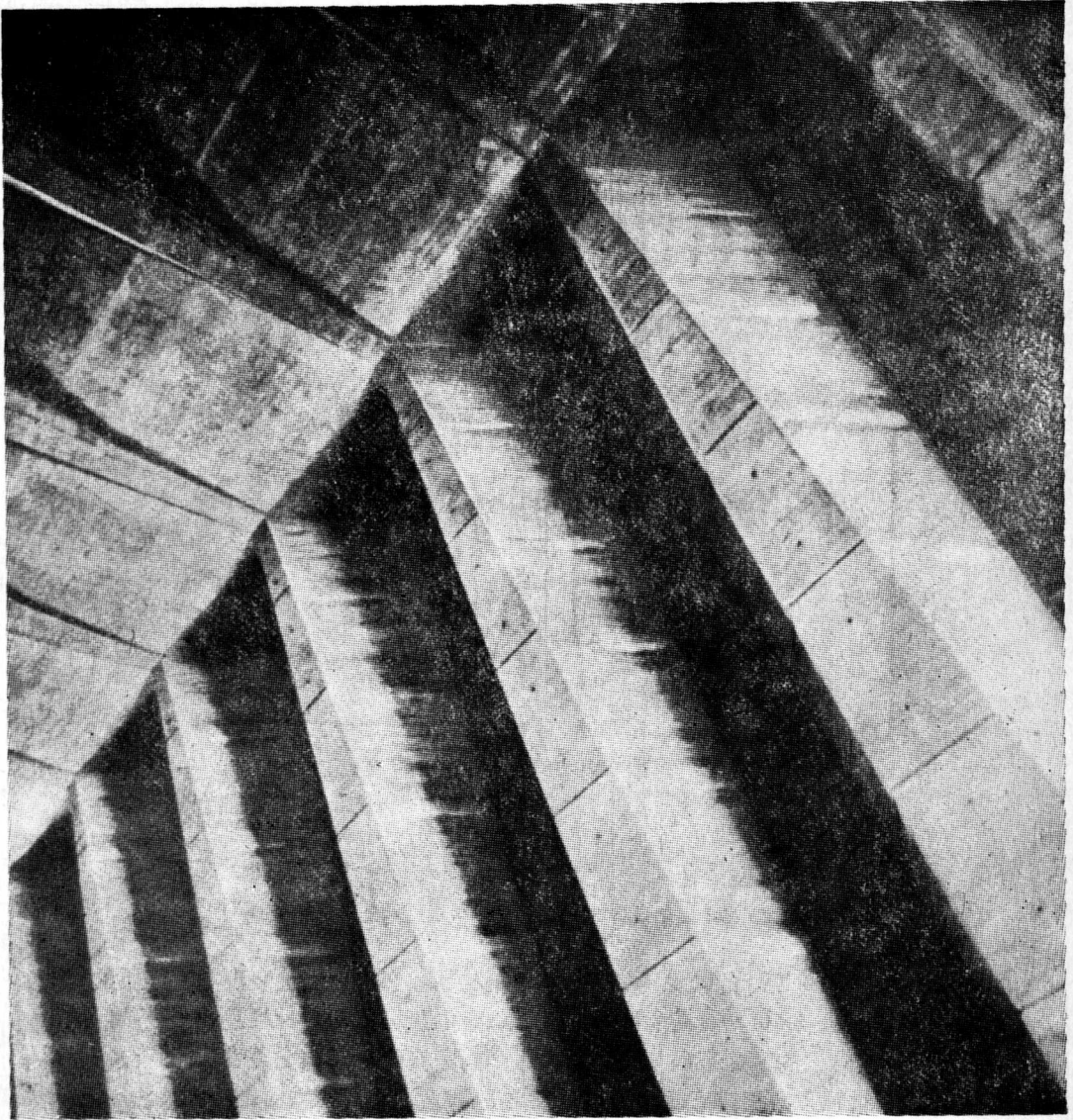


图 135 巴黎联合国教科文组织会议
大厅[18]

建筑师：布诺依尔和策尔富斯
工程师：奈尔维

- 1—梯形平面；
2—屋顶是一系列双跨框架建成的折板形式，顺最大
应压力线布置的实心板与折板贯串。在框架的转
角处是用斜向加劲杆加强的，在屋顶的中间支座
上是以横梁加强的；
3—透视图



照片：巴黎联合国教科文组织会议大厅内的折板结构[18]

用实心板予以加固的。在转角和中间支座处，实心板在截面下部，在较长跨向上转入跨中受压区。这个波浪形也是为了建筑上的效果而发挥的。尽管如此，它的真正的合理性存在于它的结构逻辑性之中。贯串折板的波浪形板不但有助于抗压，而且加强屋顶全宽上折板的刚度，因而，对结构的总体稳定是有利的（图135）。

马塞·布诺伊尔为明尼苏达（Minnesota）大学城圣约翰大教堂作的设计是同一主题的变化[66]。很明显受到联合国教科文组织会议大厅的影响，他将折板结构发展成为一系列的两铰框架，支配着教堂的内部（图136）。

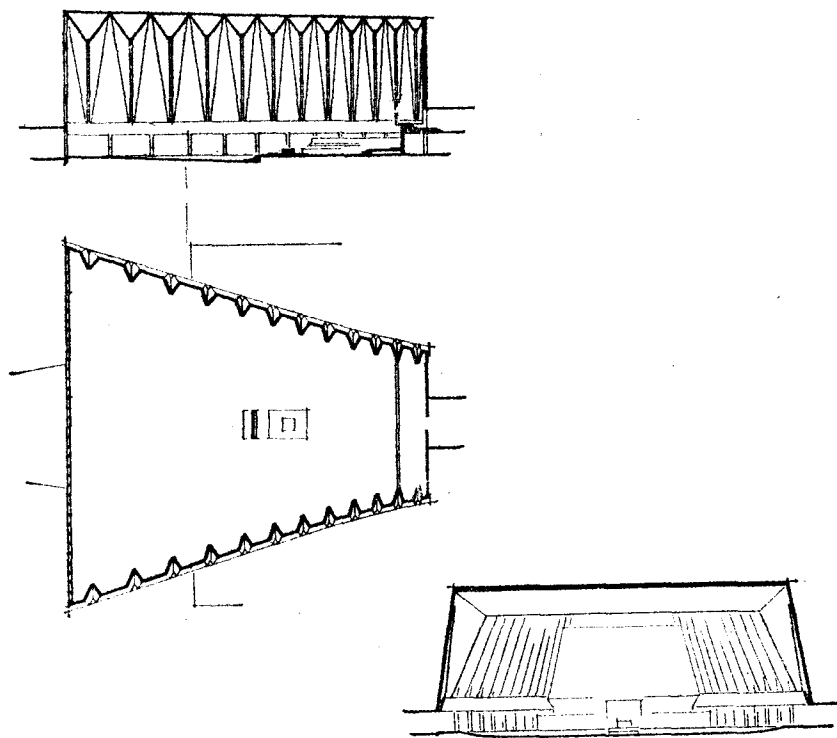


图 136 马塞·布诺伊尔设计的一个教堂，折板结构的单跨框架[66]

贝洛尼（Belloni）设计的帕维亚（Pavia）运动场，它的特点是表现南方气质的一种富于幻想的晶体造型。这里，对向的锥形，互相贯穿的折板的动态被推进到了极端，然而所得出的形状远非随意的，而是服从几何的和力学的定律的。互相交错贯套的折板结合成为一个拱顶。在拱顶方向折板给结构体系提供必要的稳定性，在横向细拱脚被约束在一起，一根横向拉杆制止折板的张开。拱顶的推力由收缩形扶壁承受。无疑，这样的造型看来仍然颇为奇特，但是，它的“正确性”是可以由精确的分析加以肯定的。在任何情况下，即或如图 137 的那样生动的例子，都不能认为折板结构纯属轻浮而加以排斥。它是由钢筋混凝土提供的新的可能性启发而得来的一种结构类型，应当加以发展，并且完全无偏见地予以鼓励。无论如何，它的晶体般的严密性和独特的建筑气氛是不容任意污蔑的。尽管，也有看来是不可避免地出于追求时髦，加上结构上的无知，产生了一些特别不适当的设计，对应用折板结构的某些不合理倾向和对折板的评价现在已经逐渐显而易见了。

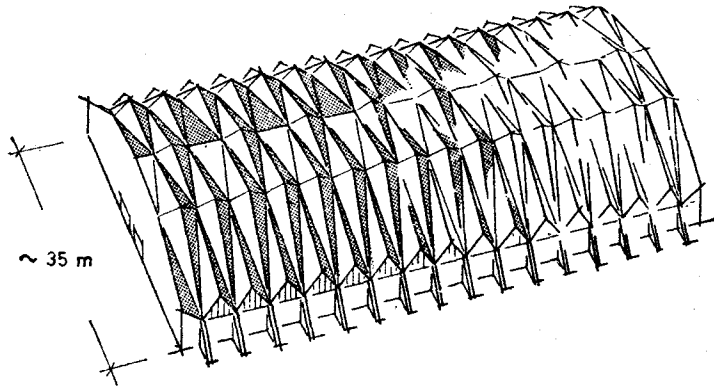


图 137 在意大利帕维亚的一个运动场，由互相贯穿的折板组成的拱顶[67]

例如，当一个美国出版物，在关于娱乐性建筑艺术问题的标题内，谈到现代建筑中的所谓“新方向”，而联系到一些最近完成的折板结构时，很象是试图规定一个新的建筑流行式样。而在宣告“新方向”中，只有含蓄、朴实、摒弃一切装饰性倾向才是学会把握问题和取得对造型在结构上和美学上两方面的理解的最有效办法。另外，被视作最坏的一种倾向是一有机会就不分青红皂白地滥用它们。

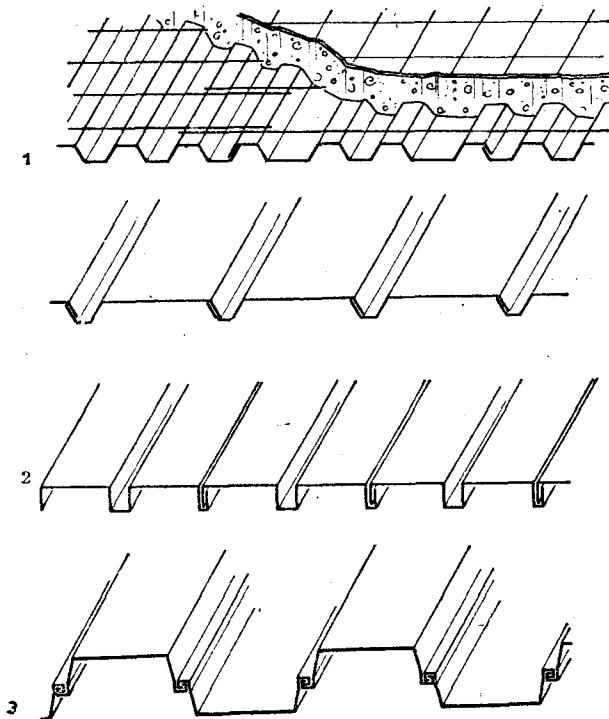


图 138 简单波形建筑元件

- 1—钢筋混凝土楼板的模板与加劲的结合；
- 2—波形墙板；
- 3—板桩

折板结构凡纯粹用于实用目的而没有建筑上的虚假的地方，真正的结构形式就得以平静地发展而不致大惊小怪。板桩、一些墙板、许多类型的钢甲板等的刚度都是从褶和波而来的。在这些地方折板的目的是如此明确，尺度也如此常见，很少人觉得形式的新颖。

如果我们深入探讨这个常见形状的领域，我们将回想起锯齿形厂房屋顶也是这类形状

的一种非常实用的形式。当然，锯齿形屋顶最初用于工业建筑，那是摆脱了美学偏见的建筑。从此，折板就成为被轻蔑的目标，说它“只不过”是一个功利的手段。一个设计方案如果敢于采用锯齿形屋顶，它就不可避免地被排除，理由很简单，“就象个厂房”。我们绝不可忘记在探索新颖结构选型时，保存与强调它的简明性是最重要的，这样将比任何不成熟的美学分等更能促进发展（图139）。

至今，山崎（Yamasaki）设计的底特律（Detroit）麦格雷文（Mc Gregor）纪念会议中心，可能是折板结构在建筑上最杰出的运用实例之一。混凝土构架十分清晰简单的形式，做为整个建筑物的主题，不少结构斜交点造成的困难细部都没有被遮盖，而且处理得

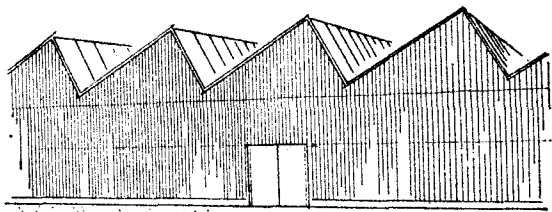
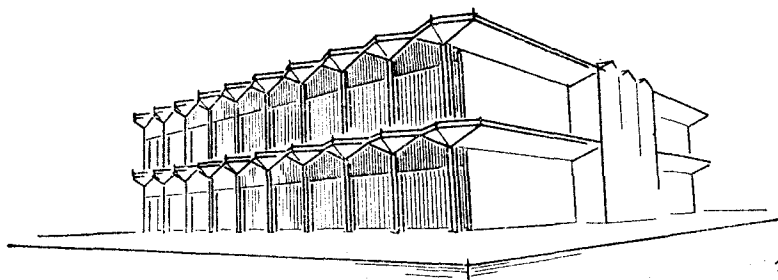
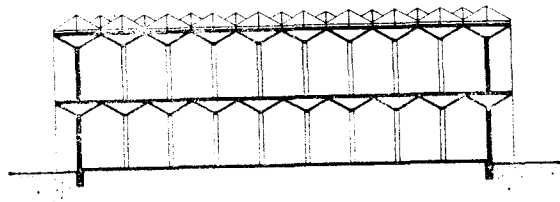


图 139 锯齿形屋顶也可视为折板，因为并没有结构部件作用在竖向平面上



1



2

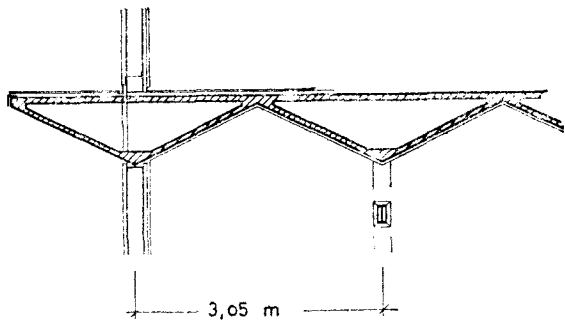


图 140 在底特律的麦格雷文纪念会议中心，山崎将折板结构发展成为一个建筑表现的精致造型

1—立面图，
2—纵剖面 and 细部

非常巧妙和完整。然而，这类结构的局限性也同样地清楚。造型的严密性和晶体般的鲜明性超越于内部人群活动之上。这个大厅本来打算做为学习的中心，现在成为一个纪念物，进入这个大厅的人们都本能地被迫小声讲话。折板结构那种严密的几何条理对各个细部都有影响。窗，门，天窗，总之建筑物的每个部分的形式取得，首先，不是来自它的功能，而是不可避免地属于视为设计中主要因素的几何体系。这个渗透一切的几何形，不但凌驾于这个中心之上，而且同样凌驾于它的环境之上，把建筑物孤立起来，并使它带有纪念性（图140）。

罗扬（Royan）一个新教堂的不平常造型[69]散发着类似的影响（图141），也是强调设计的纪念性。效果也许表现过于大胆或过于造作，但它确实只是新颖而不平常。

不了解造型的结构根据，就不能作出结论性的美学判断。这个教堂的外墙是由许多向外张开的V形截面柱组成的。它们独立地排列着，两柱之间为竖向玻璃窗。因为柱子是折板形，所以显得很强有力。在建筑立面上用水平回廊将这些立柱连成一个三向的结构整体。教堂的设计师们[建筑师：吉莱（Gillet）工程师：拉法耶（Lafaille）和萨格（Sarger）]已经将基本的结构构思反映到设计主题上去，这样，设计师们不过是用钢筋混凝土做了中世纪匠师们用砖石所造的拱形扶壁而已。他们试图不受干扰地表现结构本质，所以，拆模后，仍保持粗糙的混凝土表面，造型的结构必然性就是一切，表面处理相对地不重要。我们必须承认这个教堂对折板的发展是做了重要的贡献的。

为了加强普通的折板，有时必须做些重要的改变。西尔斯·塔姆帕（Sears Tampa）百货商店的屋顶提供了这样一个例子[70]，按照模拟的梁，最大的弯曲应力在板脊和板谷处，在这里将截面加厚，折板结构的强度即可明显地增大。在这个例子中，折板之间插进了水平的板段。同样的理由产生于常见的波纹墙板（图138-2）。另一种形式稍有不同，引起和图142-1的屋顶结构相似的联想，是用于混凝土楼面的自承模板（图138-1）。从这些改变的形式上，我们可能察觉出折板发展中的一个新的出发点。最初只是想增加折板结构的强度，但是，这些改变对设计方面也提出了新的可能性。

例如在都灵（Turin）奈尔维设计的展览馆[24]从屋顶肋的形式上可以明显地看出这种发展趋向。这里结构确实主要是一个拱而不是折板，但在结构的断面中，拱肋可以完全理解为水平折板。这些肋对拱提供必要的刚度。断面中明显地看出板脊与板谷处的截面材料加厚（图142-2）。奈尔维这样早掌握这个概念（都灵展览馆建立于1948年）是不足为怪的。

把一块板折一折来增加它的强度，这个概念是这样浅显，又这样有说服力。那么不要问，为什么很久以前没有被利用？答案可能是那时没有合适的材料，现在有了钢筋混凝土，将来可能还会发展出具有类似性能的其他材料。吸引人的崭新可能性展现在富有想象力的建筑师面前。但仅有想象是不够的，如果没有掌握折板的几何学，如果建筑师们还不敢于象他们当中有些人已经准备去做的那样深入到力学中的话，折板的结构造型甚至还在取得发展机会之前就会成为形式主义的畸形发展。

所有折板结构的晶体般的造型都是很严谨的，它们很难结合到总体设计中去，它们对四周环境产生一种有力而又顽强的影响。这些特点具有一定引诱力，为了“建筑效果”而不顾功能和结构原则地试一试折板。再者，折板结构的细部处理是很细腻的工作，这种困难很容易被低估。结构造型的生动性来自表现的清晰性，在这一点上，折板结构更甚于其它任何结构。虚伪是不能容忍的。如果我们想到那些现代机械设备、管道等，实际上无法

避免的拥挤程度，屋面的保温和排水的需要，屋谷防水，安装檐槽和雨水管等等，我们就不难意识到，一个设计仅从模型来看，虽然，可能是令人信服的，但是当它遇到严峻的现实问题时，也许很容易就宣告失败。任何人想回避艰苦的途径而取得那庞大的，朴素的，象晶体般明晰的结构造型，例如，象巴黎联合国教科文组织会议大厅那样的建筑物，那么最好让他先去设计折板结构及其所有难弄的建筑详图。

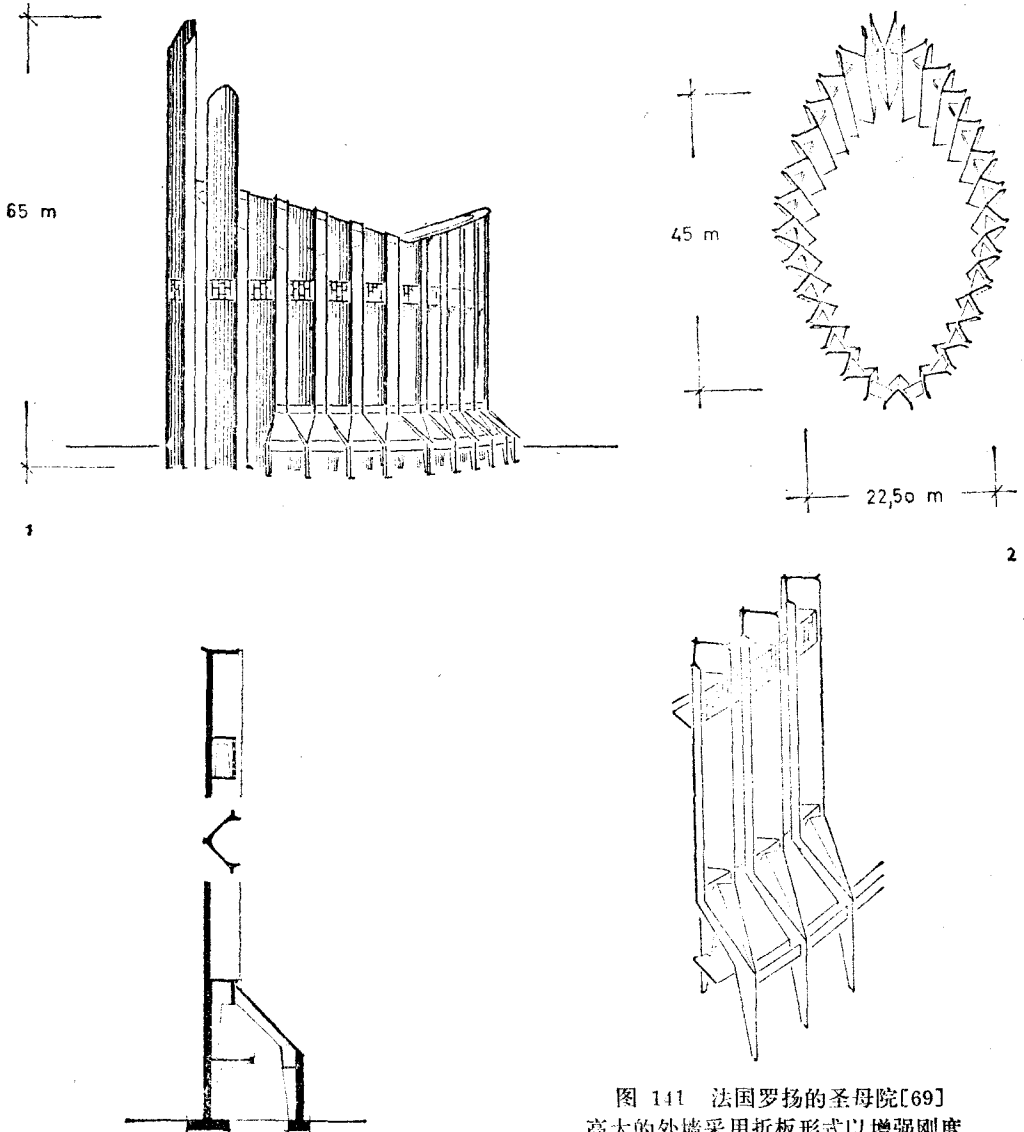
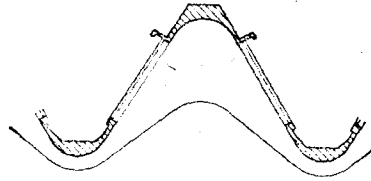
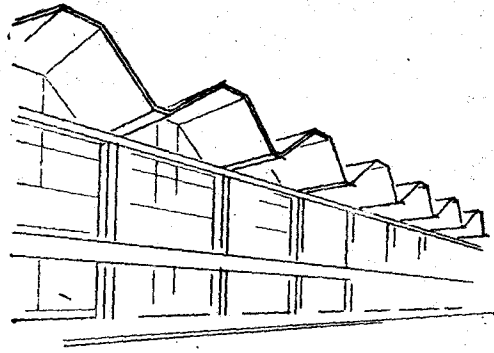


图 141 法国罗扬的圣母院[69]
高大的外墙采用折板形式以增强刚度
建筑师：吉莱；工程师：拉法耶和萨格

- 1—概貌；
- 2—表示折板外墙的平面；
- 3—一个折板的细部



2

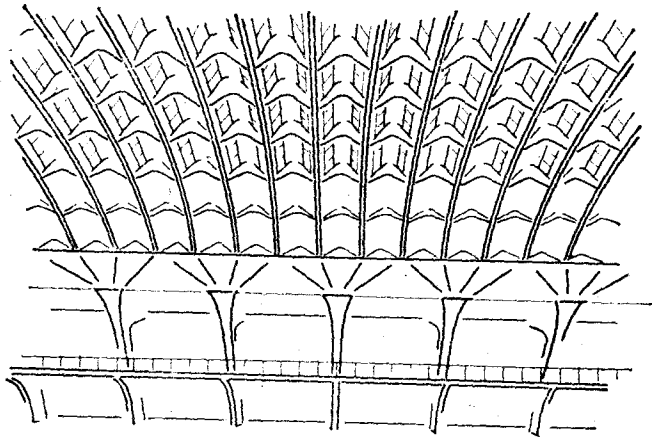
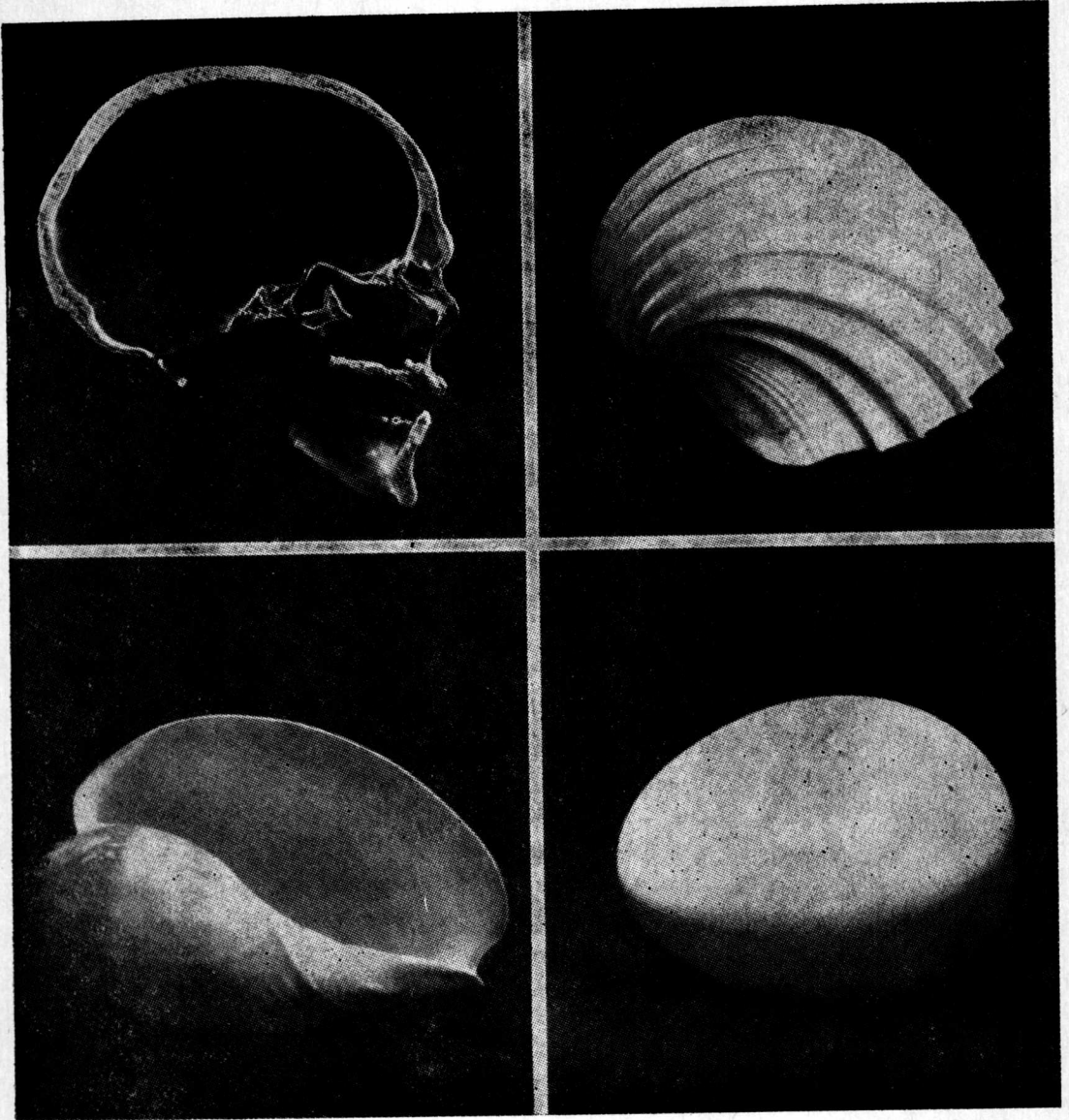


图 142 折板的进一步发展

1—在板脊和板谷处用水平板段能增加结构的承载力[70];

2—在奈尔维设计的都灵展览馆中,从屋顶的一个断面可以看出板脊和板谷处由于应力最大,而材料加厚



照片：自然界的壳体形状

壳 体

“壳体”这个名词使人联想起自然界的形状，例如，鸡蛋、坚果、螃蟹、软体动物、种子的荚、或是昆虫的护身壳，我们印象中壳体有两个非常特殊的性能，就是刚性的和曲面的。

若干平面绝不能形成一个壳体，至多不过是一个盒子或一个箱子。

大自然以柔软材料做成千千万万的形状，但不能制成壳体。带纤维的材料如稻草，或柔韧的材料如皮革和毛皮都不适合于我们所指的壳体概念，只有“刚性的”，即意味着坚硬的和坚韧的，才适合于形容制造壳体的材料。

自然界的和人造的壳体形式都是以“曲面”和“刚性”材料为其两个基本特性的。凡最早致力于设法解决这个问题工程师们，不论是英国人，法国人或是德国人都假借同样的自然界形象来描写他们的成果，这是绝非偶然的。德文“壳体”这个词和英文的及法文的意义都一样。选用这个专门名词可能指向未来，就是人造的形式将逐渐更趋于接近自然。许多以前认为不合实际的，稀奇地，与有机生物关连的那些自由形式，将使建筑艺术更加丰富多彩。

但是这种反映容易引向夸大的和不成熟的论断。还有待于未来的发展。我们必须稳步前进，如果我们真的要建造壳体，我们将会迫于实际的需要，除了上述的“曲面”和“刚性”条件之外，还必须增加许多其它条件。

一个壳体一定“能制造”，意味着它必须具有一个易于处理的几何图形，它一定不可以使工厂和工地的正常设备负担过重。

从力学的角度来考虑，荷载必须是壳体完全能承受的那种类型，壳体不能承受重的集中荷载除非予以特殊加固。在支座处荷载不可避免地要集中，在这些地方壳体就必须有所修正，以便控制力量，将它们平稳地传到下部结构。

分析壳体并预计其中应力的数学家，所关心的是壳体形式的那些服从或至少部分服从数学处理的方面。如果他的建议被忽略的话，那么，计算上消耗的相当长的时间就和设计的经济性不存在什么关系了。

数学家将坚持，在理论上壳体的厚度相对于跨度，必须“非常薄”。为了能系统地阐述一个理论，他必须排除壳体内产生弯矩的一切因素。宁让壳体起“薄膜”作用，亦即一切力都与表面相切，为了使壳体中力的实际分布尽量与理论依据的假定相符合，壳体就必须薄到除了切向力之外不能承受任何其他的力。

实际情况，壳体的有些部位是常常需要加厚的。这种加厚对应力的格局造成“干扰”，数学家是不高兴的。为了他的计算，他宁要一个各方向都一律的理想壳体。任何不规则性对他都是一个“干扰”。

由于这些和类似的考虑，现代壳体结构限制了可有形式的范围。到底有多少是问题本身固有的，还是仅仅由于目前计算技术不成熟而造成的结果，这是另外一个问题。对这种限制大自然是不知道的。因为我们所感兴趣的首先是造型，特别是能够从自然生物中启发而得的那种重要的结构造型。自然界的生长完全根据自然规律而不是根据有限的计算技巧，所以我们一定要对于今天仍旧阻碍壳体设计发展的一切，也可能是短暂的限制，批判

地予以断定。除此以外，我们也非常希望在不关重要问题上避免繁琐的解释。唯一的不可避免的要求，其所以不可避免是因为这是一个本质问题，就是上述总结中谈到的必要条件：壳体必须是“曲面的”和“刚性的”（能够抗压，抗拉和抗剪）。

本节的题材按照壳体的形式来分类。我们不去追究不同类型的构件在数学上是否属于同一类。对我们的目的来说，最要紧的是它们引起的反应相似，它们起同样的作用。一个筒形拱顶和一个旋转的双曲面在外表上看来容易混淆为相同的壳体，但在数学上它们是完全不同的。一个多边形穹顶是解释为球体的一部分好呢，还是解释为一种推移型式好呢？对此我们不感兴趣。没有两个鸡蛋是完全相同的，但这对于蛋壳的原理是无关紧要的。因此，两个壳体在数学上的构成虽然不同，但结构形式可以一样。我们所称的结构造型具有比这个更宽广的基础，就是功能、材料和力学原理的统一。这种三位一体性才是造型的创造者，数学上的构成只不过是达到目的的手段而已。

以下参照一些相似的形式上有关的例子，对结构造型的规律进行探讨。这些例子是自由选择的，其主要标准是结构的明朗性和简洁的表现性。壳体可以分为五类：

1. 圆柱形壳体；
2. 旋转壳体；
3. 劈锥壳体；
4. 双曲抛物面壳体；
5. 自由式造型的壳体。

圆柱形壳体 象折板结构一样，圆柱形壳体在自然界也有一些相应的东西，例如，草梗和竹竿的封闭圆管在工程技术中也有所运用。但是，圆柱体的切开部分是壳体结构的基本型，是一个房屋的原件，既未被其他工程技术也未被自然界所用。只是在过去二、三十年中被建筑师们承认了它的重要性。圆柱体的切开部分是典型的壳体形式，也就是本节所讨论的重点。以后在文章中凡是有“弧段壳体”的词句，在一般情况下，就是指的圆柱体的一部分而不是球体或圆的一部分。在弧段壳体中也包括，严格地讲，不属于这类的一些壳体。但是，因为形式比较相近，同时也没有更合适的地方来安排，因此，就放入圆柱形壳体这一节内。我们还要讨论圆锥的一部分，轴向弯曲的圆柱体的一部分，最后，还有一些数学特征完全不同的壳体，例如，某些旋转双曲面壳体。本节内容的选择标准主要是形式的相似性和结构作用的相似性。

弧段壳体除曲率之外（参考图146），与拱的常见形式和拱的力学原理没有共同之处，它完全是一种新的东西。为了不用数学工具而能理解它的作用，我们再用纸做的模型说明。一张纸一般完全不能抗弯，如果把它卷起来，它就变得挺硬。再将它放开，在与纸筒反向等分，折成几个部分，就得到一系列相当强的弧段壳体。重荷载下它们就向两侧摊开而塌落。如果两端用硬纸板粘住就维持了壳体的形状并增大了它的强度（图143）。

如果按照分析折板结构的方式分析圆柱形壳体的作用（参考本书162~163页），我们再次分辨出三个基本的作用：

1. 曲面在横向的作用

首先，假设用一系列平行的平板条组成的一个折板来代替壳体。如果再假设这些板条

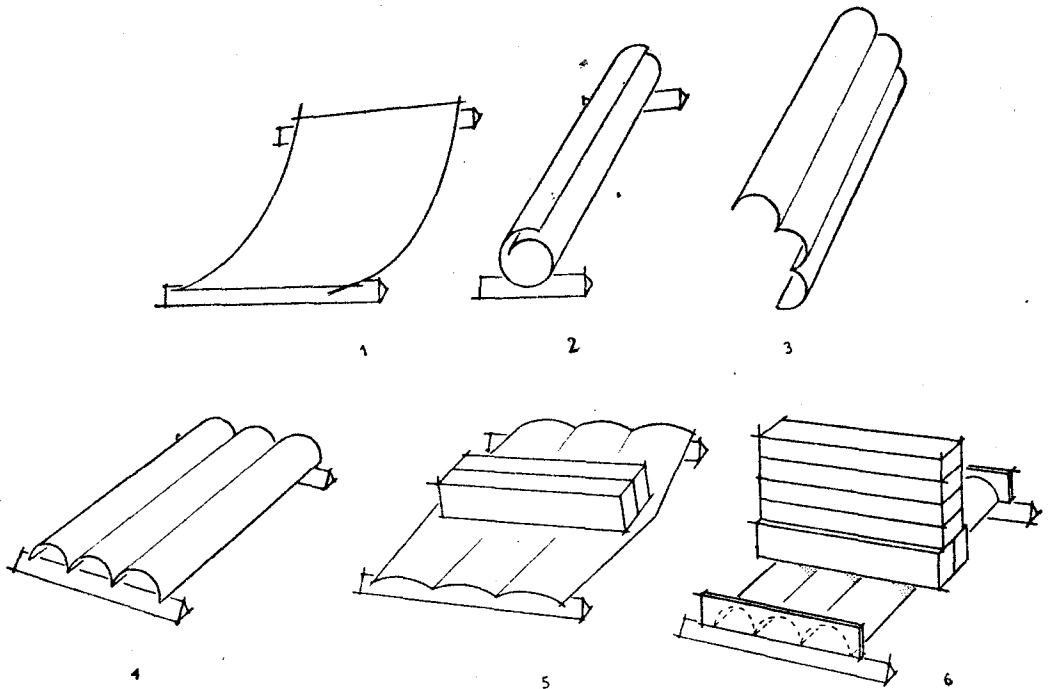


图 143 一个圆柱薄壳屋面的纸板模型

- 1—一张平纸实际上没有一点抗弯强度；
- 2—把它卷起来就变得挺硬；
- 3和4—与卷筒反向等分几个部分，便取得一系列硬的弧段壳体；
- 5—重荷载下壳体就塌下来了；
- 6—两端粘上横向加劲件就可以保持壳体的形状并增强它的承载力

在横向有相当大的抗弯强度，就象在折板结构中所说明的一样（图 129），均布荷载将集中在折线处，这里折线的作用就好象一般的支座（图144-1）。

2. 曲面在纵向的作用

在折线处的集中荷载可以分解成在相邻板条面上的分力。这些分力表示作用在板条上的反力。此时板条的作用就好象跨在纵向上的简支梁（图 144-2）。由于这个体系是不对称的，例如，在 A-B 线两边的简支梁所承受的荷载很明显地是不一样的。因此，这两个受不等荷载的梁在 A-B 边的变形趋向是不同的。然而，由于跨过 A-B 边的板是连续的，这两根梁对变形趋向必定互相约束，因此，沿着 A-B 边的实际变形一定是这两种趋向的折衷值。结果是在 A-B 边上的应力主要成为切应力，薄壳是足足能够抵抗这类应力的。

现在如果设想使板条变得越来越窄，这样就得到一个标志真正壳体的连续曲线。不难看出，正常的壳体作用和已经阐述过的折板作用是基本上没有什么差别的。上述的切应力对两者都发挥重要的作用。

3. 横向加劲件的作用

如果一个非常薄的壳体能起 1 和 2 所述的作用的话，它的初始形状必须严格保持不

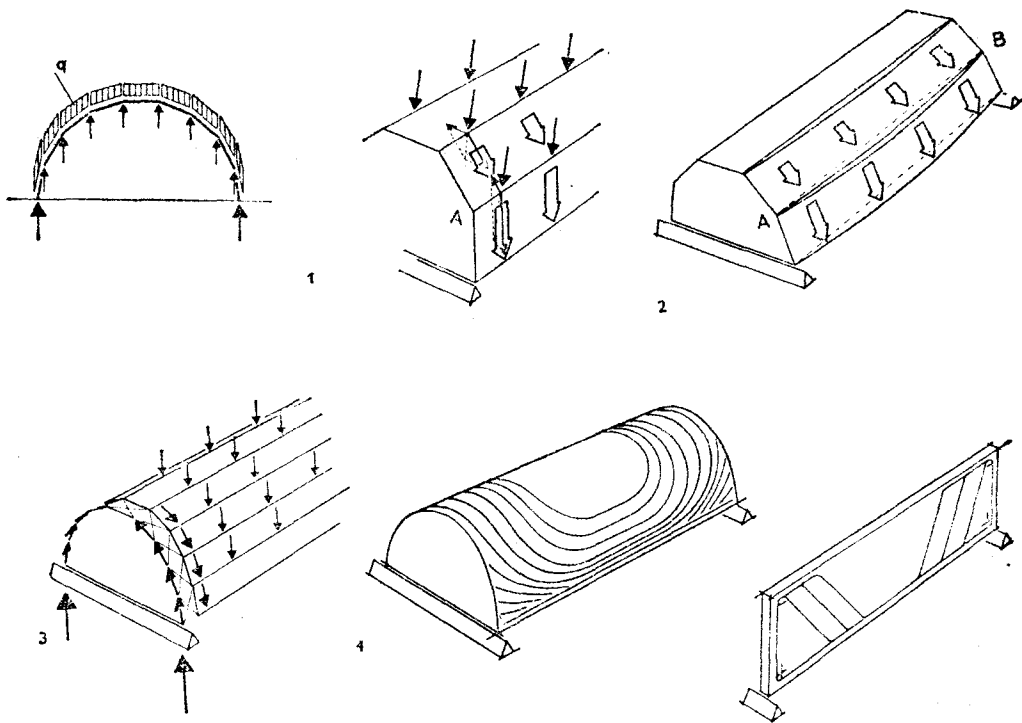


图 144 圆柱形壳体的作用可以假想为折板来理解

- 1—荷载集中在刚劲的折线上；
- 2—折线之间的许多平板条在跨度方向的作用象小梁，将荷载传到A、B两点。然而，由于它们在折线处是连续的，它们就能承受剪力。所以，它们相互约束彼此间的变形趋向。这样从整体来讲就增大了结构的承载力；
- 3—在各端的横向加劲件保持了结构的形状，加劲件与壳体的连接必须能够传递剪力；
- 4—圆柱形壳体中的主要配筋和简支梁中的配筋对照

变，并且必须阻止侧向的摊开，因此薄壳和加劲件的连接点必须能承担剪力，这是非常重要的。在图(144-3)中近似地用一个象征性的格构来表示。很清楚从整体而言，结构的承载力决定于沿着薄壳和加劲件会合线上产生的抗切强度。

扼要地讲，圆柱形壳体的作用有点象由无数窄板条组成的一个折板。荷载先传到折线，然后再分解成为与折线两边的窄板条相切的分力。在纵向窄条的作用如同小梁，因为相邻板条的连续性限制它们不能自由变形。（与对称的折板中简支梁的理论相反，参阅本书第163页）。总之，只有用加劲件保持壳体的形状，而且壳体与加劲件之间的连接点能抗切，壳体才能发挥作用。

如果把圆柱形壳体看作一个封闭系统，当然，类似一根梁的作用是很清楚的（图144-4）。对照简支梁和圆柱形壳体的配筋图形两者的相似性是不难看出的。把壳体看成一根具有薄的曲线腹板的梁的时候，立刻就可以理解它的作用了。

还有一点值得注意。在确定拱的形状时要求严格遵守的压力线近似抛物线，对于圆柱形壳体是并不典型的，实际上，它甚至会削弱壳体的强度[71]。如果圆柱形壳体的截面是按照压力线确定的，荷载就会沿着压力线一直往下传到壳体的底部边缘。荷载在传递过程中不曾转变为剪力，于是，荷载通过最短的路线达到支座。在正常情况下，剪力产生在折

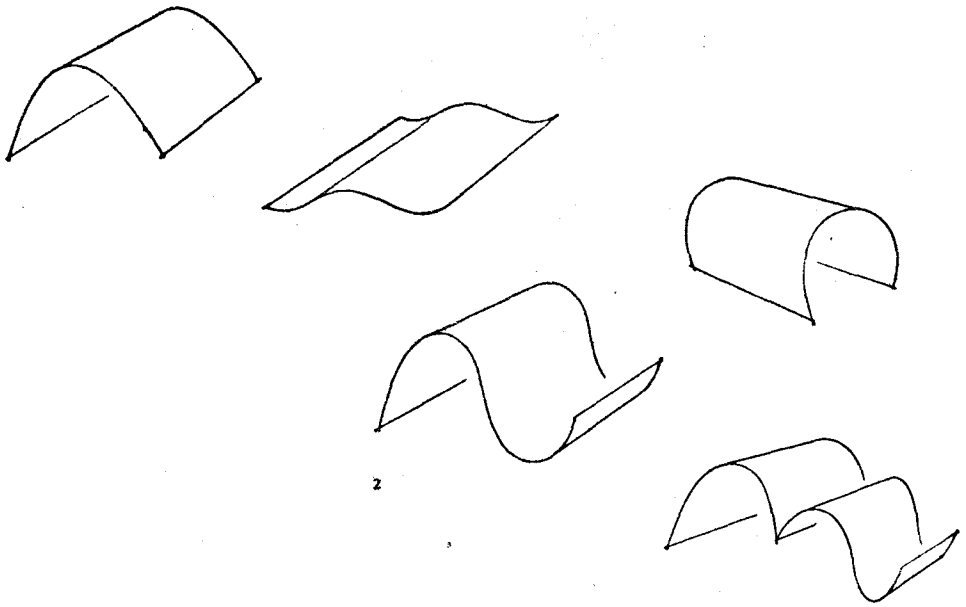


图 145 圆柱形壳体可用的截面

- 1—压力线并不是典型的，采用过分平坦的曲线是错误的；
2—任何截面都可以采用，只要它的曲线是足够强有力的

板的折线处，或者沿着壳体的曲线，壳体的曲线离开压力线越远，抗切的效果就越好。如果截面完全依照压力线，在壳体的底部边缘将产生纯粹梁的作用，这当然违反壳体的真正特性，因为壳体的承载力是以其抗切能力为基础的（图145）。

实际上，至今多数已建壳体的截面都是圆弧形的，因为这种形式几何上简单，便于建造，数学上易于处理；不过壳体结构本质上并不是指定非此不可。

在德国二十年代时用著名的蔡斯-迪维达克（Zeiss-Dywidag）体系开始了圆柱形壳体的建造。在弗兰克福（Frankfurt）和布达佩斯两个中央市场就是采用半圆截面的弧段薄壳屋顶[62]。这些弧段在跨度方向连以大的梁式的边缘构件，最初认为是不可缺少的。将弧段斜置插进玻璃面形成朝北窗的锯齿形壳体，以后成为工业建筑中典型的屋顶型式（图146）。这些早期的壳体风格对于结构设想的内在拉力和外部优美还表达得很少。真正的壳体设计还是以后才出现的。

当壳体的曲线和它那惊人的薄度充分暴露时，它的轻快优美感再显著也没有了。汉诺威（Hanover）[72]和卡塔赫纳（Cartagena）[73]运动场看台的悬挑屋顶在这一点上是特别清楚的[图147-1和147-2]。不过两端支承的简单壳体，从支承平面悬挑出去也可以获得同样优美的效果。波哥塔（Bogota）汽车站的屋顶[74]（图147-3）就完全由弧段壳体和横向加劲杆组成，加劲杆也起梁的作用。因此，可以间隔地省去支柱，并在两侧各加一个自由挑出的壳。整个建筑物不是别的就是结构与造型。

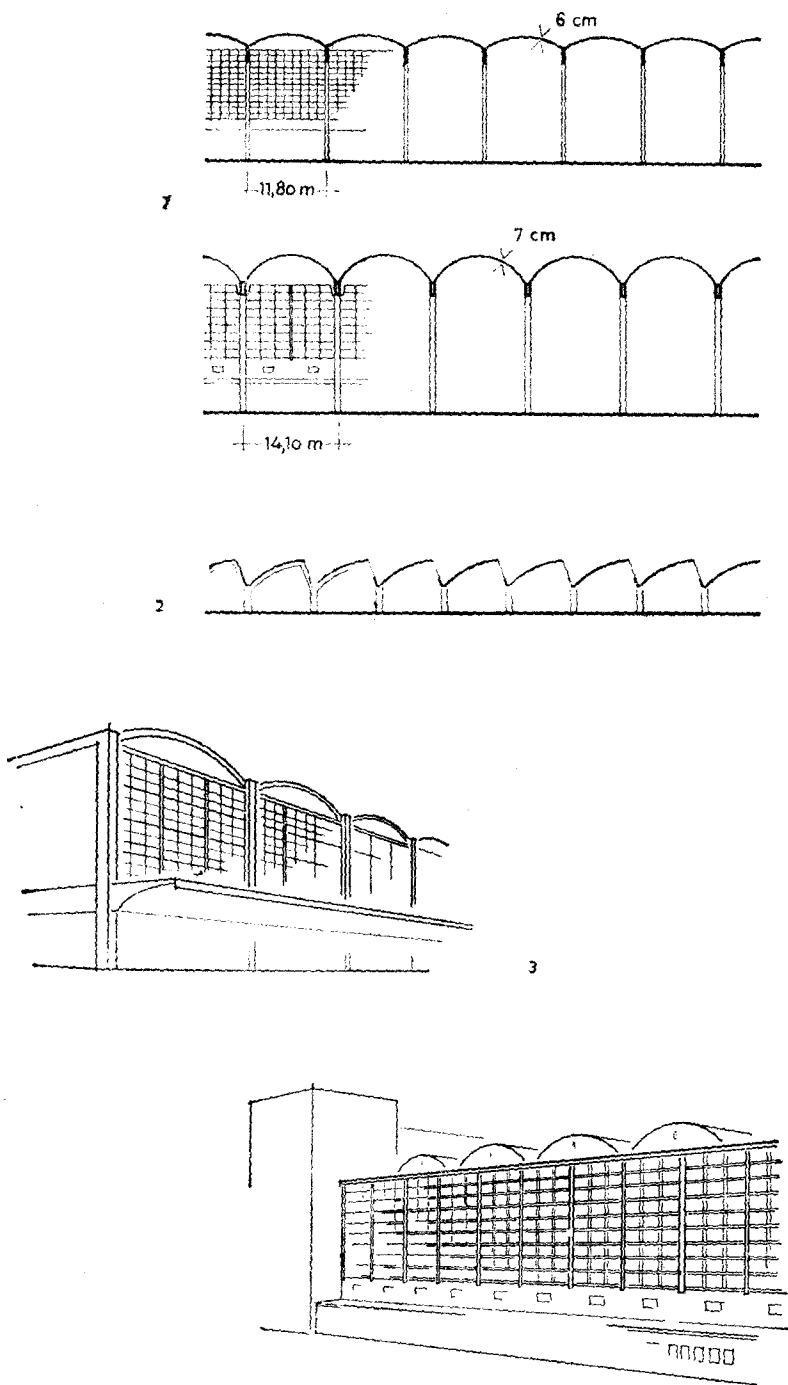


图 146 最初简单的圆柱形壳体形式的作用好象两个支点间的梁
 1—具有排着的大边梁的圆柱弧段壳体（截面相应于图146-3）；
 2—斜置的圆柱弧段壳体形成北窗的屋顶；
 3—布达佩斯和佛兰克佛的中央市场立面

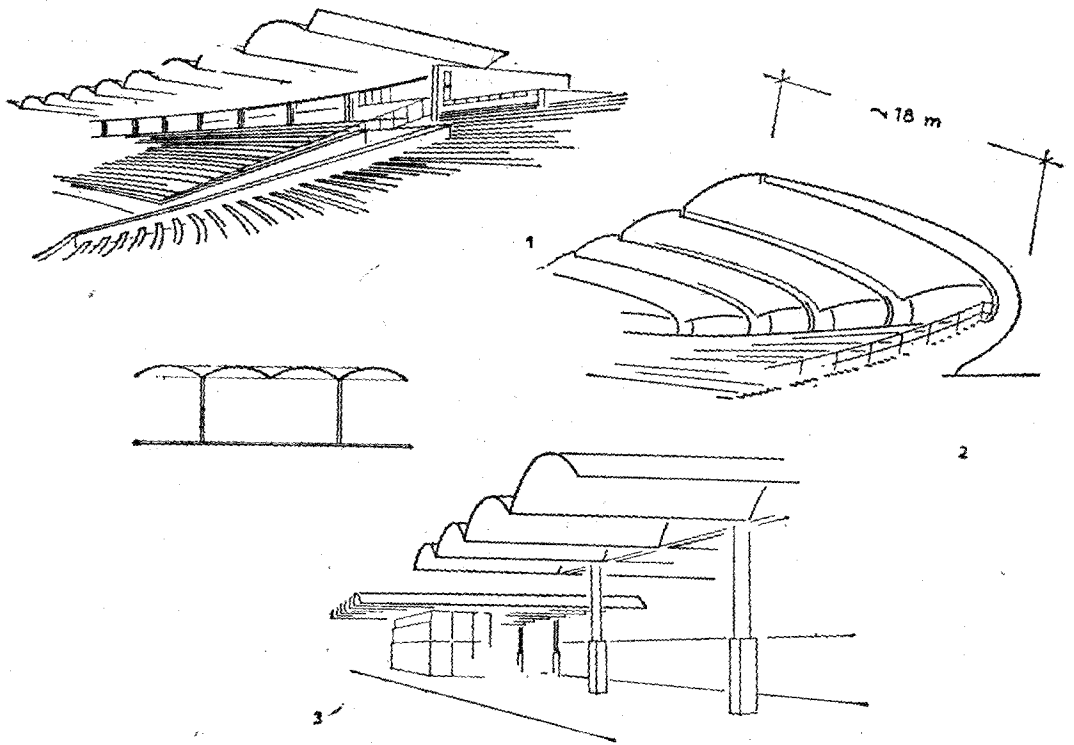


图 147 后来用在悬臂结构中的圆柱形壳体

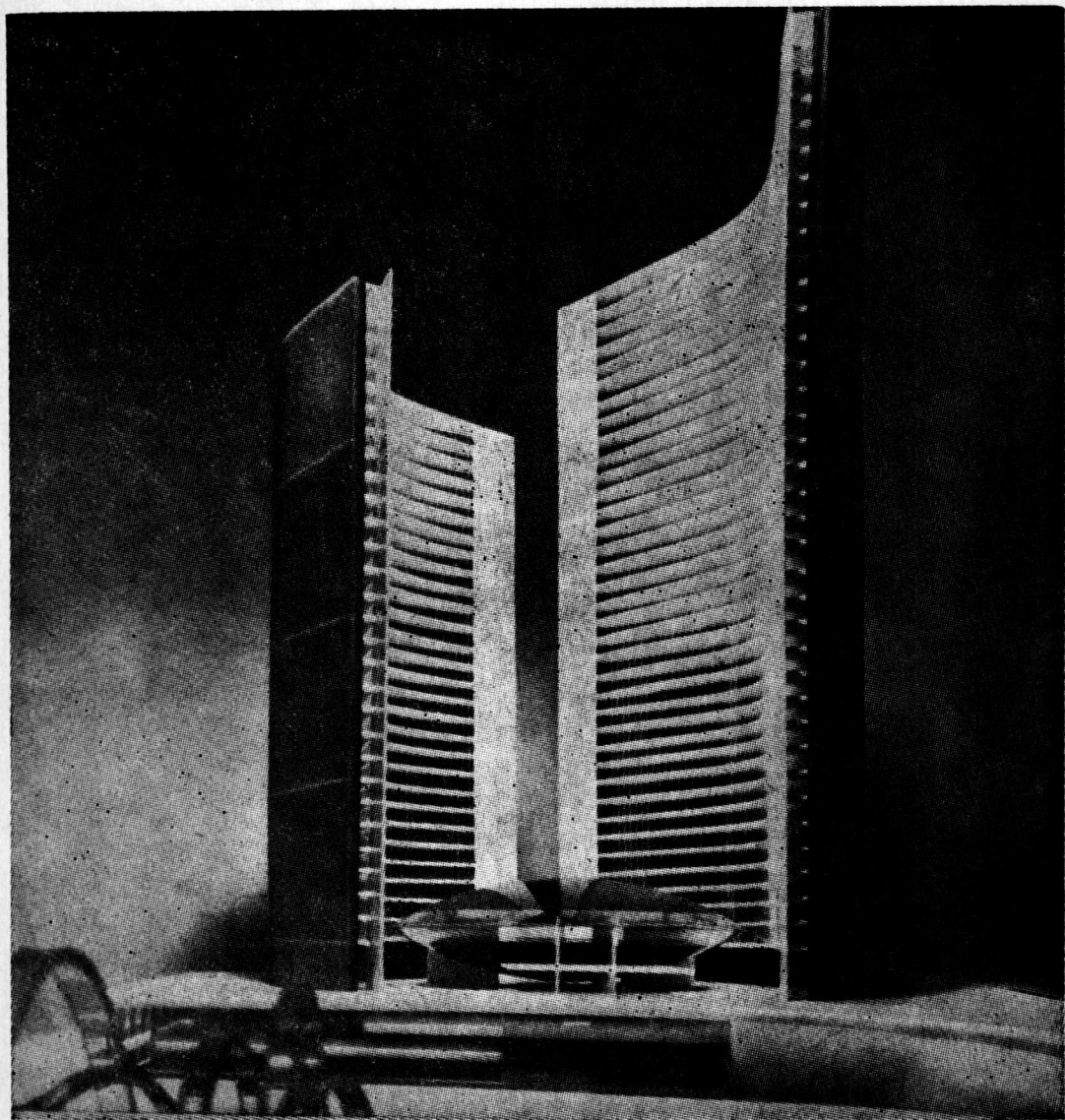
- 1—德国汉诺威的运动场看台[72]；
- 2—哥伦比亚卡塔基纳的运动场看台[73]；
- 3—哥伦比亚波哥大的汽车站[74]

组织若干弧段壳体而形成的空间结构，从下面看有一种中空的效果，这种组成体在技术上和形式上都有趣味。图 148 的两个水塔包括一圈向内凹进的弧段。壳体的曲率和水压反向。把壳体看作竖向跨越的元件，在壳体中产生的拉应力主要被凸出的肋所承受（参看图 144-4），而水平的环向拉力则集中在加劲件链的外缘。因此，这些水平件链除加固壳体元件和保持壳体形状的原有作用外，还象水桶的箍一样承受环向拉力。

这些例子完全是土木工程，他们表明除了把弧段壳体排成一线外，还有更多的安排方式。例如，在思恩 (Caen) [77] 的水塔采用锥形收缩的弧段壳体，只要将基本形式稍微变动一下，对建筑师和工程师来说都表明还有很多新的可能性。

一个仍旧等待实现的非凡设计是芬兰建筑师里威尔为多伦多新市政厅做的得奖的设计 [75]。它是第一次将圆柱体弧段的中空型用于一个高层建筑的竖向构架。工程师肯定这个结构将按照壳体设计。虽然，这个壳体原来想用两层墙，后来发现有可能从单层墙一边挑出 36 层楼，由于形式本身固有的曲率，还有足够抵抗风力的刚度。在这种情况下，楼板成了加劲构件。

迎接这个设计的是广泛的批评，表明对接受这样方案，我们思想上是多么没有准备。多数的批评暴露了对真正处于紧要关头的东西完全缺乏理解。



照片：多伦多市政厅摩天大楼设计[75]
建筑师：维尔佐·里威尔 (Viljo Revell)

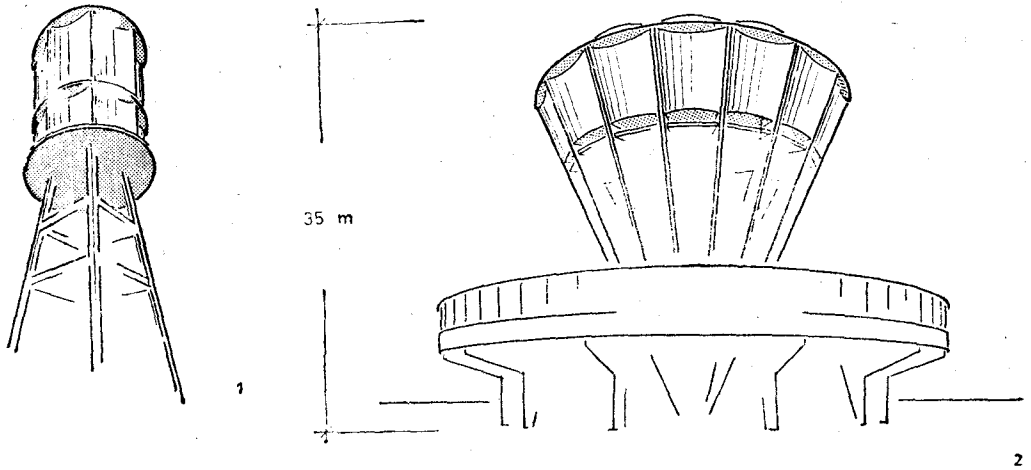


图 148 弧段壳体组成的水塔

- 1—埃及的水塔[76]；
2—法国恩思中心的新水塔

宇宙 (Universal Atlas) 水泥公司近来邀请了一些著名的建筑师和工程师为一系列重要的建设任务准备一些设计, 在类型上不作任何限定, 只做为一种理论探讨。成果由报纸公布了出来, 其中一些设计非常有意思, 是值得学习的大胆尝试。在这一系列设计中有些已经取得富有成效的反响, 包括“未来的大礼堂”[78], 在剑桥的建筑师协作组(TAC)~瓦尔特·格罗比乌斯 (Walter Gropius) 设计组和魏丁格尔 (Weidlinger) 及萨尔瓦多里 (Salvadori) 两位工程师的集体作品 (图 149)。两组壳体象扇形一般展开于严谨的功能平面之上, 把各个壳体截面做成锥形而取得扇形的效果。这些壳体的承载力并不受影响。

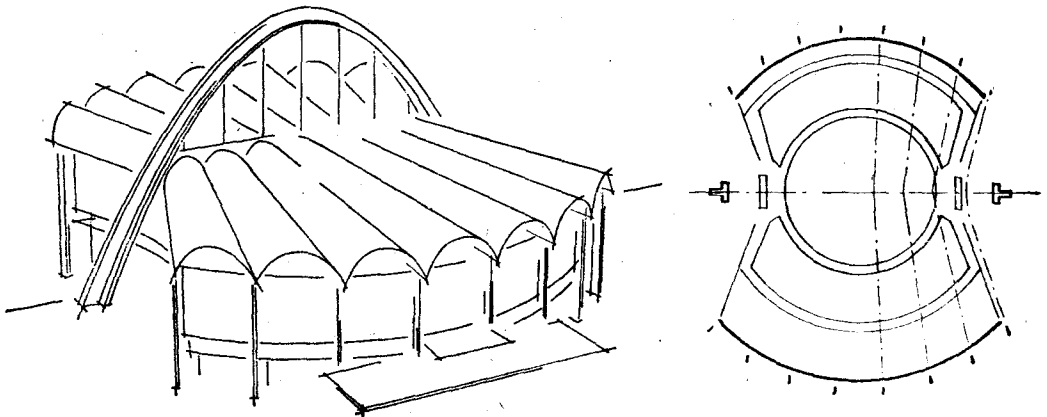


图 149 壳体布置为双扇形而形成大礼堂的屋顶

- 建筑师: 瓦尔特·格罗比乌斯设计组
工程师: 魏丁格尔和萨尔瓦多里[78]

赫尔默斯 (Hellmuth), 奥巴塔 (Obata) 与卡沙鲍姆 (Kassabaum) 三位建筑师与奈维合作设计的一个在圣路易斯 (St. Louis) 的圣路易斯小修道院的中心型方案[79]包括两层相叠锥形壳瓣组成的同心环。这个结构比图 149 的设计脱离圆柱弧段形更远些。实际上, 每个壳在它的纵轴方向也是曲线的。尽管如此, 这里谈这个设计, 是为了说明如何从一个形式逐渐发展到另一形式, 并且说明壳体的表现力是多么取决于边缘的处理方式。虽然此例中壳体的边缘显然属于讨论过的类型。可是, 辐射状的布局和单个元件的双向曲率, 预示着我们还将遇到在多种多样的壳体中的发展变化, 如旋转壳体, 双曲抛物面壳体和自由壳体等。这些在截面上和平面上向内收小的壳体形成一种中心型拱顶。它们合理地结合在一个更广的结构设想之中, 其中只部分地遵从单个圆柱壳体的定律。从壳体之间有非常刚韧的沟槽上, 使我们认识到加劲褶的重要性。关于这方面以后再讨论。(关于互相渗透型式中的脊与谷的论述, 本书第 190 页有非常突出的例子, 这里的讨论可以与它参考比较)。沟槽是由两个相邻壳体相交而形成的。前面说过, 好象在支承处应该配置一种隔膜以阻止弧段壳向外铺开。这里却第一次取消了隔膜, 同时壳体的边缘是无约束的也不用加固。这是由于在这个特殊例子中, 各个壳体单元不是单向弯曲而是双向弯曲才有可能。从图 150 中可以清楚地看出弧段壳内外部的曲率是不相同的。我们以后还要多多地讨论这个双向曲率的问题。就是归功于双向曲率, 所以壳体才这样刚劲, 以致不用隔膜而能保持形状, 特别在这个例子中, 荷载趋向于流向刚性的沟槽截面中去, 在这里沟槽的作用就象拱肋减轻着无约束的边缘的负荷。自由边缘的抛物线形状也可能是有助于减少负荷的另一个因素。自由边缘两邻的荷载通过一种拱作用的方式被传递到支座上去, 而壳体不必参予作用。在这些情况下, 我们原确定不是圆柱壳典型性的抛物线截面又变为重要。在以下几节中, 联系壳体设计我们还要重复阐述它的适合性的问题。

“长”圆柱形壳体在与跨度正交的方向弯曲。横向的曲率并不含有拱的作用。曲线的形状和压力线无关 (图 151-1)。但是, 另外一种壳体弯曲的方向与跨度方向是相同的, 这种壳体称作“短”薄壳, 带有加强壳体的相距不远的肋, 这时压力线又成为一个重要因素。短薄壳矢高较大, 只有在需要很高的空间时采用这种型式才是合理的, 例如, 中央市场, 竞技场, 飞机库等等。如果短薄壳直接支承在曲线两端的基础上, 力的传递, 就象在拱中一样, 将经过最短的途径到达支座, 不会象图 144 和图 151-1 所示的长薄壳那样必须通过隔膜或加劲肋走弯路。如果短薄壳的曲线符合静荷载下的压力曲线, 也就是, 近乎抛物线, 那么力将由这条线通过而完全不使加劲肋发挥任何作用。每当压力曲线变动, 例如, 在风力作用下 (图 151-3) 就会干扰这种平衡, 如果未用加劲肋的话, 这种单向弯曲的薄壳就将坍塌。只要压力曲线和壳体形状不相符时, 壳体就必须将荷载的不对称部分传递给加劲肋。因此, 这些肋必须发挥如图 144 所示的隔膜作用, 就是, 加强薄壳的刚度和保持薄壳形状的作用。可是, 因为这些肋不象隔膜那样, 以实心片的形式封闭薄壳的端部, 所以必须具有足够的抗弯强度来抵抗各种可能的合力。在壳体本身承担静载的同时, 只剩下风雪造成的变动荷载让肋来承担, 肋的工作就减到最小值。当壳体的形状和压力曲线相符的时候, 才是这样。因此, 在短薄壳中, 抛物曲线形的压力线又成为确定形式的因素。所以, 短薄壳与简单的拱相比, 并没有增加更多的作用。真正壳体作用的因素, 在这种情况下局限于不对称荷载下, 肋的小间距这个因素也没有明显地表示出来。相反, 设计是由近似抛物线的压力曲线所控制的。所以, 短薄壳的典型作用就是直接的拱作用。

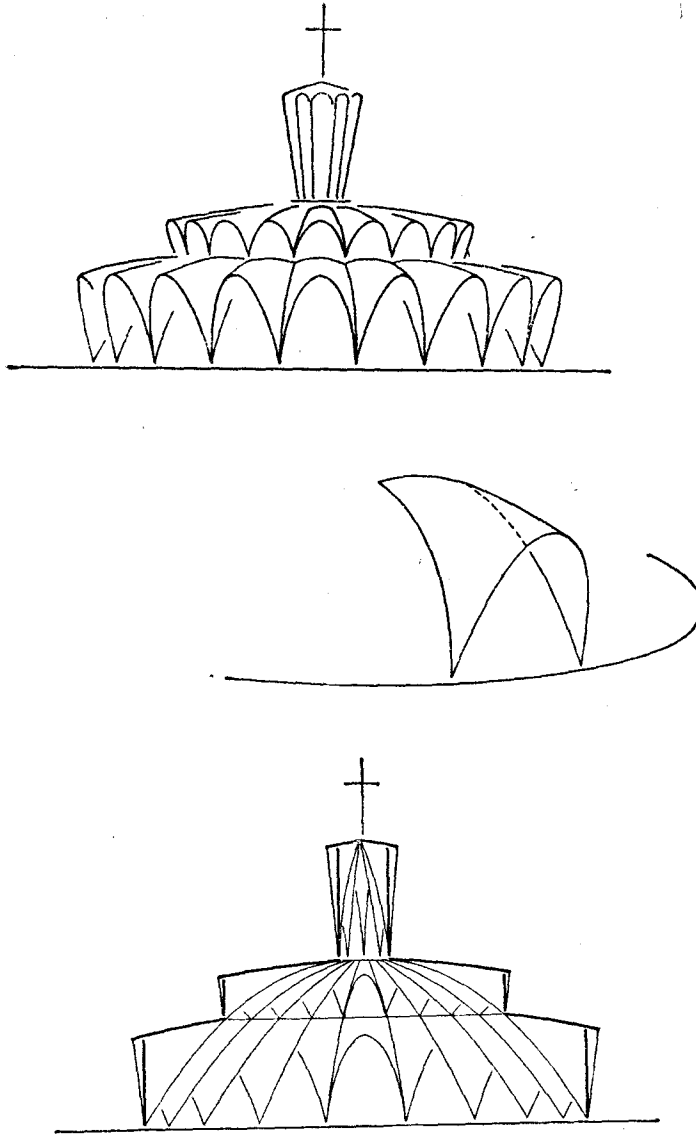


图 150 壳体单元布置成圆形，而不用圆柱体形，启示了双向曲面的发展
建筑师：赫尔默斯、奥巴塔和卡沙鲍姆[79]

短薄壳适合于宽屋顶的单层建筑物，如科隆的中央市场[80]（图 152-1），不过论及典型的壳体形式时，短薄壳只是处于次要地位。图152-2的瑞士戈绍（Gossau）的一个工厂，设计者之所以能用圆弧形的短薄壳而不用压力曲线支配的抛物线形，只是因为他能安置一个非常刚性的格构梁做为加劲件[81]。这个梁能够承受由于形状偏离了压力线所引起的弯矩。在这里我们应当谈谈马亚[82]设计的苏黎世展览厅（图 152-3）。这个建筑中，壳体的两端伸出加劲肋之外很多。这样把薄边的轮廓鲜明地突了出来，确定造型的压力抛物线很清楚地从加劲肋的曲线上显示出来，这是短薄壳的特点。

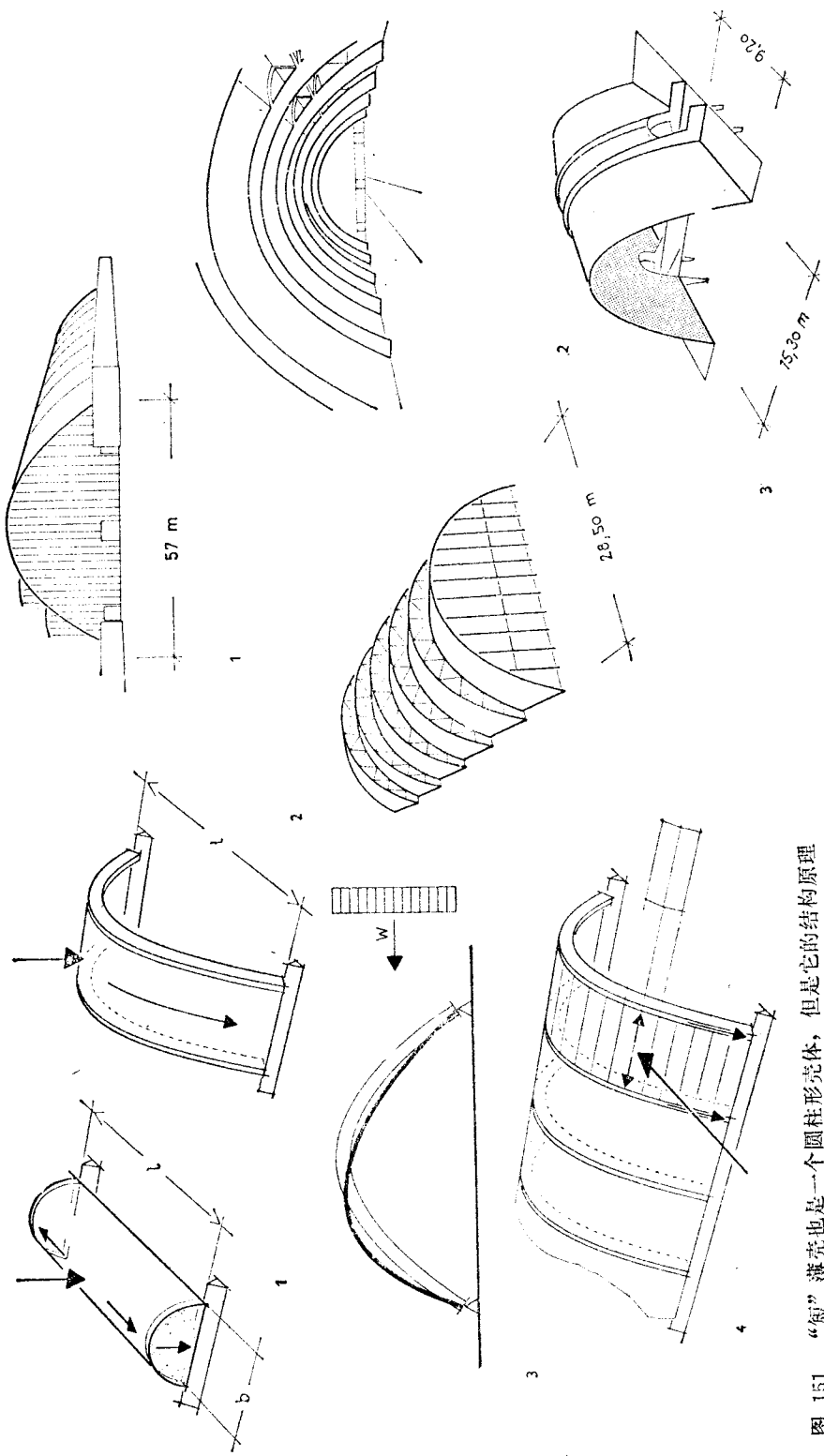


图 151 “短”薄壳也是一个圆柱形壳体，但是它的结构原理是截然不同的

- 1—至今为止的讨论限于和跨度正交方向弯曲的圆柱形壳体；
- 2—“短”薄壳在它的跨度方向弯曲，它的曲度最好按照压力曲线。竖向荷载由拱的作用承担；
- 3—当不对称荷载使压力曲线发生变动时，加肋肋可以保持结构的形状；
- 4—不对称荷载通过弯曲板（这可以假想为由一系列平板条所组成），传递到加肋肋

图 152 采用短薄壳的建筑物

- 1—德国科隆的中央市场[80]；
- 2—瑞士戈绍的一个工厂[81]；
- 3—1989年马尼亚在苏黎世设计的一个展览厅[82]

佩西亚 (Pescia) [83] 的鲜花市场是壳体 and 拱顶的折衷，它是由25厘米厚的空心砌块建成的，因此，它比混凝土薄壳强得多 (图153-1)。好象看不见加劲肋。在一般应有肋间的空腔地方填了混凝土。这样，肋就隐藏在屋顶厚度之内。不管怎样，这些隐藏的肋对拱顶承受不对称荷载时仍起加劲作用 (参考第二章第135页)。在纵向两支柱之间顺壳面设倾斜的拱，而不用短薄壳端部一般的连续直线的支承方式。这样将结构削掉一部分而改进了室内的通风和照明条件，又使结构造型更易于理解。

清楚地区别“长”薄壳 (图144) 和“短”薄壳 (图151) 是很重要的，因为混淆了这两种形式将严重损害我们对纯正的结构造型的发展和欣赏。用两个例子来说明这个观点。图153-2中覆盖在一个大面积上的屋顶是由几个尺寸不同的壳体所组成。两端的壳体一直到地，使人猜想它们是跨在曲度方向的短薄壳。引人注意的是它们还是抛物线形的。中间的壳体截面为圆弧形，而且，从长宽比上也会想到象是一个正规的跨纵轴的弧段壳体。显然，这个屋顶是短薄壳和弧段壳的组合物。此外，还不明确外墙是否有加劲的作用。外墙应该做为中间壳体的隔膜和两端短薄壳的加劲肋。但是墙体的透明纹理表明它们并不具备上述两种功能。如果外墙不是实墙，也不能做为加劲肋。那么，在A与B处至少缺少两个支座，也缺少为发挥中间壳体的强度的隔膜。此外，两端的壳体缺少短薄壳正常需要的加劲肋，并且几个壳体的厚度都一样。这个厚度对长薄壳太大，对短薄壳的加劲肋又嫌不够，对这样的设计就无法经过分析而对它的作用有所了解，总之，它没有结构的起因。它可能表现某种雕塑的价值，但在建筑上是站不住脚的。

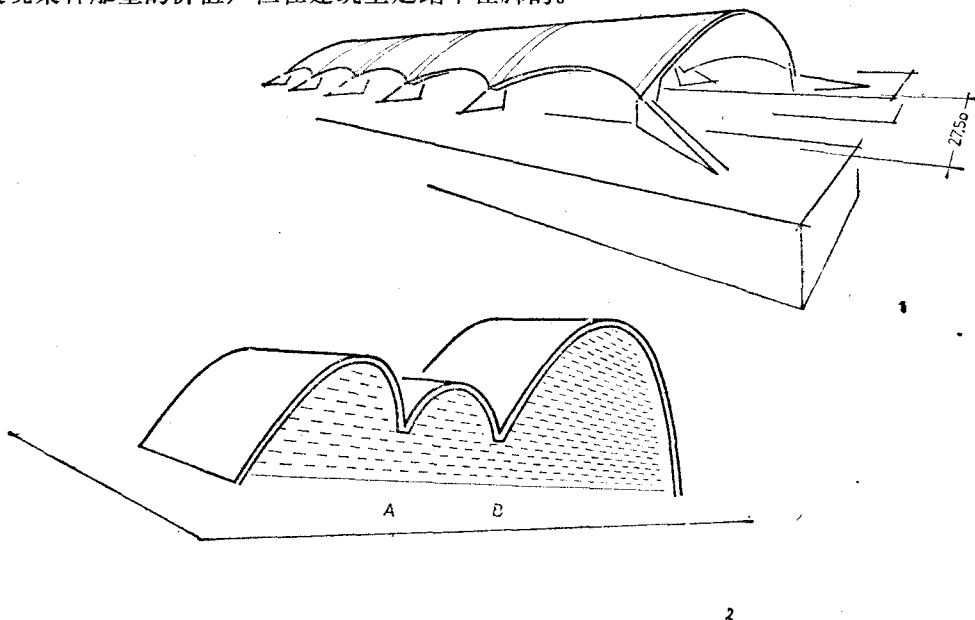


图 153 短薄壳的变化

- 1—意大利佩西亚的鲜花市场[83]的屋顶是一个拱顶，用空心砌块建造的，这个拱顶的作用象一个短薄壳。竖向荷载传到壳体的下缘，由隐藏在屋顶厚度之内的倾斜拱再传到独立的支座。不对称荷载由加劲肋承担，这些加劲肋同样地隐藏在壳体厚度之内；
- 2—当短薄壳和圆柱形壳体的作用没有清楚地区别时，造成结构上意义不明确。壳体的曲度、跨向、厚度、横向隔膜或加劲肋是否存在以及一般结构原则都变得模糊不清

同样的批评可以加之于如图154-1所示的屋顶结构，不过，这个例子总的格局是容易把握的。中间壳体支在角上，表明跨向纵轴，然而端部没有设加劲件。外边壳体的一边伸到基础，说明它们的作用好象短薄壳，然而，看不到加劲肋。附加在外边壳体的板片是平的，它们既不象壳体又不是拱。只能解释为受弯的板。立面上显出壳体厚度一律，又说明对长薄壳太厚对加劲肋又太薄。再仔细观察这个连贯结构的头一个印象是结构的不合理性。这个结构系统的稳定性完全依靠弯曲板的刚度，但是，这些弯曲板既不是薄壳也不是拱，如果以平板来代替弯曲板将更符合要求的（沿着图154-2所示的直线）。另一方面，如果薄壳的曲度和厚度，隔膜与支座的形状和位置，壳的一般跨向等都符合真正的圆柱形壳体的话；那么，这个设计将获得轻巧，经济和表现力强的效果（图154-3）。

当然，把圆柱形壳体所有的变化都压缩到我们前面规定的两种类型，即跨度在轴向的长薄壳和跨度与轴向正交的短薄壳，对建筑性质变化多端是远远不够用的。无疑，圆柱壳体的各种变化，圆柱壳体同其他体系的折衷或组合都是可能的。有这么一天，还会由这些可能性引出有力的新造型。然而，未来的发展只能从成熟了的形式本身出发，而不是从忽略结构原理的形式主义出发。

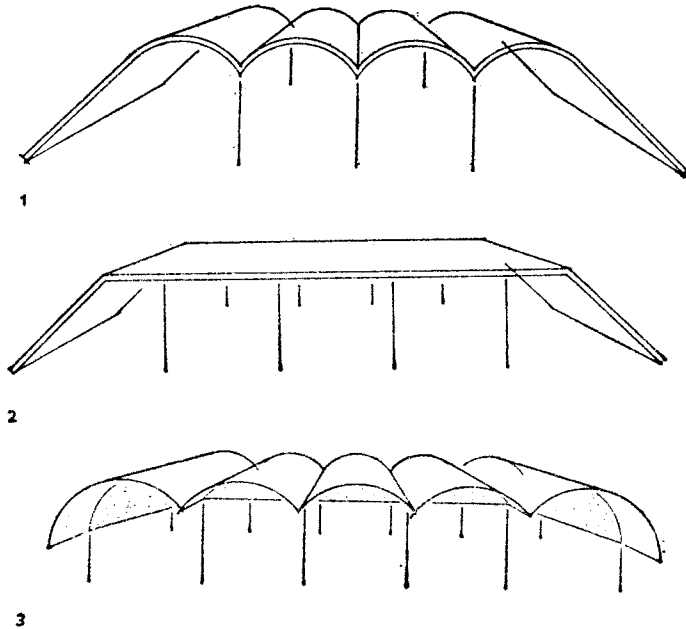


图 154 虚假的壳体

- 1—板的厚度，加劲件的缺少和两端的平板段使人联想是一个受弯的平板结构；
- 2—在这种情况下，采用平板设计比表面上似乎是壳体合适；
- 3—建议另一个方案，采用一系列真正的薄壳，即在支座处有加劲件，两端的薄壳倾斜地布置

两个圆弧截面的弧段壳体相正交形成一种十字拱顶形式（图155-1）。两弧段相交的谷线可和曲线折板的相对照。这个谷非常刚劲，它帮助保持结构的形状，还象隔膜或加劲肋那样增加壳体的强度。它的加强效果主要决定于壳体相交的角度。

圣路易斯航空港[84]薄壳屋顶的边缘是用约2米宽45厘米厚的大混凝土肋来加强的（图155-2）。这是从外面可以看得见的尺寸，然而薄壳本身的厚度只有11厘米。因为薄

壳只在一个方向弯曲，如果没有这个加强的边，那么对约36米的跨度来说，壳体刚度就不够了。在这一点上，将圣路易斯结构和马亚壳体（图152-3）作一对照是很有意思的。我们看，后者也有悬空的边缘，从处于建筑物里面的加劲肋向外伸得很远。因为尺寸较小，不需要边缘加强。

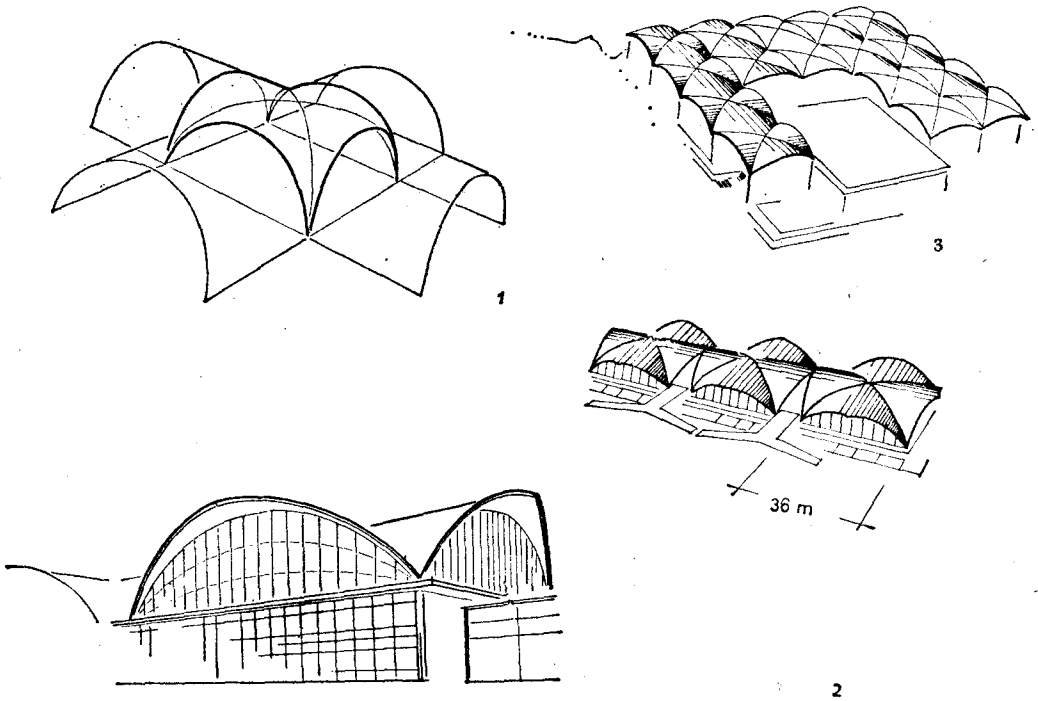


图 155 两个圆柱壳体 90° 正交

- 1—结果象十字拱顶的形式；
- 2—圣路易斯航空港[84]；
- 3—加里福尼亚门罗(Menlo)公园的仓库

已经谈过两个弧段壳体 90° 交贯，下一步谈更多的弧段壳体的复式交贯。如果壳体交叉成脊，结果形成一个穹顶。在壳体结构的早期时代，这类结构曾用于莱比锡和巴塞尔(Basle)[86]的市场屋顶（图156-2）。这里脊取代谷起着加劲作用。按照分析短薄壳中力的分布所用的基本原理，（图151）我们能够辨别：

1. 在一个弯曲的壳体中力的传递方式与拱结构相同。由于不对称荷载或是壳体曲线偏离压力曲线而产生的弯矩被。

2. 曲面的加劲效果所承担，曲面又将力传递到脊。可以把这些曲面设想为一系列连续的平板条所组成。

3. 最后，这些脊取代加劲肋，并保持住壳体的形状。外观上这些互相交贯的形式并不都是很生动的。一方面，它们缺乏弧段壳体直线排列的那种简单朴素性，这些弧段壳体共具一个轴，清楚地朝同一方向。另一方面，相同的弧段交贯形成的辐射平面在建筑上是苛刻的，对一个方向弯曲的要求是无法配合的。一般单向弯曲给人的印象是刚劲的，在几何上

是肯定的。

无疑，不管怎样，在弧段壳体交叉这个主题上所能进行的各种变化还远远没有到底。

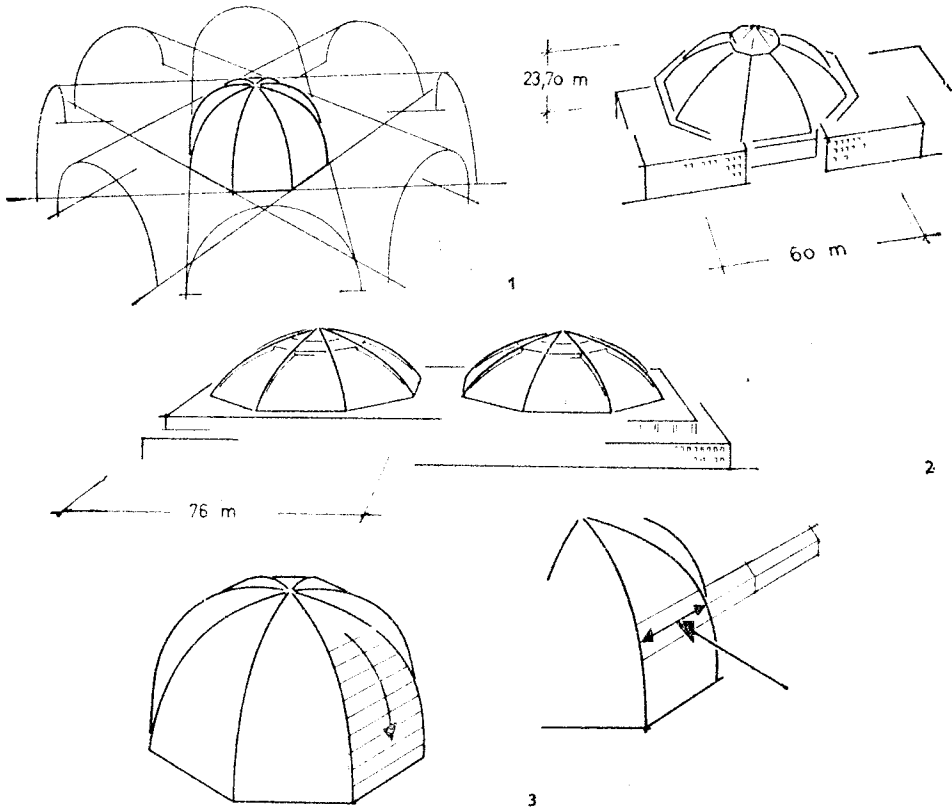


图 156 圆柱壳的复式交贯

- 1—与图155相反，交贯的结果也可以是一个穹顶；
- 2—德国莱比锡和瑞士巴塞尔的批发市场；
- 3—我们必须辨别弯曲板的作用（可以假想弯曲板是由一系列平板条所组成）和起加肋的作用，后者在这个例子中实际上是屋脊

在特雷圣地（Tressanti）拟建的市场[87]是一个很好的例子，说明一系列弧段壳体互相交贯可以获得多么生动有力的建筑造型（图 157）。一旦掌握了所有脊和谷都能提供劲度这个概念，就可以把它运用于任何一套交贯的形式。交贯为控制结构作用的方式，并在使结构更富于表现方面提供了一个手段。如果说，即使最简单的弧段壳体的交贯能产生这么多生动的空间结构造型，那么，将壳体的基本形状加以改变，例如变成锥形、使它不对称、将轴线倾斜等等，这样改变后的结构单元再互相交贯必将创造出更丰富多彩的新造型。

在这方面我们谈谈美国空调公司（UACC）设计集体提供的一系列方案中的一个“未来的航空港”[88]（图158）。壳体辐射布置，使我们回忆起图150中的教堂。但是，这个航空港的壳体布置成一个大环而不是一个穹顶。再次须要将圆柱壳体改成锥形，但这还不是

设计最重要的特征。真正创新之举是引进与第一套壳体直角相交的第二套成圆环的壳体。其结果是一个扩大的结构统一体，它的刚度大部分来自两个系统相交的谷。这个阶段，建筑师只勾画出一个设想，有待严格的力学分析的考验。壳体的剖面应以抛物线还是他种曲线为基础？壳体的边缘可否脱空还是用加劲肋？是不是在较高壳体的顶未加劲的区域不必加强，就能够让交贯的壳体顶的高度不同呢？上述的疑问只是许多等待澄清的细节问题中的一小部分。无疑，工程师们不久将找到建造这样结构的方式并且能使它稳定，但是以结构造型而论，在方案接近成熟之前，还要研究许多问题。在这一点上，我们介绍它的理由仅仅为了表明，根据几何地交贯壳体创造新的造型有无限的可能性。

这个广阔而尚未触动的领域对建筑师们和工程师们的技巧和幻想力是一个挑战。本节的起点是简单的圆柱形壳体。它的表面在一个方向是弯曲而在另一个方向是直线的。所以，容易建造，因为这个原因，自从开始有壳体结构以来，它就是一个流行的形式。不论基本型式经过怎样的修改，它的作用的本质仍然是在一个方向对变形几乎没有抵抗力的薄壳和帮助壳保持形状不变的加劲隔膜或肋之间的力的相互结合。只有这两者同时存在，壳体才具有一定的刚度、强度和空间作用。两者单有其一都不成其为空间结构。

在讨论图 150 的教堂时，我们第一次提到双向弯曲和它对壳体本身刚度的有利影响，壳体设计所有进一步的发展必然走向双曲形式。

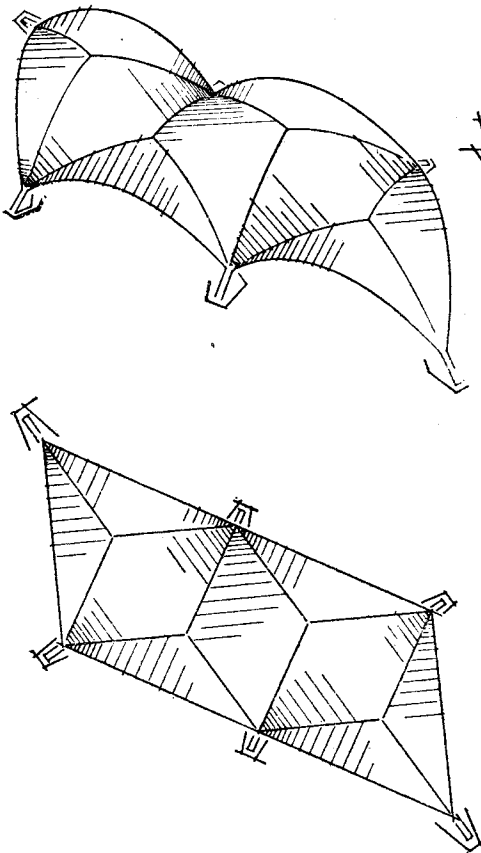


图 157 意大利特雷圣地市场弧段壳体
斜角交贯

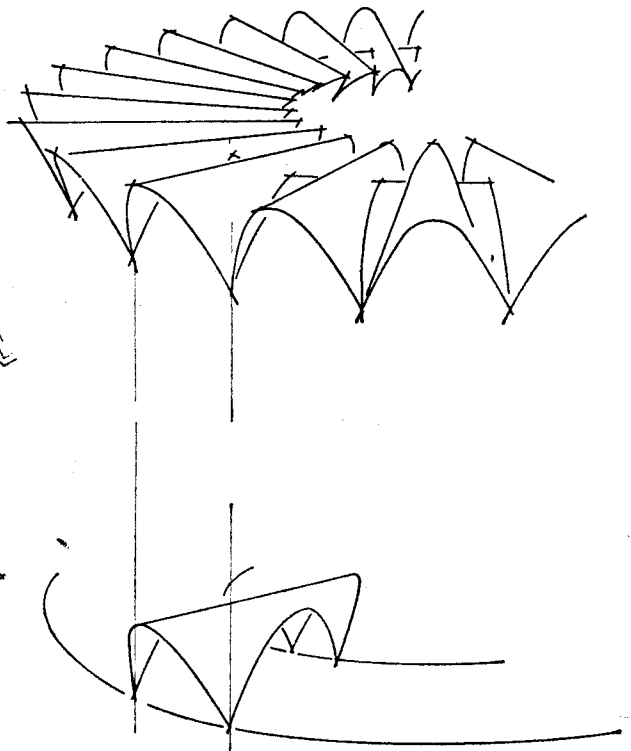


图 158 交贯愈复杂，放弃简单圆柱形的诱因愈强烈
一个航空站的设计[88]

这个趋向的第一步也是明显的一步是圆柱形壳轴向也呈曲线（图 159-1）。严格地讲来，结果不再是一个圆柱形壳体。不管怎样，按本节绪言中所述（参阅本书第178页），我们姑且将它包括在同一类型中。

我们能给它的最好定义是称之为“拱式弧段壳体”。它的表面既在纵向又在横向弯曲。结果是一个增加本身刚性的壳体，图 159-2 表示拆去加劲肋时，单向弯曲的壳体立刻坍落，而一个双曲的壳体却能继续抵抗变形（图 159-3）。就象一块桔子皮一样，桔皮虽然相当柔软，但是却不容易将里面翻成外面。

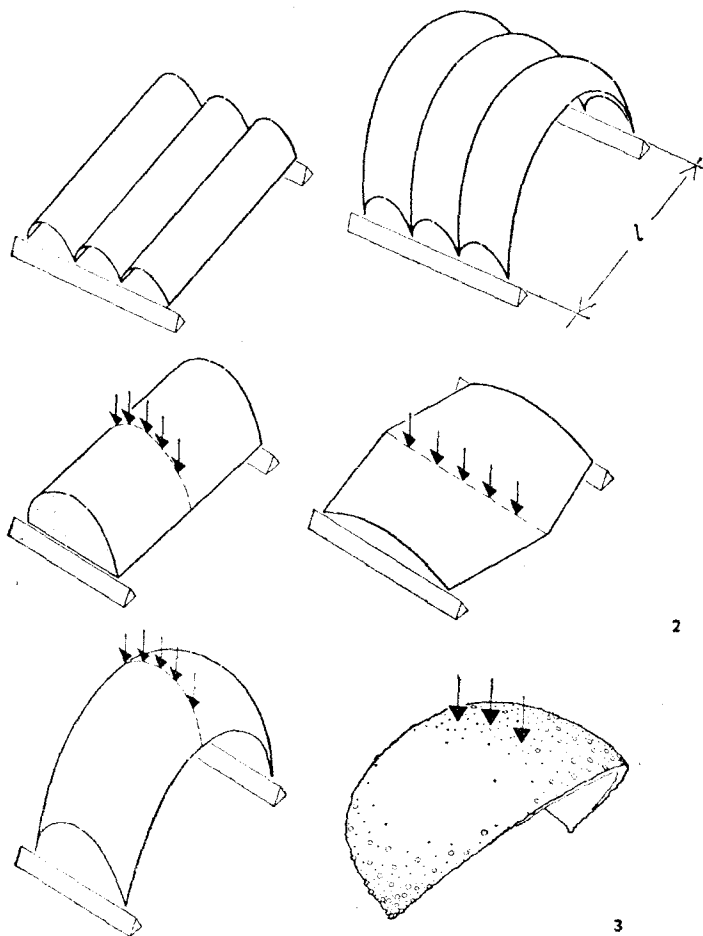


图 159 圆柱形壳体在跨向起拱时，就变成双曲壳体

- 1—有别于直壳体，拱起的壳体在跨度方向发挥拱的作用；
- 2—没有横向加劲肋，圆柱形壳体就相当不稳定；
- 3—象一块桔子皮，一个拱起的圆柱壳体能从它的双向弯曲取得额外的刚度

如果一个起拱的弧段壳体的各端是牢固地支承住，则将呈现拱的一般特性，因此，压力线的形状又成为一个重要问题。这就是法国 马里尼安 (Marignane) [88] (图160) 建造的一组飞机库的结构类型。拱所产生的水平推力由拉杆承担。拉杆和壳体一起在地面上浇制，然后将整个屋面升起19米就位。每个飞机库覆盖面积 100米宽×60米长。壳体的

厚度只有6厘米,是跨度的1/1670,意味着非常节约材料。不过,还意味着要在全长中较密地布置支撑。这个设计的工程师们的技巧虽然受到广泛的赞扬,因为它和我们现在所讨论的题目有关,允许我们对它的造型有所评论。每个弧段壳的横向弯曲对壳体作用是非常重要的,因此,它应该是设计中的决定因素。从一个有利的位置能够看到弯曲形成的拱顶轮廓。不过,更重要的是支点,即壳体结束而下部结构开始的地方。可是,这里横向曲线却铺成一条直线的边。这个过渡令人迷惑不解。造型软弱,好象曲线被压平,可是抵抗被压平的趋势正是壳体作用的实质。更进一步来说,它是模糊的,不能反映壳体的及其材料的内在状态的特点,可能壳体的端部应该是起波纹状的薄片以显现它们的形状和比例(图160-3)。

美国工程师们[90]用同样原理设计了一个建筑,跨度为300米的壳体只有10厘米厚。我们拭目以待,象这样尺寸的许多单个壳体是否足够稳定。

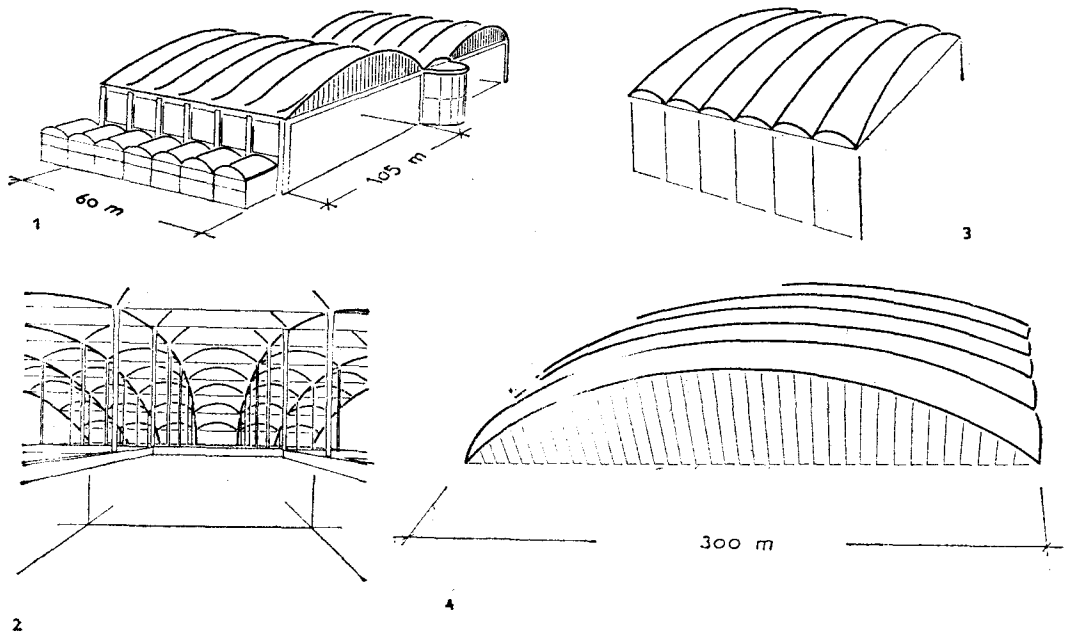


图 160 采用起拱圆柱壳体的两个设计

- 1—法国马里尼安[89]的飞机库;
- 2—具有加劲肋和悬吊拉杆的内部透视;
- 3—如果壳体的端部更有力地表现出来,将更清楚地反映出结构原则;
- 4—拟建的大会堂,跨度大约300米[90]

在巴黎的新C.N.I.T.展览馆[91]代表壳体的进一步发展,双曲弧段壳体经过变化以适应集中型的平面。它是空腔壳型的第一个结构。覆盖一个边长205米的等边三角形面积。三束曲面的锥状展开的弧段壳从支座散出,汇合而形成中心型拱顶。在这里,将弧段壳体在纵轴方向起拱的想法,如梅瑞南尼的一组飞机库,应用于中心型拱顶结构,将壳体单元展成扇形,代表另一个变化。支座间距竟达205米。拱的压力曲线又成为支配结构的主题,它确定成为三边立面特征的抛物线形。这个非凡结构的稳定性是由于采用了空腔壳体而得到保证的。实际上,这个壳体包括相距约2米的两层平行曲面。用纵横两向的竖立

隔膜使两层曲面固定距离，维持形状并结成一个整体。这些隔膜只有6厘米厚。壳体的最大厚度边仅6.5厘米，只有跨度的1/3150。如果我们将两层壳体和隔膜所用的材料计算在一起，每平方米屋顶面积的混凝土折算厚度为18厘米。这个数字，还小于跨度的千分之一。假定鸡蛋中间的厚度为0.4毫米，它与直径的比为1/100，那么巴黎新展览馆的屋顶材料用量比自然界制造一个鸡蛋要用的材料小10倍，即使我们计算时就用空腔板约2米的总厚度来算的话，厚度与跨度的比也仍然只有1/100，完全和鸡蛋一样（图161）。

至于三个支座的设计，是否适合于一个建筑表达如此非凡大胆的设想则是另一回事。我们觉得遗憾的是这些支座和马里尼安飞机库屋顶的边（图160-1）一样在结构上枯燥乏味。还有，把这三个支座减到能够比得上结构其他部分的细致程度本该是多么需要！

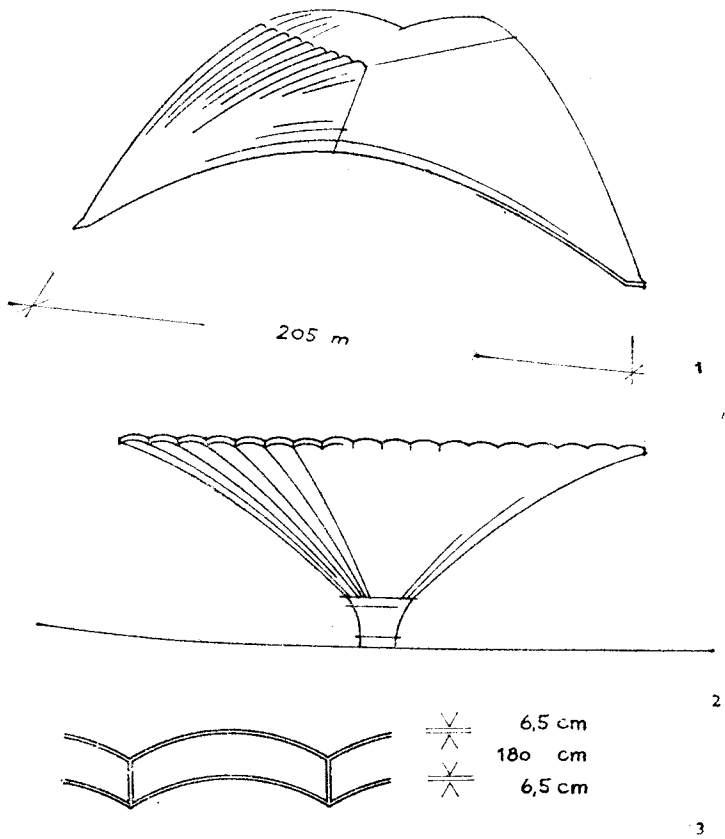


图 161 在巴黎的新C.N.I.T.展览馆[91]

- 1—拱起的弧段壳象扇子般展开形成一个支承在三个支点上的中心型拱顶；
- 2—屋顶包括两层用隔膜联接的平行的薄壳；
- 3—双层壳的细部

在UACC提供的方案中我们选出另外一个壳体结构，这是魏丁格尔和萨尔瓦多里两位工程师设计的体育场[92]。这个碗形场覆以菌状环顶，由向上又向内收缩的弧段壳组成和缓的曲线，抵着一个中央的受压环。从模型的照片看出，壳体的外围周边是用细的加劲肋而不是用一般的实心隔膜予以加劲的。之所以能够跨越这样大的跨度，肯定是因为壳体不是一个方向而是纵横轴两个方向弯曲（图162）。

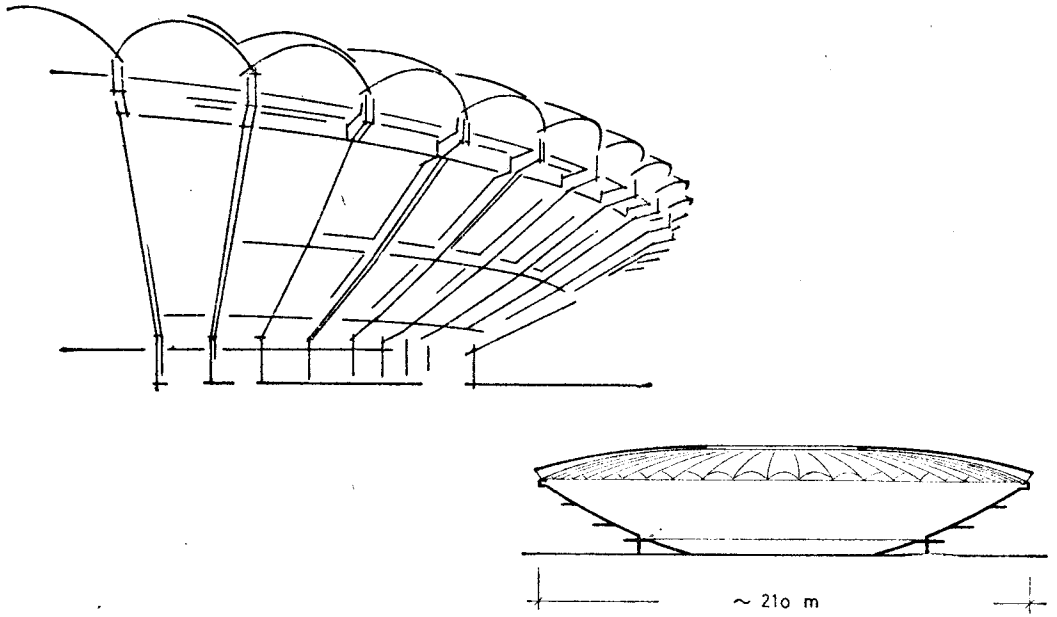


图 162 体育场方案[92]

建筑师：雷蒙德 (Raymond) 和拉多 (Rado)；工程师：魏丁格尔和萨尔瓦多里
 一圈拱起的圆柱壳集中到一个中央受压环上

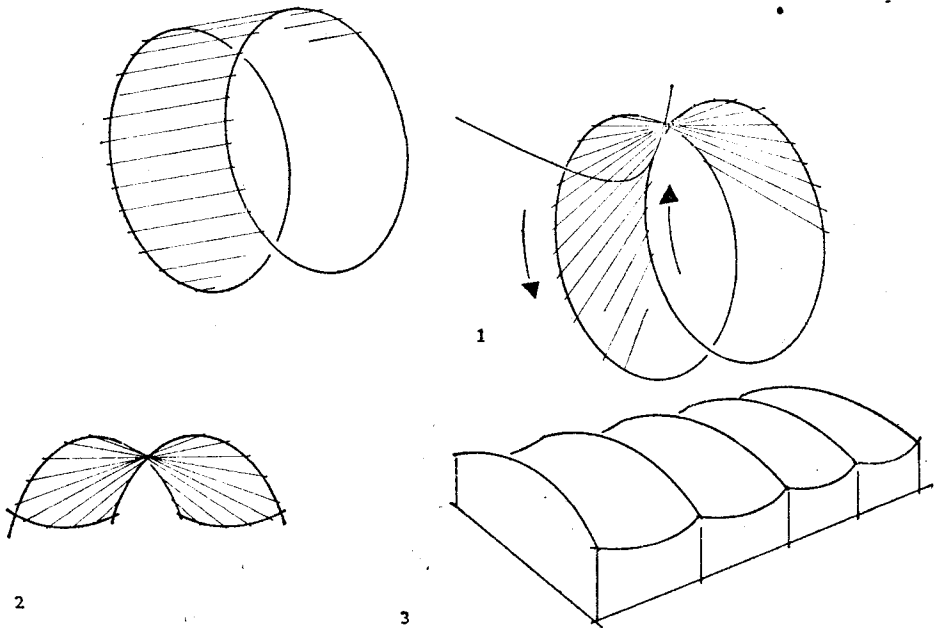


图 163 旋转双曲面给人的印象是颠倒过来的圆柱壳体，然后在跨度方向起拱

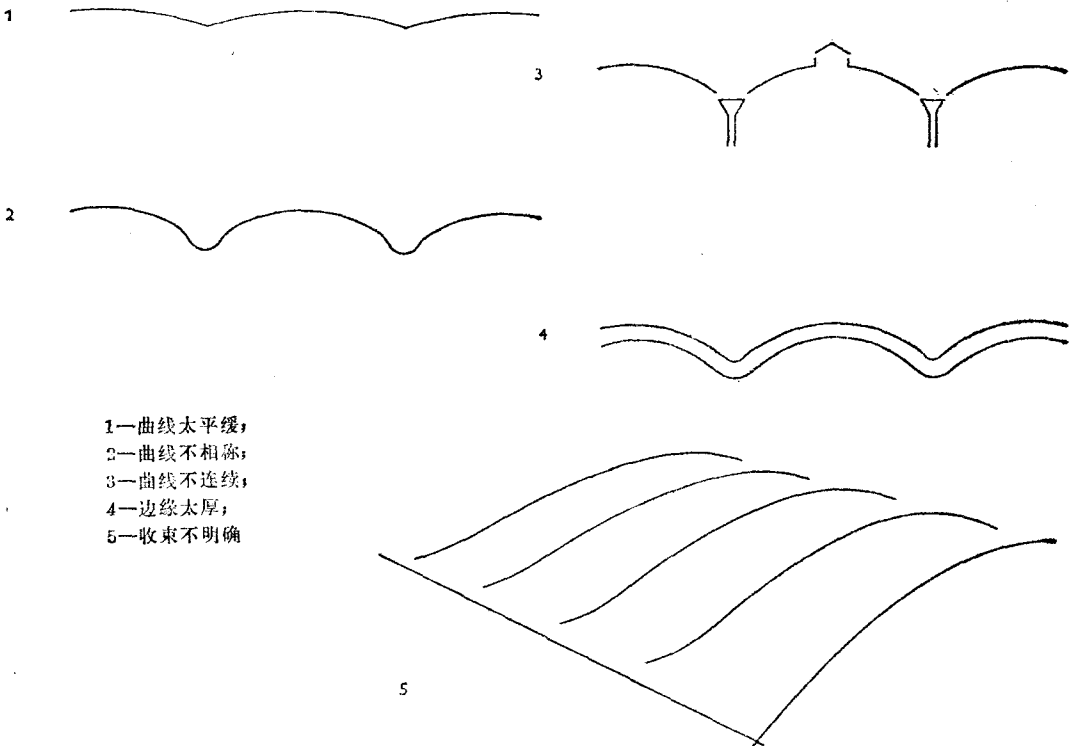
- 1—由平行线连接的两个圆环反向受扭，拉紧的线就形成旋转双曲面的马鞍形曲面，它的截面是一个双曲线；
- 2—这样旋转双曲面的一段，在形状上很象一个横向弯曲倒转过来又拱起的圆柱壳体；
- 3—一系列这样的弧段所组成的屋顶与由一系列拱起的圆柱壳体组成的屋顶相似(参看图160)

如果将已讨论过的起拱弧段壳的横向弯曲倒转过来，结果的形式具有两组反向的曲线。这种形式就是单叶旋转双曲面。这是一个很重要的建筑造型，因为它的双向曲面可以完全由运动直线而成。这意味着，例如，预应力结构中可以很方便地铺设钢索（图 163-2）模板也就可以较简便地用直木条和木板。旋转双曲面这种显著的特性可以容易地说明如下：

设想把一个短圆柱体的外壁取去，代之以许多根等距排列平行于柱轴的线，然后将圆柱两端相反方向扭转，这个由直线的体系就形成一个具有双曲剖面的空间曲面。一些薄壳屋面就是用这个原理设计的，它们确实不是原意的起拱弧段壳体，但是，形状很相似，所以，我们认为可以在本节结束时将它们归纳进来。

现在我们将圆柱壳体或弧段壳体最重要的特点总结如下：

1. 壳体的弯曲和它的跨向成直角。
2. 横向弯曲可以是任何形状的，不一定顺从压力曲线。抛物线剖面并不是圆柱壳体的典型。压力抛物线型只有对含有真正拱作用的壳体起确定形式的力量，例如，跨度方向二次弯曲的短壳和弧段壳。
3. 壳体的横向弯曲要充分的强调而不是象图164-1中那样平缓的或微弱的。
4. 壳体的曲线应当鲜明协调。一连串不相称的弧形（图 164-2）绝不会满足人们的视觉。
5. 壳体应当是一个紧凑的整体。天窗，洞口和窗带都会破坏造型（图164-3）。



- 1—曲线太平缓；
- 2—曲线不相称；
- 3—曲线不连续；
- 4—边缘太厚；
- 5—收束不明确

图 164 一些违背壳体设计原则的形式

6.壳体应当薄，臃肿的板在结构上是错误的，并且损坏端部立面效果（图164-4）。

7.壳体应该明确地结束，不应简单地逐渐消失。它的形象应当在边缘上表现出来。软弱无力地消失的曲线是和壳体结构内在状态的特征不一致的（图164-5）。

8.如要保持圆柱壳体的形状，就必须加劲，加劲件应该归入支座。如果想加厚整个壳体代替加劲件是错误的。结果是一个弯矩确定而不是真正壳体作用确定的形式（参考图154）。不加劲的边缘必须悬挑（唯一的例外是双曲形式）。

旋转壳体 圆柱壳体的基本型是单向弯曲，几何图形简单，也容易建造。因此备受早期壳体设计者的注意。对基本型（图148~150）任何变化的尝试都不可避免地要趋向于放弃简单的弯曲。但是，只有在引进旋转壳体之初，才向复合弯曲方向确实地迈进一步。除去两个例外，它们都是双曲的。只有圆柱体与圆锥体可以展成一张平面，它们没有双向弯曲。这里我们不再讨论。所有旋转壳体都具有双向曲面。它们基本的完全对称的原型是球体。自然界中任何地方都可以找到球形的物体，例如，行星、肥皂泡、鱼子、水果等，眼球也大体是球形。

这里用半球来说明双向弯曲壳体的作用。设想从一个半球切下一窄条（图165-1）这个窄条孤立时趋向于起一个拱的作用。我们都知道，只要它的形状与压力曲线相符，在自重单独作用下，不会产生弯矩。在此例中，压力曲线是一根悬链线，即略呈抛物线（参考第二章，本书第135页）。但是，这个窄条是半球的一部分，形状是个半圆，因此，它是相当明显偏离压力曲线的（图165-2）。照说，它应该有足够的强度来抵抗由此产生的弯矩，但是，因为只是从一个非常薄的壳体切出来的一个窄条，它的抗弯强度就不大，所以，有顶部下沉，两旁鼓出的趋势，在任何点上的作用状况都取决于对压力抛物线偏离的程度。和它相同的邻接的拱状窄条不管多少，都有同样的变形趋势。然而，当恢复了连续性时，壳体的空间作用就开始觉察出来了。半球上趋向于下沉的上部单元相挤而形成整体的帽盖，在这个帽盖部分所有的力都是压力而且与壳体相切。半球下部的单元水平向拉紧而形成环状的带，限制了个别单元向外鼓出的趋势。在这个区域里子午线的应力是受压而水平向应力是受拉。这样，所有的力都是切向的，也就是说，它们都作用在壳体本身方向。为建造一个抗弯力很小或是没有抗弯力的非常薄的壳体的条件就满足了。从而应用“薄膜理论”的条件也满足了。原则上完全根据切力而发展的壳体的这个理论，不仅对半球而且对任何双曲壳体都有效。

为了使壳体的实际作用状况尽可能和理论的假定近乎相符，壳体设计者们要尽力满足若干特殊条件：

- 1.壳体的弯曲应该是连续的。
- 2.壳体的厚度应当是不变的，或者，至少不可突然改变。
- 3.壳体的厚度联系跨度来说，应当非常薄。
- 4.荷载应尽可能的均匀分布，尽量避免集中荷载。
- 5.在壳体边缘的支座应该设计得把这些地方连续性的缺陷尽可能地弥补掉。
- 6.支座的性质不应该是由它来阻止壳体的自由变形等等。

如果不能满足上述条件，结果会产生横向弯曲应力，但是，由于壳体太薄，没有抗弯的强度。这好象意味壳体必须加厚，但反过来又违反了第三条的要求即壳体必须很薄。例

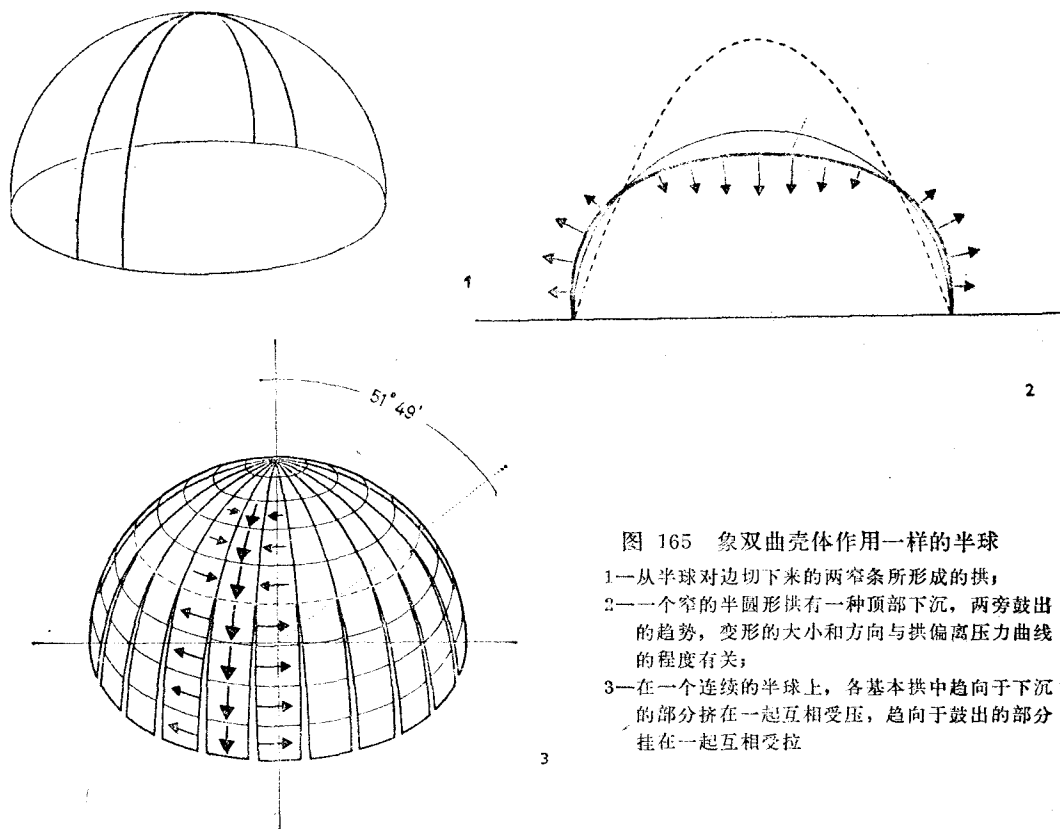


图 165 象双曲壳体作用一样的半球

- 1—从半球对边切下来的两窄条所形成的拱；
- 2—一个窄的半圆形拱有一种顶部下沉，两旁鼓出的趋势，变形的大小和方向与拱偏离高压力曲线的程度有关；
- 3—在一个连续的半球上，各基本拱中趋向于下沉的部分挤在一起互相受压，趋向于鼓出的部分挂在一起互相受拉

如，在支座处力的局部集中当然又需要加厚壳体，如前所述，又会引进弯矩而推翻了“薄膜”的假定。一般术语称这些现象为“干扰”，如果我们客观地自问，究竟什么“被干扰了”在以上的分析中，那仅仅是设计者的假定，即薄膜应力和没有弯矩。不希望有的弯曲应力常常会不知不觉地出现，尽管，为了证明壳体的薄是正确的，才假定弯曲应力不存在。如果应用薄膜理论，壳体必须薄。如果采用这种理论，实际上几乎无法求应力，因为经常有弯矩造成“干扰”。这个现象无疑使壳体设计者很烦恼，致使这方面的作者们完全放弃容许弯矩出现的可能性。我们也不想走得太远，相反，我们将审慎地局限于讨论结构造型，而不去考虑计算方法和掌握壳体分析的困难或不可能性。当然，这决不含对数学家和工程师们使壳体结构能建造出来的伟大创举或功绩发生怀疑的意思。只不过我们要问当壳体设计在理论分析的，经验的甚至实验的方法一应具备的时候，造型——这也是我们最关心的问题——究竟是否，应该受到不是以壳体作用本身的概念为基础的，而是以仍然围绕我们的计算方法的一些限制为基础的假定所影响。虽然，在某些情况下，就算需要抓住设计壳体的数学问题，有的假定和控制壳体的自然规律毫无关系，难道我们所建的造型就没有可能成为它的受害者吗？我们有什么权利坚持，壳体必须均匀地薄，一定不可以忽然改变厚度。简言之，是不是一定不容许存在任何弯曲应力呢？看一看坚果或蜗牛壳的结构就足以揭露对支配自然界的任何企图的专断性。可是，避免给人以错误印象，这也是一种跛脚的比喻。凡是含有弯曲应力的地方，结构的尺度占重要地位（参考第一章第64

页)。其实,对于坚果和蜗牛壳,最严重的应力是由冲击和震动的集中力所产生的,而建筑物的典型荷载却是均匀的。不过即使在建筑物中产生集中荷载的任何地方,例如在支座,不连续性和厚度变化将是不可避免的。如果要很适当地表现结构造型,这些变化是很重要的。即使如此,由于尺寸的不同,更不用说功能的不同,它们和坚果的特点是很不一样的。和蜗牛壳以及坚果的相似处只存在于原则上,绝不允许凭幻想作出错误的联系。

总而言之,大凡力学分析和自然法则失去接触,如杠杆的基本原理就是一个生动例子,因而纯粹成为数学性问题的時候,这是个关键时刻,应当把结构造型的探索和力学分析的问题分开。在我们看来,上述的设计条件,没有一条是必然地来自壳体内在的本质的。这种教条主义的限制,似乎一方面使我们离开优美的结构造型,另一方面对问题的处理又采用了任性的形式主义。

因此,下面对一些对称旋转壳体的讨论将摆脱壳体理论中那些先入为主的,似乎僵化的“条例”的束缚。我们对造型的评价以及探讨它们和结构的连系将根据本节开始时已阐明过的少数几条原则,这几条原则是用“自然法则”表达结构概念的要素的。

根据受力的情况而决定壳体弯曲方式,我们已见到最好是双曲。壳体的材料是“刚性的”。我们所需要的就是这个基本限定(参考第177页)。

第一个设计为半球壳体的圆屋顶,是1925年在耶拿[63]建造的蔡斯天文馆(图166)。随后在莱比锡、柏林和德累斯登(Dresden)也有类似的结构物。圆屋顶的几何图形是完整的半球,因为是为了三维物象的投影才做成这样的面的。参看图165可以很好地理解它们

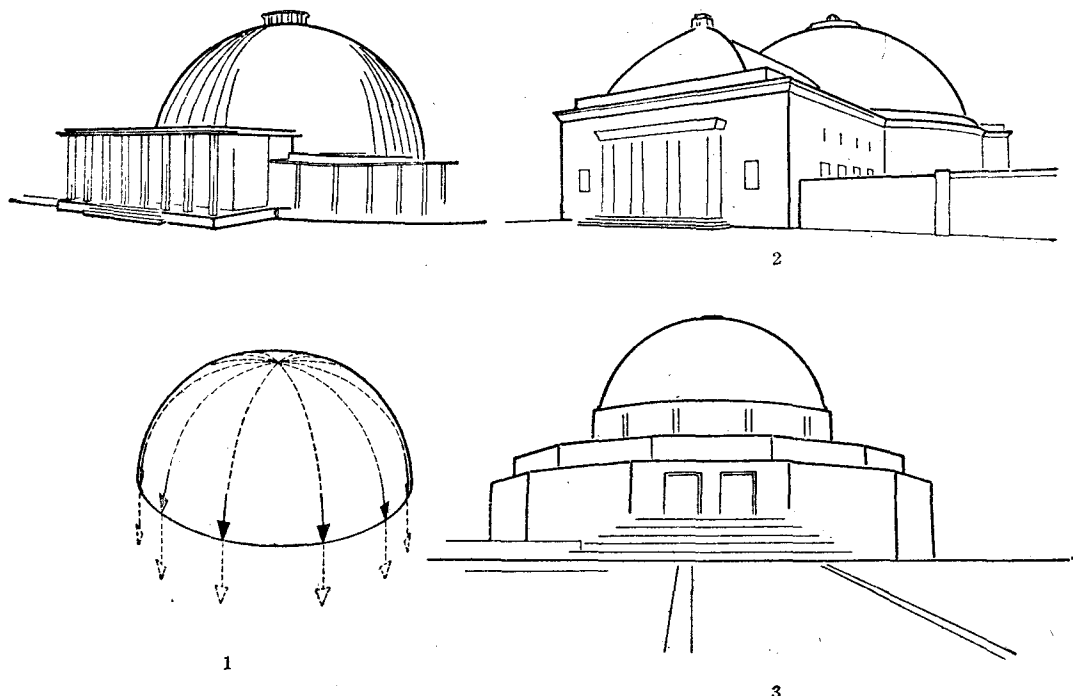


图 166 一些天文馆的半球形壳体

- 1—在德国耶拿建造的第一个天文馆圆顶成为以后这类结构的典型[63],在圆顶下部边缘子午线的力与壳体相切,它们的方向是竖向的,不存在水平向的推力;
- 2—柏林天文馆;
- 3—芝加哥天文馆

力的作用方式。水平向拉应力由壳体配筋承担。子午线的压力由下部结构承担，这个压力和半球的下面边缘相切，就是说它作用在竖向。理论上，这是球形壳体在支座处的理想条件。所有的反力都是竖向的，没有剩余的推力。

在这里存在着半球形壳体和古石造圆拱之间的主要差别。古建筑如：罗马的圣彼得大教堂，佛罗伦萨的大教堂（Duomo），德累斯登的圣母大教堂（Frauenkirche）均在二次世界大战中被毁了。所有这些古石造圆拱顶都产生径向推力。石造结构的受拉强度很低，所以即使用了熟铁索加固，也不能抵抗圆顶下部的水平拉力，（参看图165）。在洞口之间的薄弱点处开裂，只是在建立起一种拱的作用以后才又恢复平衡。在这种拱的作用中开裂的圆顶各相对的部分形成成对的独立拱顶肋（图167）。每一对肋组成一个拱，因为这个拱是独立的，它的形状应当与压力曲线一致。由于偏离压力曲线而产生的弯矩就应当由拱体本身的材料来抵抗。因此石造圆顶是那样的厚实粗大，而不可能造成象壳体那样薄。同样，拱顶分开的各个部分，就象真正的拱翼那样，对下部结构施加很大的水平推力，常常使下部结构产生位移。在卅年代中期，古石造圆顶在力学上的说明，从在德累斯登的圣母大教堂屋顶裂缝的精确测量和相应的计算作出的比较，得到进一步的证实。作者本人与乔治·吕特（Geog. Rüh）教授合作进行了这项工作。从我们的证明中得出的结论是：古石造圆顶的力学作用不象是一个空间结构而象成对的独立拱肋，每个拱肋要按照平面系统来对待。

回到耶拿天文馆的半球形壳体。它落在一个连续的象鼓一样的下部结构上，而没有传递任何推力。这些情况并未收效于结构的造型。总之，它的形状纯粹是几何形的，对内力的作用表现得很少。任何地方都没有露出那印象深刻的极其薄的壳体厚度。圆顶施加给下部结构的力是竖向的均布荷载。没有应力集中。也没有加厚或厚薄对比来表达内部结构的生动性。半球体的形式在数学上是准确的，但是也不比台球更好看。做为结构造型来说，它是枯燥无味而无表现力的，印象深刻的只是因为我们知道壳体那样薄这个事实。下表表示壳体结构，古石造圆顶和鸡蛋在用料经济方面的比较：

壳体结构用量经济比较表

名 称	跨 度 (l)	壳体或圆顶的厚度 (d)	厚 跨 比 $(\frac{d}{l})$
1. 罗马的圣彼得教堂	40m	3.00m	1/13
2. 德累斯登的圣母大教堂	24m	1.25m	1/19
3. 鸡 蛋	4cm	0.4mm	1/100
4. 在耶拿的蔡斯天文馆	40m	6cm	1/666
5. 巴塞尔的中央市场	60m	8.5cm	1/700
6. 巴黎的展览馆	205m	13cm ^①	1/1570

① 13厘米是双层壳的总厚度，每部分只是6.5厘米厚。

造型的贫乏性也许就是为什么这个半球体除了形状决定于功能的天文馆之外，很少用于一般建筑的原因，尽管它的结构概念很有兴趣。在近廿年中它在建筑上已不起什么作用。

波托（Porto）的运动场[95]和西迪·贝·阿贝斯（Sidi-Bel-Abbes）的市场[94]的屋顶都是按照球体几何形建造的。在这两个例子中，不用半球形而用球体的一部分。因此，支座的问题变成较有意思，只承受竖向荷载的连续的鼓分解为一系列独立的扶壁。这

些扶壁为了与壳体中力的分布取得一致，以大约和壳体下缘相切的方向倾斜着。当然，这些力首先要传送到支座的顶部。壳体的正常厚度于此是不足的。所以，必须要有一个加固的区域将这些力聚集起来再传递到扶壁上去。结果形成一个既能抵抗弯矩又能抵抗扭矩的环梁。波托的壳体环梁成为明朗的设计主题。西迪·贝·阿贝斯的环梁只能从建筑之内看得见，从外面看，它隐藏在一圈单坡屋顶之内。壳体的厚度可从无数的孔洞上显示出来。至于这些肋形的开洞的预制元件是不是真能表达壳体厚度在力学上是可能的。那只是个细部问题，在这里却属于次要问题。不论怎样，值得一提的是，建造这两个预制装配结构时里面都不用脚手架。

联系到叉形柱时（第二章）我们已经讨论过罗马的奥林匹克运动场[41]。这里值得再次一提，因为这些叉形柱是如此明确地顺圆顶边缘相切的方向倾斜着。圆顶里面葵花瓣似的特殊肋承受外力后，再传到柱顶。壳体本身在支座之间微呈波状以抵抗横向弯矩。圆顶里面的网肋可归因于预制菱形元件所用的方法（图168-3）。其上的2.5厘米厚连续壳体是现浇的。非常薄的壳体是从预制肋那里获得刚度的。这些肋削弱了壳体作用到什么程度还很难说，甚至也有可能这些肋的作用起主导的影响。

通常，一个壳体是既连续又平滑的，下面没有肋。其结果是一个空空洞洞不具特殊表现力的造型。特别在里面没有一点阴影，可以使造型显得生动一些。所以，当壳腹可以看得见的时候，最好用肋使壳体更形活跃。由于薄膜在大跨度上有可能产生局部压屈，从增加壳体抵抗压屈的强度的观点来看，加肋也是有益的。尽管如此，作者还没有发现一个例子是拿肋作为抵抗压屈的加固部分确是和力的实际分布相协调而得出的真正的结构造型。

在东京建造的一个大会堂[96]的屋顶形式是一个很平缓的球面部分（图169），由支座处的处理反映出圆顶的平缓性。在此例中屋顶的边缘支承在几乎是竖直的柱子上，实际上这些柱子稍稍有点向外倾斜。柱的轴线不再与子午线上的力对准直线，因此在子午线上的力必须在壳体里面平衡。为此，就需要一个特殊大型截面的环形带来加固。一般钢筋拉长太多会危及壳体在结构上的连续性。就象一个古石造圆顶一样，会在子午线方向开裂。因此，要依靠预应力混凝土来解决这个问题。采用后张法的预应力混凝土可以控制圆顶边缘的变形。除此之外，子午线上的力在竖向的分力必须从壳体传送到柱子上去。这样壳体

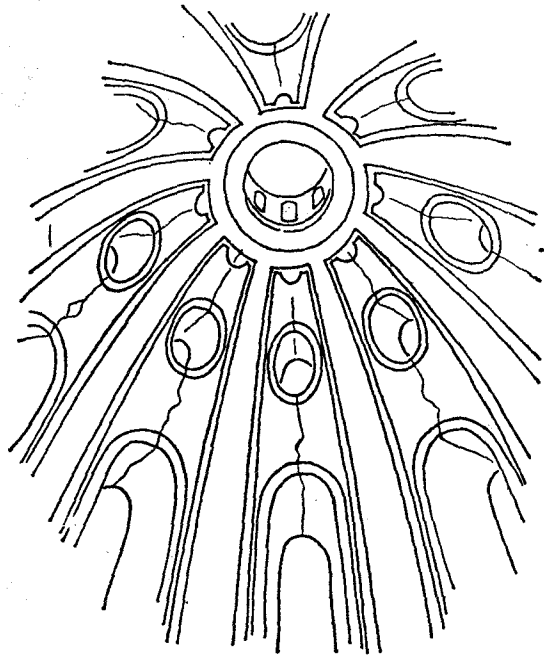


图 167 德国德累斯登的圣母大教堂（18世纪）[93]

这是双层厚实的石圆顶的一个很好例子，象多数的其他石圆顶一样，并不是一个真正的空间结构。由裂痕造成的格局显示它不再是连续的，相反，圆顶裂成许多段，其作用就象独立的拱

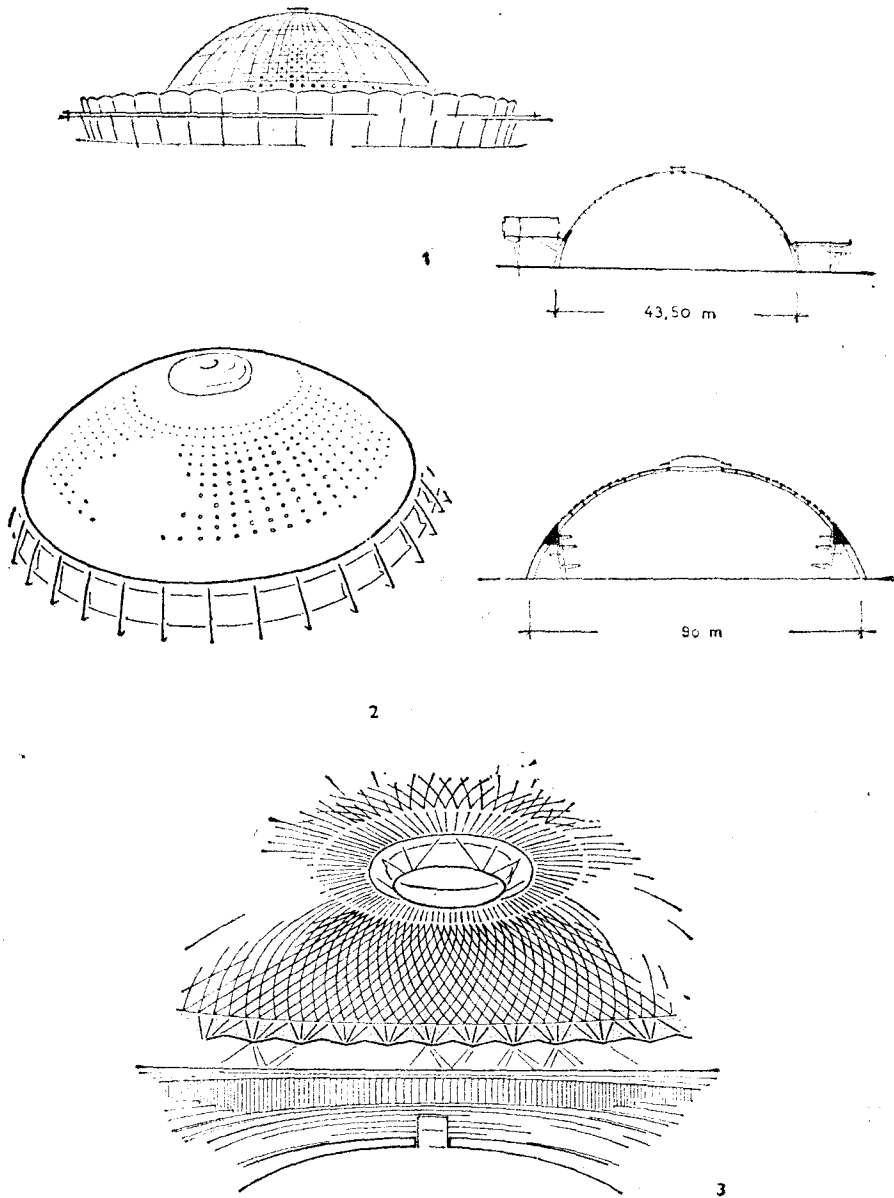
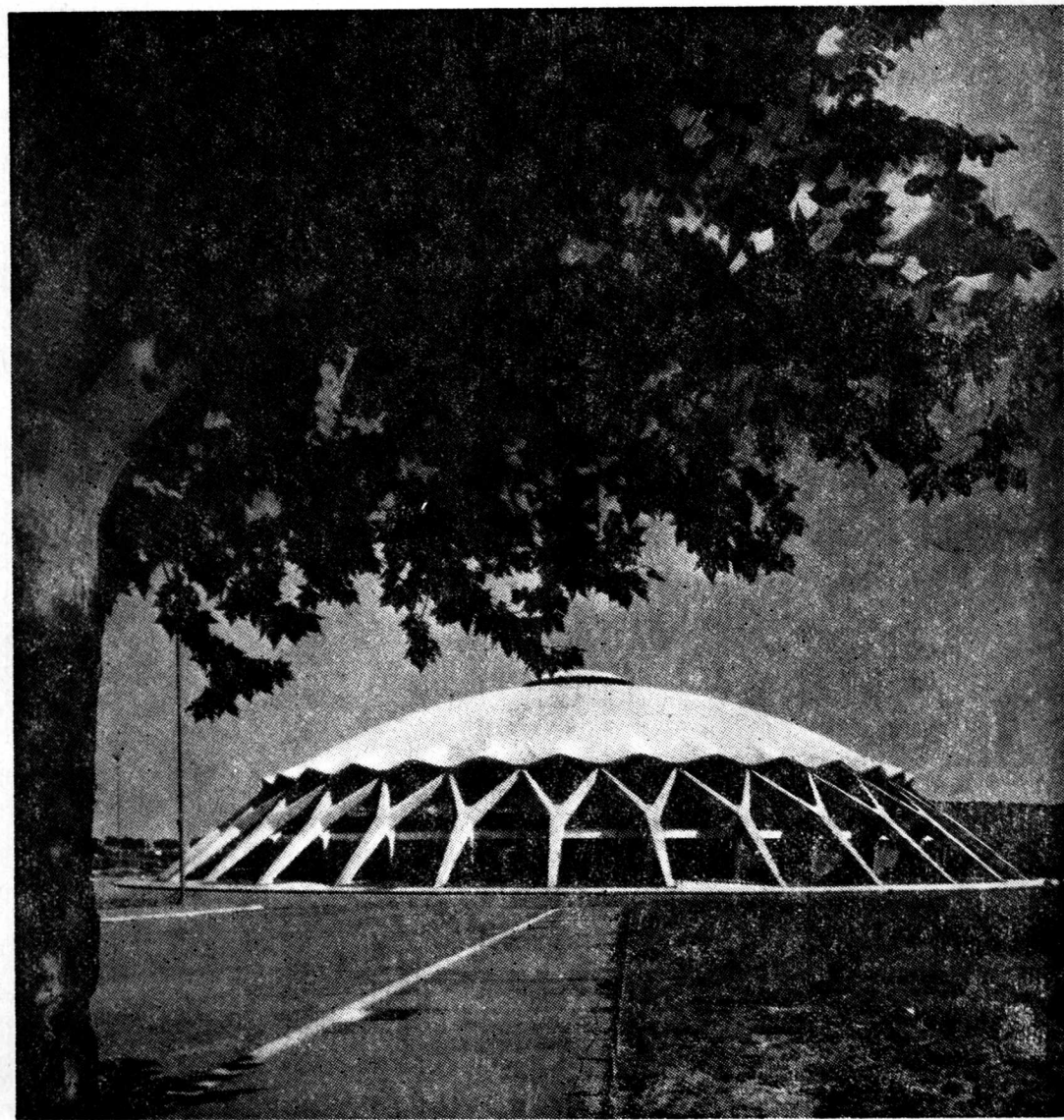


图 168 球形壳体的一些运用

1—阿尔及利亚的西迪·贝·阿贝斯的市场[94]；

2—葡萄牙波托的运动场[95]；

3—罗马的奥林匹克体育宫的内部，工程师：奈尔维[91]。



照片：在罗马的奥林匹克体育宫〔4〕
工程师：皮尔·路易吉·奈尔维

的边缘就会产生弯矩和扭矩，因为力的传递络线在支座之间是一个曲线。如果采用这样的支座体系，通常按照假设而造成的应力是对壳体不利的，但又不能避免。必要的措施是布置一个能抵抗拉力、弯矩和扭矩的截面相当重实的边缘构件，如何设计这样的构件以及逐渐过渡到壳体的正常厚度，绝不是简单的，在数学上也出现困难。我们对壳体力学的概念还相当模糊，至今对造型与力学作用之间的相互影响也没有做过系统的探索。因此，这种体系怎样是最优的结构方案，我们还很难做出最后的结论。只有一件事是肯定的，这样平缓的圆顶边缘坐在独立竖向支座上的形状，必须按照严格的结构原理采用特殊处理。只是用装饰效果以逃避问题，这和滥用随意的形式同样是错误的。这就为探索结构分析和美学分界问题上展示了一个宽广而又极有兴趣的活动领域。

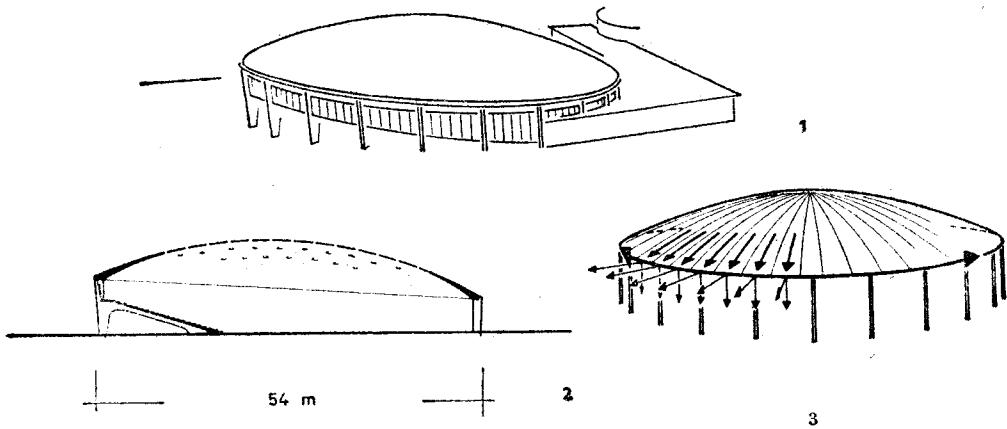


图 169 在东京的一个大会堂[96]

- 1—透视；
- 2—剖面；
- 3—力的分布

在旋转壳体中，双曲面享有特殊的地位。它是一个独具风格，富有表现力而又是严格的几何形式，它是扭转两个圆圈之间的一系列直线而形成的（参看图 163）。这种造型经常用于冷却塔（图 170-2）。

耶路撒冷大学内的犹太教堂的圆顶[99]是完全不同于东京的大会堂和典型的旋转双曲面的。它不是以锐边结束而是平缓地圆圆地弯到竖线。将壳体的竖向墙切去若干弧片，就留下了八个分立的支点。这是假定如同半圆球的情况一样，在壳体的边缘子午线上的力渐渐转向竖向。然后，由于简单的拱作用将这些力传送到各个支点。在这些拱的边缘和支点的下端适当地加厚，这不但符合结构上的需要，在造型上也是令人满意的。只留下一个细部的问题——就是在壳体的下缘如何表现出壳体是那样的薄来。令人满意的是位于拱顶之上的顶棚是脱空的不与壳体相连。

不能认为壳体结构偏离旋转体的准确形式是随意的，原则上这是完全适合于壳体的设计，耶路撒冷的犹太教堂（图 171-1）的壳体显然是建筑师有意识的手法。这种手法给人以强有力的优美感受，同时也提出了把壳体作为可塑体的设计问题。可是建筑师似乎还没有掌握这些非常广阔的可能性。我们再次强调壳体不受什么固定型式的限制，设计师有发挥想象的最大自由。然而少数几个真正大胆的新塑造的创作都出自工程师的图板。有意思

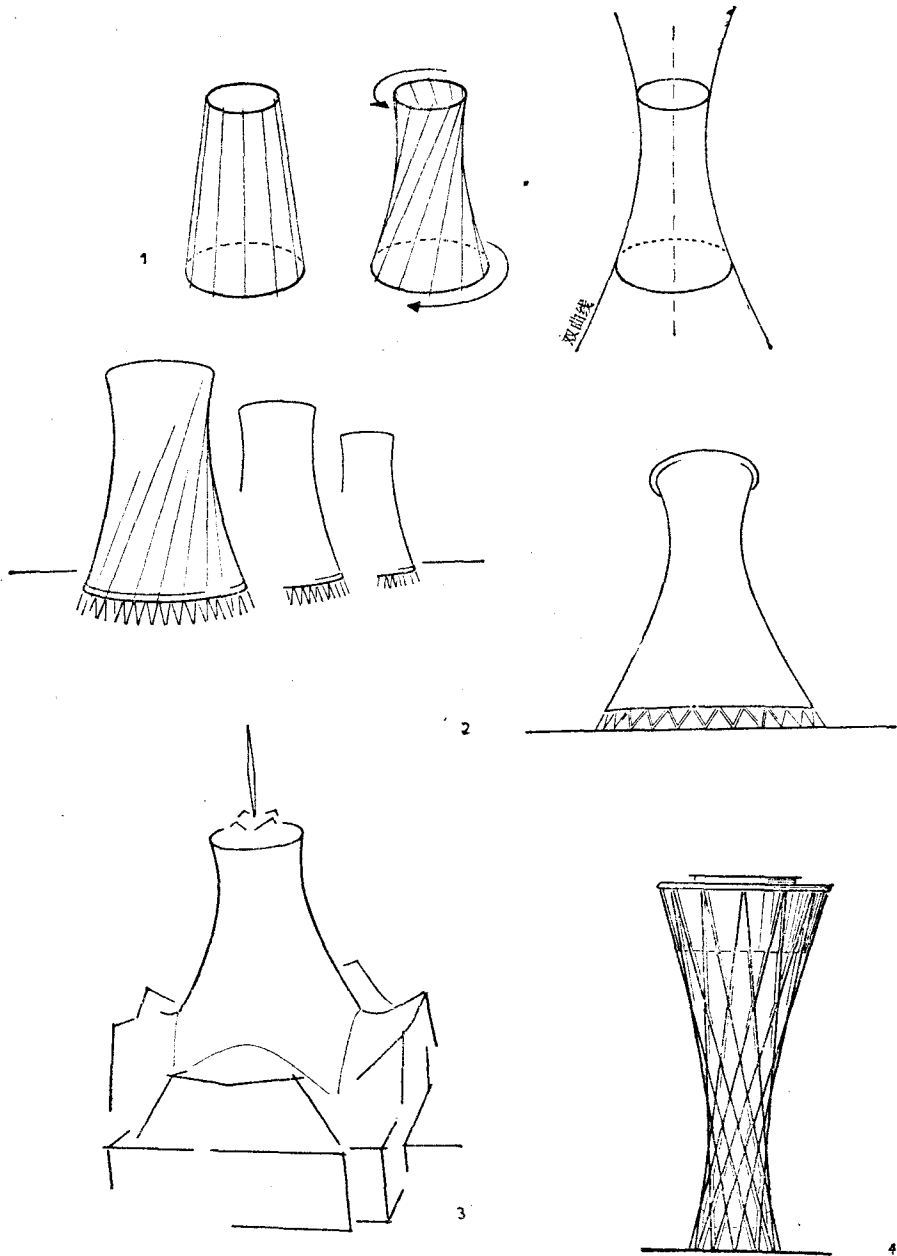


图 170 旋转双曲面

- 1—如果两个圆筒以一系列的线互相反向扭转，或者将曲线绕一定轴线转动，就形成单叶旋转双曲面（参看图 163）；
- 2—冷却塔设计成旋转双曲面；
- 3—在阿尔及利亚的新教堂[97]的造型就是一个旋转双曲面；
 建筑师：赫培（P.Herbe）和勒·库特尔（J.Le Coureur），
 工程师：萨格（Sarger）；
- 4—拟建的水塔是由直母线交叉为菱形而成的
 （虽然不是一个真正的壳体，但是这个结构几何形体和我们的讨论有关）

的是这些主要不是艺术性的创造而是自然法则的直率表现。印象特别深刻的是某些贮罐卓越的造型(图171-2)[100]。这些贮罐坐在平地地基上,壁面所有部分的应力都相同。这种型式的数学定义可从数学教科书中而非画卷中找到。然而,大自然在每一个水珠上都能创造出无穷无尽的造型。

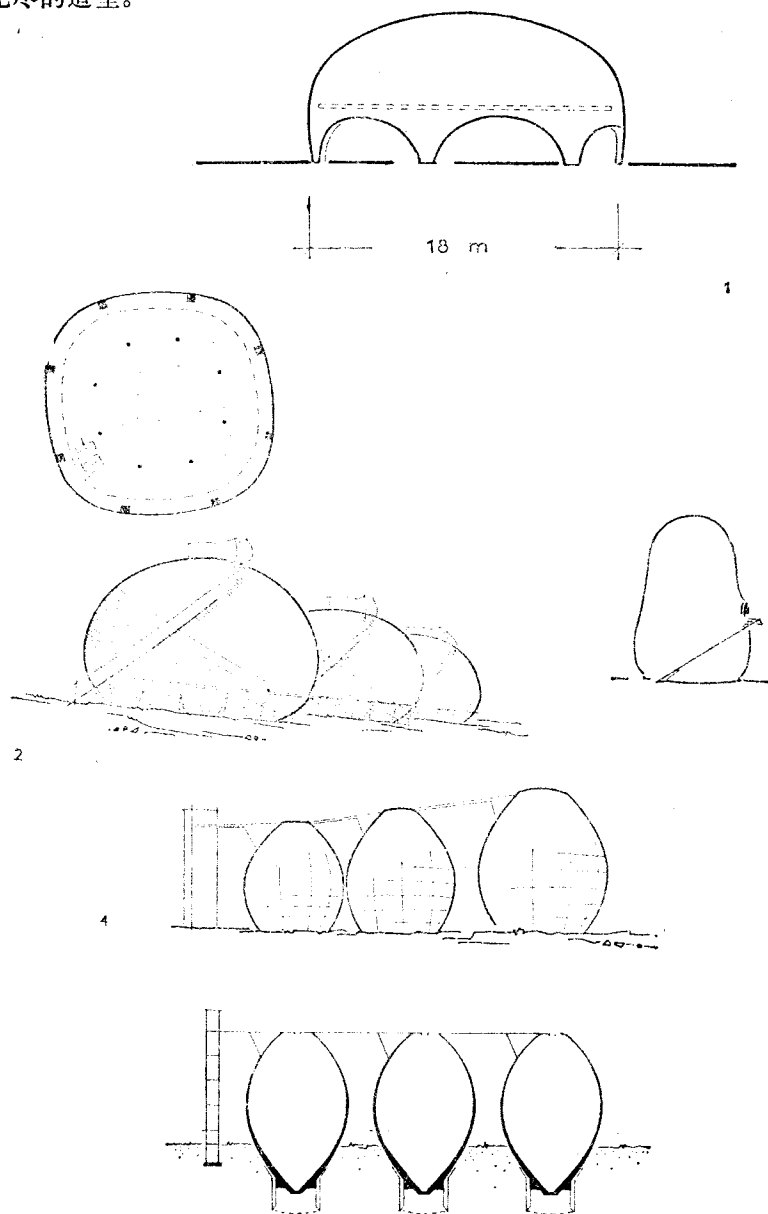
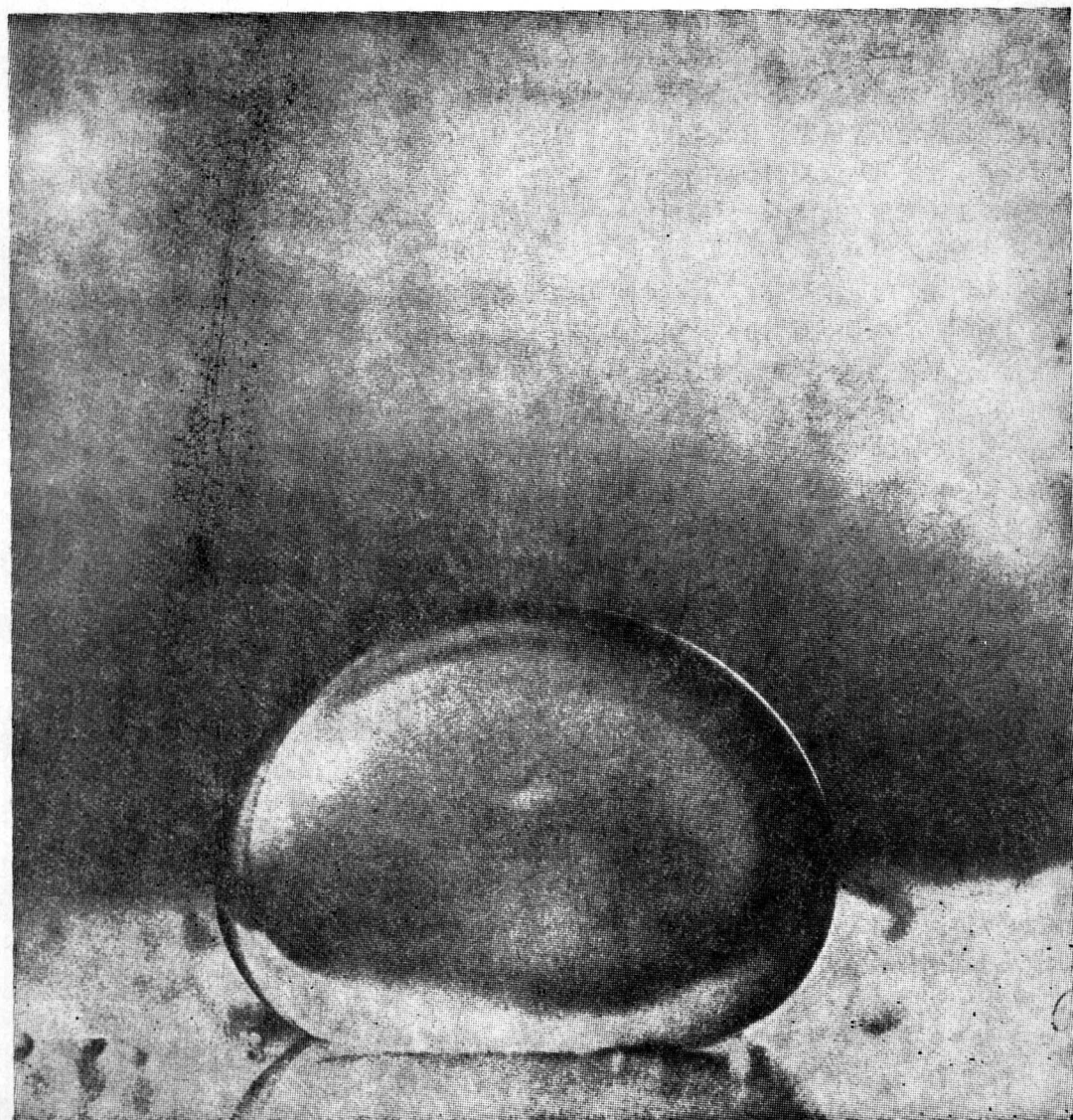


图 171 一些深刻表现可塑性的旋转壳体

- 1—耶路撒冷的犹太教堂[99]。平面不完全是圆形,而是方形的变形;
建筑师:埃兹拉·劳(Ezra Rau);
- 2—储罐[100];
- 3—一个竖立的风箱[101];
- 4—沉淀池[102]



照片：一滴水珠

至此，将所讨论的内容总结如下：

封闭的旋转壳体在边缘上无从表现它的曲度和薄度。只有在下部结构设计上能够看到壳体作用独特的力的影响。对局部压屈的抵抗力无疑是壳体设计中很有意思的问题，还远远没有弄清。旋转壳体的一般型式还未被公认为建筑学上的问题。我们对壳体与下部结构之间的转变区中应力的真实分布情况，对边缘构件或加劲肋比例之间的关系，和对作用在它们上面的力，都还了解得很少。因此，每当设计重要的壳体时不但要求对应力分布作具体分析，以便确定一个既定尺寸的壳体的安全系数；还特别要求对力学与型式间的相互关系进行系统的钻研以建立我们所称的结构造型。

当然，旋转壳体的边缘不一定要平行于纬线。壳体的边端也可有其他方式。因此，造型可能性的范围就扩大了。

1924年建造的迪克尔霍夫（Dyckerhoff）和维德曼（Widmann）试验壳体[103]可视为这个系列中的典型（图172）。虽然，实际上它是一个移动的壳体而不是旋转的壳体；我们在这里将它介绍进来，因为从造型的观点来看，很清楚它应当属于这一类壳体。将球面切出一部分，我们就能取得和简单曲面壳体一样的富于表现力的边缘。设计在很大程度上有赖于支承的特点。试验壳体（图172-1）采用实心隔膜以保持边缘的形式。在布林马尔（Brynmawr）[104]的工厂和在贝尔格莱德的展览馆[105]端墙都开了玻璃窗，将实心隔膜切去中部，下缘留下一根拉杆，上缘留下一根加劲肋。

如果将球体切成三边，例如麻省理工学院的大礼堂[106]（图173），造型比较活泼。檐下三个曲面的外墙全是玻璃面，这样就没有隔膜。顶的三个脚由埋在地面下的拉杆系紧。壳体的边缘只有很少的加固措施，因为双曲面的型式自然就是刚劲的。但是，从杂志里发表的关于这一值得注意的结构的叙述中，我们知道在支点的荷载集中导致壳体外力和相应内力的发展，给设计带来许多困难。壳体的三个尖角必须加厚，因而失去球面形状。好象对这种细部应该采用哪种形状最好，至今没有很清楚的概念。对我们来说，这个球体的三角部分似乎太抽象，只象几何图和模型，似乎既不够有机又不适合于所承受的荷载；总之，它不足以称为结构造型。在支点处荷载的集中肯定需要一个别致的，更雄辩的，更有表现力的，从长远角度来看可能应该是更有效的细部。虽然我们承认，在这个例子中的球面和其他例子中类似的严格的几何型式，表明数学分析是可行的，而且也经常对促进施工是重要的（尽管球面本身的模板工作就够困难），但我们不能不怀疑，是否还有其他不是这样严格的几何形式可以更近乎“壳体”实际概念，也更容易实现。在以下的实例中，我们暂称这种型式为“自由造型”，尽管这些型式不受几何图形的限制，但仍遵守结构的原理。实际上，这些形状却有鲜明的结构性。在本节的最后部分还要深入讨论。

劈锥壳体 教科书中对劈锥壳体下的定义不完全一致。我们只是泛泛地解释这个名词，因为我们所感兴趣的只是型式。劈锥面是由一根直线一端沿着一根直线，另一端沿着一根曲线移动而成。至今劈锥壳体还没有得到很大的重视，我们在这里提到它，部分原因是为了课题的完整性，但另一部分原因是将来它可能得到更广泛的应用。不管怎样，由于劈锥壳体是双曲的，而且可以完全由直线构成，使它本来就适宜于壳体设计。

北向锯齿屋顶采用劈锥壳体有一定的好处，屋顶单元的一个边呈直线。每跨弓弦桁架的上弦接到另一个桁架的下弦。桁架的形状可以设计成符合于压力线或其他合适的曲线。它们如同隔膜一样对壳体有加劲作用。

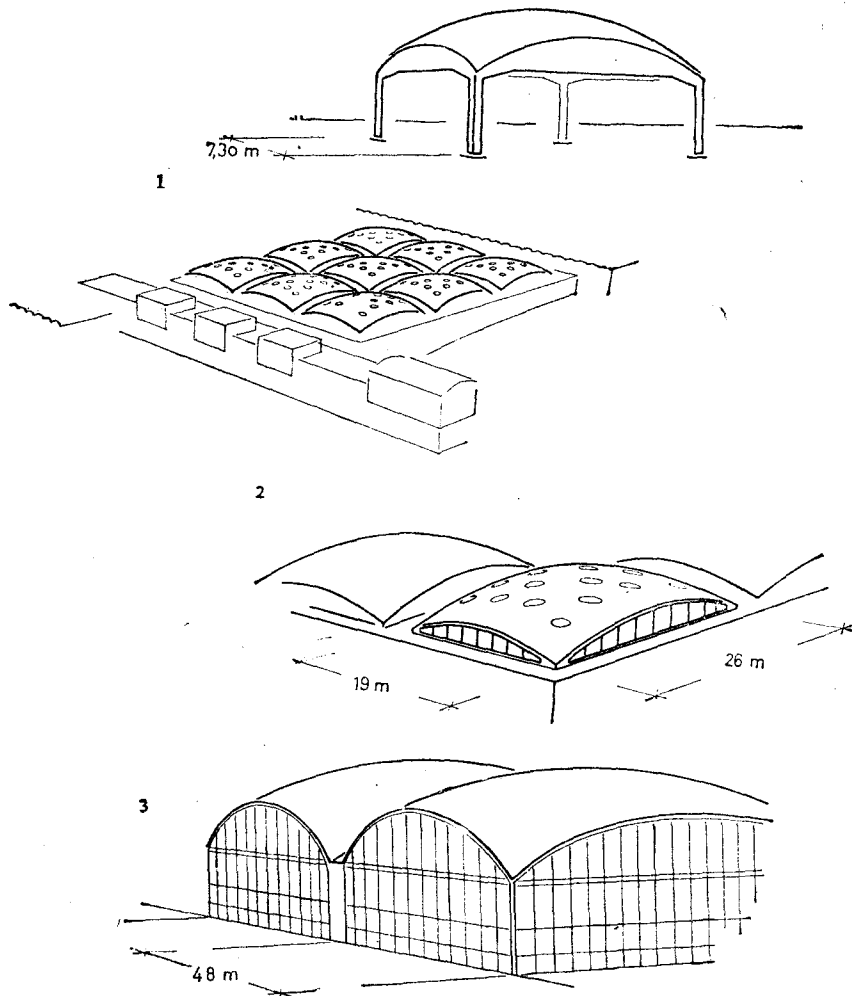


图 172 平面是正方形的球面壳体

- 1—1924年建造的迪克尔霍夫和维德曼试验壳体[103]；
 2—威尔士(Wales)布林马尔的工厂[104]；
 3—南斯拉夫贝尔格莱德的展览馆[105]；
 工程师：科斯坦尼伐克(Kostanievac)

马里奥·萨尔瓦多里工程师曾设计一个壳体(图174-3)，可以视作两个对向的劈锥壳体相叠加而成[107]。一般在直边劈锥曲度的消失在这里会减弱壳体。为抵消这个缺点，工程师把直边做成波状，面向宽曲线那一边波纹渐渐平缓趋于消失。如此，可以保证结构整体的稳定性。当然，在主曲线和次波纹这两端都需用隔膜加劲。这个纯粹从工程上考虑而确定的造型和类似的自然形式贝壳是这样惊人的相像。

如果我们给“劈锥壳体”这个名词下的定义足够广的话，就也可以用到巴黎的联合国教科文组织大楼的雨棚上。这个雨棚是从一个抛物线型的拱两边各挑出一个劈锥面而组成的。从大楼方面向外挑的较大的面是由两个抛物线限住的，两个抛物线的曲向相反，上面的一个曲度不很明显。一根直线两端分别顺这两个抛物线移动就形成这个曲面。

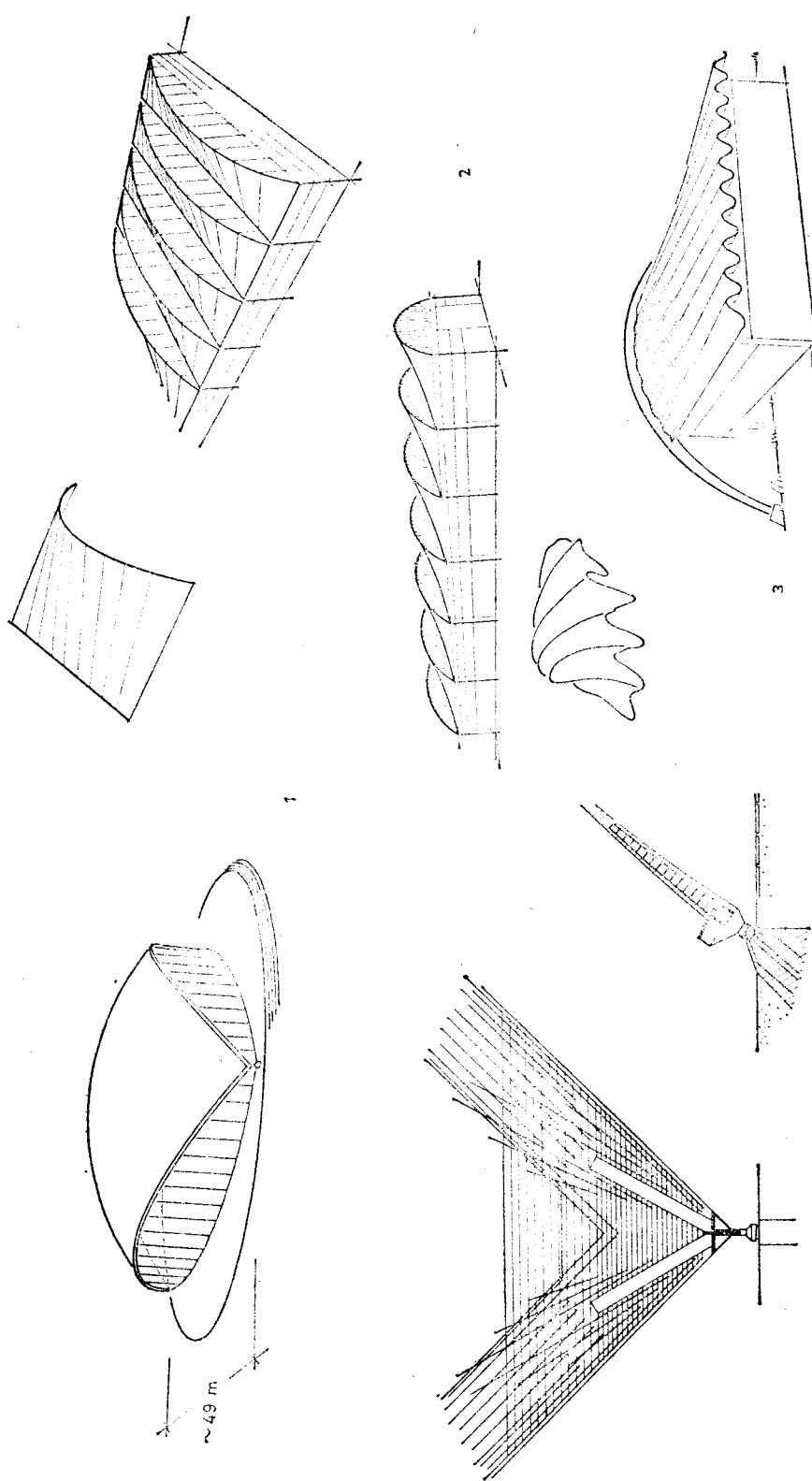


图 173 具有曲边的三角球面部分

1—美国麻省理工学院的大礼堂[106]；

建筑师：萨里宁

2—支点的细部

图 174 劈锥壳体

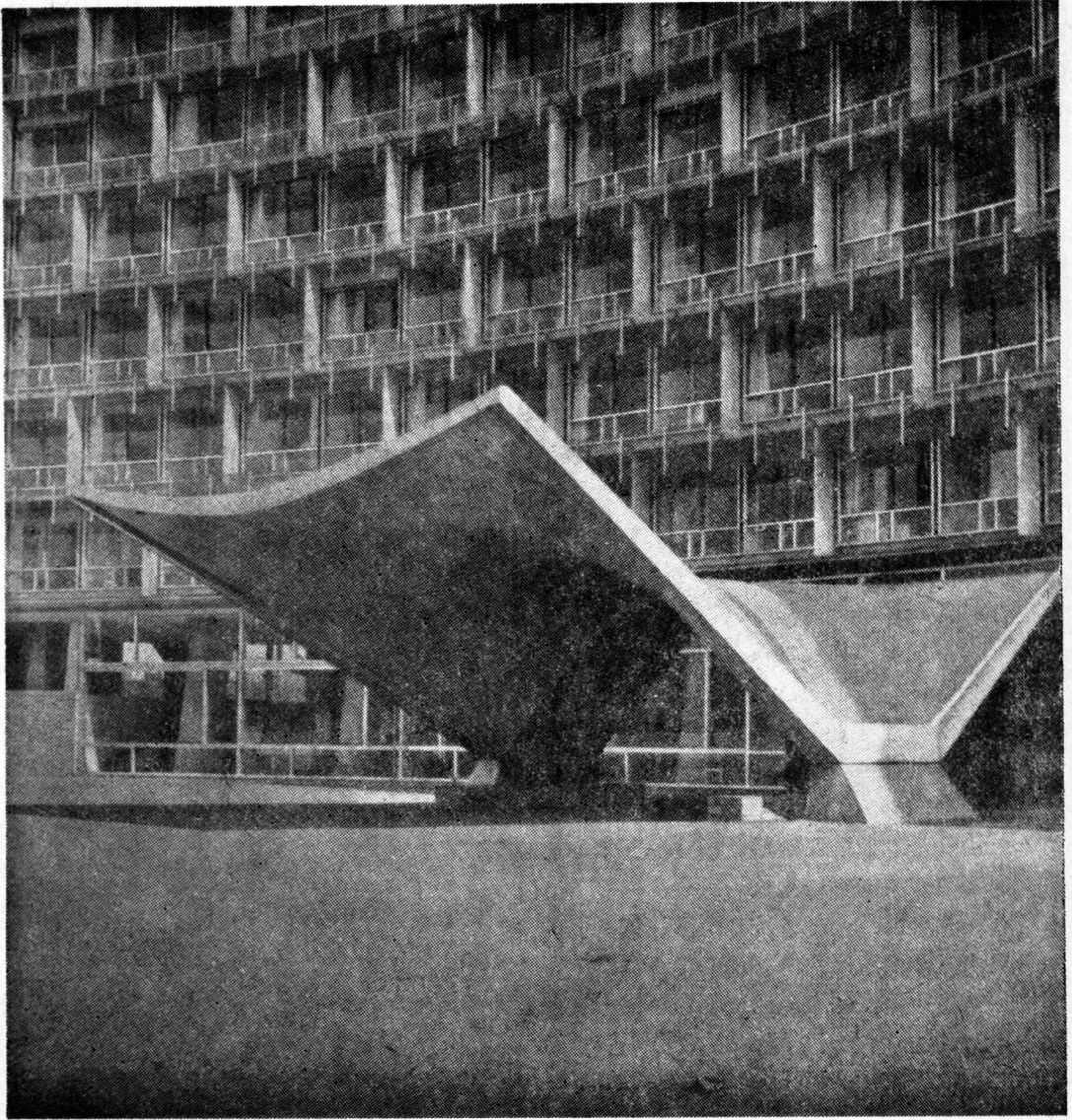
1—一根直的母线沿着一个曲线和一根直线移动就形成一个劈锥，

2—具有劈锥壳体屋面的工厂，

3—象一个贝壳的房顶采用对向劈锥的形式，

建筑师：中岛(Nakashima)

工程师：萨尔瓦多里[107]



照片：在巴黎的联合国科教文组织会议大楼的雨棚[18]
建筑师：布诺依尔(Breuer)、策尔富斯(Zehrfuss)
工程师：奈尔维

特别是劈锥壳体给我们的感觉是，几何图形不一定是很好的结构造型，需要进行加工。希望将来这些壳体的主要结构因素的设计更加细腻，加劲件，肋和边缘件更加微妙地组合在一起，荷载更加明显地集中在支点，支座能更好地表达本身的特点，这意味着为了结构的更有效而放弃严格的几何图形。

双曲抛物面壳体 在探索适合于壳体结构的曲面的过程中要求：

1. 双向弯曲；
2. 数学上可以分析；
3. 易于建造；
4. 美观而有表现力。

因而找到了双曲抛物面，以后简称为 h.p.。它并不属于古典几何学的一部分。从十七世纪以后才知道它的数学公式。许多年来数学和几何学的教科书只给它以很粗略的论述。是谁获得第一个设计双曲抛物面的荣誉，还很难讲。凡是遇到不易肯定的时候，往往可能是几个人各自独立工作，同时发现的。自从第二次世界大战以来，遍及全球，h.p. 越来越多。这样的普及无疑是由于这种造型很快被人们所接受。

究竟双曲抛物面的意义是什么？它的哪个特点对我们最有关系？

图175清楚地说明 h.p. 的几何图形，一组相同的抛物线倒悬在另外两个拱起的抛物线之间。形成马鞍形的曲面。在横向包含着第二组相同又平行而拱起的抛物线。马鞍是朝两个相反方向弯曲的（图175-1）。

水平的断面，就是轮廓线，形成一对曲线（图175-2）斜向断面也是如此。

一个双曲抛物面包含两组交叉的直线（图175-3）。因此，在马鞍内任何的开洞都可以由四条直线做成框边，形成一个翘曲的四边形。换言之：从一个双曲抛物面可以切出任何翘曲的四边形。如果两个相对的直边按同等比例分成几段，在等分点处用直线连接，这些直线就是在 h.p. 双曲面上的母线。最重要的基本的和组合的 h.p. 曲面是：

1. 由竖向抛物线和水平双曲线范围住的马鞍形；
2. 由一个翘曲的四边形范围住的基本的直边型式；
3. 几个基本的直边型式的组合；
4. 由几个曲线全部或部分范围住的断面；
5. 由几个曲线围住的断面的组合。

下面将讨论一些实际建筑物和画图板上的设计的造型和结构，这些建筑物和设计是按照上述分类的。

几年前坎迪拉（Candela）为墨西哥大学设计一个宇宙线馆[108]。钢筋混凝土的薄膜虽然只有1.5厘米厚，跨度约为10米。壳体必须很薄，是为了减小它对宇宙线渗透的抵抗力。屋顶的形状象一个马鞍，两端为抛物线，如图176。因为母线是直的，模板可以很容易由一般木板和小方木制成。山墙做成波浪形以增加刚度，在两端承受壳体。尽管中间沿着两个 h.p. 曲面相遇的线上所形成的自然脊，本身可能已有足够的加劲作用，还是用了特殊的肋来加固壳体。端部的悬挑檐部的悬挂以及曲面的普遍紧张状态，引人注意到，呈现于钢筋混凝土薄膜中力的平衡。悬挂的钢丝网和脆的混凝土组合一起，产生只有双曲壳体才有的高度的空间刚度，在双曲抛物面的翘曲面上表达得如此强烈。这个小小的宇宙线

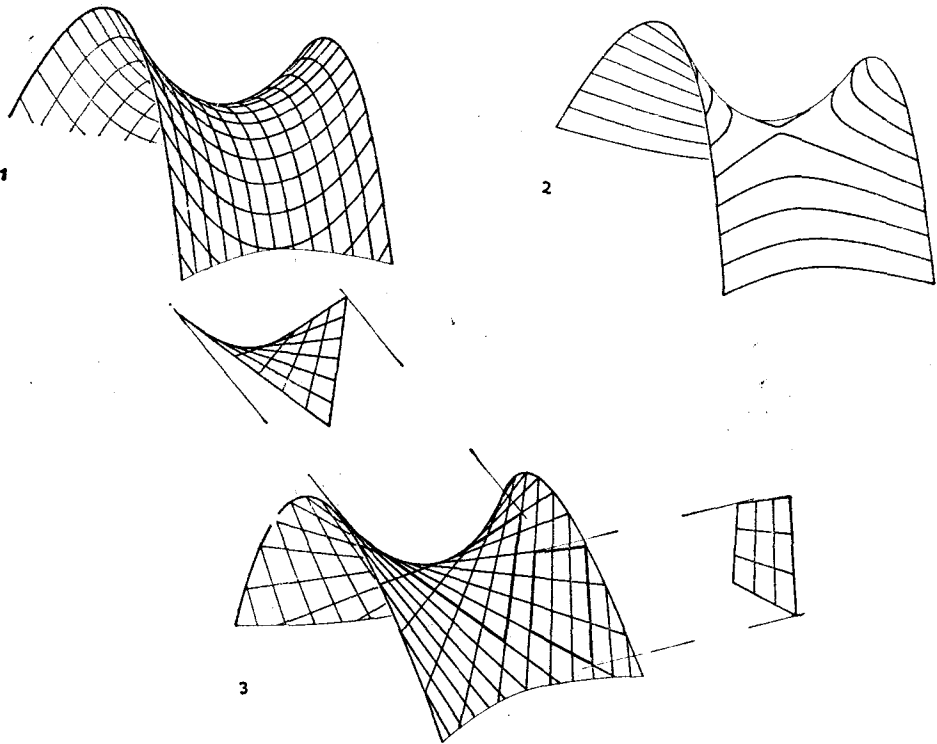


图 175 双曲抛物面

- 1—一组相同的抛物线悬挂在两个拱起的抛物线之间，结果就是一个马鞍形的双曲抛物面。在马鞍形曲面上与悬挂的抛物线相垂直包含第二组相同但是拱起的抛物线；
 2—水平断面是双曲线；
 3—双曲抛物面的马鞍形曲面包括两套直线。因此，可以从一个 h.p. 曲面切出由四条直线围住的任何翘曲的型式

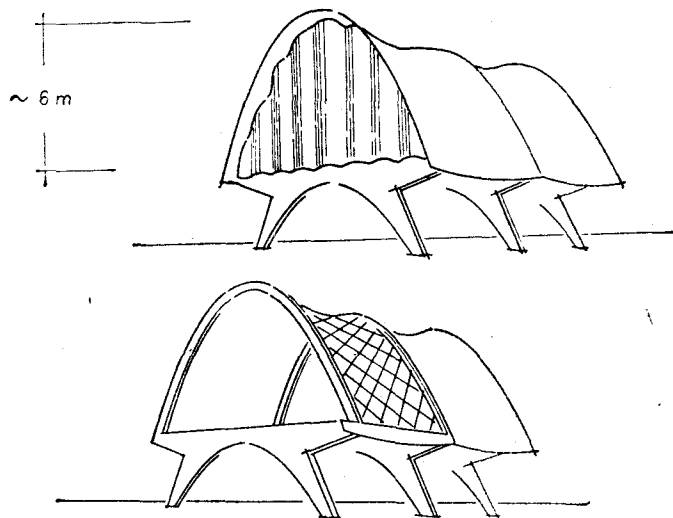


图 176 墨西哥大学的宇宙线馆[108]，用两层直板做成翘曲面的模板
 工程师：坎迪拉

馆是马鞍形 h.p. 特别精致的例子。

现在我们将注意力转向从马鞍中部取出的基本直边型式，这个双向反曲显现其拉力与压力之间的相互作用，给人深刻的印象。在这个作用中一切应力都最经济地取得平衡。一个配筋恰当的壳体在任何点和任何方向都能承受与曲面相切的拉力和压力。两个最低点显然是设置支座最好的地方。这类屋顶一般最关键的荷载是结构的自重，结构自重是非常有利地使悬挂的抛物线受拉，而拱起的抛物线则受压。再者，这些抛物线非常符合与均布荷载相应的压力线。因此，从一开始，偏离壳体抛物曲线的外力趋势就是很小的。

如果我们首先假定，最初荷载沿着狭窄的抛物线拱起单元传到直线边缘，在这些拱端产生一个合成的压力 D ， D 与壳体边缘相切。又可以假想这个合力 D 分解成为一个压力 D_r 和一个拉力 Z ， D_r 沿着壳的边缘作用在支座方向， Z 和悬挂抛物线之一相切。这个拉力绷紧屋顶并减轻其他拱的负担（图 177-1）。另一方面，我们可以假定荷载先转换成作用在悬挂抛物线方向的拉力，并假定这些荷载传到直边之一之后，它们也分解成为两个压力 D_r 和 D ， D_r 沿着壳的边缘向着支座方向作用， D 作用在抛物线拱的方向。从支座下面对拱在切向作用一个反向推力， D 就减轻悬挂抛物线的荷载。这两个过程既互相影响又互相帮助。一个单元偏离严格曲面的每个倾向，都受到作用在反向曲面的一个相应的力所抵制。唯一不平衡的力是沿边缘合成的压力 D_r ，这些力必须集中在一个和壳体是以抗剪相联的边缘构件上，从而，将这些力传递到支座上去。在支座处这一边缘构件承受的 D_r 和对面边缘构件的 D_r 合并成为与壳面相切的反力 R 。在这个直边的基本形式中边缘构件完全受压。既然由于壳体双曲拱连锁作用合并而成的压力向着支座方向累积，因此，边缘构件的尺寸就必须愈近支座愈大。在理论上，由于边缘构件本身自重引起的一点：弯曲应力是微不足道的。这样小的应力不可能决定边缘构件的外形。不象在简单的曲面壳体中的加劲肋和隔膜那样，这些边缘构件没有保持壳体形状的作用。只要支承是适当的，双向曲面本来就足够刚劲。壳体从整体考虑，象拱一样产生水平推力。因此，支座必须足够抵抗横向位移或者用系杆拉住。表现壳体中力流的生动性很大程度上要依靠下部结构的设计。

木结构最适合于 h.p. 曲面的几何形状。在抛物线方向采用弯曲薄板和薄片，和在直的母线方向采用木板一样容易。卡塔兰诺 (Catalano) 建筑师为自己住宅的木屋顶选择了从 h.p. 马鞍形中间切出的一个对称体 [109]。屋顶是由三层木板钉成的，两层顺压力方向，一层顺悬挂抛物线方向。边缘构件是钢制的，它们推向两个混凝土墩，后者由埋在地面下的用后张法预应力混凝土制成的系杆拉住。

从马鞍形中间切出的截面改变了基本型式，并不影响结构原理。不但如此，这样的形状可能更适合特殊要求，还可能加强造型的表现力。在墨西哥的科亚肯 (Coyoacan) 的教堂 [110] 就是采用偏置的马鞍形体。不对称的形状更突出了圣坛的位置，圣坛正在屋顶高点之下。4 厘米厚的钢筋混凝土屋面长向对角线的跨度为 30 米，短向为 25 米。窗门的竖梃除了防止不对称屋顶倾翘之外，没有承重的作用。假定边缘构件中未被平衡掉的推力是由厚实的外墙所承受，外墙的作用如同系杆一样。可是，为表现这一关键性的结构作用，应该找得到比毛石更好的材料。虽然屋顶的推力约有 40 吨，但是我们意识不到，屋面好象不相干地放在墙上，应力是如何传递到下部结构的表现不明确。

在日本静岗 (Shizuoka) 议会大厅的屋顶是在一个正方形平面上的双曲抛物面，正

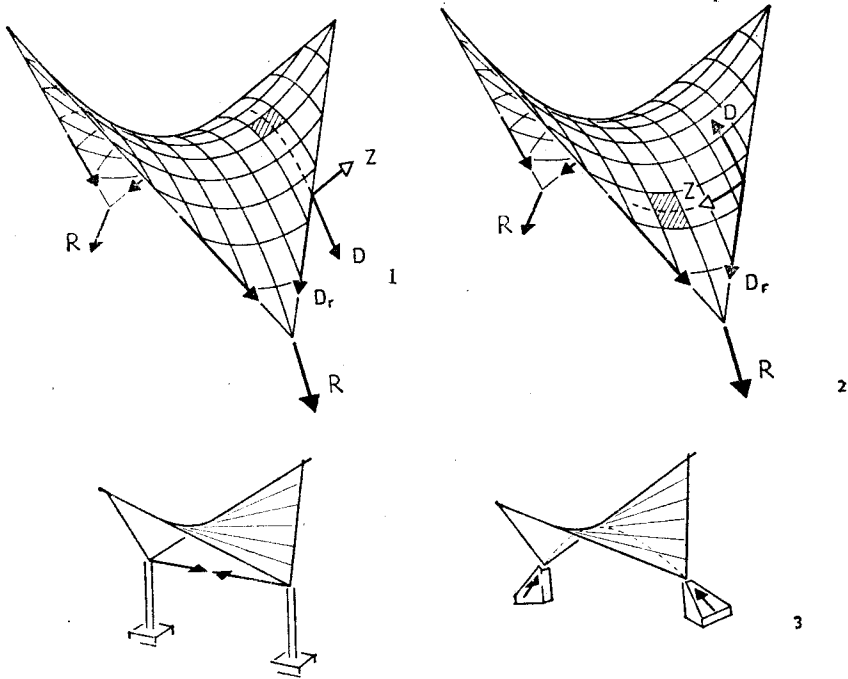


图 177 承受竖向均布荷载的直边双曲抛物面的结构原理

- 1—在拱起抛物线方向产生拱的作用。在壳体的边缘，合成的推力 D 可以分解成为一个平行于边缘的压力 D_r ，和一个与悬挂抛物线相切的拉力 Z ；
- 2—相反，边缘承受悬挂抛物线方向的拉力 Z 。此力也可以分解为两个压力 D_r 和 D_t 。 D_r 平行于边缘。 D_t 与拱起抛物线相切，也就是，与拱的推力方向相反；
- 3—在每个支点，两个边缘上的 D ，并成一个合力 R ， R 与h.p.的曲面相切。这个斜推力 R 必须由拉杆或斜扶壁来承担，否则这个结构一开始就不稳定

方形的边长超过50米。这样长的跨度和这样大的静重（因为钢筋混凝土壳体本身就有18厘米厚）意味着边缘构件要传递约1400吨的总推力。为抵抗这个推力所需的混凝土截面约为1.4平方米，每米长的重量约为3.3吨。这样大的边缘构件让它吊挂在壳体边上，而不另设支承，就象卡塔兰罗住宅的轻型木屋顶那样，是不可能的。边缘构件本身自重所产生的弯矩就太大了，壳体无法承受。因此，在这个设计中边缘构件的支承成为非常重要的问题。建筑师在大厅的一边用了折板墙，在另一边用了混凝土薄片透光墙。一个支座上对角线的总推力约为2000吨。由埋在地板下面巨大的系杆来承受推力的水平分力。这个屋顶的几何图形，相应于从h.p.马鞍形的中部切出来覆盖正方形平面的最简单的对称双曲面，它给人的印象是建筑师已经成功地赋予这个强有力的几何图形一种真正日本的艺术语言，从而，进一步证明双曲抛物面的多面性。

上述的直边形式也可以有多种组合。只要每个基本壳体保持它的独立作用如图177的方式，则h.p.作用的效率就可以充分保持。最简单的组合是两个基本形状互相对接。每个单元以斜向推力的形式各将荷载传递到基础。两个边缘构件的应力完全相等，因此，在它们会合之处不出现有待解决的不平衡的力。然而，象卡塔兰诺住宅的屋顶（图178）

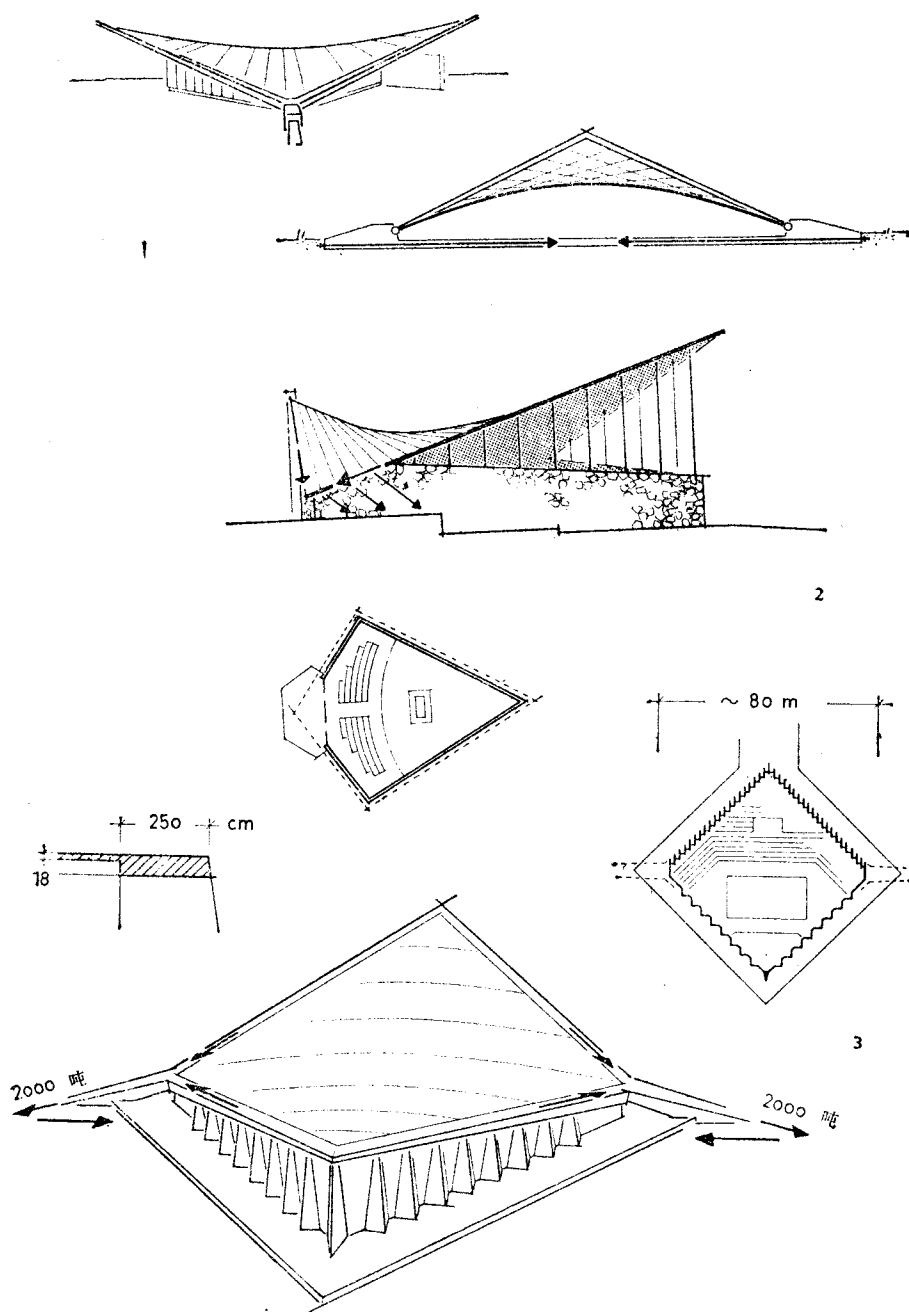


图 178 从马鞍形中部取出的直边 h.p. 单元

- 1—卡塔兰诺建筑师的住宅的木屋顶是由三层木板钉起来的[109]。它是对两个轴都对称的 h.p. 型式；
- 2—墨西哥科亚省的教堂 [110] 是一个钢筋混凝土的 h. p.。壳体对一个轴不对称，在平面图上它就象一个风筝；
建筑师：德·拉·莫拉 (De La Mora)，工程师：坎迪拉
- 3—日本静冈议会大厅 [111]。在平面图上是对称的正方形壳体
建筑师：丹下健三 (Kenzo Tange) 和坪井 (Y. Tsuboi)

那样一个独立单元，如果不采取特殊的措施，就会侧向倾翘。反之，两个 h.p. 面相接却自然稳定。整个结构支承在三个支座上而不是两个，可以加进这个链的单元数目不限。

图179-2为伦敦一个女子中学的屋顶，是由五个不对称的 h.p. 单元辐射形的组合。同样，每个单元的作用如同图 177 的单独壳体一样。设计师在单元之间用透光带以强调各个单元建筑上的独立性。壳厚 5 厘米，是从下面向上朝着支承在钢索网络上的隔热板喷浆制成的。五个支座都是垂直的，只承受竖向荷载。结合在夹层楼板内的五边形拉杆系统承担水平推力。可惜得很，这个重要受拉构件发挥的强大约束力没有在任何地方明显地表现出来。

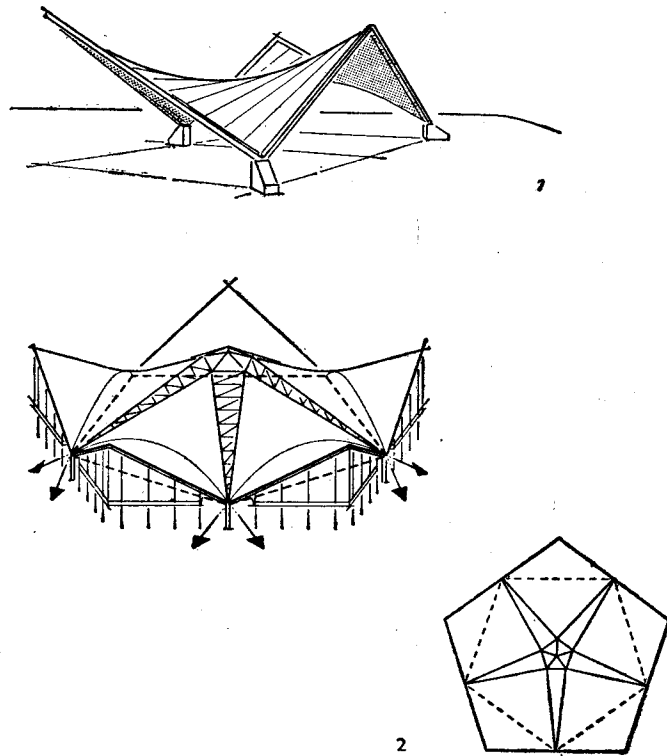


图 179 直边 h.p. 的组合

- 1—堪萨斯(Kansas)大学的一个试验性木屋顶[112];
- 2—伦敦一个女子中学的屋顶[113], 它是 h.p. 马鞍形单元按同心安排的。在平面图上象风筝一样的五个壳体单元之间用透光带隔开, 又用一个五边形共同的拉杆固定

丹佛 (Denver) 商业中心[114]的进厅包括四个 h、p 单元组合在一起，推力集中到中心，对角向展开到四个角。在这里推力由斜墩传到基础。

同样系统也应用于许多工业建筑中。水平推力由系杆承受。柱子只承受竖向荷载。

坎迪拉设计墨西哥的勒德勒 (Lederle) 实验室时，运用了一个非常聪明的手法，所有水平推力在屋面结构本身之内保持平衡；因此，既不需要外部的扶壁又不需要外部的系杆（图 180-4）。每对相遇于柱顶的水平总推力互相抵消，直接沿着水平谷底拉紧。四个柱子只承受竖向荷载。水平力在内部互相平衡的结果使结构有一种特别轻盈的气氛。不然，一般产生推力的屋顶总是稳重地扎根于下部结构。

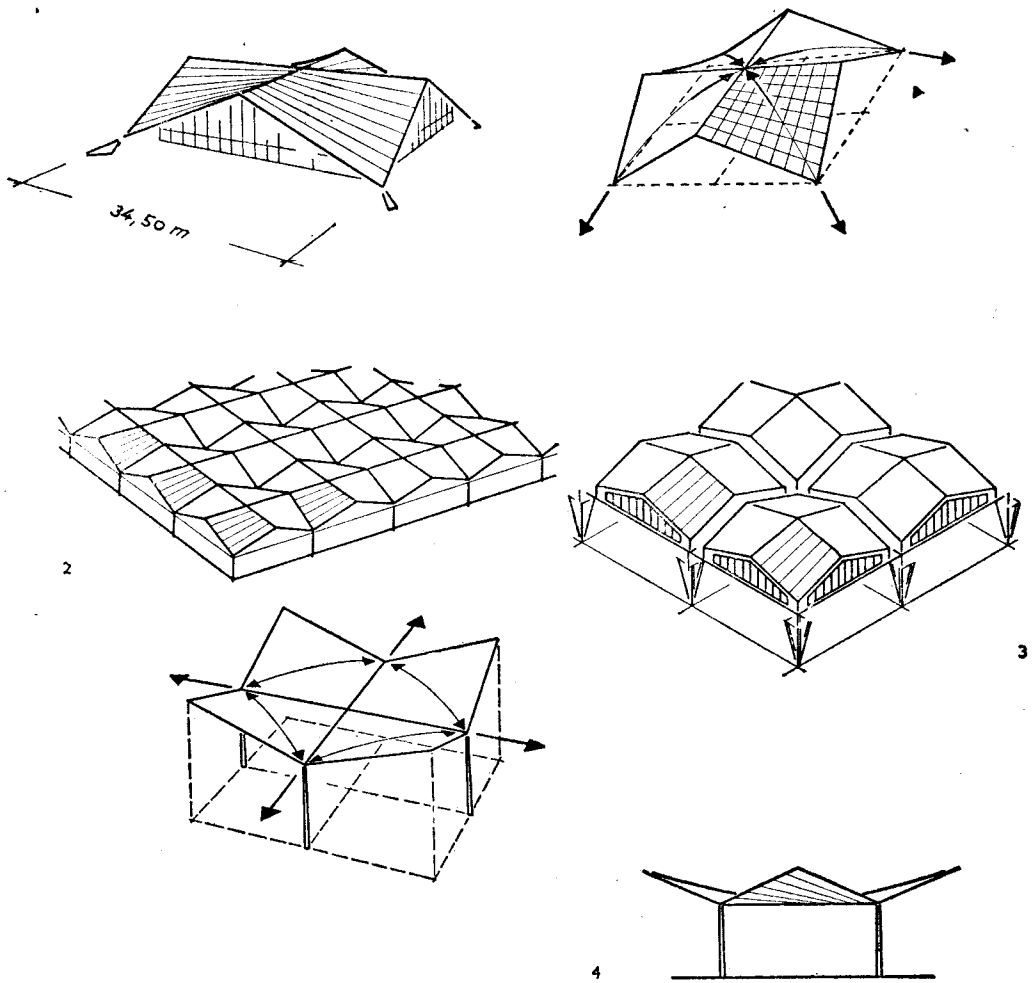


图 180 平面为正方形的h.p.单元，每四个为一组支承在四个点上

- 1—科罗拉多 (Colorado) 的丹佛的百货商店的进厅[114];
- 2—得克萨斯 (Texas) 的达拉斯 (Dallas) 的工厂[115];
- 3—墨西哥的赫尔德斯 (Herdcz) 工厂;
- 4—墨西哥的勒德勒实验室。工程师为坎迪拉[116]。四个单元组合成使所有推力在壳体内部维持平衡。四个柱子只承受竖向荷载

如果四个h.p.单元旋转使外角下降而中间上升，这就得出一个顶在单根柱子上的“伞形”屋顶（图 181-1）。从每对相邻单元来的推力在共同边缘构件方向产生一个合力，拉力通过边缘构件传递到顶点。在顶点水平分力互相抵消掉，剩下一个竖向合力由柱子承担。这个竖向力等于屋顶的全部自重。

巴隆尼 (Baroni) 设计卡塞塔 (Caserta) 商场时，采用了这类钢筋混凝土屋顶[117]。他还在设计中用了铝。在正方形平面上四个单元都一样。因为这个铝质伞形屋顶包括四个预制单元，所以运输时可以架成一堆，只有屋顶的四分之一那样大。

将伞倒过来就成了一个托盘。在外边对角线上的推力与边缘构件中的拉力平衡。在中心水平分力互相抵消，竖向合力传到柱子，它也等于屋顶全部自重。坎迪拉曾经将许多这类单元组合成墨西哥商业中心的朝北窗屋顶[118]（图181-2）。

这些例子只是从 h.p. 单元许多可能的组合中选出的一个小部分。当我们回忆起，可以由一个双曲抛物面切出任何不对称翘曲的四边形，具备一切双曲面结构的先决条件，我们可以判断，将这些 h.p. 单元组合成不同的方式一定可以产生多么丰富的造型。同时直边的翘曲四边形还是相当简单的形状。以后还将看到，采用曲边的 h.p. 曲面造型的范围更会大大增加。

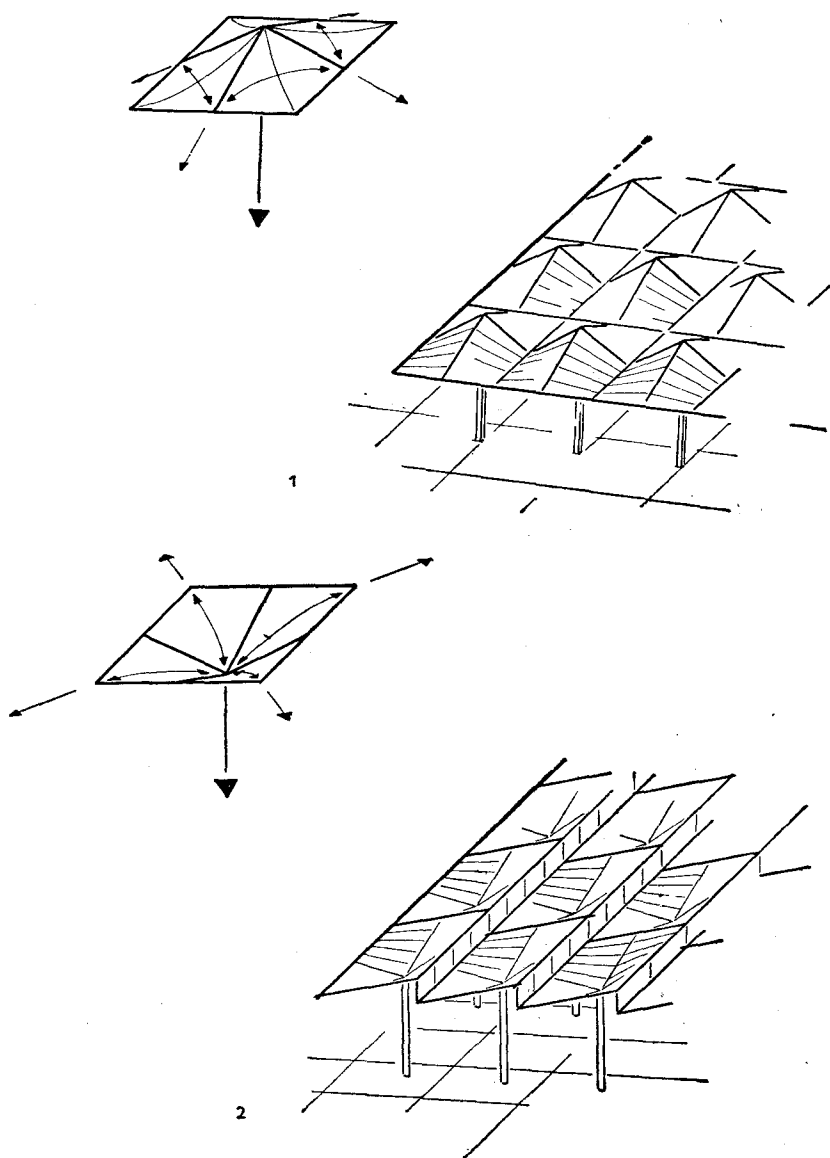


图 181 伞形壳体

- 1—意大利卡塞塔的商场。工程师为巴隆尼[117]；
- 2—墨西哥的商业中心。工程师为坎迪拉[118]；

虽然，多年来双曲抛物面已成为建筑界热烈议论的题目，至今在这些型式的应用方面只有少数建筑师敢于走出纯工程技术的范围。坎迪拉和德·拉·莫拉在墨西哥曾建造一个教堂[119](图182)，它的全部结构——屋顶，墙面和柱子——都是由直边的 h. p. 单元组成的。凡是不厌其烦地试图（只有很少人如此）去理解这一既复杂又感人的设计的人。也就是，试图弄清楚究竟是怎样一些几何关系被用来发挥作用的时候，莫不惊叹这些几何图形所含有的造型的丰富性和戏剧性以及表现力的充分可能性。坎迪拉沉醉在这些问题中，他宣称壳体结构是建筑艺术的开端。他着重指出，如果建筑艺术是塑造空间，那么与壳体结构的潜力相对照，古代的作品只不过是雕塑，算不上是建筑艺术[120]。我们不要对坎迪拉的话过分挑剔，对他的言论也就象对他的教堂设计那种尖锐评论一样，认为这只是现代的症状[121]，这同1930年德国未来派的舞台设计师所招来的争论相似。我们认为这样评价一个

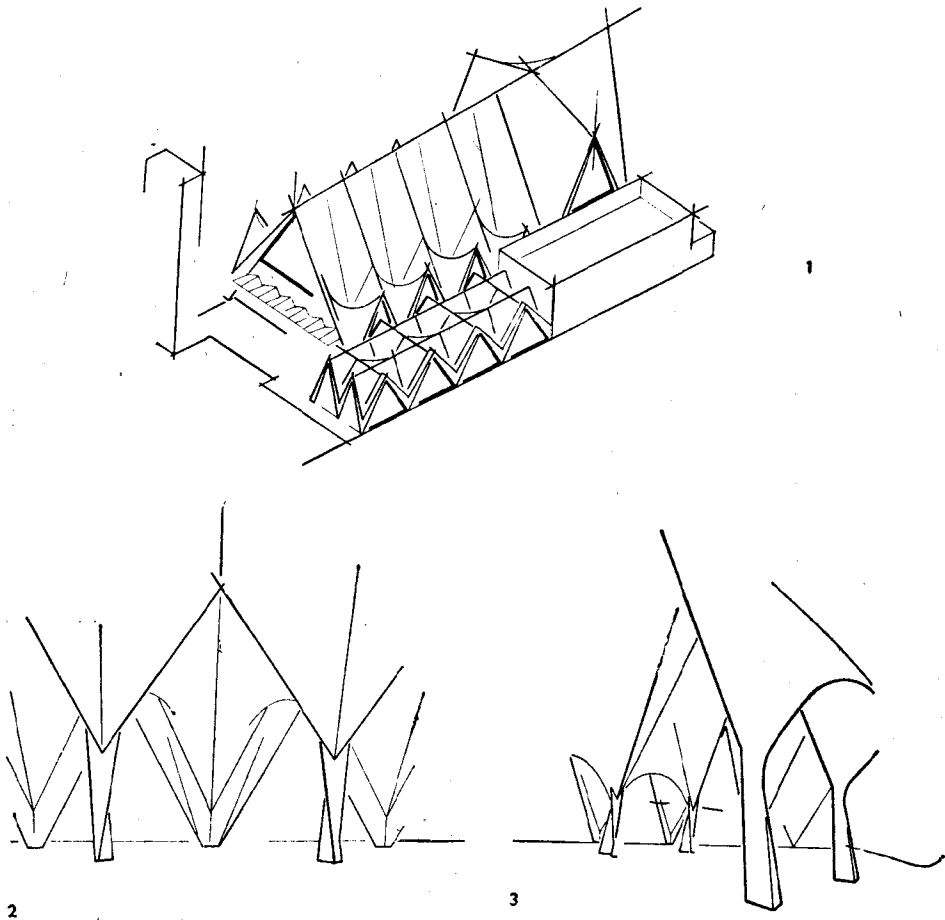


图 182 在墨西哥的米拉格罗莎圣母 (Virgin Milagrosa) 教堂[119]

建筑师：德·拉·莫拉

工程师：坎迪拉

1—全部屋面由直边的h.p.单元组成；

2和3—在教堂里面也只看见直边的h.p.曲面。甚至柱子也由h.p.形成。能见的曲线不是马鞍形的边缘而是它的轮廓

如此重要的试验是远远不够的。实际上与未来派主题的形式上的关系只是许多可能的关系之一，而且，是没有任何因果联系的关系。所以，不能纯粹从外表判断这些问题。总之，这不是今天出产舞台布景，明天出产广告的形式游戏，这是肯定的。相反，我们面对的是一个真正的结构秩序。在这个建筑上，h.p.壳体结构固有的许多可能性中的一种得到始终不渝地实践而取得了极好的结果。

另外一个例子是1958年勒·柯布西埃为布鲁塞尔国际博览会设计的菲利浦斯馆[122]。这个结构也招来尖锐的不同意见。柯布西埃是我们时代最有名的建筑师之一，他利用h.p.几何图形的严格规律去实现原来认为完全是自由的造型。从一个方面来说它的形状和墨西哥教堂的形状是恰恰相反的。在后者，精致的墙面和屋面如风卷一般地从细小的底部直到中殿形成尖锐的肋和脊。各个h.p.单元在复杂穿插中从属于一个主要是轴向对称和重复的系统。而菲利浦斯馆是一个帐棚，象薄膜般的宽褶一直落到地面。它的尖顶就象帐棚杆顶着一样，从尖顶向各方散下屋脊，不对称的程度到了极点。然而两个设计的结构原则都是一样的。不管是现浇还是预制。今天这样解决问题，明天又那样，这都是小问题。虽然整个造型一个是从里面，而另一个是从外面更富有表现力，但都是服从相同法则的。两个建筑物主要都是直边h.p.单元贯串的组合。在两例中造型与结构是不可分割的。它们可说已走到现代建筑未开发的边陲，做了很有意义的远足旅行，不象球体，圆柱体和圆锥体，它们的几何图形如此多样，不受任何结构造型必需从中解放出来的约束。相反，在此例中，几何学好象给结构带来了生气(图183)。

以上的讨论是关于直边h.p.曲面，对菲利浦斯馆只要我们的注意力限于它的上部结构，很清楚它也属于这一类。升起地坪的，决定结构整个外貌的所有面，毫无例外地，都是直边的。但是，如果我们把注意力转到平面上，就会发现它是完全由曲线组成的。因此，给予h.p.面以曲线边也是可能的。关于立面效果将在后面讨论。

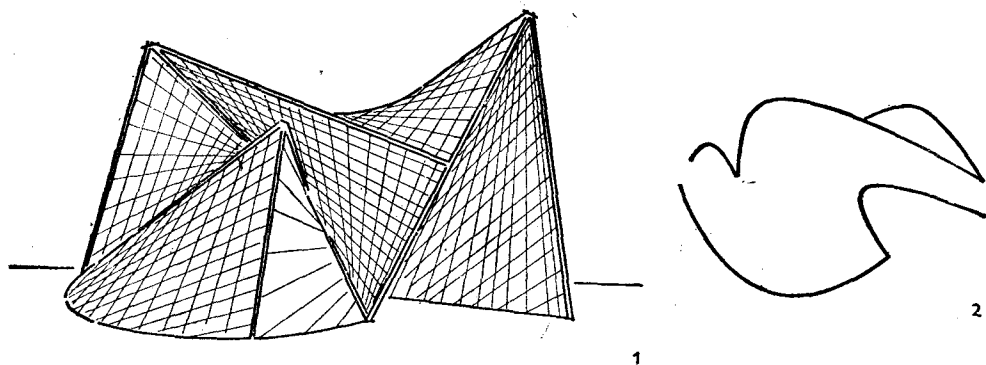
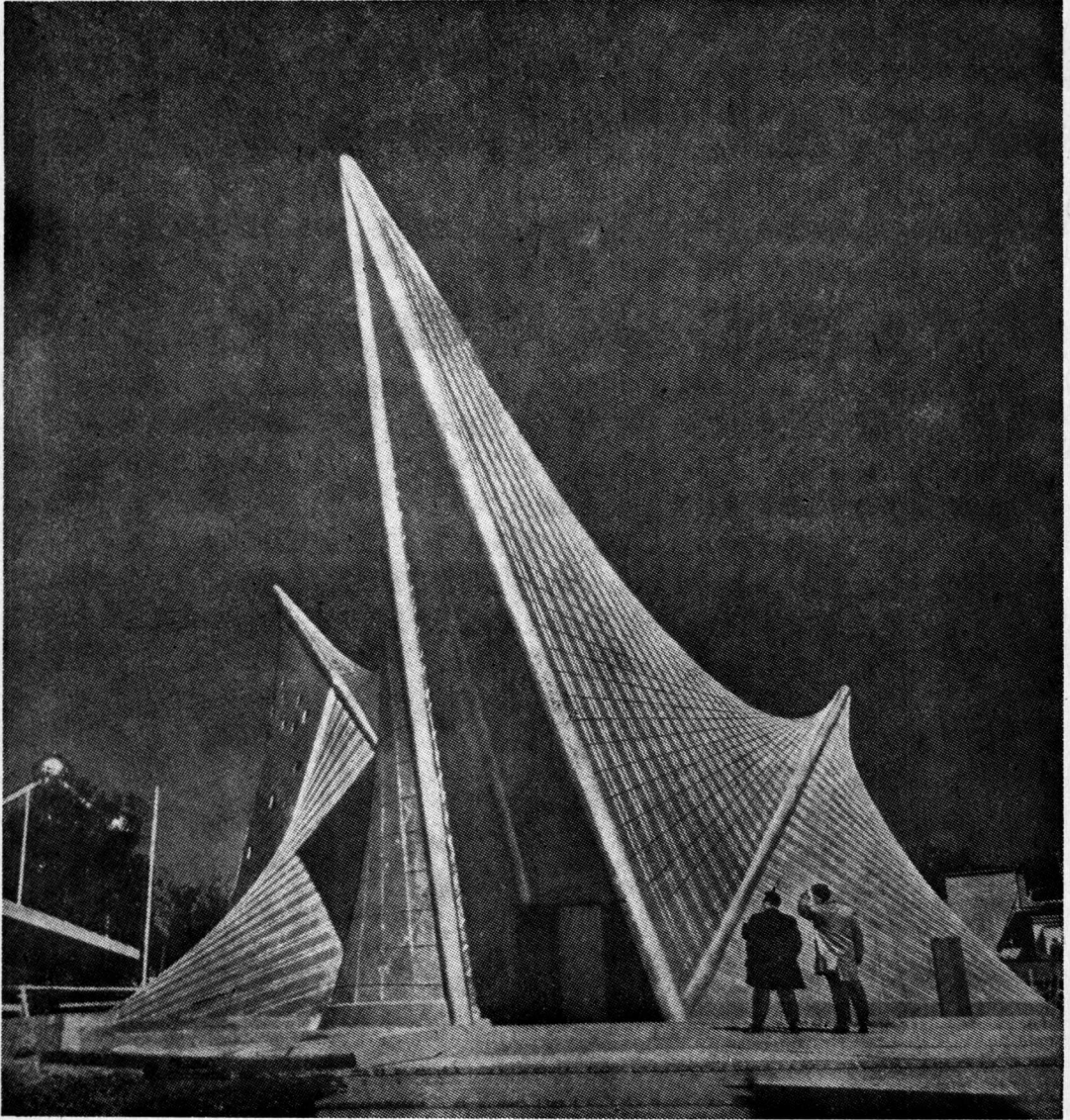


图 183 1958年布鲁塞尔国际博览会中的菲利浦斯馆。勒·柯布西埃设计[122]

1—全部结构由直边h.p.单元组成；

2—平面图，同样的h.p.曲面在这面上是直边，到地面成曲线

对双曲抛物面感到惊奇的一点是许多直线沿着预定的路线移动而产生两个相互反向的曲面。对应用和理解这类几何学的人印象都很深刻。所以作为这个型式的母线的直线，在至今已建多数的h.p.中如此被强调，是不足为怪的。在h.p.曲面的壳体中直边是主导的特征。另一方面，曲边用得相对少，虽然，在几何学上或结构上没有不能用的理由。下一



照片：1958年布鲁塞尔国际博览会中的菲利普斯馆[122]
建筑师：勒·柯布西埃

节要讨论的悬吊屋顶中，曲线的受压拱却经常用来作为支座（参看第 245 页）。

任何房屋的建筑效果主要依靠侧视图，决定于视线高低和观察角度。蛙瞰图和鸟瞰图都是次要的。如果根据从上面不合实地看模型，而作出判断，是会对建筑物的水平轮廓和平面估计过头的。主要的水平观察角是最重要的。显然，h. p. 的几何性质非常适合于这种状态。

如果修改基本型式如下：旋转一个边使它水平投影保持直线，立面却成一个曲线。由于旋转的方式不同，曲线可以下垂或拱起。这样的 h. p. 屋顶虽然平面仍旧为直线所限制住，边可以是弯曲的。这些曲线的真正形状是抛物线。

调整曲线的锐度和方向可以改变边缘的表现力。设计师可以充分发挥想象力。他可以自由地随意采用其他曲线的边，组合起来以探索其他截面（图 184）。将 h. p. 壳体的边缘加以弯曲的办法，以尚未开辟的表现力量展开一个宽广的新应用领域。

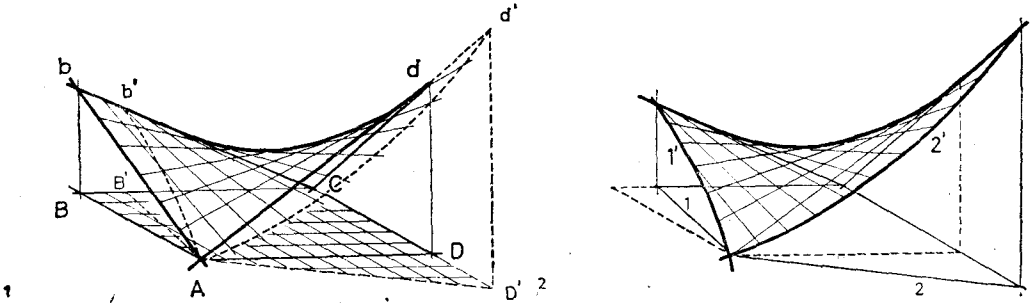


图 184 曲边的 h. p. 单元

- 1—从 h. p. 马鞍形中间取出的一个直边单元 (A-b-c-d) 对两个轴是对称的。在平面上的投影是一个菱形 (A-B-C-D)。如果 A-B 转到 A-B', A-D 到 A-D', 垂直上去的边缘 (A-b', A-d') 就成为曲线；
2—在平面上边缘 1 和 2 是直线的，在它们的上面就成为屋顶的曲边 1' 和 2'。原来的边缘旋转进去，曲边是个拱；旋转出去，曲边下垂

自从 1958 年 6 月国际博览会以来，在布鲁塞尔中部建造了一个有曲边的 h. p. 形式的问讯亭。由于张拉直棍那样巧妙的预应力系统，按照萨格工程师所下的定义，它应该属于受力的或悬吊的木屋顶。在本节中提到它，因为它也易于用钢筋混凝土或木板建成完全一样的壳体。这里，我们主要对曲边感兴趣，平面图上看出，曲边是由于向直的母线在水平方向的投影旋转而形成的。这些柔和曲线（图 185-1）的锐度恰到好处，比枯燥无味的直线较为悦目。如果曲率再突出一些，它还有一个外加力学的作用。就是，利用拱的作用，在某种程度上，不产生弯矩，辅助边缘构件承担自重。

平面上是直边，立面上是曲边的 h. p. 组合型式的基本概念可用以说明由魏丁格尔和萨尔瓦多里工程师设计的三合 h. p. 屋顶。虽然，原为美国长滩 (Long Beach) 一个漂亮的餐厅 [124] 的方案 (图 185-2)，但已经受到全世界的注意。各个部分是稍微不对称地从 h. p. 马鞍形中间切出来的，结构的中心顶部比挑出的外侧顶点要高一些。在屋顶上三个壳体相遇的柔和曲线表现为显著的肋。这些肋的曲度和外边缘的曲度一样，都是按照力传递到支座路线而定的，如前所述，是压力曲线，跨度在 60 米以上，直线边缘构件的自重不可避免地要产生不利的弯曲应力 (参看图 178 的静岗会议大厅)。而弯曲的边缘能够经济地承受自重

且不产生弯矩。况且，曲边可使设计更加丰富，把几何提高到结构造型的水平。用工程师自己的话：“它是优美的形状……不是化装的而是真的。型式本身差不多就是它的必然的应力图，而不是建筑师选择的雕塑性形状，它是由工程师制造竖立起来的。……显示壳体的构思魅力在于它的外边缘的薄度。加劲肋不沿壳体边缘，而是缩进去些” [125]。

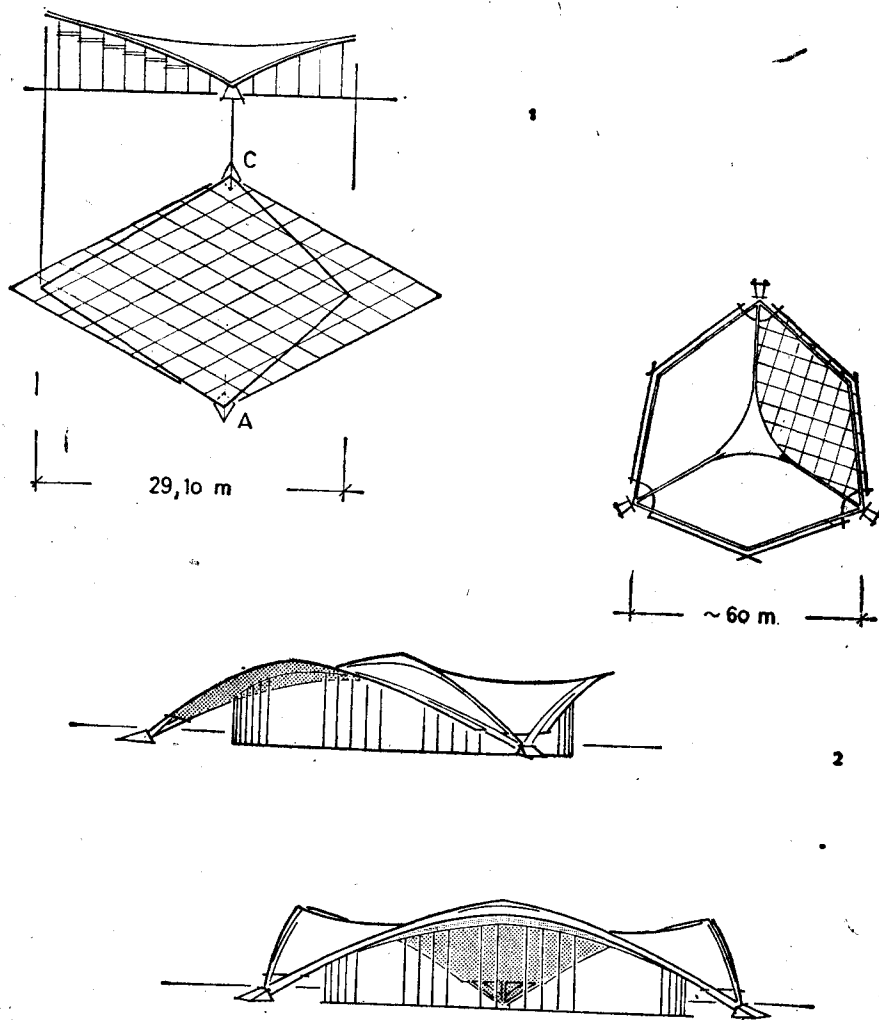


图 185 一些曲边 h. p. 的运用

- 1—布鲁塞尔的问讯亭[123]。平面图表示边缘如何绕着A和C向内旋转。因此，屋顶的边缘好象是拱形的；
 2—加利福尼亚长滩的大餐厅设计中，萨尔瓦多里和魏丁格尔工程师组合三个曲边 h. p. 壳体。拱的作用协助边缘构件承受部分的自重

长久以来各种 h. p. 单元的组合型式成为学生设计中的宠儿。他们做了许多优美的模型，有些吸引人的模型照片登在一些建筑杂志中。这些探讨的价值是无可争辩的，它发展了学生的空间想象力。如果一个青年建筑师要充分支配造型的新天地，这种探讨激发他的幻想，使他熟悉必须掌握的几何原理与力学原理。但是，我们不要忘记，从木和纸的模型

和几何学的练习到足尺壳体的实现还有一段长的路程。必须强调，当我们谈的主要是关于造型，而次要是力学分析的时候，要指出虽然对 h.p. 壳体的建造，几何学的作用很大，但绝不是唯一的重要因素。材料的性能，可行的施工方案，最后，力的组织以及与造型之间生动的相互作用等的探讨，要比结构安全度的常规检查更为重要。如果一个有艺术天才的建筑师想从壳体结构的抽象模型跨到实现，就不能象有些人那样，认为上述的探讨只是不得已的苦事，而应当认为是设计师不可避免地必须掌握的东西。从这些研究中他将能超越乏味的几何学取得向真正的结构选型前进的推动力(图186)。

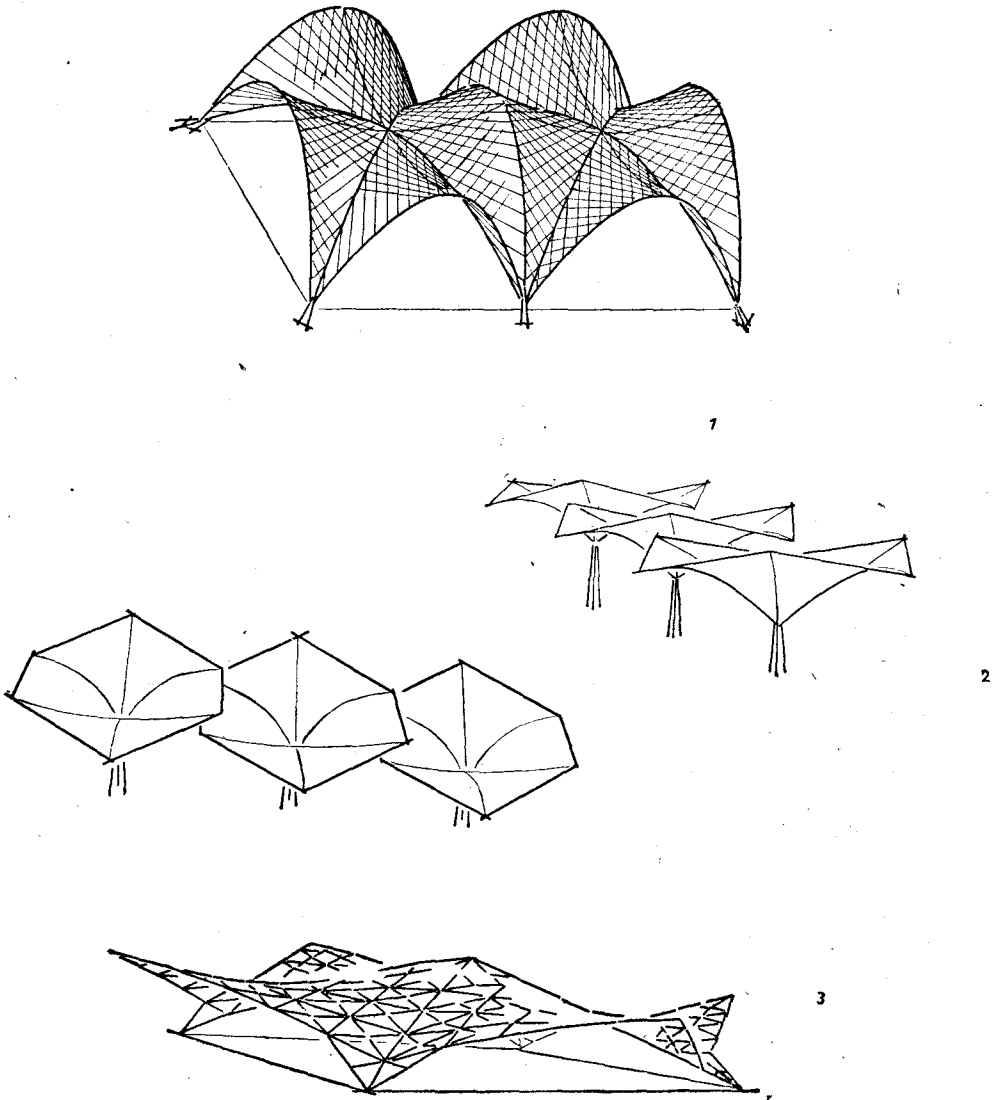
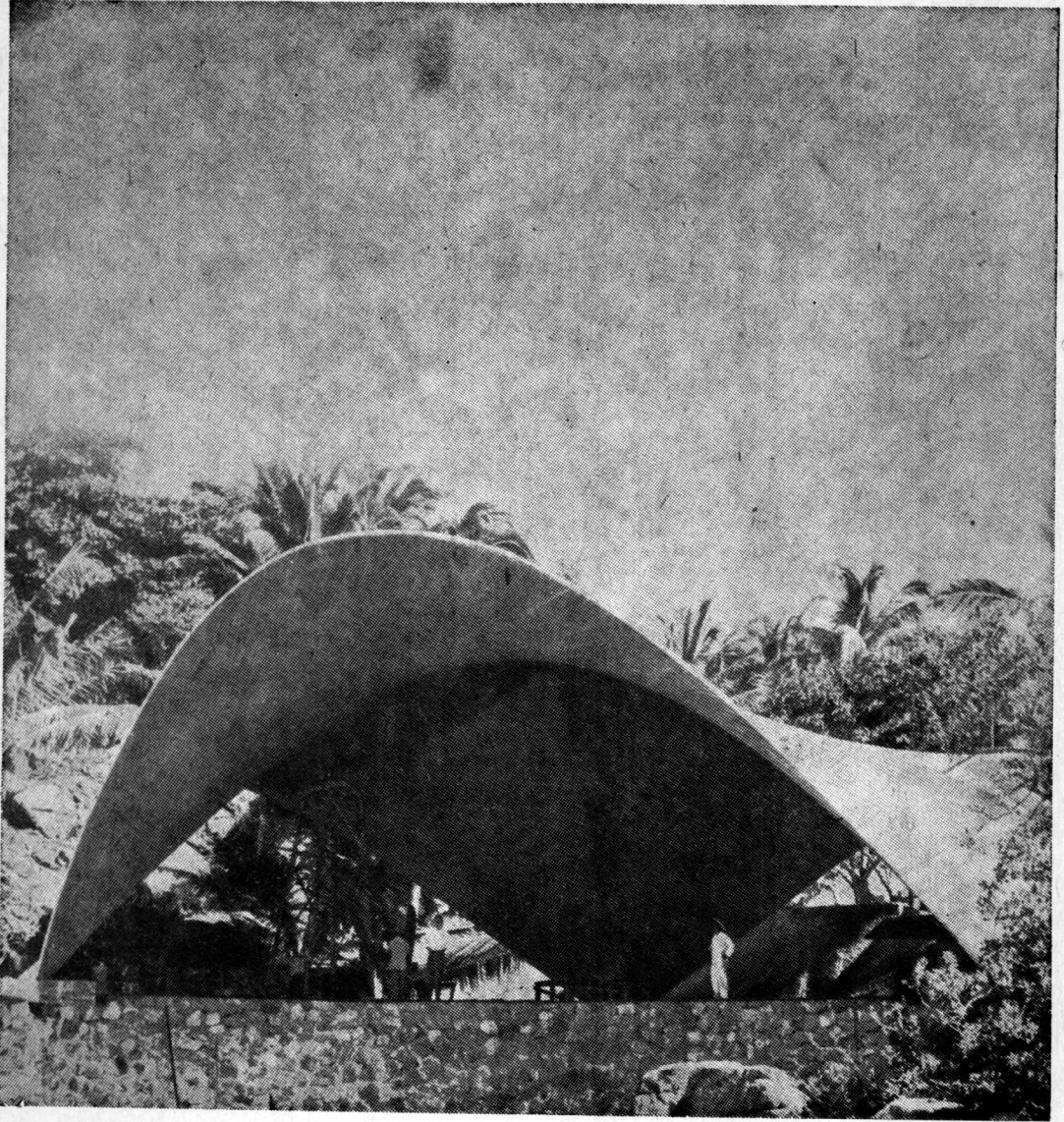


图 186 壳体几何学的研究

- 1—坎迪拉的一个方案[126]；
- 2—一个学生的设计；
- 3—卡塔兰诺学派的一个草图[127]



照片：墨西哥、阿卡普尔科（Acapulco）的夜总会[128]
工程师：坎迪拉

真正成熟的设计,更好的是建成的建筑,当然比最漂亮的模型更引起我们的兴趣。我们再回到坎迪拉的首创作品。他设计的阿卡普尔科夜总会[128]和霍奇米洛科 (Xochimilco) [129]的曲边h.p.单元辐射布置的餐厅(图187)。一个结构有三个,另一个有八个选自 h.p. 马鞍形的单元;安排的方式使缩小端集中在中心,曲边形成屋顶外缘而不必加劲。两相邻单元相遇处形成极刚性的沟。集中到沟的荷载是作为拱推力沿着抛物线截面传递到的,或另外如坎迪拉所猜想,作为严格纵向力沿着壳体直的母线传递到的。因为对称,这些合力是在沟的方向。又因为沟在屋脊处消失,此处成为抗弯薄弱区如铰一样。因此,相对的一对沟的作用就好似一个三铰拱。每个沟底曲线轮廓约似三铰拱的压力线,因此,不考虑弯矩

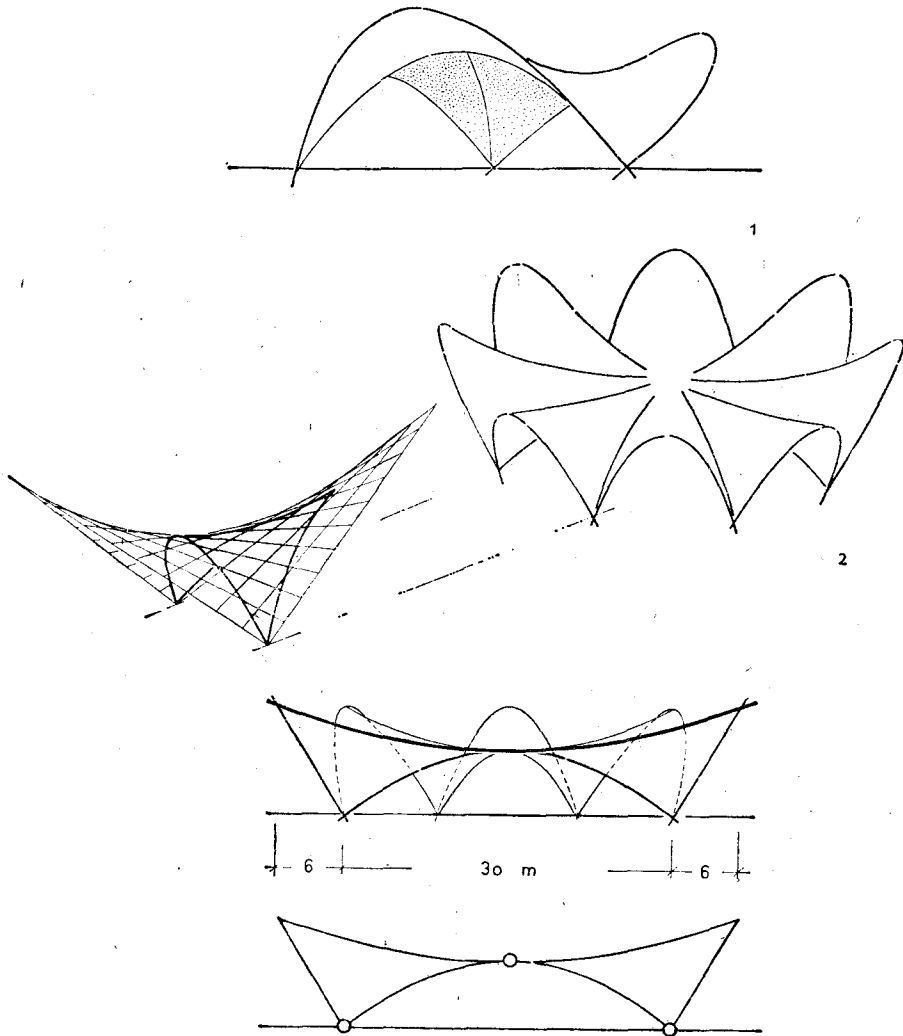
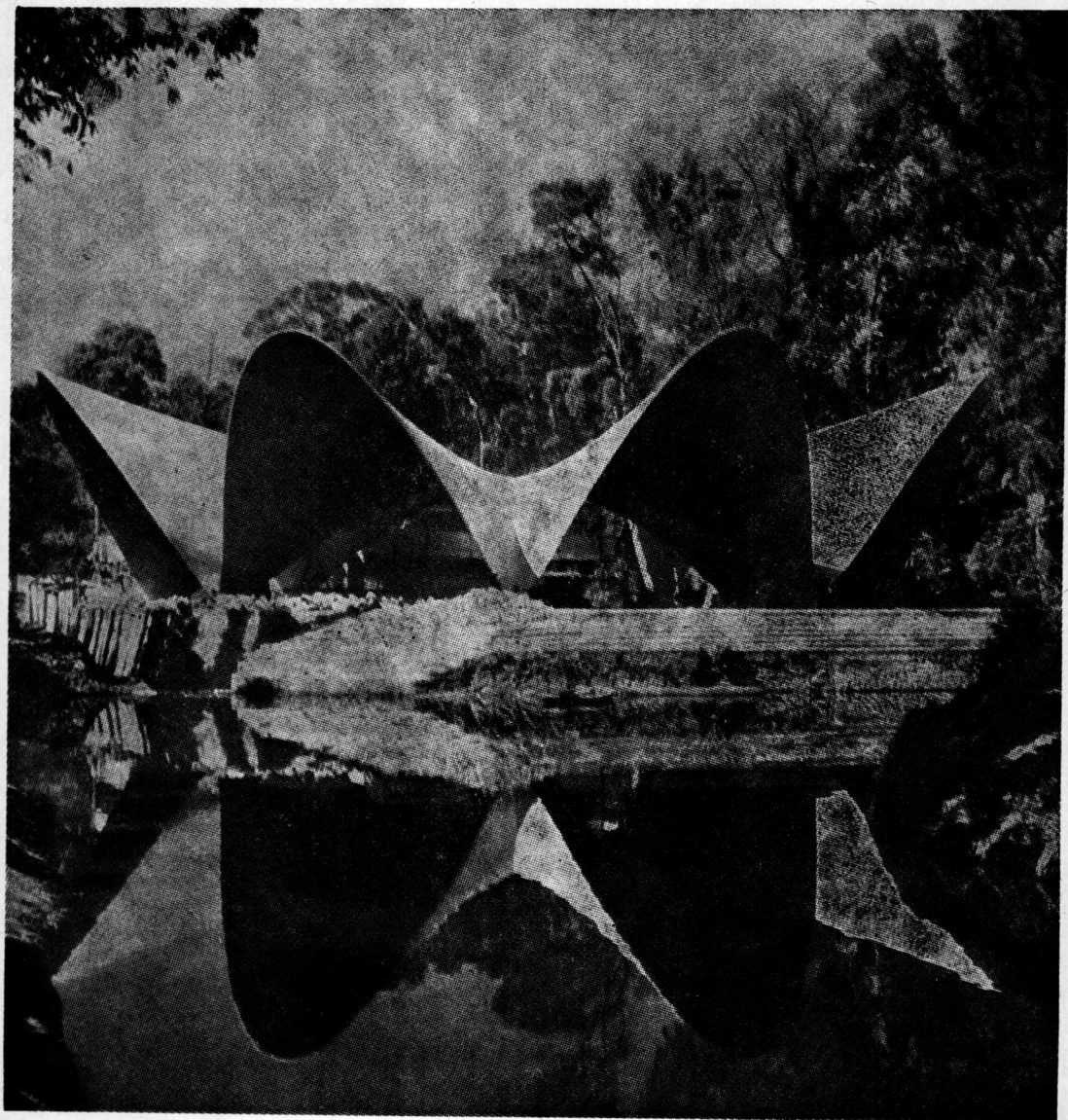


图 187 坎迪拉设计的两座建筑

- 1—墨西哥阿卡普尔科的夜总会[128]。三个 h.p. 单元(参看详图 187-2)在中心相遇于一点,再向外转成抛物线曲边;
- 2—墨西哥霍奇米洛科的餐厅[129]。八个象纸袋的单元组成一个中心型顶。沟如同折板起加劲作用。双曲 h.p. 面的边缘不必撑住(参看图150)



照片：墨西哥霍奇米洛科的餐厅[129]
工程师：坎迪拉

是对的。但是，最有意思之处是壳体脱空的边缘，它一起一伏不需任何加强。在讨论圣路易斯修道院（St Louis Priory）（图150）时，这种可能性已经暗示过。我们从坎迪拉的著作中推断，取消边缘构件代以脱空的边被他视为造型的纯化。他认为由于在结构的实际组织本身之中存在着加劲因素（在本例为沟），由于平面的对称性以及由于壳体的双向曲度[130]，才有简化的可能。

作者曾为美因河畔洛尔（Lohr am Main）[131]铸造厂设计了一个不寻常的屋顶造型。由许多在某些边缘弯曲的 h.p. 单元组合而成，这个屋顶有个颇为特殊的功能，那就是具有非常有效的自然排气作用以避免烟气聚积。为此，选用两个镜象 h.p. 单元，每个单元有两个曲边和三个直边，配合在一起形成一定程度上是自由的形式，但继续过渡到圆形通风管。这样形成的棱锥壳体包括两个大的 h.p. 面和一个通风管，覆盖的面积为13.5米×15.0米。一边是采光面。很清楚，既使象这样特殊的形状，也可以容易地运用 h.p. 单元的。的确，这些曲面既不能由马鞍形中切出，也不能完全来自直边的单元。图 188-2 表明最后的型式是如何由一个挠曲四边形限定的不规则 h.p. 单元切出来的。

自由式造型的壳体 结构的自由式造型听来象是荒谬的。但下面讨论的自由式造型在各方面都是结构法则确定的。不符合结构法则的自由式造型仅仅是设计师狂想的表现，当然和本书提出的观点是矛盾的。既然，型式完全决定于力学法则，那么自由式造型中“自由”的意义又何在呢？

本章一开始就确定壳体必须满足两个基本条件：它必须是“弯曲的”和“刚性的”。以后对各式壳体造型进行严密分析时并不希望在这两个基本条件之外附加任何几何定理。相反，几何学是经常令人厌烦的。支配结构造型的法则是微妙得多的。经常提到的压力线实际上不是一个抛物线。象抛物线，这是对的，但实际上两者很少是相符的。压力线随着荷载而变化，它一向就是活的。从易于施工和数学分析的角度来看，圆形、圆柱和球体的基本几何形是重要的；但本质上与壳体的承载力无关。我们立刻认识到球形有表现力较差的倾向，比起其他许多型式来，它并不适合于一定要求的壳体结构。我们感到它那严格的几何形过分约束造型的发挥，例如，灵活性较大的双曲抛物面则使人如释重负地受到欢迎。无疑，h.p. 的型式的出现大大开扩了壳体设计的运用范围。至少，可以杜绝那种认为造型的发展停滞了的无稽之谈。然而，即使在前面的分析中，我们也必须认识，壳体按其本质，是不可能被特定的几何型式束缚住的，不论是什么型式。这样说来，自由式造型不是别的，无非是从几何约束中解放出来的一种型式，并不是随心所欲的解放。相反，结构的自然法则继续决定着造型，从非结构性的几何学解脱出来只意味着结构型式从无关的影响中获得自由，因而，壳体的特性可以更纯地表现出来。

为了排除任何误解，应当强调，此处定义的“自由式造型”必须视为遥远的目标。它和时髦的招揽性建筑的“畸异”效果和任何幻想没有共同之处。事实上，它是只有在最有才华的设计师肯于致力结构问题时，才能达得到的目标。

“自由式造型”并不意味着取消几何学的定律。即使在最任意的自然形状中，也都可以找到几何条理。因此，假定造型的整体并不是全受几何原理的支配，然而，仍旧服从一定的几何定律的话，我们还是称之为自由式造型。

在法国罗扬[132]的市场屋顶就象一个有波形边的海蚌。因为它总的设想只是受力学

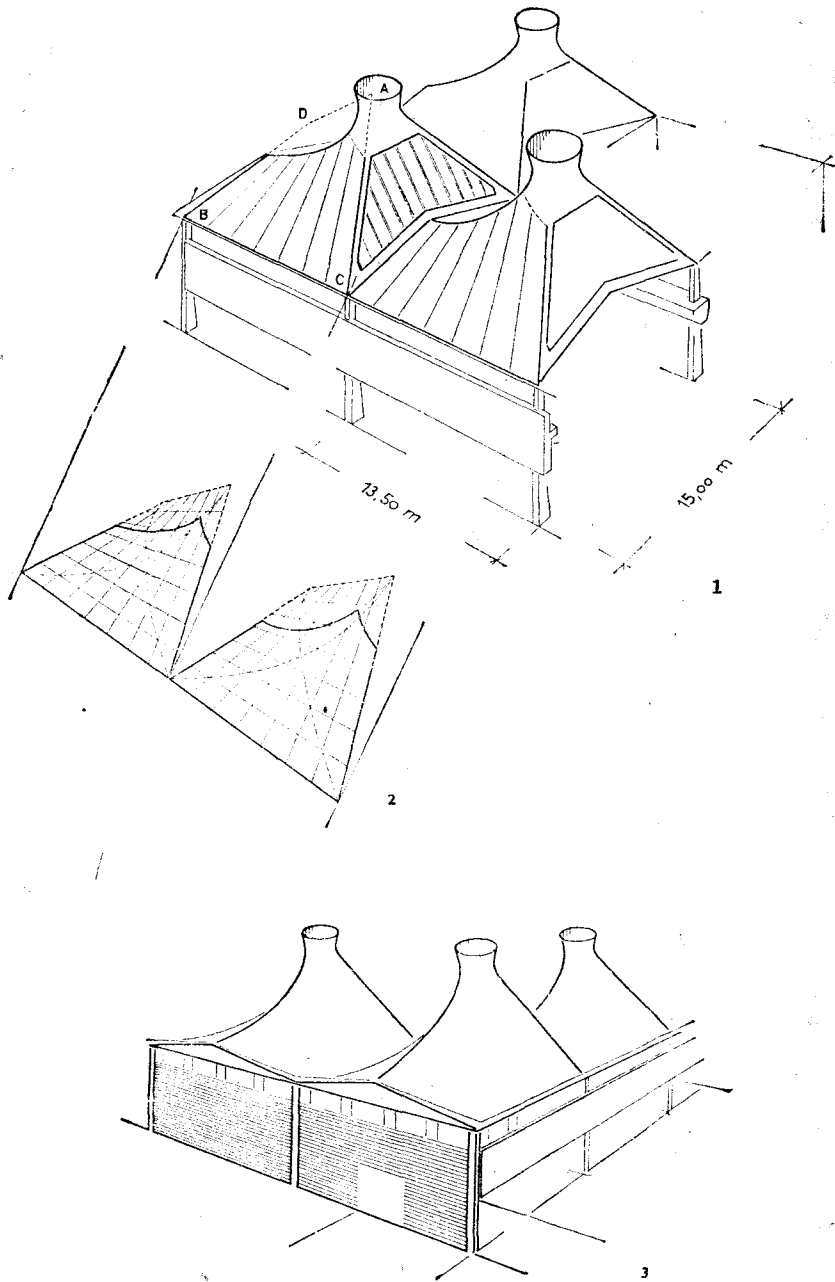
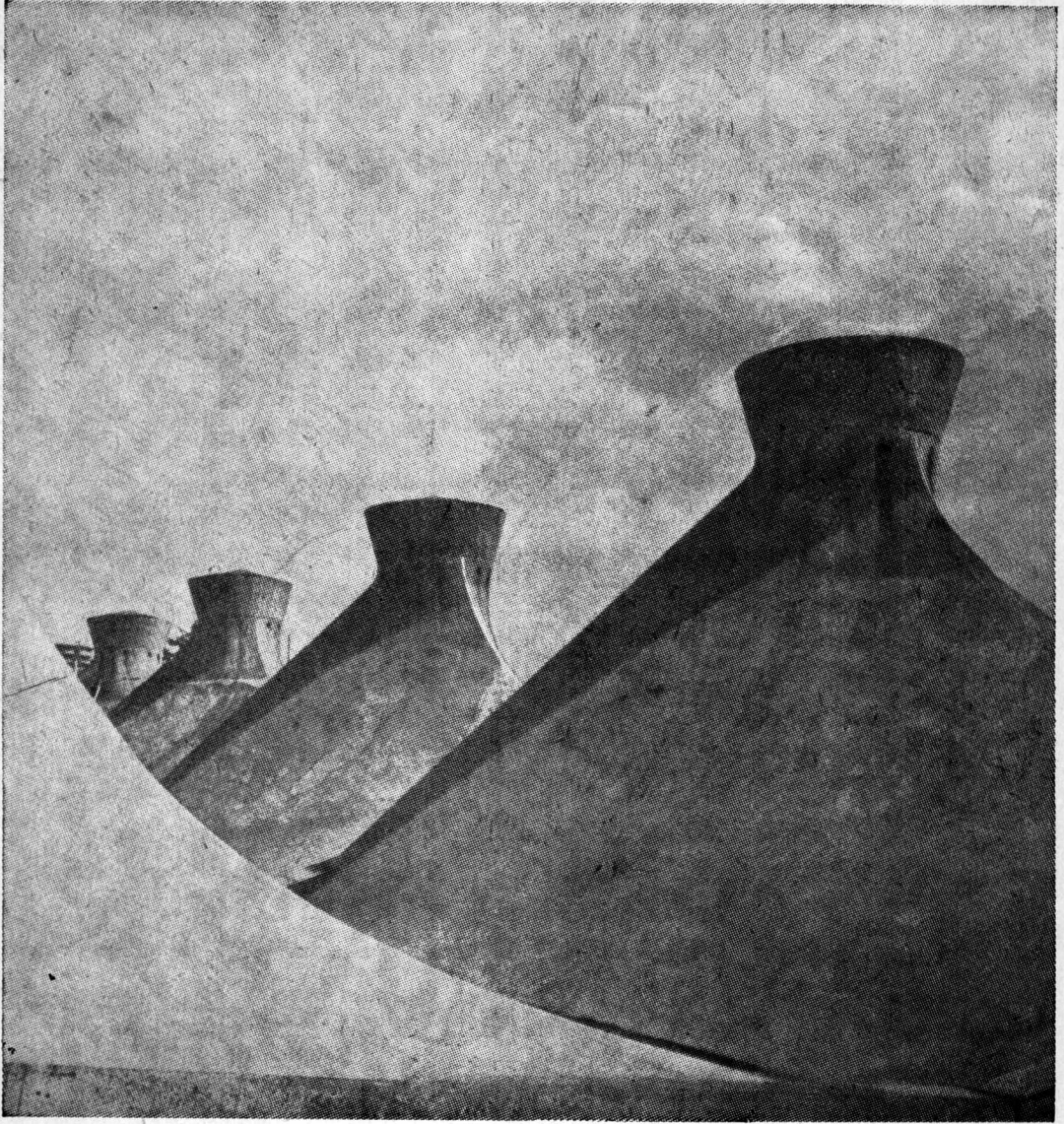


图 188 德国美因河畔洛尔的一个铸造厂的钢筋混凝土屋面[131]

1 和 3—每个屋面壳体包括两个对称的 h.p. 单元，一个采光面和一个通风罩。这个形式是为了提供良好的自然通风；
2—所采用的 h.p. 单元的图解



照片：美因河畔洛尔的一个铸造厂的壳体屋面[131]

法则指导的自由创造，也算是一个自由式造型。这里几何学只是起辅助的而不是主导的作用。平面图为圆形，当然也可以用卵形或椭圆形。

工程师将抛物线和正弦曲线结合组成波形周边截面。可选的曲线很多，但是，在着手设计以前要有一条规则，这条规则使壳体的实际施工简单化。在概念上，它完全是“自由的”。波形体只遵守下面几条：双向弯曲，同心安排拱顶式，拱的断面近乎压力线。造型“摆脱”了几何学的束缚，可是仍遵循着精确的结构法则。毫无那种任意玩弄形式的自由的迹象。

魏丁格尔和萨尔瓦多里在波多黎各（Puerto Rico）[133]设计的海滩餐室，根据的几何原则和罗扬的壳体不同。平面和断面都是椭圆形的。波形截面由上下相切的抛物线所组成，而不是象罗扬市场屋顶那样由抛物线与正弦曲线组合而成。然而两个壳体的相似是无容置辩的。虽然，总体组成有一定自由，这个型式绝不是偶然的或任意的，而是有其明确的结构法则(图189)。

在本章开始时叙述的许多设计，与罗扬市场和波多黎各餐室非常相似。坎迪拉的亭（图187）和计划中的圣路易斯修道院实际上也是同样海蚌型的结构，唯一的差别是几何尺寸的改变。即使是坎迪拉的对造型起决定作用的双曲抛物面也是服从这一法则。

极度的精炼只能出之于一个有结构知识的艺术家或一个有艺术家造型感的工程师之手。所以它是属于当代设计的范畴，同时也是设计的难题。纯粹的工程才干又伴随以艺术创造的灵感，是稀如凤毛麟角的。没有结构的实在性，设计的天才还是空的。我们的希望完全寄托在有才智的建筑师和结构专家们投身到这个可能是现代设计面临的重大课题中去，从而做出成绩来。至今这些听来还象是乌托邦的梦境，许多人怀疑“自由式造型”究竟能做出些什么来，也许只是新建筑的一时风尚而已。

因此，例如，当萨里宁勇敢地向“自由”结构造型的方向迈步时，我们应该高兴。他与安曼和惠特尼工程师合作，在艾德威尔德（Idlewild）[134]为环球航空公司（TWA）设计的航空港，就是从壳体结构真正的特性发展出来的。没有任何形象被生硬的几何图形所削弱，看不到一个圆形，直角或抛物线。新的形象及奇异的比例，以无拘束的型式展现在我们面前。可是，每个曲线和每个细部暗示出方向与秩序的整体感。我们看到重力法则，材料强度，特别是壳体设计组合成一个既协调又有独创性的格调。屋顶由飞动的双向曲面组成。从曲面边缘长出来的肋朝着支座方向渐宽，以适应渐增的荷载，同时又起着增强壳体抵制变形的作用。然而，它们并不仅仅是顶边的附属物，而且是从结构功能的整体有机地发展出来的。它们形成屋顶到下部结构的过渡，并勾出巨大而紧凑的形象，从基础昂扬直上端顶。四个壳体清楚地由采光带互相分开。但是，它们组成一个有机统一体足与造物比美(图190)。

对建筑师写的下面一段话，我们是充分相信他的，他说：“我们可以说这是一个从曲面壳体法则推导出来的结构造型问题。是一个有关塑造灵感的问题，塑造灵感指导着一切建筑因素朝向空间延续方面迈进。……这些因素流动的方式决定了用制图方法进行设计成为不可能。……用模型进行试验一直延续到最后得出答案为止”[135]。

设计支座的方法的描述值得一读。支座是用铁丝做架子，在上面“自由地”塑造，工程师在定下了合力的位置与方向，并估计了混凝土所需断面的尺寸之后（图190-3），沙里宁写道：“当我们完成了支座模型的时候，是我们最为快乐的时刻中的一个。当我们

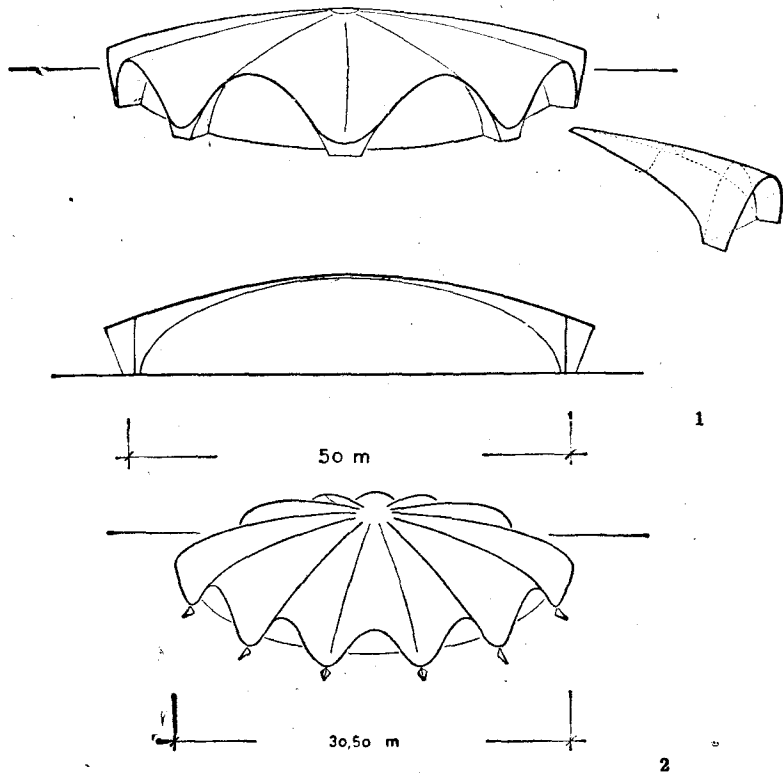


图 189 模拟海蚌的型式

1—法国罗扬的市场[132];

工程师: 萨格

2—波多黎各的海滩餐室[133];

工程师: 魏丁格尔和萨尔瓦多里

嗣后准备把它画下来的时候, 我们感到(例如平面)这些支座的造型极妙。光用制图的方法我们是永远找不到的”。

这个建成的建筑是结构型式的具体表现, 它只有在艺术灵感和工程知识相结合的情况下才能产生出来。

至此, 我们也应当谈一谈朗香(Ronchamp)教堂[136], 它可能是勒·柯布西埃最重要的作品。直率地讲, 朗香并非结构造型(图 191)。不论是带有许多小洞的厚墙, 悬挑的屋顶, 还是细部, 都一点也不表现结构逻辑。它是吸引人的雕塑, 充满了美感和诗意, 不可想象能有比它更丰富更美的设计答案。但是, 它的感染力完全在于造型而不在结构, 造型的意味并非来自结构的法则。如果批评它的墙面不真是厚实的, 或者屋顶不真是悬吊的, 那都是没有批到点子上。其实, 这就象对一个华丽的巴洛克教堂做结构分析一样地没有意义。我们知道在它们, 粉刷“外衣”, 镶铺大理石和金饰都是最重要的表现手段。好的表现手法也可是好的艺术。另一方面我们知道各个时代伟大的建筑都和结构有密切关系。技术成分越重要, 联系越密切。帕提农神庙的造型最宜用大理石。如用石膏重建, 效果将如何呢? 如果卡特雷(Chartres)大教堂用钢筋混凝土建造, 或者斯图加特电视塔造成一个巨大

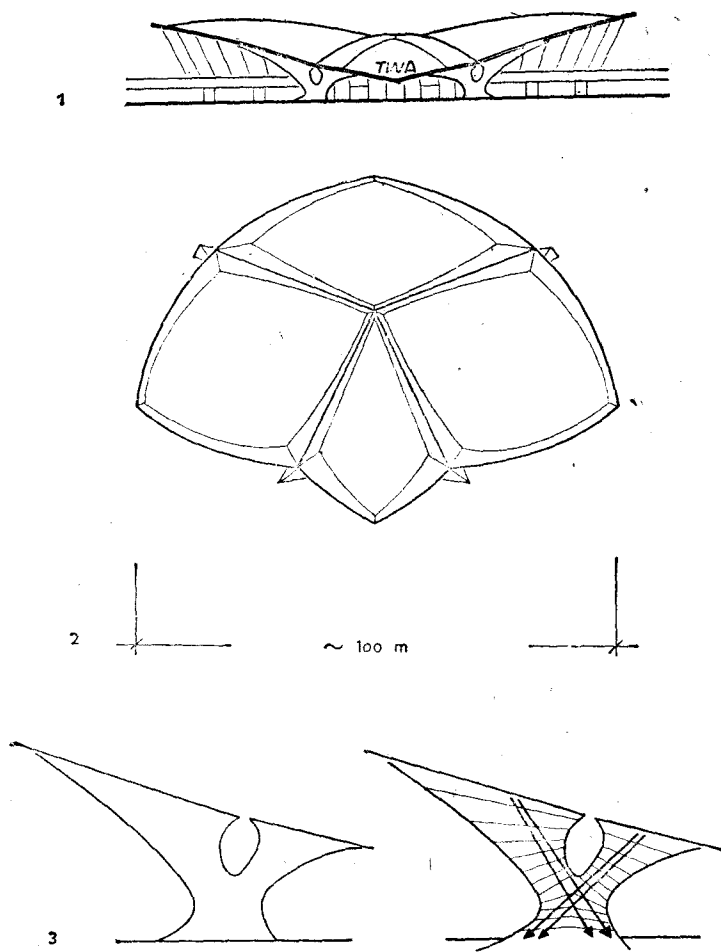


图 190 纽约艾德威尔德环球航空公司的新空港的自由壳体造型

建筑师：沙里宁

工程师：安曼与惠特尼[134]

1—从大道上看；

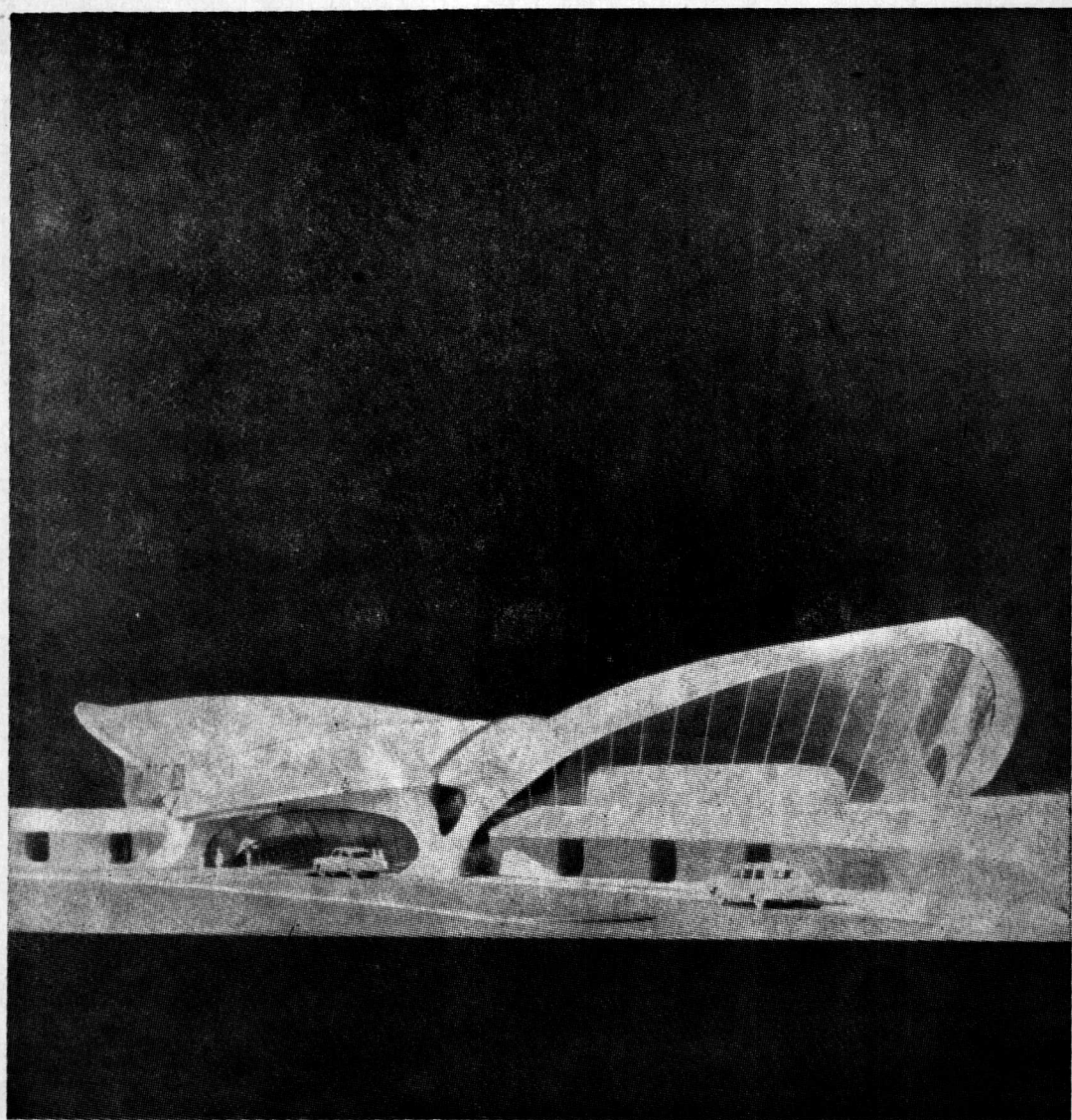
2—屋顶平面。由采光带分开的四个壳体支承在四点上；

3—支座是适应推力的方向自由塑造的

的中心藏有钢桅杆的圆筒，那有什么意义呢？这样的例子说不尽，那都是非常荒谬的。内容越技术化越令人生厌！由此，特别在现代建筑中，我们为结构造型占压倒一切的重要性作辩护证明是正当的。

朗香教堂是一个天才的出群成就，高耸于一般建筑之上。它不受规则的限制，认为它不是结构造型的结论无损于它的价值。结构造型不会失去重要性，只不过艺术作品可以不要结构造型而存在。许多艺术领域可以与结构或建筑无关。

柯布西埃在其他场合也曾创造了异常有力的结构造型，例如，在布鲁塞尔国际博览会的菲利浦斯馆，他显示出对双曲抛物面的深知是远远走在时代的前面的。



照片：纽约艾德威尔德环球航空公司航空港的模型[134]
建筑师：沙里宁

再回到受结构约束的“自由”造型。大家对这类设计的意见是有分歧的。坎迪拉坚决主张与几何学的联系不可完全消失，他甚至建议只采用完全肯定而简单的型式，他自己喜欢h.p.曲面。他认为这类结构的计算易于了解，这是为他的偏爱辩护的坦率根据。他又宣扬要绝对忠诚于分析方法。他写道：“双曲抛物面最易建造。……它是唯一的翘曲面，可用初等数学最简单的公式去计算薄膜应力。……鉴于目前可用的现有实用分析法，对于建筑中应用完全自由的造型，我是非常悲观的，只要建筑师们为了避免过多的烦恼与失望，我相信他们考虑这个问题时将会更冷静一些。自由曲面藐视简单的分析。……有些人宣称如果数学分析太困难，总可以转而求之于模型试验。我个人从不依靠这种方法，因为问题不在于寻求结构的内部应力(一般都很小)，而是边缘的力。……我看不出如何能用

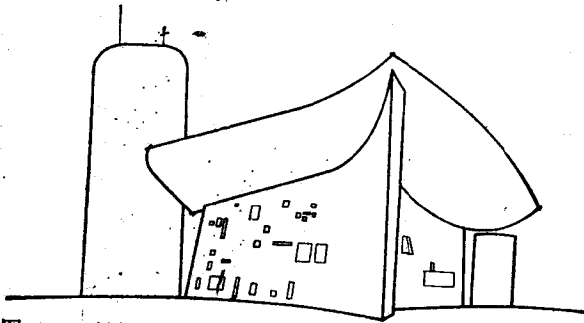


图 191 虽然勒·柯布西埃在法国朗香礼拜堂的设计[136]是一个伟大的艺术作品，它不是一个结构造型，而是建筑尺度的雕塑

小尺度的模型试验达到此目的。……唯一的办法就是去计算应力。但是，只能用可靠的方法而不能用于材料的变形可能性作出的含糊假定。所以我个人只相信力学与几何学。为了不考虑结构的变形，我们必须采用复合面……但是，h.p.是唯一可用简单力学分析的复合曲面。这是比造型的优美更正当合理的”[137]。

关于坎迪拉的作品我们谈了不少。托罗加(Torroja)的意见就完全不同，他在马德里学院完全依靠模型试验。他写道：“关于屋顶，目前的建筑进步地趋向于较多变化的曲面，而不顾计算上的困难……”[139]。他引用为南美塔其拉(Tachira)俱乐部做的方案为例：“在分析这个曲面时，存在不能解的微分方程的困难，迫使我们计算局限于暂时的大约估算。”在这种估算的基础上，托罗加开始建造模型、进行试验，以达到最后的方案。他认为，运用从模型试验发展出来的一套分析技术，来确定一个不平常造型的壳体的应力和稳定性，总是有可能的(图192)。

许多工程师对这种方法没有信心。他们主张数学分析，对好的工程师来说是唯一的、真正严肃而可贵的方法。另一方面，1957年在奥斯陆(Oslo)举行的壳体结构会议上，托罗加在他的报告的结束中说：“总而言之，我认为改进典型性形式，如圆柱体和其他标准曲面的分析方法是多么地重要。但是，我们也应该试求新的发展，……所以，每天都必须准备面临新的和更复杂的问题，并去发掘所有的资源，材料，技术等等”[139]。从他在马德里学院实行的纯粹实验方法中[140]，我们的结论是，他所指的广义来看是全世界已经逐渐普遍采用的实验力学。

坎迪拉的方法虽然是分析性，但限于初等几何，特别是双曲抛物面和简单的力学体系。而托罗加喜用的实验方法则不同于前者，经常应用比较抽象的数学的技术。这个方法是从应力状态和壳体的微分单元的变形出发的，达到为特殊几何型式取得通解，在一定程度上它包含较难的数学处理问题。很明显，这种方法不会促进新型式的发展。一旦为一个特殊型式吃力地获得一个通解，工程自然希望尽量重复运用。如果不这样，对他来说倒象是

轻举妄动。造型并不是表面性的东西，它还可能比计算方法更重要，但是许多工程师拒绝承认这一点。这就是为什么在德国当壳体结构开始时，新型式的发展进度如此之慢，甚至可说是在停滞状态中。

至于对探索造型而言，富于创造的设计师对于力学分析法的选择是比较不关心的。纯粹数学的分析包含零碎解决问题的危险，而失去整体的概念。简化假定的需要和把复杂计算分成一系列孤立步骤的需要，容易导致造型地位的降低，使它成为分析原则或计算方法的必然结果。设计师希望排除弯矩而获得简单的薄壳状况，决然在理论上将边缘构件从实际壳体脱开（参看图146），从结构造型而言，肯定是错误的。从结构统一性的角度来看，边缘构件和壳体应当结合为一个整体。问题是如何做法。至今分析的方法还不能解决如何获得正确型式的问题，实际上还没有精确地提出这问题。但是，希望将来系统的模型实验将引导我们沿着这条路走上去。无疑地，最终方法都是相互补充的。不论是实验的还是分析的，每种思路和各种方法都是有活动余地的。研究的范围如此之广，对各种性格和各种观点都是有事可做的。

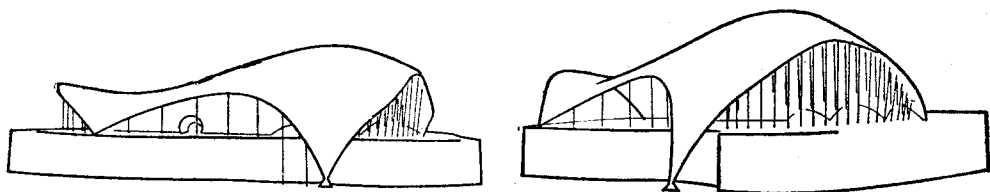


图 192 南美塔其拉俱乐部的设计，虽然是一个很奔放的设计，但是仍具有结构造型的一切必要条件。工程师为托罗加 [138]

如果我们不去理会那些富于旋转弯曲的时髦建筑风格，而限于那些其中结构型式的因素明显的“自由型式”的话，那么能挑选的例子就很少了。卡斯蒂略尼的那不勒斯火车站是个了不起的设计，其结构概貌已经在第二章中讨论过（图113）。它的屋顶的自由造型见240页上的照片。奈尔维与卡明诺斯（Nervi-Carminos）为塔库曼（Tucuman）大学的设计[141]和悉尼（Sidney）的新歌剧院设计[142]也值得一提（图193），但对后一个设计至今只能从很小尺度的初步模型照片中得到一点概念，这个设想是否能展现为一个伟大的结构造型，我们将在以后一定的时候才能看出。

我们建筑学院的设计室有很多优秀的作品，表现出许多卓越的设想，可惜只停留在纸片模型阶段。在马德里托罗加研究所一个学生的创作[143]是一个很好的例子（图194），他将三个壳体聚集成一个杯形，壳体本身与已知的几何图形都不相关。但是，与此同时，它们的结构的来源却表现得很清楚。三个壳体是明显的双曲马鞍形面，它们悬挂在向外倾斜的三根桅杆上，又挑出很远。弯曲的边缘表明有意避开常规几何图形的约束，而取得更接近自然的造型。支模以及建造这种型式的困难是另一件事。这个设计对发展自由的而结构上还是可定的造型有贡献，在此提及，是为了引起人们的注意。

为了和我们所谈的既是“自由的”又是结构的造型做对比，图195示出一些草图。许许多多这类自由型式表现出的是狂想与任性。用这类结构的一些草图结束本节，目的是使读者认识它们，并把它们和我们所说的真正的结构造型区别开来。



照片：那不勒斯火车站的设计[51]
建筑师：卡斯蒂略尼

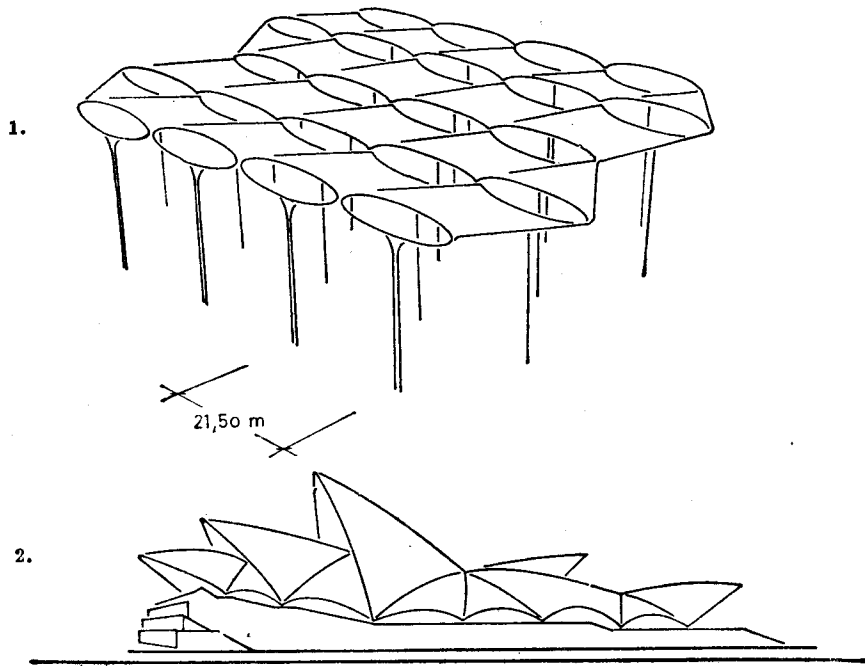


图 193 不同用途的自由式造型

1—阿根廷塔库曼大学礼堂的设计；
 建筑师：卡明诺斯；工程师：奈尔维和巴托利(Bartoli)[141]
 2—悉尼新歌剧院的设计[142]

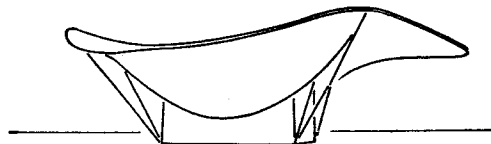


图 194 托罗加建筑学院一个学生的马德里一个航空港设计[143]

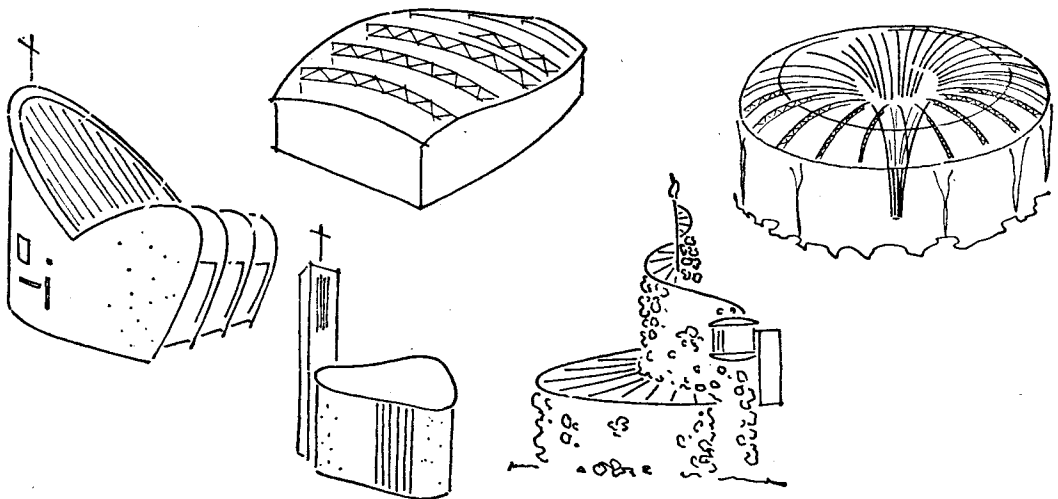


图 195 当结构原理被忽略时，结果是一个任意的造型，它可能说是雕塑，但很难认为是建筑

悬索结构与网络结构

缆索用到建筑上的想法是从悬索桥来的。照我们原来的定义悬索桥是“平面体系”。自从第一座悬索桥建成以来，虽然已经有很多年了，而缆索最近才应用于屋顶结构，用了一个新造的名词“悬吊屋顶”。但是，除少数例外，据我们了解，用“悬吊屋顶”来说明缆索屋顶并不准确。这个新型结构的主要特点不是“悬吊”，而是将成组正交的缆索张拉而成相互反向的曲面，从而产生三维稳定性的体系。

这类结构与壳体显著不同，在自然界中很少相似的物体，也许蝙蝠翅膀或水鸟的蹼有些相似之处。而蜘蛛网是一个“平面体系”，它的作用过分依靠它的弹性变形，这就难与缆索屋顶相对照。在人工制品中帐棚和帆与空间缆索结构最相似。可分为以下几类：

1. 单向曲面屋顶，其稳定性全靠自重或辅助加劲杆件。将它们划为空间结构，还有一定的保留。
2. 双向弯曲的缆索体系，其稳定性来自预应力。
3. 缆索与压杆组合的体系。
4. 帐棚。

单向弯曲的悬吊屋顶 单曲悬吊屋顶的作用象一组平行的悬吊缆索。每根缆索在自重下变形，与相邻者无关（图196-1）。如果一系列刚性的横向构件铺在这些缆索之上（图196-2），这些缆索才能起到整体的作用。但是，出现振动或不对称荷载时，也未必是刚性的（图196-3）。风力产生的振动可由增加结构自重来平衡，但并非经济的办法。不对称荷载下的变形只能用横向构件端部施加竖向拉力（图196-4）的措施加以消除。但是，这意味着牺牲原来的清晰概念。荷载的不对称部分传递到加劲作用的刚性横向构件上去，而不是由悬吊缆索负担。

这类单向的曲面屋顶也有用混凝土浇制的（图197）。结果是一个顺悬链线的单曲悬吊壳体，这个壳体相当于原第188页图151所叙述的短薄壳，只是方向相反。荷载以拉（压）力方式沿着悬链线（压力曲线）传递到结构两端的连续支座上去。荷载中可能产生振动或使屋顶变形的所有不对称分力，由壳体的加劲作用分散到边缘上去。此处，为了对照，可以解释为一系列平面单元折缝相接（图197-1）。屋顶曲边起的作用与短薄壳的加劲肋相同。所以，它们必须非常刚劲或有效地被支承住。用悬吊屋顶的建筑，外墙设支柱是方便的，因为支柱做为窗棂或墙架总是有需要的（图197-4）。

此类单向弯曲的混凝土壳体之所以称之为壳体，因为它的作用更象壳体而不象悬吊屋顶。它们相当重，然而，真正的缆索结构最受欢迎的是它的轻巧性。再者，荷载经过非常迂回的路线才到基础。拱形短薄壳（图151）中大部分荷载沿着压力线直接流向基础，但是，单向悬吊壳体的荷载的支承点虽然避开屋面覆盖的地面，但它并不直接传到基础，而是集中在两端的最高处。此处必须设置拉杆（图197-2）或刚性鳍去抵抗产生的水平力，或者荷载必须由屋顶平面中的加劲桁架承受并传送到边缘，在这里与适当的受压边缘构件取得平衡（图197-4）这些边缘构件的作用象倒转的拱，它们将附加竖向压力引到外柱。这些力流路线相当复杂，因此，很难在建筑上表现出来。单向悬链曲面是与熟悉的悬索桥的

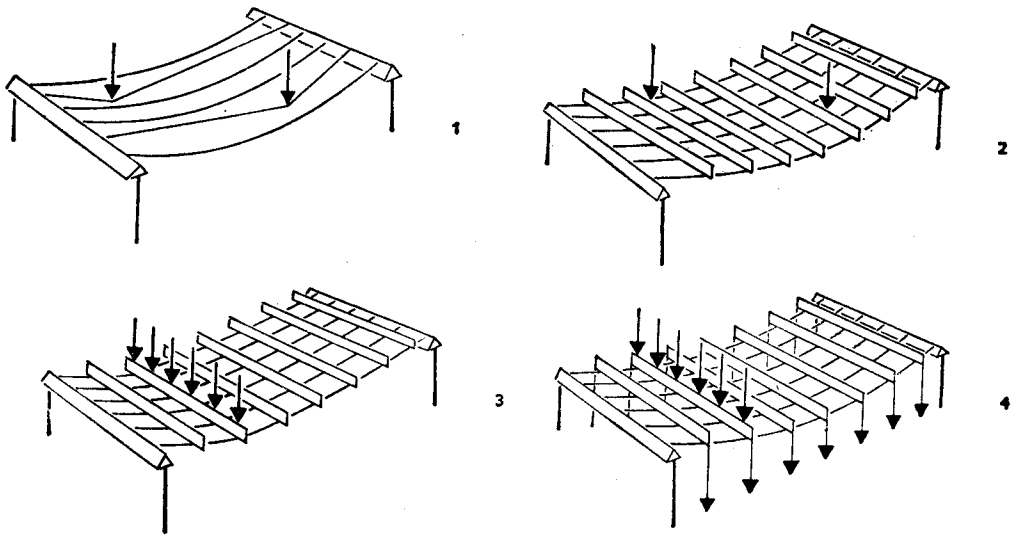


图 196 单向悬索屋顶

- 1—在荷载作用下，每根缆索孤立变形；
- 2—为了使所有的缆索共同作用，必须加上横向加劲肋；
- 3—即使采用加劲肋，在不对称荷载作用下结构仍不稳定，
- 4—只有将横向加劲肋的端部向下拉紧，才可以完全保证结构的稳定性

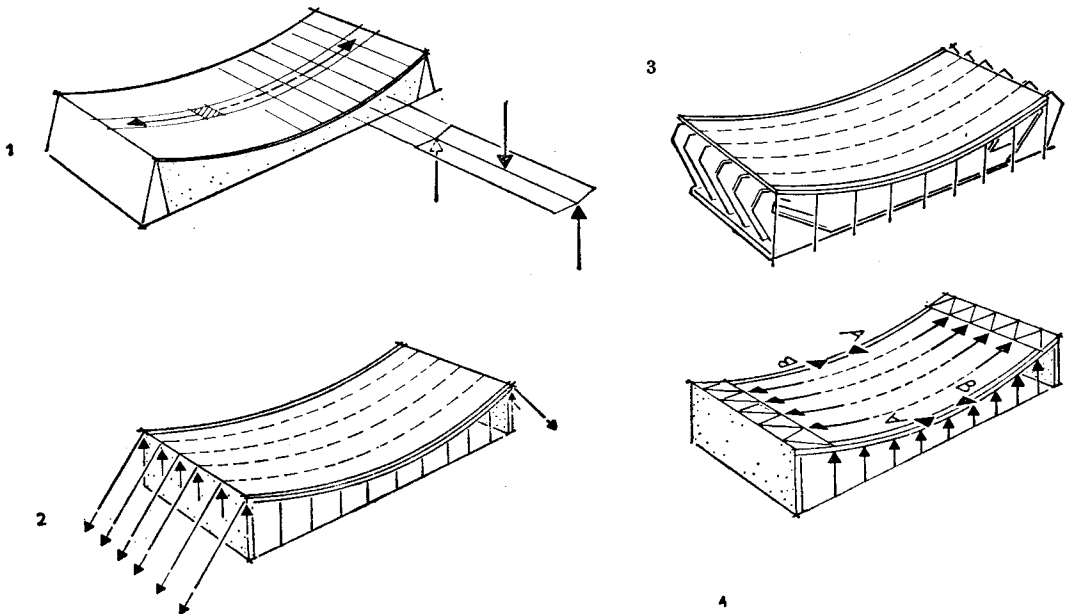


图 197 单向悬吊的混凝土壳体可以视为倒置的短薄壳（图151）

- 1—对称荷载以纯拉力形式传递到结构的最高处，不对称荷载由壳体的曲度（参考折板结构的作用）传递到边上去；
- 2—集中在结构高处的荷载必须由象在悬索吊桥（第242页）中那样的拉杆（它们沿着屋檐产生竖向分力）承担，或者；
- 3—由混凝土鳍承受弯矩，或者；
- 4—由屋顶平面中的大桁架承担。在此例中，桁架的反力A和B与壳体相切，它们由受压的侧边加劲肋所承受，后者的作用如同倒置的拱，将压力传到外墙

平面体系有密切连系的结构型式，它们只能有保留地被称为空间结构。

在乌佩尔塔耳（Wuppertal）游泳池的设计中[144]将缆索埋在混凝土内以免腐蚀（按照定义应当称之为悬索壳体）（图198-1）。如图197所示，它的作用象一个倒置的短薄壳。

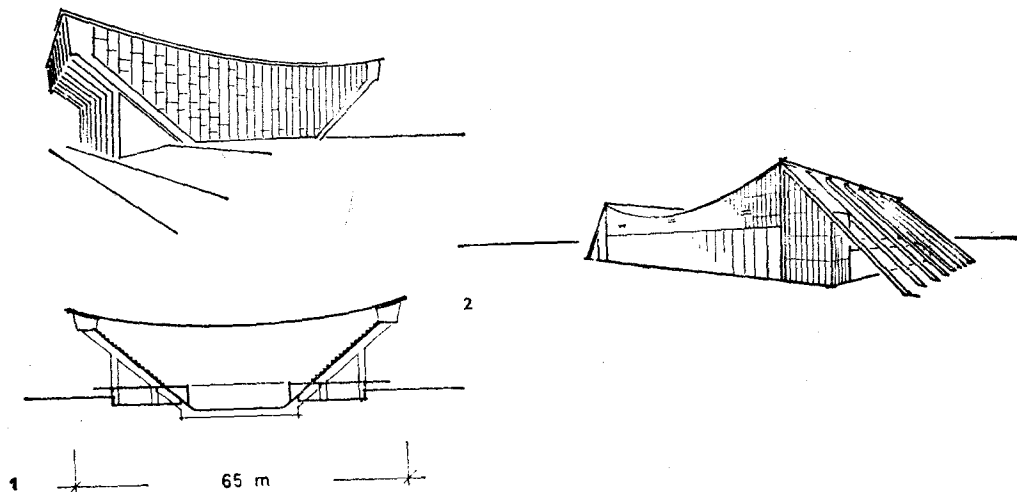


图 198 悬索壳体的实例

1—乌佩尔塔耳的游泳池[144]，结构原理大体与图197-3所示相同；
2—一个飞机库的设计原理根据图197-2所示[145]

这种清晰明确的结构也有恼人的各式各样无意义的仿制品。图199是这些例子。

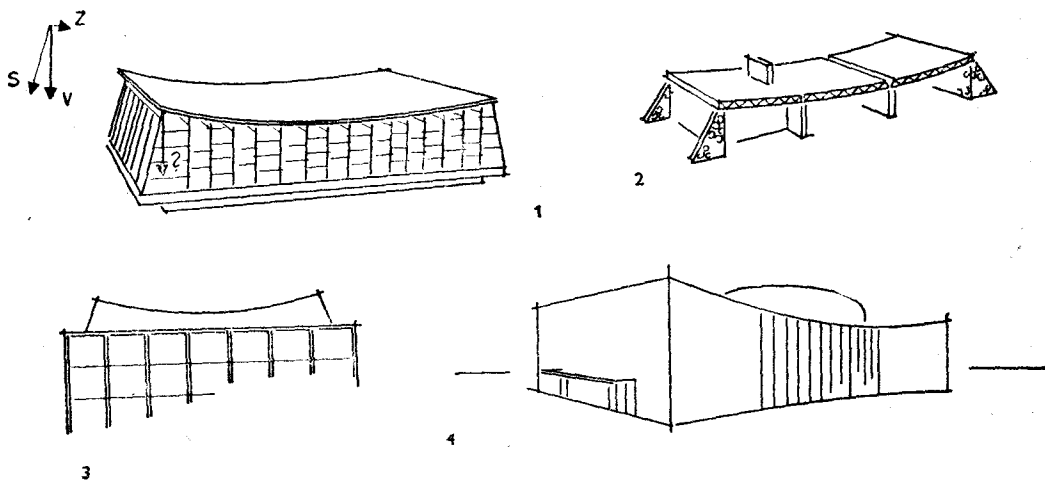


图 199 一些形式主义的设计，外形模仿悬吊屋顶，而结构原理却被误解

- 1—从缺少承受悬吊屋顶法向反力的有效措施上，明显看出结构的不忠实。切向力 S 不能在斜端墙方向起作用，因为没有抵抗竖向分力 V 的措施。实际上，屋顶是一般的梁板结构。建筑物的斜向短边是错误地模仿图197-2和198-2所示的型式；
- 2—在此例中毛石砌成的扶壁（用在应当承受拉力之处）表现形式主义走到荒谬的极端。很明显，屋顶必须承受在跨于承重墙间的桁架上。支撑一个悬吊屋顶如同悬吊拱顶一样荒谬；
- 3—一个虚伪的悬吊屋顶落在骨架结构上，外形用于错误的地方，而且结构内容也被忽视；
- 4—悬吊屋顶的上面加了个大礼堂的上部建筑，其造型绝不会是真实的

与单向悬吊壳体不同，一系列平行的缆索在两个支座之间拉紧，没有什么意义。这类结构由于风雪造成不对称荷载的威胁和振动的危险，经常需要加劲如图 196，而加劲的方式却又违反它的本质。另一方面任何马鞍形曲面一目了然，显出双向弯曲的缆索网络的真实意义。

双向相反弯曲的缆索体系 巴西利亚 (Brasilia) 的南里奥格兰德杜·苏尔 (Rio Grande do Sul) 展览馆 [146] (图 200) 贯彻了这个概念。纵向的主索以悬链线的形状挂在两个横向圆拱之上，索的尾端成束锚固在地下。圆拱之间的主索并不是平行排列，而是由一系列横向联系索向心地拉向建筑中轴，这些横向索都是圆弧段。最后结果是一段完全确定的旋转体。由于横向索是竖向排列的，在与主索交叉各点上，反力的切向分力还缺少对它平衡的

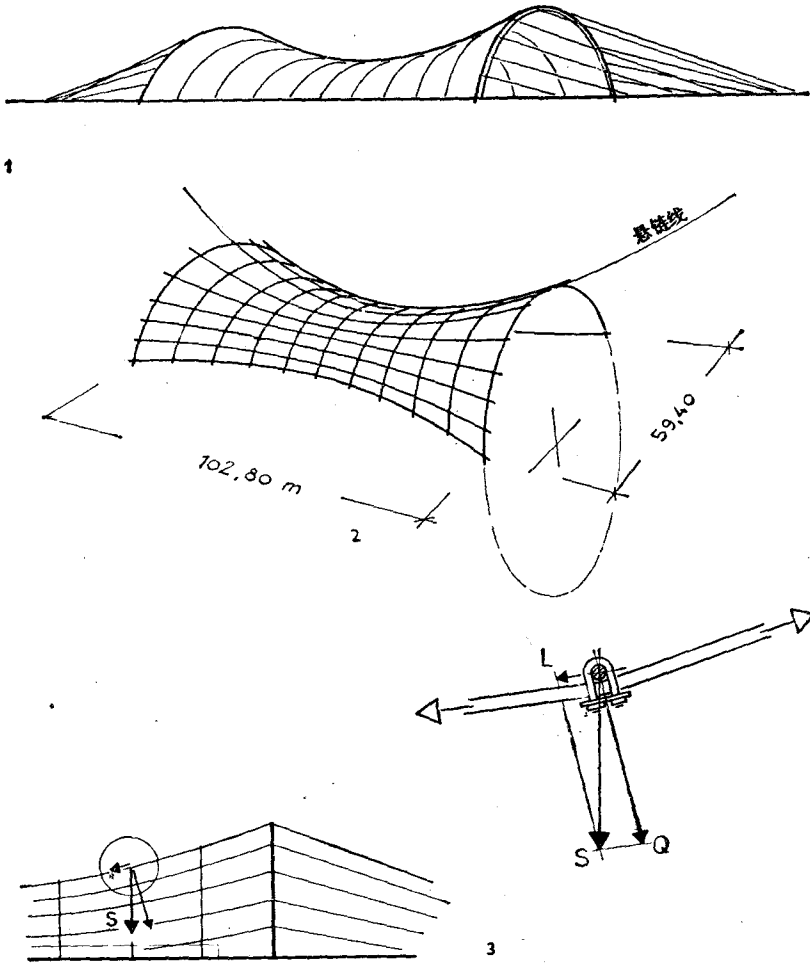


图 200 在巴西利亚的南里奥格兰德杜·苏尔展览馆 [146] 包括两组相反方向受拉的缆索。主索形成悬链线，横向联系索成圆弧段。除两端的受压拱外，结构全部由受拉缆索构成

1—透视；

2—型式的几何图；

3—缆索交叉点的力的图解，作用在竖向平面的联系索对主索施加的力 S ， S 分解成与主索正交的力 Q 和沿着它的力 L 。在 L 的作用下，联系索将沿着主索下滑，但它被一个夹钳扣紧，不再滑动



照片：北卡罗利纳（North Carolina）瑞利（Raleigh）运动场[147]
建筑师：马修·诺维基（Matthew Novicki）

力，因此，联系索将沿着主索下滑（图200-3）。为此，工程师设计一个特殊夹钳，在交叉点将缆索扣紧。这样，保持了原定的几何形状，计算与结构细部也得以简化。型式与预应力屋面的原理完全一致。除两端的圆形受压拱外，结构上的缆索全部受拉。

南里奥格朗德杜·苏尔展览馆的精确几何图形很象上节中所讨论的旋转壳体，看来不大生动不如从旋转面中切出来的马鞍形表现力要强得多。诺维基在他的瑞利运动场设计中充分认识到这个事实及其对结构与造型的一切影响[147]，这个结构已成为缆索屋顶的典型（图201）。一组缆索悬挂在两个受压拱之间，另一组与第一组正交并且拉紧，结果成为有空间刚度的网络结构，交叉的两组缆索共同承受屋面重量，这个双曲面虽然没有承压和受弯的构件而只有受拉的缆索，但仍有足够的刚性，这个概念意味着屋面结构的自重可比通常降低很多。

一个只有6厘米厚的钢筋混凝土薄壳，包括屋面材料在内，自重不少于160~170公斤/平米，而瑞利运动场屋顶的自重只有30公斤/平米。当然，象这样轻的屋顶，自重小于雪载与风载，它有被掀起的危险。诺威基的屋顶能抵挡这种趋势，归功于张拉网络的空间刚度。屋顶的曲度越大，刚度也越大。那样不寻常的轻屋顶减少了下部结构和基础负荷，因此降低了造价。架设缆索可以不用脚手架，大大地简化了施工。当然，对我们来讲，造型轻颖是更令人感兴趣的。通过受压拱的荷载传递路线，既清楚、经济、合理而又富有表现力。（图196的单向悬吊屋顶中力的传递路线就比较曲折）。悬索和联系索与拱中的力平衡，两组缆索也相互平衡。部分拱自重用于张拉悬索，部分成为在拱本身方向的受压分力。由缆索和拱组成的网络是一个紧密整体，当荷载对称时，甚至不需要外墙柱来支承担。

诺维基在初步设计中，采用向内倾斜的立柱，这将有助于避免人们得到那种以为立柱确实承受屋顶荷载的错误印象。不幸在建筑师早夭之后，这一点被取消而代之以垂直立柱和平行窗条的方案。如果将外墙柱折向外凸，或其它办法，例如不用外柱，而代之以受拉的缆索，绷紧在与外墙取平的一根水平拉杆上的话，则外柱摆脱荷载的趋势，可能表现得更加惊人。

在两个倾斜拱之间受拉的瑞利马鞍形就成为“悬吊屋顶”的典型，或更正确地称为双向相反弯曲的“受拉缆索屋顶”。后者说明对这类结构注意屋面形状比拱的形状更重要。如果我们去追求最大整体刚度的马鞍形曲面，显然会采用双曲抛物面。但是，瑞利运动场的屋顶不是一个h.p.面。选用抛物线形的拱（双曲抛物面应该是双曲线，参看图175）和几乎是与之相切的悬索，使屋顶上部展开的面不是h.p.而是非常平坦的（图201-5）。最初，这样平坦会产生一定程度的掀动，以后因为悬索下垂，掀动就消失了。这些意见并不是要贬低象以瑞利运动场为代表的创举，目的只是提请对造型的结构性内容的注意。

柏林大会堂[148]的造型有些类似瑞利运动场。使人想象结构原则是相同的，缆索网络拉紧在两个拱之间（图202-1）。事实上，它确是原来的意图无疑。建筑师的想法是大会堂屋顶应该是轻巧而脱空挑出外墙。当然，想到的是两个受压拱之间张拉的缆索屋顶。此处要求屋檐自由地挑出，就不能象瑞利运动场周边安排支柱，因此，在不对称荷载下就不稳定（图202-2）。解决这个问题的办法是加劲中心部分。会堂外墙之上设很大的环梁，环梁与拱的两端点刚性连接（图202-3），然后，再用悬吊的钢筋混凝土薄壳将这个骨架盖住。

建筑师不愿放弃将屋顶悬吊于两拱之间的原意。实际上，这些拱已经建成，但它们只

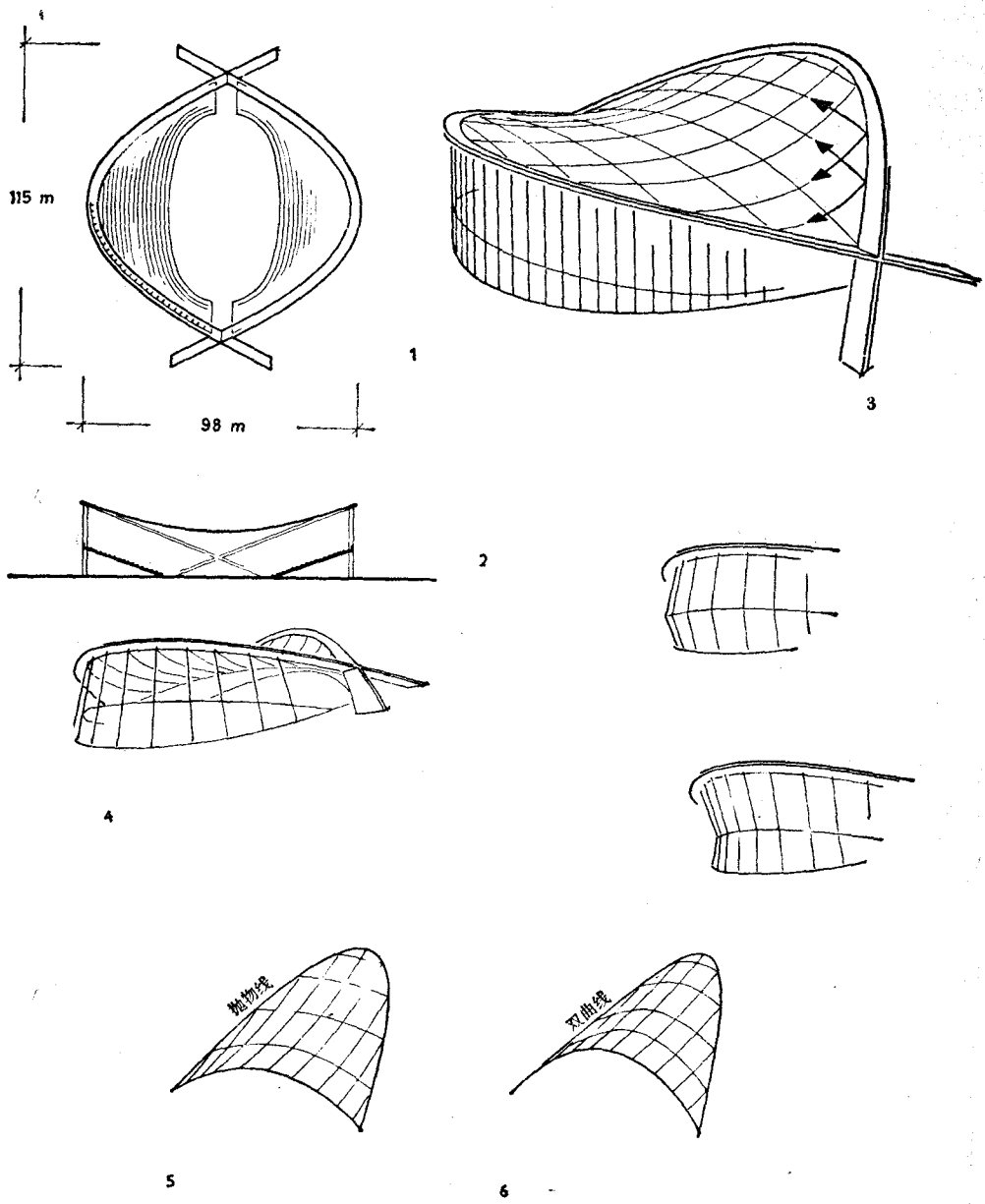


图 201 北卡罗利纳州的瑞利运动场。两组反向弯曲的缆索拉紧
 在两个倾斜的抛物线形的受压拱之间
 建筑师：诺维基；工程师：塞维罗特（Severud）、埃尔斯塔特（Elstad）和克吕
 格尔（Krueger）[147]

- 1和2—平面和剖面表明看台和屋面本身都向着拱顶渐升；
- 3—在对称荷载下，受压的拱和受拉的屋顶平衡。承重外墙只在承受不对称荷载时有用；
- 4—诺维基的最初方案之一，周边承重墙倾斜而不是垂直的，以减轻承重屋顶荷载的印象。
也可以外柱上引进折角以达到同样的效果；
- 5—马鞍形屋面不是一个h.p.，上面部分相当平坦；
- 6—如果是双曲线的拱，就可以使屋顶成为真正的h.p.，则既增大曲度又增加整体刚度

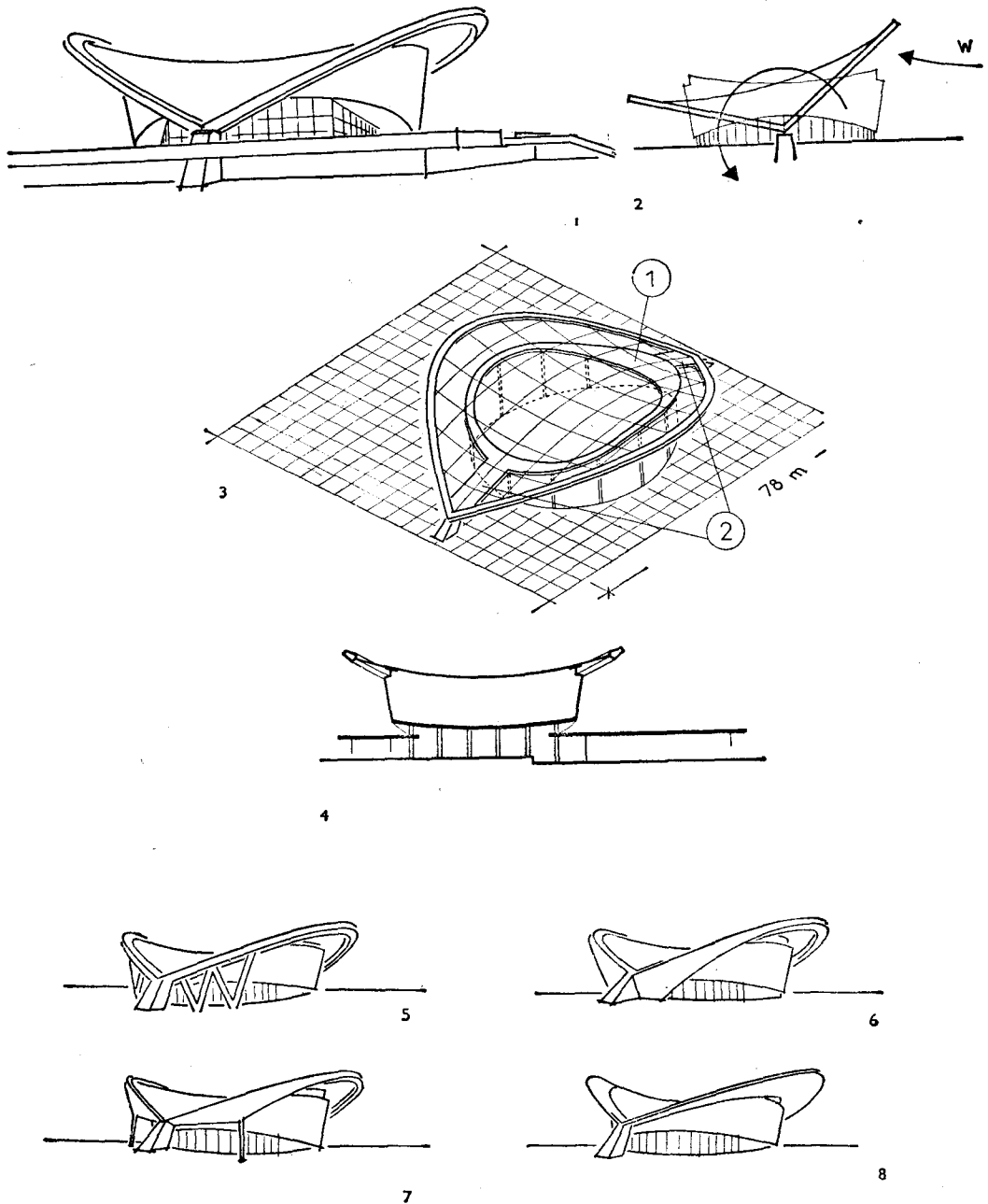


图 202 虽然柏林大会堂[148]的屋顶给人的印象是悬挂于两个受压拱之间的缆索网络结构，而实际上是一个混凝土薄壳

- 1—立面图；
- 2—一根受拉的缆索只支承在两点上，在不对称荷载下会失稳；
- 3—大会堂上的薄壳屋顶悬挂于一个巨大环梁①中，它与拱的两端点②刚性连接；
- 4—拱拉向环梁，环梁保证拱的稳定性；
- 5、6和7—按照原来的设想，如果拱在不对称荷载下能做成自承的，屋顶就可以建造。或者；
- 8—如果放弃拱的概念，大会堂本身就用来说提供必要的稳定，而屋顶则从外墙悬挑出来

承受屋顶的静重。从风雪来的不对称荷重，即此设计中的临界荷重系依靠上述这根巨大环梁来承受。这是使建筑物稳定的唯一保证。为了确保拱向后拉住的有意效果，环与拱之间的混凝土屋面和会堂主体屋面，不得不用接缝分成许多窄条；否则，屋顶的作用将如一个薄壳，拱将在牺牲悬吊效果的条件下起作用。为使主体屋面至少部分地起悬吊作用，将壳体屋面沿着屋脊，又以一条缝一分为二。就这样，防止了壳体在横向起拱的作用，多少不得不悬吊于两拱之间。但是，连续的薄壳的作用应该是不同的。这一系列的修正如此复杂混乱，以至掩盖了原则，并损害了本来强有力的结构造型的统一性。我们想象的是一个强有力的悬吊于两个大拱之间的屋顶，我们设想这是设计的核心，而现实恰好相反。屋顶实际上是一个混凝土薄壳，它的中部由一个巨大的环梁加劲。拱被拉向环梁，后者是稳定性的唯一依靠。

针对不对称荷载而使结构稳定，采用下列任一方式都可能好些：或将屋顶与大会堂本体分开，并给予它一个内在稳定的造型（图202-5、202-6、202-7）。或将屋顶与大会堂溶合一气，就是，利用外墙和所支承的环梁的三维稳定性，与此同时删去多余的拱。而拱的位置可代之以脱空挑出于大会堂周围的悬臂壳体（图202-8）。

我们感到遗憾的是这样美好的设想，竟因急于完工而未能成熟，限定完工日期是所有完整设计的公敌。我们更惋惜的是，从其他各方面来讲，这是大战以来德国建造的最好的结构。

上述两个实例，瑞利运动场和柏林大会堂，说明赋予这样新颖结构以协调的造型是多么艰难。在技术困难的面前，放弃基本的结构原则是多么容易，不可避免的恶果是结构与型式不协调的连锁反应。设计上不可改变的逻辑和造型上的简单朴素，是进一步取得成就的唯一希望。

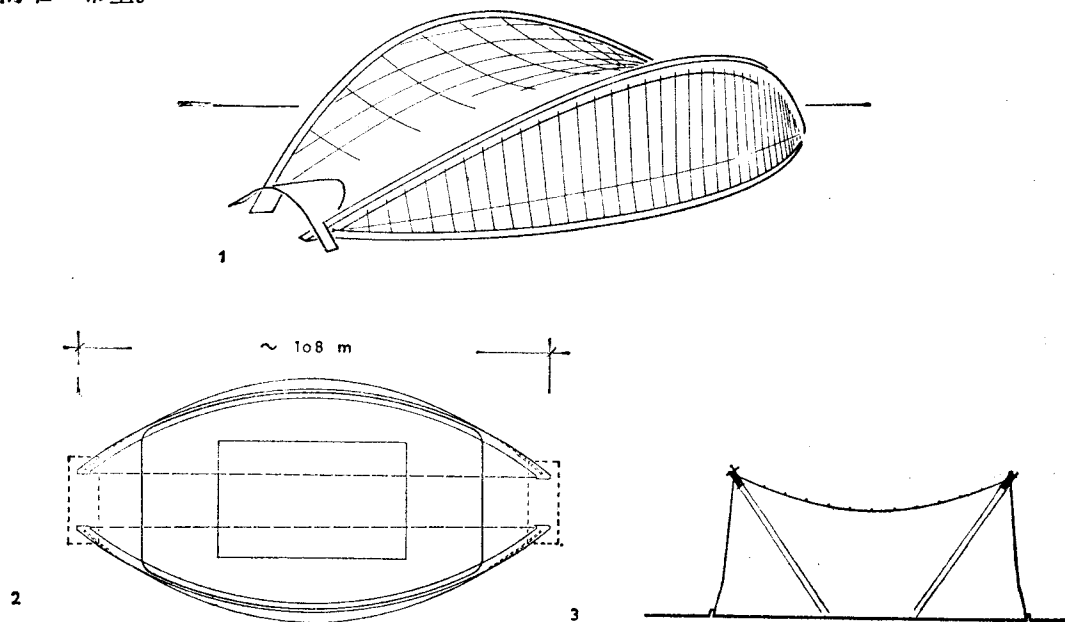


图 203 巴黎一个运动场的设计[149]

1—棚在两个纵向受压拱之间的马鞍形屋顶和缆索网络的边墙，除混凝土拱外，缆索是采用的唯一结构因素；
2和3—平面图和剖面图说明拱的推力是如何传递到地下连成一起的共同基础上的

在巴黎离开圣乌昂 (St.Ouen) 展览馆 (图 161) 不远的地方将建造一个运动场, 这个设计已委任给萨格建筑师。双曲缆索的网络绷在两个顺运动场纵向的受压拱之间。对瑞利运动场和柏林大会堂的平面来看, 拱纵向比横向好。萨格的设计实际上就采用了这个概念。这个设计也不用柱支撑拱, 也不将拱拉向巨大的核心环, 而是凭着缆索结构的真实精神, 用从拱到拱和从拱到地的受拉件将拱稳住。两拱将总的压力传到共同的基础上, 这个基础是沿着运动场纵向在地下互相联系在一起。我们深信, 没有什么知识上的不足, 也没有什么不可克服的实施困难, 足以妨碍这个大胆设想的坚决实现 (图 203)。

目前萨格正在为摩纳哥 (Monaco) 设计一个室内游泳池 [150], 那是在轻巧与优美方面无可匹敌的结构。只有受拉缆索的网络是考虑为永久性的; 夏季将塑料屋面移去, 留下缆索, 作为挂灯和节日彩旗、花环之用 (图 204)。

主索在纵向悬于两个钢制的横向拱之间, 一组联系索横向铺在主索上。在建筑物的两端, 悬索的拉力通过拱传送到另一组形成外墙的缆索, 后者用高强度的预应力钢筋与基础拉住, 结构受到拱与基础两者自重的拉力。由于起拱端点的铰支, 拱将能承受最终的位移

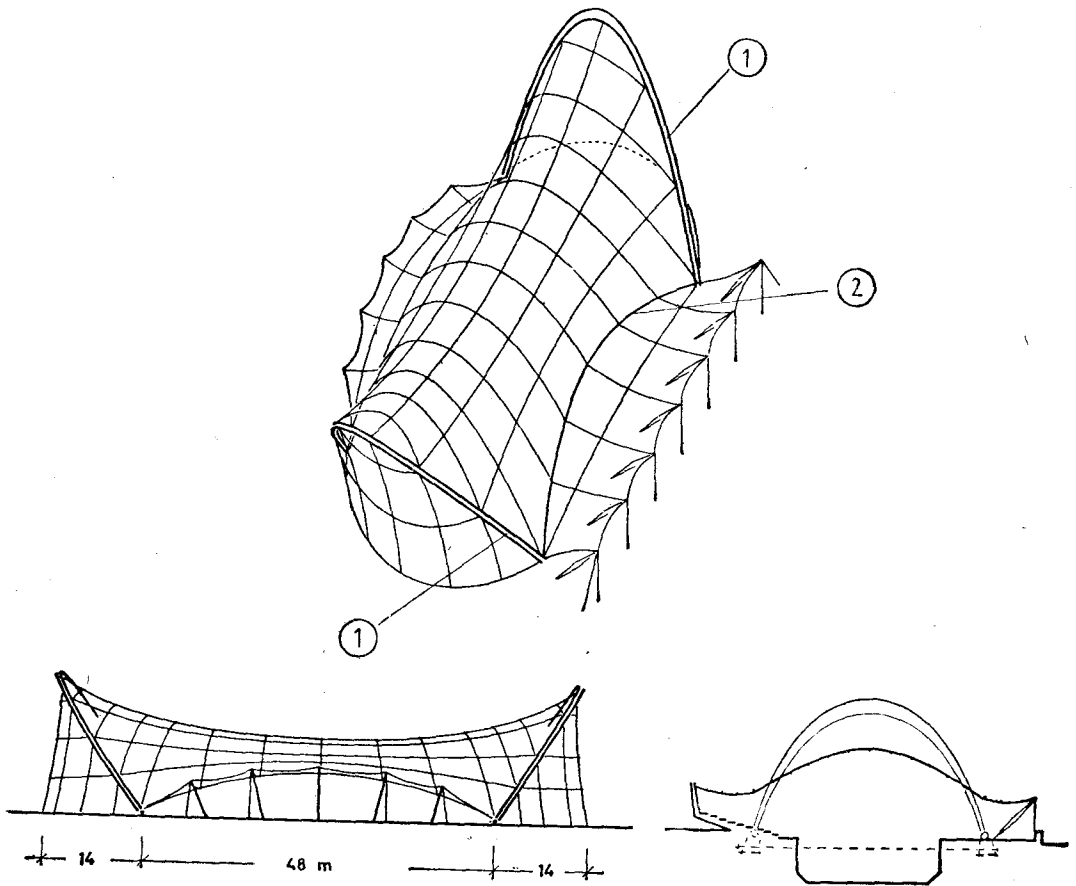


图 204 摩纳哥的室内游泳池 [150]

双曲缆索网络在两个受压拱①之间拉紧。屋面只是透明的塑料薄膜, 夏季薄膜将移去。建筑物的长边是敞开的, 两拱端点之间张拉一根主索形成一个屋谷②, 两侧的贴附屋顶(也是缆索组成的)在屋谷线与主屋顶会合

而不会产生扭曲。两侧的贴附屋顶与马鞍形的主屋顶连成一条明显的谷线。在这条谷线上，从两端拱脚之间张拉一根主索，这根缆索象一个“受拉的拱”对结构起加劲作用。贴附屋顶在两向相反弯曲，但是，与主屋顶成为明显对比的是它在横向下垂而在纵向拱起。贴附屋顶的边缘缆索经过一系列斜撑杆而到钢拱拱脚。垂直受拉件将这些撑杆拉向基础。除钢丝与钢索外，所用的结构元件就只是两个拱和两行短的斜撑杆。

屋面将是重1公斤/平米的塑料膜，由许多500平米面积的段落组成，这些段落又分成许多块，形状完全符合各自的双曲面几何图形。块与块之间缝住并贴牢在一起，组成的较大单元，正交于脊线方向，相叠搭接成不漏水的屋面。

对许多人来讲，这个“建筑”好象是乌托邦似的或完全是错误的。但是，没有一个有先见的人会闭目不见这样的现实，就是这些新颖的造型是以非常明确的结构观念为根据的，从长远来看，必将证明这些观念是正确的。

不可避免地悬吊屋顶必然成为那些时髦建筑师的招徕节目。1958年布鲁塞尔博览会就是一堆误解的结构和无头脑的仿制品的橱窗。在这些货品展出中有的悬吊屋顶(不是壳体)，因为不理解这种型式的基本作用而将屋顶在同向而不是反向双曲(图205-1和图205-2)。

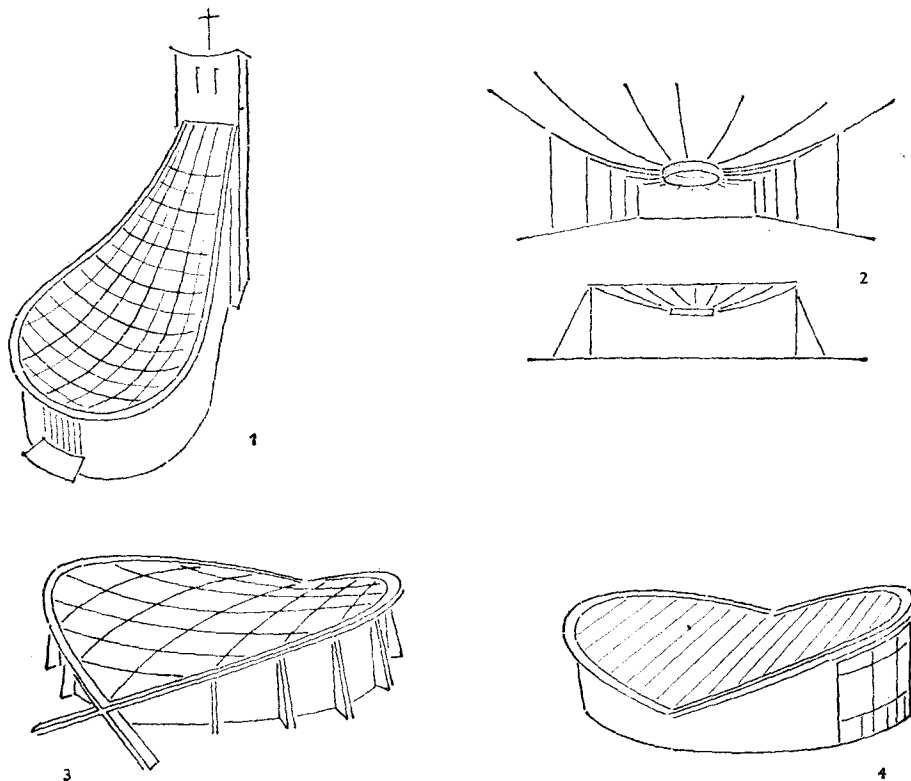


图 205 这些例子没有正确地理解悬吊屋顶的概念。技术形式主义在运用外形上单纯为了效果而忽略功能与逻辑性

- 1和2—屋面同向双曲完全不适于悬吊屋顶。只能用增加静重的办法防止掀动；
- 3—多余的扶壁只用于装饰结构，在既不产生拉力也不产生压力的地方；
- 4—平屋面表明为一般的梁板结构。屋檐的斜拱形式是从悬吊屋顶设计那里盲目借来的

这类屋顶不可能只凭张拉钢索来稳定，它们软得象个水囊那样悬荡着。这样的结构只能凭外加无用的沙囊来防止风载引起的掀动或飓风引起的倾覆。这种虚假结构经常弥漫整个设计。负责法国展览馆的工程师瑞尼·萨格在他的报告中肯定地指出[151]：“但是，新形式主义的虚伪性真正达到了臭名昭著的程度是……的惊人结构（图 205-3）。它的屋顶象是绷紧在两个倾斜的抛物线拱之间的马鞍形，两个拱相交于地面上 2 米处形成明显的叉形拱座。”（明显地与瑞利运动场相似。——作者）。“设计师以为这是一个也需要缆索屋顶的建筑妙想。他不理解倾斜拱是真正的结构因素，却象对花边那样加以对待。他一定曾说服建筑师接受这一点，因为在所谓拱座浇灌之前建筑物已建起来了。建筑立面上用了许多扶壁加以润色，无疑是为了给人以坚固的印象。既然，两个拱是搁在连续的周边墙上的，那么扶壁对马鞍形悬吊屋顶的稳定性完全不起作用。”照萨格估计，虚假的拱座是为了使结构配合建筑师的设计，事后想起来才加上去的。

在椭圆形的平面上，屋顶由两个相对倾斜而完全平坦的屋面组成，这是什么意思呢？这样结构既非壳体又非悬吊体系，它只能受弯（图 205-4）。此类造型只不过是为了赶时髦，完全没有结构基础。

薄壳能受拉也能受压，它可以单向或双向弯曲，曲度可以同一方向或两个反向。它总是形成一个闭合的刚性体系，作为垂直反力或斜向推力直接传递荷载。另一方面，真正的悬索屋顶只能由两组交叉的反向弯曲的索构成。荷载通过悬索传到屋顶的最高点。受拉的悬索引起对下部结构向上的拉力，因此，下部结构和辅助支座的造型应该表现出屋顶分布的力，这些力既不是竖向的也不是横向的，而总是切向作用于屋面的。

如果在框架之间张拉一个钢索体系而形成一个直边的翘曲四边形（图 206），立刻很

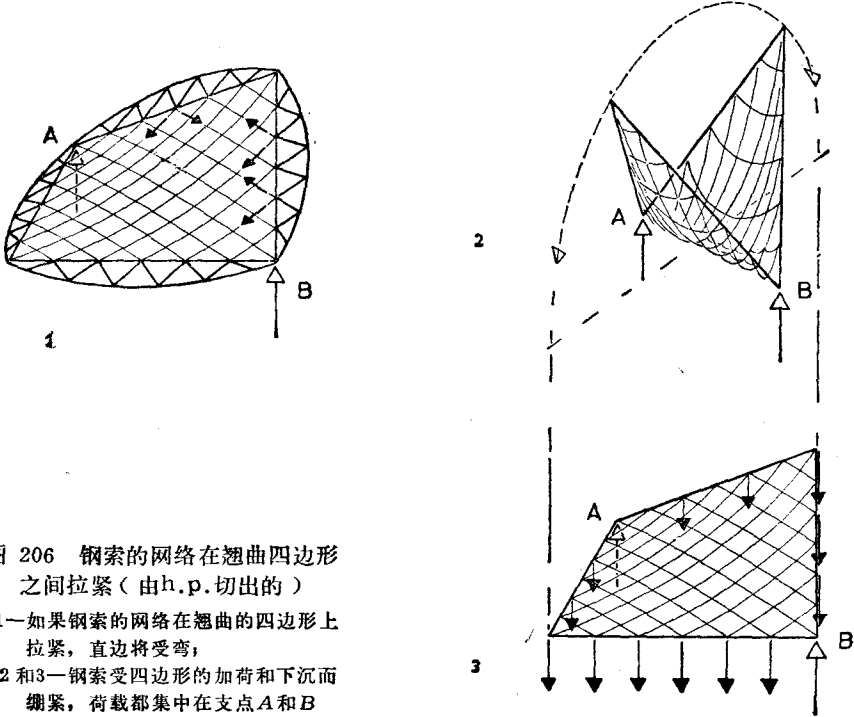


图 206 钢索的网络在翘曲四边形之间拉紧（由h.p.切出的）
 1—如果钢索的网络在翘曲的四边形上拉紧，直边将受弯；
 2和3—钢索受四边形的加荷和下沉而绷紧，荷载都集中在支点A和B

明显，钢索中的预应力将在直边引起弯矩。如果这些直边有足够的受弯刚度，则屋顶将仅受到边缘构件自重的力，如图201拱自重的作用一样。

1958年布鲁塞尔博览会，在法国馆上[152]萨格工程师很好地运用了上述的概念（图207）。两组相反弯曲的钢索绷紧在翘曲长菱形上面，基本型式是从马鞍形中间切割出来的一个h.p.（参考图175-3），钢索是由强劲的边缘构件和墙体的重量预先张拉的。两个长菱形的竖向反力集中在A、B两点。沿着A-E和E-B边缘，屋顶由凸出于屋面上的花格梁和外墙向下拉住。所以，钢索被张拉后发挥竖向朝上的力。换言之，在最后荷载作用下，墙面B-E受拉，花格梁A-E向上弯曲。最初F-A和F-B两边会脱空飘动。在边缘构件自重和外墙中的拉力共同作用下，从而这些边下垂时，屋顶的张拉就完成了。由于钢索的张拉，F点的下垂计算出约50厘米。钢索的网络包括保温层与屋面材料，重约18公斤/平米。覆盖的无柱面积大约12,000平米。

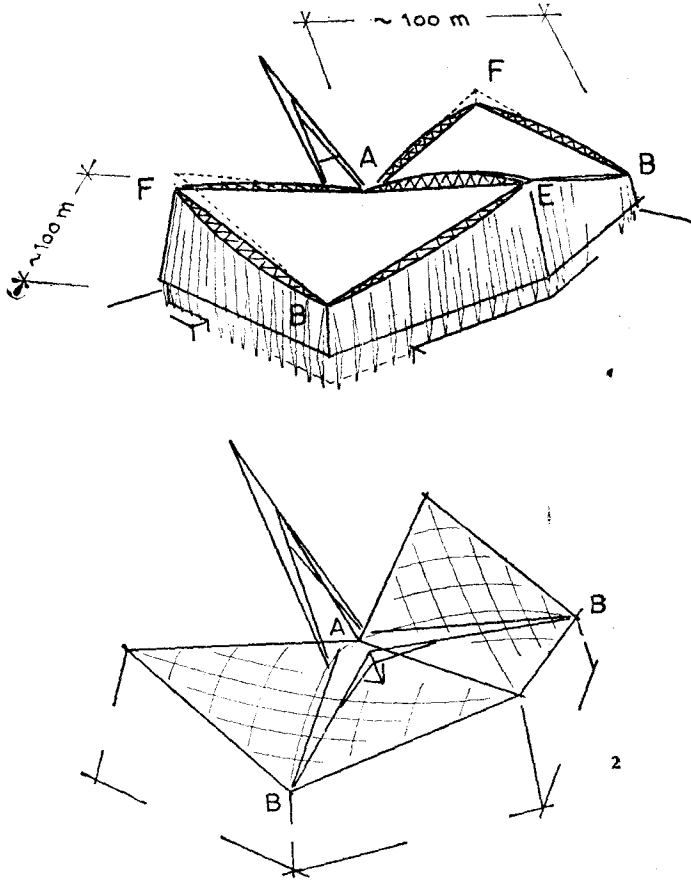


图 207 1958年布鲁塞尔博览会中的法国馆
 建筑师：吉莱（Gillet）；工程师：萨格[152]

- 1—两个长菱形A-B-E-F只支承在A、B两点。强劲的边缘构件承受包括它的自重与墙重的竖向荷载。在这些荷载作用下，F点下垂约50厘米；
- 2—揭开的透视说明两个h.p.长菱形是如何支承在A、B两点。构件A-B是按抵抗悬索屋顶产生的水平拉力而设计的

此处使我们感兴趣的造型主要是双曲屋面。然而，半径大的曲线形象表现力在边缘上而不在曲面本身。边缘是直线的，但重要之处是边缘扭曲成翘曲长菱形。这就导致屋顶边缘似乎随意起伏，立面不规则，比例混乱和任性的总印象。从整体来讲，确定于边缘翘曲的h.p.面的整个构图表现出一个非常独特的结构上的变调，在参观博览会的人当中，只有极少数能理解它。此外，象常有的事一样，由于赶工，许多细部做得不象预计的那样满意。再从如此大型的建筑物来估量，这些缺点比总体造型更容易给人不好的印象。例如，外墙的构架在结构上完全不必要，按照原来的打算，外墙不作为支承，而是受拉构件。构架保留未换，部分原因是赶工，部分为了控制巨大花格边缘件的倾倒趋向。这是首次尝试，在长菱形的h.p.上有拉索的体系。从这个角度来看，这座建筑物是个值得注意的，了不起的，协调的方案，无疑，在结构与选型的未来发展中将发挥强大的影响。

萨格将同样的基本概念用于他设计的布鲁塞尔的问讯亭[123]，这个建筑物我们以前已经提到过。很有趣味的是它的“缆索体系”是数层受拉的木板。拉力来自基础，基础由细长窗框悬吊在屋顶边缘。因此，虽是木结构，也必须视为受拉的屋顶。屋边缘稍微偏离h.p.的直线形母线的平面使屋檐显得微曲。这样赋予结构以亲切悦目的气氛，同时，由于引进一定的拱作用而使边缘构件中的弯曲应力有所减轻（图208）。

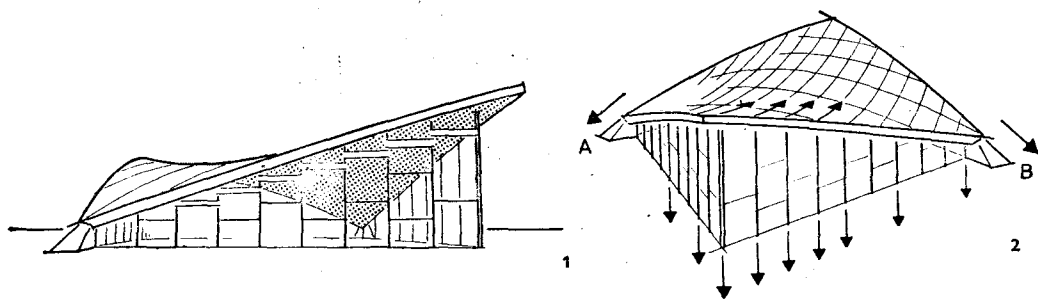


图 208 布鲁塞尔的问讯亭[123]（参看图185）可以视为悬索屋顶，因为材料（胶合板）承受双向的拉力就象交织的钢索一样。工程师：萨格

- 1—受拉的窗框将基础的重量传送到屋檐，在此处的屋顶施加预应力；
- 2—示意图说明窗框中的拉力和A、B点的斜向推力，由这推力确定扶壁的形状

缆索与支杆的组合 最近的发展是缆索与支杆各种组合的出现，在组合中索的拉力经过一系列中介的压杆而转向，使拉力与压力的交织产生空间刚度。它们在形态上尚缺乏一致性，因此，还不足以归纳为一种独特的结构造型。所以，我们只能简单提一两个知名的吸引人的实例，而把是否会有一组独特的现在还不能识别的结构造型出现，这一问题暂时撇开。

1958年布鲁塞尔博览会中美国馆的屋顶[153]不是别的，而是一个104米直径的自行车轮，搁在一圈支柱上。建筑物中心浮着一个鼓形的“毂”，承受在两组径向受拉的钢索“辐”上。一个令人惊叹的特点是中间的大洞——此方案的直接结果，日光由此射入。形状确定于初等几何。结构造型上没有什么进步意义。力学的原则被装饰性处理，特别是被外墙的不寻常的设计，弄得含糊不清（图209）。

这个博览会中另一处还竖立着一个有表现力的桅杆[154]，也是钢索与压杆组合成的。这个结构的稳定性依靠的是刚性杆件的受压，受弯和钢索受拉之间的交织作用。巴克明斯

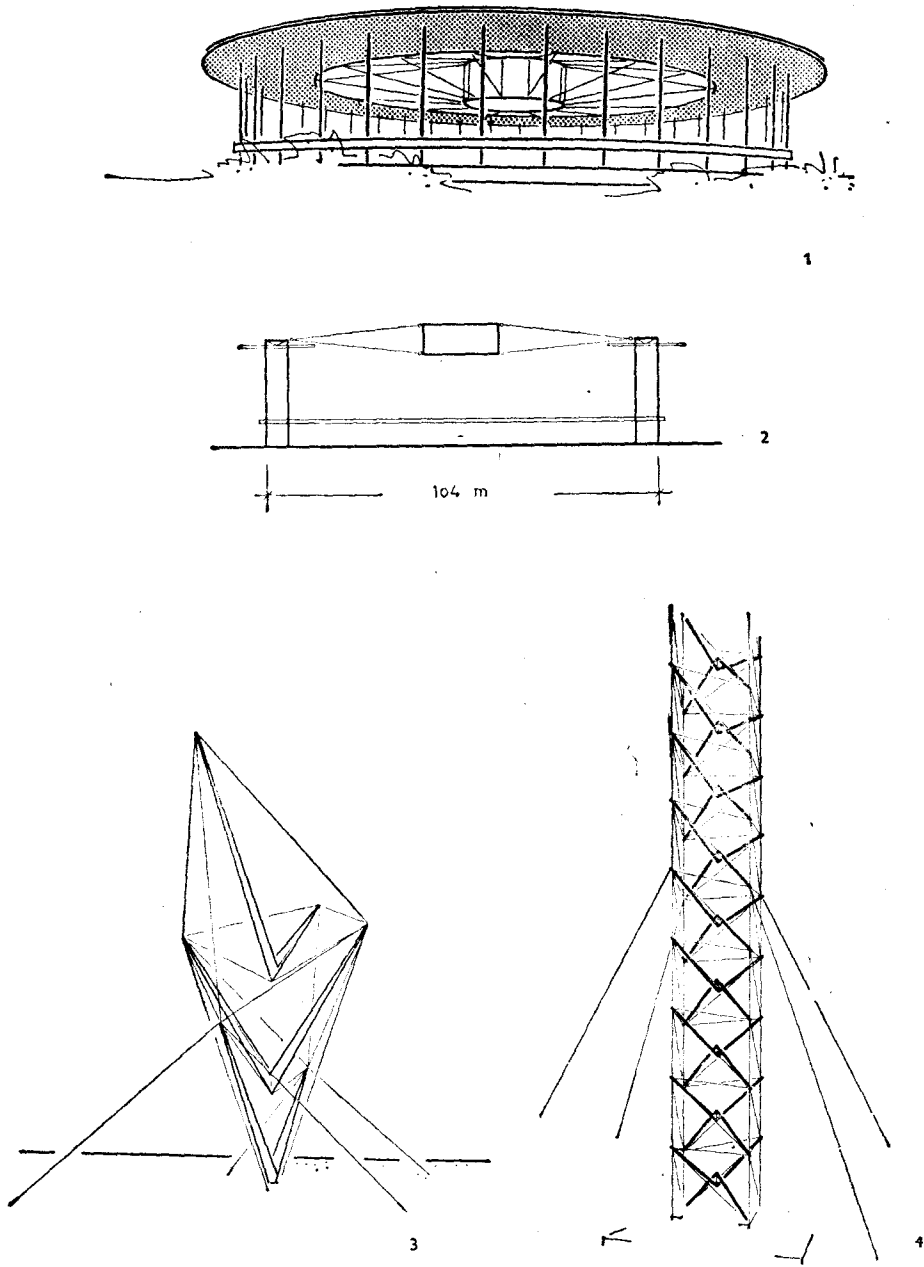
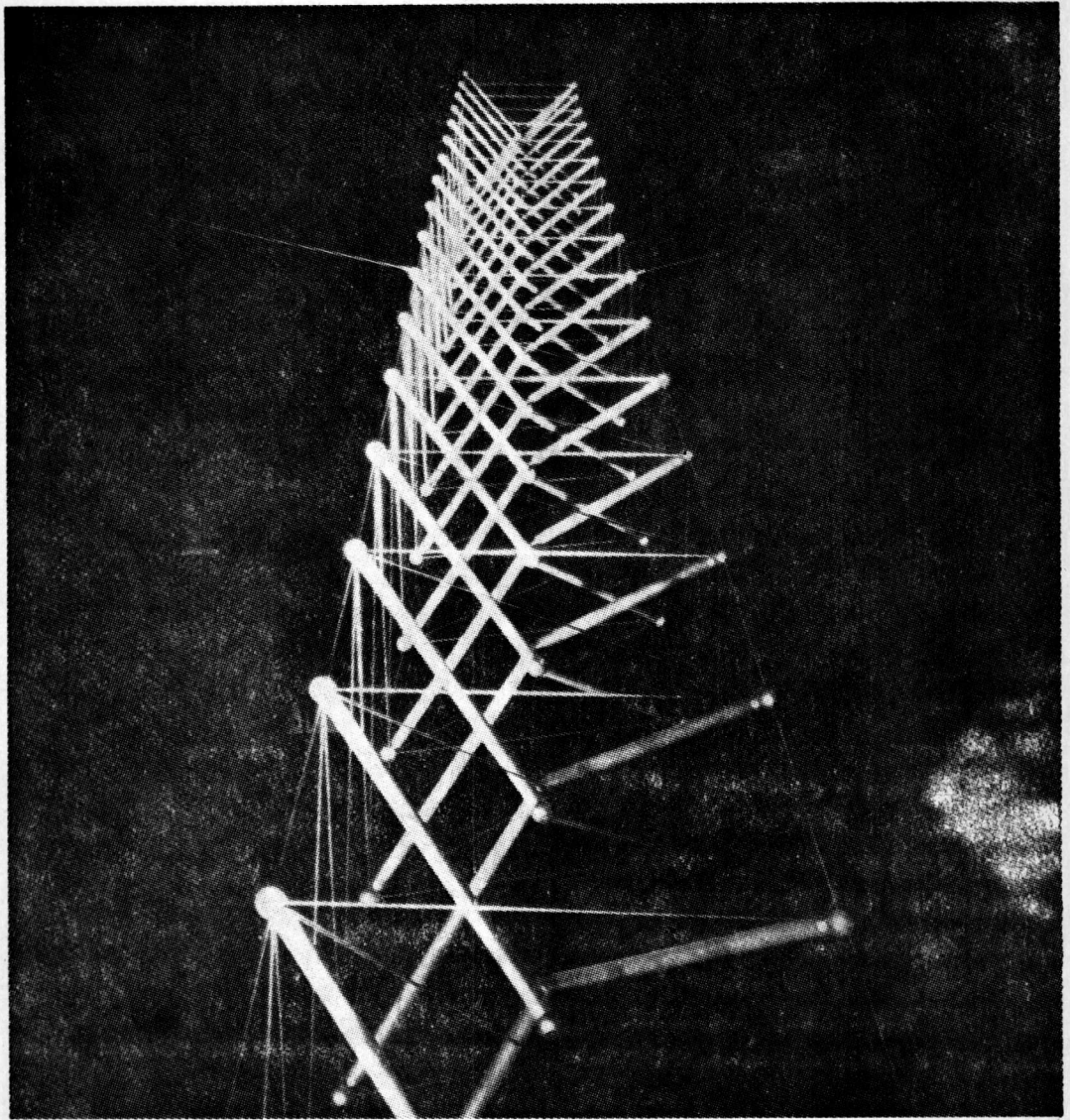


图 209 缆索与支杆的组合

- 1和2—1958年布鲁塞尔博览会中的美国馆是一个巨大的自行车轮。一个空心的鼓由压杆分隔开的两个受拉环组成，它悬浮在建筑物的中心由受拉的钢索承受，这些钢索联系外边的一个受压环与中心的鼓，从而使结构有足够的空间稳定性；
- 3—一个强劲的桅杆由V形压杆和受拉钢索组成（在布鲁塞尔博览会中）；
- 4—巴克明斯特尔·富勒设计的一个由压杆和钢丝组成的类似结构，此结构中的部件是预制的[155]



照片：刚劲的桅杆
巴克明斯特尔·富勒设计的纽约现代艺术博物馆[155]

特尔·富勒的作品包括许多类似型式的组合[155]。今天这种结构的应用还有限，然而，将来的条件就可能不同了。由于更占重要地位的灵活性，轻巧以及易于装卸，越是变得重要，则采用张拉钢索体系的机会就更好。受拉在材料上最经济，因此可用最轻构件。

帐棚 帐棚是悬吊或张拉屋顶的最后的一组。很早人类就使用了帐棚，最初是用动物的皮，以后用纺织品制成。然而，只是最近才被建筑师重新发现，在德国应当感谢弗赖·奥托（Frei otto）[156]，他引起人们注意帐棚结构的几何与技术问题，和它那可能取得的优美而吸引人的造型。不能把帐棚设计当做儿戏，必须非常严肃地对待，而且，它是常被人们议论的话题。无疑，帐棚的型式将在较有雄心的建筑构图中不断涌现出来。在讨论结构造型时，帐棚特别重要，因为它的造型本身就是结构。没有其他类型的结构象帐棚那样，造型从结构原则自然流露出来。前面我们关心的完全是张拉或悬吊的钢索和网络，现在必须用纺织品来考虑。实际上，这只不过意味着中心思想的修正，因为纺织品也就是非常细密的网络。在本节最后还要回到张拉钢索的结构，但仅仅是为了求得造型上的联系。因为弗赖·奥托关于这个题目写了很多[156]，在建筑、结构及纯技术方面提供了大量的资料。作者感到材料已经如此丰富，此处没有重复的必要。所以仅将帐棚结构的重要原则加以总结，并说明造型上的要点（图210）。

帐棚是受拉的纤维品做成的。如果不发生飘动，也就是说如果帐棚尽可能地做得刚劲，则材料受拉时必须反向弯曲，即必须遵循双曲悬索体系中已讨论过的法则。因为双曲面不能展开，材料必须按受拉后的双曲面裁剪。例如，适合于帐棚结构的基本的h.p.单元，必须由从边缘到中心逐渐缩小而非平行的长条做成。

帐棚应当支承在受压的桅杆，拱或肋上，否则它就不能很好地受拉。

帐棚有洋洋大观的形状，这类设计是对造型敏感的艺术家的工作而不是数学家的。在发展新造型时，模型试验很有效，而“准确的”数学处理实际上无用。图210是帐棚结构典型的造型变化的一瞥。此处不需特别讨论结构，因为造型与结构是一致的。对帐棚来讲不符合结构的造型是不可能的，因为那样的帐棚不是飘动就是缺乏稳定性。

帐棚结构已经在美国的建筑师们当中引起强烈的反应。沙里宁设计的耶鲁（Yale）曲棍球运动场[157]就是采用帐棚的原理的。一个巨大的钢筋混凝土拱形脊骨跨越约85米的建筑物全长。象帐棚的屋顶从脊骨悬吊下来，型式不是几何上预先确定的。在纵向附加上另一组钢索，使原来松弛的屋面钢索得以拉紧。这样产生的应力状态保证了屋面的稳定性。最后的屋面是反向双曲。结构中所有的曲线都是“自由式的”如在薄壳一节中为“自由造型”所下的定义同一个概念。它们既非严格的几何图形，也非纯粹任意的。它们和简单帐棚的起伏有同样的自然美。然而，我们不得不注意到一个缺点：在建筑物的端部，纵向缆索做成反向弯曲，而横向缆索的弯曲却并未同时反转过来。对一个受拉钢索体系来说，这样布置是不可能的。事实上，纵向缆索是联接到隐藏在屋面厚度之内的钢桁架上的。没有桁架，在技术上纵向的反曲线也是不可能的。一个方向的曲线而没有另一方向的反曲线，是与张拉钢索的结构原则不相容的。由于我们主要关心的是结构造型，外形与结构之间的局部矛盾也不能任意忽略掉。不过，总的来看，这个建筑物的非凡形状是符合新结构原理而发展出来的，是一个极富内在价值的结构造型。建筑师的大胆手法是值得推崇的（图211）。

它是不能象有的时候那样单纯从个人的喜好出发加以判断的。造型与结构内容是一体。这只能如此，不能另一个样。

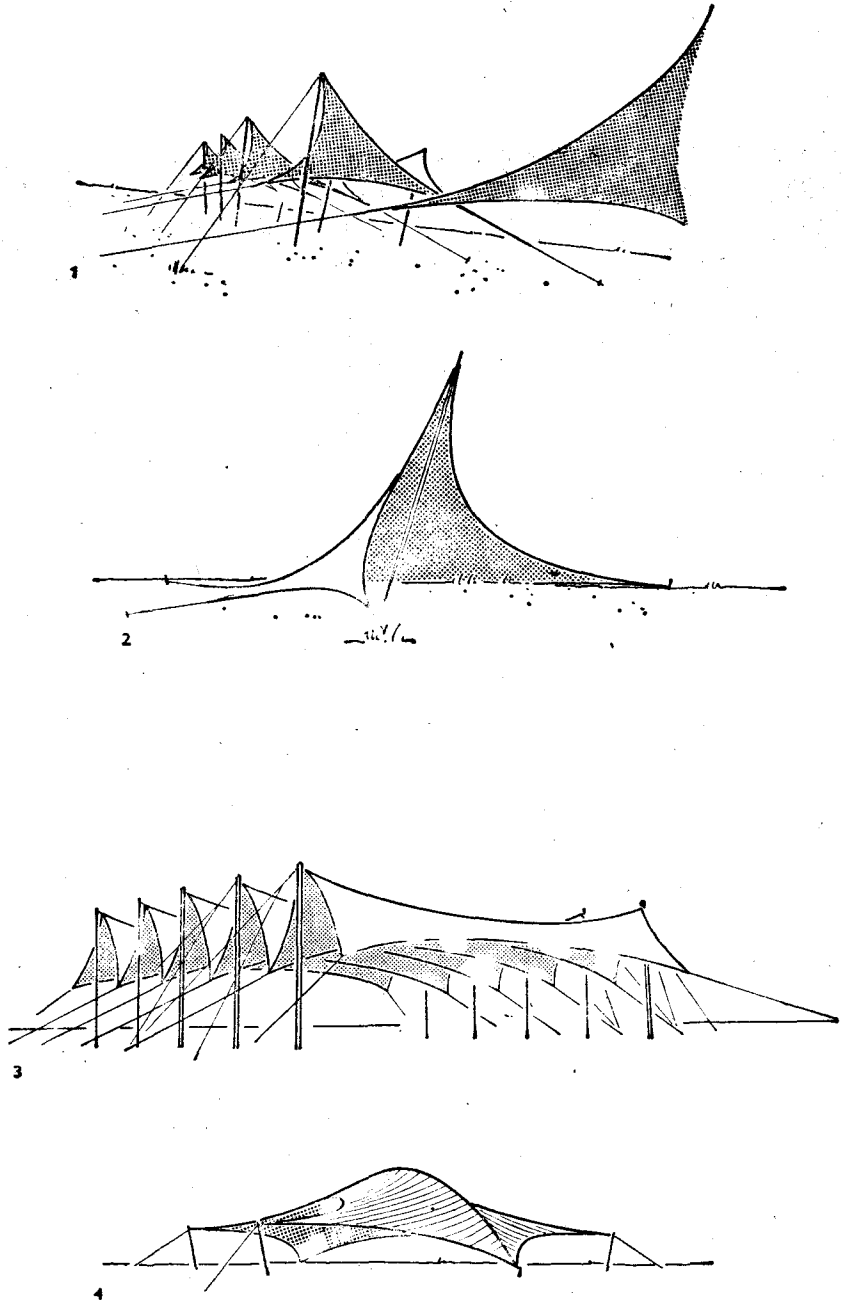
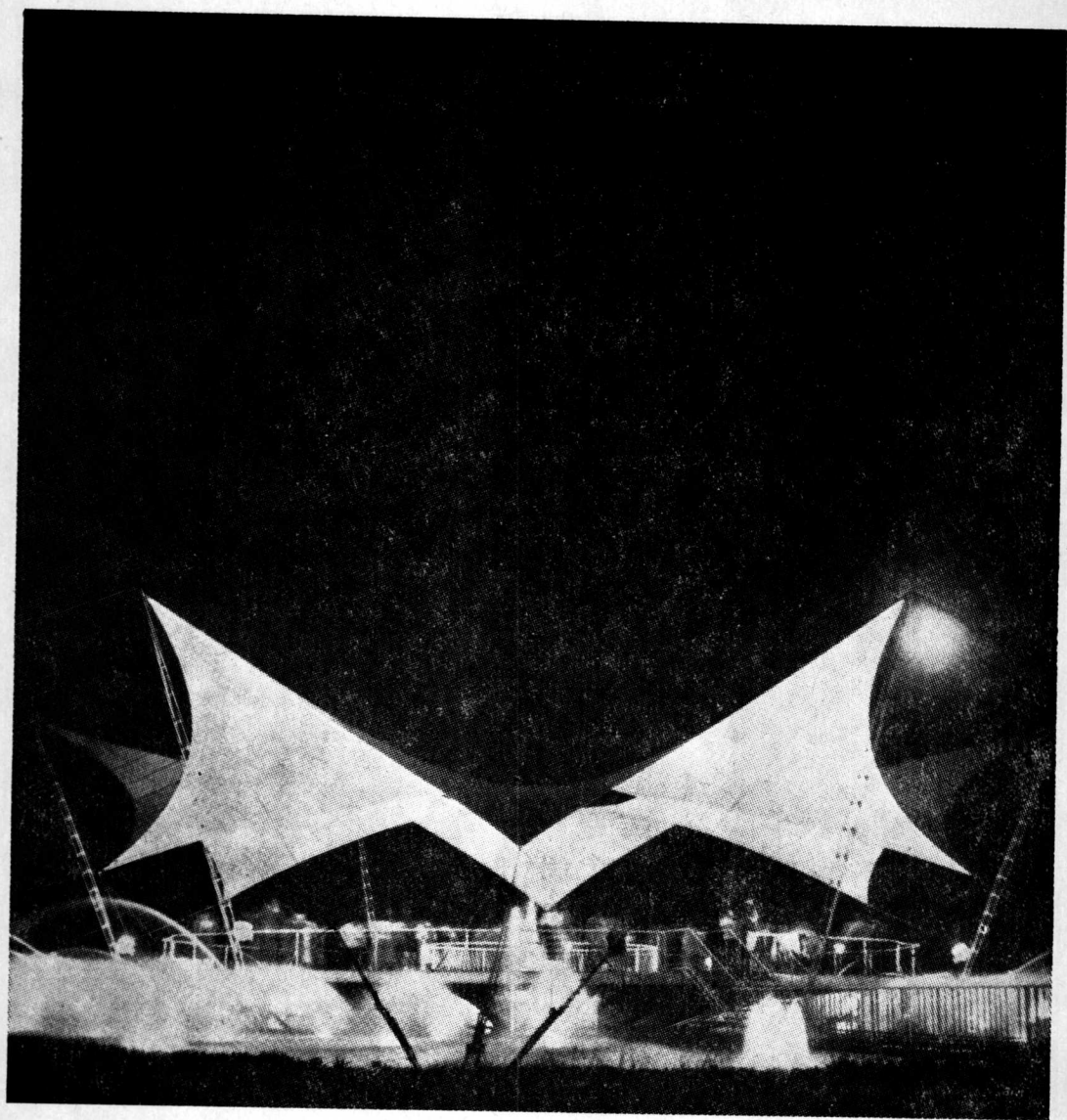


图 210 弗赖·奥托设计的一些帐篷[156]，在这种结构中翘曲面是不可避免的

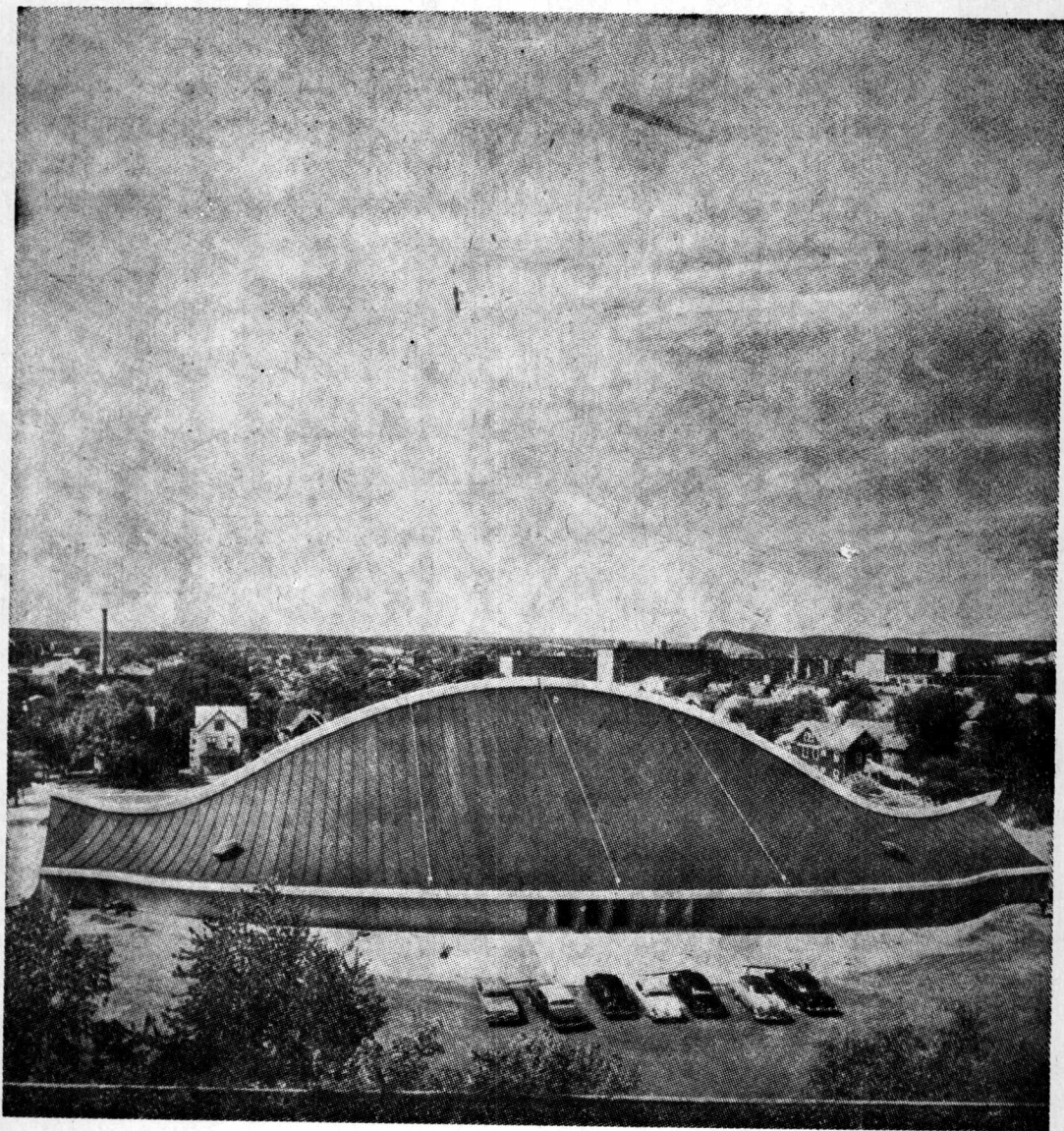
1和2—桅杆和拉线或；

3—受力相反的缆索形成刚劲的排水沟（参看图204）或；

4—受压拱，帐篷布在拱上拉紧，这类拱是张拉和绷紧帆布或塑料最有效的工具，因为帐篷的材料只能受拉



照片：科隆（Cologne）的一个舞池帐棚[156]
建筑师：弗赖·奥托



照片：新哈文（New Haven）耶鲁大学的曲棍球运动场[157]
建筑师：沙里宁

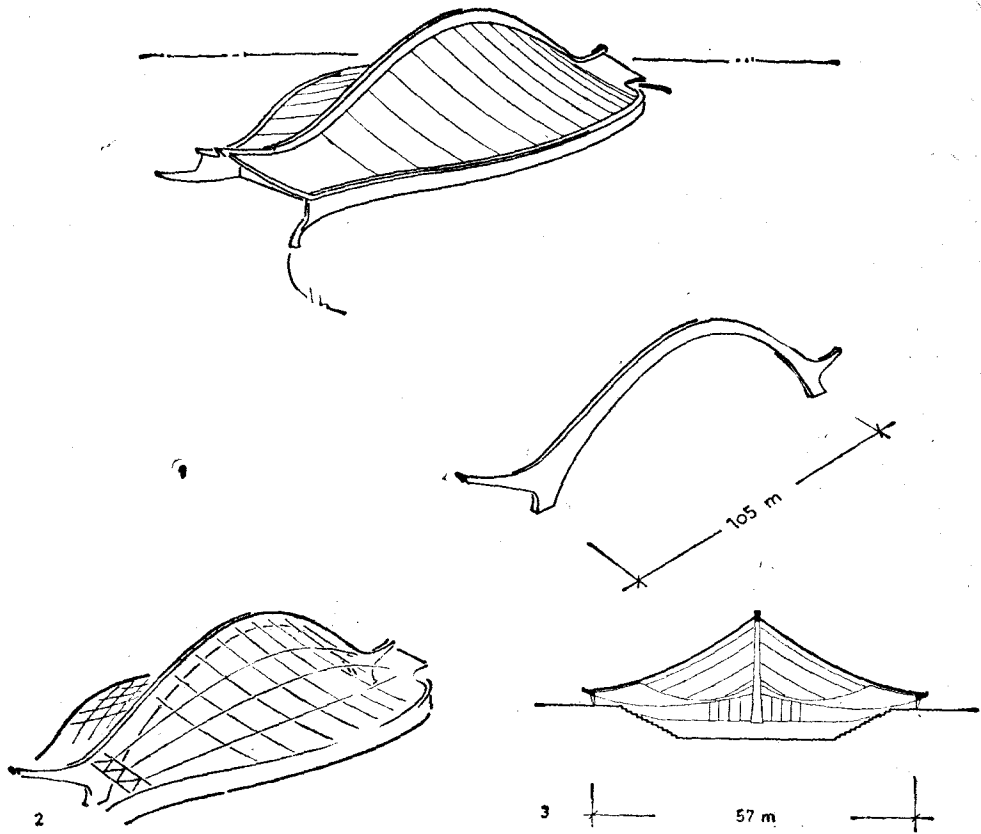


图 211 新哈文耶鲁大学的曲棍球运动场[157]

建筑师：沙里宁

工程师：塞维罗特 (Severud)、埃尔斯塔特 (Elstad) 和克吕格尔 (Krueger)

1—如同图210-4的帐棚，钢索的网络在一个巨大钢筋混凝土受压拱上拉紧。和帐棚在结构上和形式上的相似是很清楚的；

2—在缆索结构中，不可能以反曲线结束主索而同时横向索的弯曲却未反转。所以，在结构的低点处必须添加辅助的钢桁架；

3—断面图说明这个强有力的结构造型很适合于运动场的实际要求

结 论

我们再将此书重翻一遍，让各种造型的形象重新出现在我们眼前。假设我们把注意力集中到各个同类结构中的一些特别典型而又有代表性的造型上，或许将最强烈地回忆起骨架结构的严肃矩形（第7页），坎迪拉的薄壳（第214~229页），马亚的桥（第129~136页），或是联合国教科文组织会议大厅（第168~169页）的折板结构。然后如果试图将这些视觉上的印象汇总成结构造型的统一形象，我们必将承认那不是我们力所能及的。因为现代建筑者的资源太丰富了，当代世界上建筑师的课题又太多样了。实际上，当代的建筑造型并不要求具有象历史上建筑风格那种统一的形象。

我们发现的是各式各样生动活泼的结构造型，以复杂的相互关系为特征。有时，一个完美肯定的初创的造型会突然在另一处并且在完全不同的方面重现。例如，V形支座是从刚架收缩的腿引导出来的一个型式，将它倒转过来就成为卡斯蒂略尼设计的那不勒斯火车站（第142~143页）的三枝叉形柱；或者它在加拉加斯运动场（第105~106页）中与挑梁结合在一起。同样，简单的圆柱形薄壳一向完全用于屋顶结构，通过天才的手法，这种薄壳的基本原理突然应用于摩天楼的设计，决定性地影响了整个建筑概念（第184页）。

当然，一个有经验的观察者，他有明确的方向，就能在这似乎混乱的状态中找出肯定的秩序。对他来讲，所有的结构型式，不论它们显得如何离奇，都有同一合理的起点。他认为它们都是逻辑的明证和尊重建筑材料特性的好的技术设计的必然结果。他感到它们都含有同一的精神。而缺乏训练的人们依靠的首先是一眼看到的印象，就不可能直接理会许多结构型式之间的关系。他们仅凭外表形象处理问题，对那种与结构的内在类似性好象不相关的型式仍然无知。他们怎能将什么统一性强加在如此丰富的结构造型上呢？

这个问题带出关于结构的最要点之一：

没有一些“技术知识”，便不能充分欣赏现代结构造型。

这些对才智之士提出的明确要求，虽然不足以妨碍结构造型上升到艺术的水平，但这些要求显著地表明结构造型在技术科学领域中的重要地位。

建筑造型另一个重要特点是，它独立于建筑学中的所有“动向”和“新方向”之外。

密斯·凡·德·罗的“学派”在一方面，所谓“有机建筑”，在另一方面，各自如此热衷标榜的“新方向”也没有要求独占结构造型之权。虽然，不能否认，有时他们也利用它。如果认为只有直角主导的才是“结构性强的”建筑，而排斥自由造型的建筑为“非结构的”，那是完全错误的，也是目光短浅的。某些型式关系的重复（坡顶或平顶，棱角的或弯曲的型式），给一般观察者特别是外行的印象，是一个“新方向”或一个新的建筑手法的表现（避免用“风格”和“时尚”）。实际上，与结构造型的存在与否毫无关系。每一建筑动向包含着很多结构造型实例，其中既有真实的也有虚伪的。

对结构造型在现代建筑中的作用和估价，这两点非常重要，可以扼要地阐述如下：

结构造型不是单纯直觉的产物，去发现它，去塑造它，即使只做为一个观察者去了解它，都必须具备技术知识。

结构造型并不受现代建筑中任何狭窄倾向的约束。它的原理更深一层，在过去的建筑中，原理还可以不同。现在则已散布全球，而不能局限于任何特定的“学派”。

结构造型具有必不可少的知识性成分，它独立于据以鉴别（不是经常正确地）现代建筑中某些“运动”内容的人文主义思潮之外。这个事实导致人们轻易地下结论：认为由于上面的分析，结构造型“只不过是”一个合理地演化出来的功利主义的东西，是道地的工程师的事情，是处于艺术领域之外的；而建筑学做为是一门艺术，应该而且确实必须超越和高踞于结构造型之上。

结构造型是现代建筑的重要因素，这是无可置辩的，但是上述的态度就会导出虚伪的结构（第58~61页、第96页、第241页图195、第252页），常把现代建筑搞得含混不清。

如果冒冒失失地走到另一极端，将结构造型与建筑陈述本身混为一谈，也是错误的。坚持单独好的结构就足以构成建筑艺术，那是没有比这更愚蠢的了，试图使结构造型成为一种流行式样或建筑上的趋向，也是没有什么比这种设想更错的了。结构造型是建筑表现的一种工具，特别是在我们时代。它是从设计过程承认自然秩序是最高法则的充分明确概念中涌现出来的。做为表现工具，它可以与语言对照。就象语言一样，它甚至可以淹没最好的思想，使人们误解和忽略它。然而，同时，它又可以把一个本质上朴素的陈述，提高到极为清晰和卓越的艺术作品的水平。

如果想达到此目标，想令结构造型成为现代建筑的提炼、组织和构成的原则，我们需要加强对它的技术基础的理解，并取得对它的主要特性深入的领会。因为结构造型是建筑师和工程师的活动互相接触和交流的领域产物，这就需要双方的诚意和认真努力；否则，如众所周知，结果将不是单纯的造型，就是单纯的结构。唯有恢复已失去的联系，本着同一的目标，在解决共同问题时真诚合作，就能取得真正的结构造型。

参 考 文 献

- [1] *Kunstgewerbliche Laienpredigten*, see Henry van de Velde: *Zum neuen Stif.* Selected from his writings by Hans Curjel (Piper-Verlag) p. 125.
- [2] *Baukunst und Werkform* 1953, No. 6, p. 276.
- [3] Gio Ponti: *Espressione dell' edificio Pirelli in costruzione a Milano*, published in *Domus*, No. 316, p. 1 ff.
- [4] Office building in Rome. Arch: Luccichenti. From information supplied by the architect.
- [5] Corner of the Alumni Memorial Hall, Illinois Institute of Technology, Chicago. Arch: Mies v. d. Rohe. In P. Johnson: *Mies van der Rohe* (Verlag Hatje, Stuttgart), p. 154.
- [6] Volkswagen repair shop, Brunswick. Arch: F. W. Kraemer, in *Bauen und Wohnen* 1956, No. 5, p. 165.
- [7] Lever Building, New York. Arch: Skidmore, Owings and Merrill, Bunshaft. Eng: Weiskopf and Pickworth. In *Architectural Forum* 1952, No. 6, p. 101; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 50-51, p. 34; *Bauen und Wohnen* 1952; No. 7, p. 306; *Werk* 1954, No. 2, p. 49; *Bauingenieur* 1952, No. 10, p. 371; J. Joedicke: *Office Buildings*, p. 148 (Crosby Lockwood & Son Ltd., London).
- [8] German Pavilion at the 1958 Brussels exhibition. Arch: Eiermann, Ruf. *Bauwelt* 1958, No. 31, p. 757; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 78, p. 16.
- [9] General Motors Technical Center, Warren/Detroit. Arch: Eero Saarinen and Assoc., Smith, Hinchman and Grills. Published in Joedicke: *Office Buildings*, pp. 58, 96, 204 (Crosby Lockwood & Son Ltd., London); *l'architecture d'aujourd'hui* No. 50-51, p. 49 and No. 69, p. 88; *Architectural Forum* 1956, No. 5, p. 123; 1956, No. 7, p. 49; 1956, No. 11, p. 51 and 1956, No. 12, p. 56; *Architectural Record* 1956, No. 5, p. 151; *Bauen und Wohnen* 1956, No. 5, p. 145.
- [10] Office building in London. Arch: Gollins, Melvin, Ward and Partners. In *Architectural Review*, No. 728, Sept. 1957, p. 175; *Architectural Design* 1958, No. 7; Dennatt: *Modern Architecture in Britain* (Batsford Ltd.), p. 63.
- [11] Inland Steel Co. Building, Chicago. Arch: Skidmore, Owings and Merrill, New York. In *Architectural Forum* 1955, No. 5, p. 155 and 1958, No. 4, p. 88; *Engineering News Record* Jan. 1957, p. 42; *Baukunst und Werkform* 1957, No. 4, p. 206; *Architectural Record* 1958, No. 4, p. 169.
- [12] *Hart: Skelettbauten* (Callwey-Verlag), p. 36.
- [13] Olivetti Building, Milan. Arch: Bernasconi, Focchi, Nizzoli. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 58, p. 52; *Bauen und Wohnen* 1956, No. 1, p. 11; *Domus*, No. 305, p. 53.
- [14] Technical school in Berne. Arch: H. Brechbühler. In Volkart: *Schweizer Architektur* (Otto Maier Verlag, Ravensburg), p. 110. Bill: *Moderner Schweizer Architektur* 1925-1945 (Karl Werner Verlag, Zurich).
- [15] Ruins of the Cistercian Abbey, Heisterbach. Founded 1202, choir and transept consecrated 1227, general consecration 1237, architect unknown. Secularized in 1803 and sold for demolition. The choir is still standing, because the demolition shots failed. In Reclam's *Kunstführer, Baudenkmäler in Rheinland und Westfalen*, Vol. 3, Stuttgart 1959. Egid Beitz: *Kloster Heisterbach* (1926).
- [16] The Pilgrims' Basilica in Lourdes. Arch: P. Vago. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 81, pp. 46-55.
- [17] Platform underpass, Duisburg, Germany. From the drawings of the contractors, Johannes Dörnen, Dortmund-Derne. Prewar riveted structure destroyed. Welded structure: 1950-51. Bridges of similar design: Helmstedter Strasse underpass, Brunswick; Hamburg-Harburg railroad bridge. See *Bauingenieur* 1956, No. 11.
- [18] Unesco Building, Paris. Arch: Zehrfuss, Breuer, Nervi. Reviewed in *Baukunst und Werkform* 1956, No. 10, p. 556; *Bauwelt* 1956, No. 48, p. 1132; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 47, p. 77 and No. 58, p. 26; *Architectural Forum* 1958, No. 12, p. 81; *Architectural Record* 1958, No. 11, p. 14; Rogers: *P. L. Nervi—Bauten und Projekte* (Verlag Hatje, Stuttgart), p. 110.
- [19] Unité d'Habitation, Marseilles. Arch: Le Corbusier, A. Wogensky. Eng: V. Bodiansky. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 46, p. 12; *Architectural Forum* 1954, No. 3, p. 156; *Werk* 1954, No. 1, p. 20; *l'Homme et l'Architecture*, special number 11-14, 1947.
- [20] Stuttgart TV-Tower. Eng: F. Leonhardt. In Leonhardt: *Der Stuttgarter Fernsehturm. Beton und Stahlbetonbau* 1956, No. 4, p. 73 and No. 5, p. 104.
- [21] Pierelli Building, Milan. Arch: Ponti, Fornaroli, Rosselli. Eng: Nervi. In Ponti: *Espressione dell' edificio Pirelli in costruzione a Milano*, in *Domus*, No. 316, p. 1 ff.; *Baukunst und Werkform* 1957, No. 4, p. 204; Joedicke: *Office Buildings* (Crosby Lockwood Ltd., London), p. 73.

- [22] School in Cataguazes, Brazil, canopy. Arch: O. Niemeyer. Eng: A. Fraufe. In Papadaki: *The Work of Oscar Niemeyer* (Reinhold Publishing Corporation, New York), p. 153.
- [23] Unité d'Habitation, Nantes-Rezé, France. Arch: Le Corbusier. In *Bauen und Wohnen* 1957, No. 1, p. 1; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 66, p. 2. Unité d'Habitation, Berlin. Arch: Le Corbusier. See Hermann: *Über die Konstruktion und Ausführung des Wohnhochhauses Le Corbusier in Berlin*, in *Beton und Stahlbetonbau* 1958, No. 8, p. 202; *Le Corbusiers Wohninheit Typ Berlin*, published by F. Müller-Reppen (Verlag für Fachliteratur, Berlin-Grünwald).
- [24] Florence stadium, grandstand. Eng: Nervi. In Rogers: *P. L. Nervi—Bauten und Projekte* (Verlag Hatje, Stuttgart), p. 4; P. L. Nervi: *Costruire Correttamente* (Hoeppli-Verlag, Milan), plates I-VI.
- [25] Rosenau stadium, Augsburg. Designed by the Augsburg City Planning Board. In *Bauen und Wohnen* 1952, No. 9, p. 425.
- [26] St. Jakob football stadium in Basle. Arch: J. Gass and W. Boas. Eng: E. B. Geering. In *Werk* 1954, No. 10, p. 389.
- [27] University stadium Caracas, Venezuela. Arch: C. Villanueva. Contractors Christiani and Nielsen. In *Architectural Forum* 1954, No. 11, p. 155; H. R. Hitchcock: *Latin American Architecture Since 1945* (Museum of Modern Art, New York), p. 94.
- [28] Municipal stadium, Rabat, Morocco. Arch: J. Foccioli, J. Chemineau. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 47, p. XV and No. 55, p. 68.
- [29] The Rohrdamm Bridge, Berlin. See Heusel: *Die Spannbetonbrücken Berlins*, in *Beton und Stahlbetonbau* 1958, No. 5, p. 97.
- [30] M. Viollet-le-Duc: *Entretiens sur l'architecture*. Atlas, plate XXI, Paris 1864.
- [31] Filling station in Sesto San Giovanni, Milan. Arch: Favini. From information supplied by the architect.
- [32] Dome of Discovery, London. Arch: Ketchum, Gina, Sharp. Eng: Tubbs, Freeman, Fox. In *Architectural Forum* 1952, No. 9, p. 156; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 29, p. 65 and No. 39, p. 16.
- [33] Sul America hospital, Rio de Janeiro. Arch: Niemeyer and Uchoa. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 62, p. 76.
- [34] Apartment house in the Hansa district of Berlin. Arch: O. Niemeyer. See Georg Zahel: *Das Verhalten der Fundamente beim Niemeyer-Bau*, in *Bauwelt* 1958, No. 6, p. 132; G. Biermann: *Der statische Gedanke des Niemeyer-Hauses—Entwicklung und Ausführung*, in *Bauwelt* 1958, No. 10, p. 230; C. Siegel: *Die Gabelstützen am Niemeyer-Haus in Berlin*, in *Bauwelt* 1959, No. 1, p. 9.
- [35] Apartment building in Belo Horizonte, Brasil. Arch: O. Niemeyer. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 52, p. 26.
- [36] Apartment house development, "Groupe Queliverzan", in Brest, France. Arch: Graveraux, Lopez. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 46, p. 25.
- [37] Rubber factory in Brynmawr, Wales. Arch: Architects' Cooperative Partnership. Eng: O. Arup and Partners. In *Architectural Forum* 1952, No. 5, p. 142; *Bauen und Wohnen* 1952, No. 5, p. 254; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 39, p. 64.
- [38] Herdez factory, Mexico City. Eng: Felix Candela. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 42.
- [39] Prestressed concrete railroad bridge over the Rhône near La Voulte, France. In *Beton und Stahlbetonbau* 1958, No. 1, p. 16.
- [40] Birsfelden power station, Switzerland. Arch: H. Hofman. Eng: A. Aegerter and O. Bosshard. In *Werk* 1953, No. 2, p. 65; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 75, p. 82.
- [41] Olympic sports palace (Palazetto), Rome. Arch: Vitellozzi. Eng: P. L. Nervi. In *Architectural Forum* 1958, No. 3, p. 83; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 76, p. 28; *Bauingenieur* 1959, No. 4, p. 165; *Architectural Record* 1958, No. 5, pp. 207-209.
- [42] Central Garage, St. Gallen, Switzerland. Arch: Brantschen. Eng: Scheitlin, Hotz und Zahner. In *Werk* 1955, No. 10, p. 308.
- [43] Road bridge at Baden-Baden. See Lämmlein: *Hochbrücke über das Oostal bei Baden-Baden*, in *Beton- und Stahlbetonbau* 1959, No. 7, p. 161, and No. 8, p. 197.
- [44] Road bridge over the Arve, Champel-Vessy, near Geneva. Eng: Robert Maillart. See Bill: *Robert Maillart* (Verlag für Architektur, Zurich), p. 118 ff.
- [45] Aircraft hangars at Orbetello, Orvieto and Torre del Lago, Italy (1938-1942). Eng: Nervi. In Rogers: *Pier Luigi Nervi—Bauten und Projekte* (Verlag Hatje, Stuttgart), p. 36; P. L. Nervi: *Costruire Correttamente* (Hoeppli-Verlag, Milan), plates VII-IX, XVIII-XXI; P. L. Nervi: *L'architecture du béton armé et le problème des coffrages*, in *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 48, p. 68; *Architectural Forum* 1953, No. 11, p. 146; J. Joedicke: *Pier Luigi Nervi, Ein Gestalter des Stahlbetons*, in *Baukunst und Werkform* 1956, No. 10, p. 550.
- [46] Proposal for a church in Montecatini, Italy. Arch: E. Castiglioni. See G. C. Ortell: *Opere di Enrico Castiglioni*, in *l'architettura* 1955, No. 11-12.
- [47] Robert Maillart, Swiss engineer, 1872-1940. A thorough appraisal of his work can be found in Bill: *Robert Maillart* (Verlag für Architektur, Erlenbach-Zürich) and "Robert Maillart", a special publication of the Schweizer Verband für Materialprüfungen der Technik, Zurich 1940.
- [48] See "Robert Maillart", Schweizer Verband für Materialprüfungen der Technik, Zurich 1940, p. 6.
- [49] War memorial, Milwaukee, Wis. Arch: Eero Saarinen. Eng: Ammann and Whitney, in *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 85, p. 26; *Architectural Forum* 1957, No. 12, p. 144.

- [50] See *Architectural Record* 1948, No. 7, p. 88.
- [51] Naples railroad station competition, design entered by E. Castiglioni, in *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 10.
- [52] Mannheim National Theater competition, design entered by Mies van der Rohe, in *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 52, p. 94 and No. 79, p. 66; *Architectural Forum* 1953, No. 7, p. 129.
- [53] Human hip bone. See Kummer: *Bauprinzipien des Säugerskeletts* (Thieme Verlag, Stuttgart). For further references see *ibid*.
- [54] Steel and aluminum scaffolding. From information supplied by the Mannesmann-Leichtbau-G.m.b.H., Munich.
- [55] Mero system, steel scaffolding. From information supplied by the Dr.-Ing. Mengerlinghausen Co., Würzburg.
- [56] Exhibition "The City of Tomorrow", Berlin INTERBAU 1957. Arch: Karl Otto. In *Bauwelt* 1957, No. 30, p. 762.
- [57] Unistrut system. From information supplied by the Unistrut Corp., Wayne, Mich. Articles in *Architectural Forum* 1955, No. 7, p. 141; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 84.
- [58] Jay-Cee public recreation pavilion, Wayne, Mich. From information supplied by the Unistrut Corp., Wayne, Mich.
- [59] Convention Hall, Chicago (proposal). Arch: Mies van der Rohe. In *Architectural Forum* 1953, No. 12, p. 43; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 55, p. 10.
- [60] Aircraft hangar (proposal), designed by K. Wachsmann. See K. Wachsmann: *The Turning Point of Building* (Reinhold Publishing Corporation, New York); Hans Curjel: *Ein Beispiel dreidimensionaler Architektur*, in *Werk* 1954, No. 10, p. 377; *Baukunst und Werkform* 1954, No. 9, p. 549.
- [61] Fence around the Casa della Cultura, Busto Arsizio, Italy. From information supplied by the architect, Enrico Castiglioni, illustrated in G. C. Ortellì: *Opere di Enrico Castiglioni*, in *l'architettura* 1955, No. 11-12, and R. Castiglioni: *Il significato dell'architettura* (Milan).
- [62] Central markets in Frankfurt-am-Main and Budapest. See Dischinger: *Die weitere Entwicklung der Schalenbauweise "Zeiss-Dywidag"*, in *Beton und Eisen* 1932, No. 7-14.
- [63] The Jena planetarium. See Dischinger: *Fortschritte im Bau von Massivkuppeln*, in *Bauingenieur* 1925, No. 10, p. 362.
- [64] For information on R. Buckminster Fuller's domes see—R. W. Marks: *The Dymaxion World of Buckminster Fuller* (Reinhold, New York); Mc. Hall: *Buckminster Fuller*, in *Architectural Review*, No. 714, 1956, 7, p. 13; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 50-51, p. 122; *Architectural Forum* 1956, No. 1, p. 149 and No. 11, p. 158; *Bauwelt* 1958, No. 52, p. 1266; *Baukunst und Werkform* 1960, No. 1, p. 23; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 83, p. 58.
Ford rotunda dome, Detroit. Arch: Buckminster Fuller and Sanborn Brown. Eng: Lancomer and Mauser. In R. W. Marks: *The Dymaxion World of Buckminster Fuller* (Reinhold, New York), pp. 165-169; *Architectural Forum* 1953, No. 5, p. 109.
- [65] Hydrotechnical Institute, Haifa, Israel. Arch: Weinraub and Mansfield. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 77, p. 81.
- [66] St. John's Abbey, Collegeville. Arch: M. Breuer. Eng: Nervi, Farkas, Barron. In *Bauen und Wohnen* 1958, No. 11, p. 370; *Architectural Forum* 1954, No. 7, p. 148; prospectus of the Universal Atlas Cement Co., New York.
- [67] Sports arena in Pavia, Italy (proposal). Arch: A. Belloni. Eng: F. Brega. In *Domus*, No. 296, p. 12.
- [68] The McGregor Memorial Conference Center, Detroit. Arch: M. Yamasaki and Assoc. Eng: Ammann and Whitney. In *Architectural Record* 1957, No. 5, p. 178; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 89, p. 60.
Sarger. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 20. Further details from the engineers' drawings.
- [69] Church in Royan, France. Arch: G. Gillet and M. Hebrard. Eng: B. Laffaille, R. Sarger. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 20. Further details from the engineers' drawings.
- [70] Sears Tampa store, Tampa, Florida. Arch: Weed, Russell, Johnson and Assoc. Eng: Ammann and Whitney. See Raafat: *Reinforced Concrete in Architecture* (Reinhold, New York), p. 154 and *Architectural Forum* 1958, No. 7, p. 90.
- [71] See Girkmann: *Flächentragwerke*, 5th ed. (Springer Verlag), ch. 179, p. 419.
- [72] Lower Saxony stadium, Hanover. Arch: Building Department of the City of Hanover. Eng: Goemann. See Boy: *Vorgespanntes Tribünendach im Stadion Hanover*, in *Beton und Stahlbetonbau* 1955, No. 4, p. 118; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 76, p. 3.
- [73] Baseball stadium, Cartagena, Colombia. Arch: Solano, Cgítan, Ortega, Burbano. Eng: González. In *Architectural Record* 1948, No. 7, p. 88; H. R. Hitchcock: *Latin American Architecture Since 1945* (Museum of Modern Art, New York), p. 98.
- [74] Bus station, Bogota, Columbia. Arch: Ortega and Solano. Eng: González. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 28; *Architectural Forum* 1954, No. 8; H. R. Hitchcock: *Latin American Architecture Since 1945* (Museum of Modern Art, New York), p. 102.
- [75] Toronto City Hall (proposal). Arch: V. Revell. In *Bauen und Wohnen* 1959, No. 3, p. 95.
- [76] Water tank in Egypt. See Mortada: *Der Stahlbetonbau in Ägypten*, in *Beton und Stahlbetonbau* 1952, No. 12, 282.

- [77] Water tank in Caen, France. Arch: Gillet. Eng: Sarger. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 66, p. XXXVII, supplemented by the engineers' drawings.
- [78] Design for "Tomorrow's Auditorium". Arch: The Architects' Collaborative, Cambridge, Mass. Eng: Weidlinger and Salvadori. In *Baukunst und Werkform* 1957, No. 12, p. 709; prospectus of the Universal Atlas Cement Co., New York.
- [79] Priory of St. Louis and St. Mary, St. Louis (proposal). Arch: Hellmuth, Obata and Kassabaum. Eng: Weidlinger. Consultant: Nervi. In *Progressive Architecture* 1958, No. 1 and No. 10, p. 129.
- [80] Central market, Cologne. See Dischinger: *Die weitere Entwicklung der Schalenbauweise "Zeiss-Dywidag"*, in *Beton und Eisen* 1932, No. 7-14.
- [81] Textile mill, Gossau, Switzerland. Arch: Danzeisen and Voser. Eng: Hossdorf. In *Werk* 1954, No. 7, p. 288; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 35.
- [82] Cement hall at the 1939 Zurich exhibition. Arch: H. Lenzinger. Eng: R. Maillart. See Max Bill: *Robert Maillart* (Verlag für Architektur, Erlenbach-Zürich), p. 170; "Robert Maillart", a special publication of the Schweizer Verband für Materialprüfungen der Technik, Zurich 1940.
- [83] Flower market, Pescia, Italy. Arch: Gorri, Ricci and Savidì. Eng: Brizzi. In *Architectural Forum*, 1953, No. 2, p. 156; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 70, p. 78.
- [84] St. Louis airport. Arch: Hellmuth, Yamasaki, Leinweber. Eng: W. C. E. Becker, E. Contini. In *Architectural Forum* 1952, No. 11, p. 134 and 1956, No. 5, p. 107; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 55, p. 18; *Bauingenieur* 1958, No. 2, p. 73; *Architectural Record* 1956, No. 4, p. 195.
- [85] Parke-Davis store, Menlo Park, Cal. Arch: Yamasaki, Leinweber and Assoc. Eng: Ammann and Whitney. In *Architectural Forum* 1957, No. 12, p. 38; *Architectural Record* 1958, No. 6, p. 17.
- [86] Central markets in Basle and Leipzig. See Dischinger: *Die Theorie der Vieleckkuppeln und die Zusammenhänge mit den einbeschriebenen Rotationsschalen*, in *Beton und Eisen* 1929, No. 5-9.
- [87] Covered market in Tressanfi, Italy (proposal). Arch: G. Vaccaro. In *Domus*, No. 306, p. 2.
- [88] Design for "Tomorrow's Airport". Arch: Victor Gruen Assoc. In *Progressive Architecture* 1957, No. 12, p. 108; prospectus of the Universal Atlas Cement Co., New York.
- [89] Hangar at Marignane, France. Eng: N. Esquillon. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 47, p. 14; *Beton und Stahlbetonbau* 1952, No. 7, p. 172.
- [90] Design for "Tomorrow's Multi-Purpose Building". Eng: K. P. Billner, B. A. Anderson. Prospectus of the Universal Atlas Cement Co., New York.
- [91] Centre National des Industries et des Techniques, Paris. Arch: Camelot, de Mailly, Zehrfuss. Eng: Nervi, Prouvé. See Esquillon: "Palais des Expositions au Centre National des Industries et des Techniques à Paris", International Colloquium on Construction Processes of Shell Structures, Madrid 1959, No. a-16. Esquillon: "Palais des Expositions au Centre National des Industries et des Techniques à Paris", special publication of the Association Scientifique de la Précontrainte, 6, rue Paul Valéry, Paris. Other articles in *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 54 and No. 83, p. 8; *Beton und Stahlbetonbau* 1958, No. 9, p. 231.
- [92] Design for a stadium. Arch: Raymond and Rado. Eng: Weidlinger and Salvadori. See *Architectural Forum* 1956, No. 11; Raafat: *Reinforced Concrete in Architecture* (Reinhold, New York), p. 166; prospectus of the Universal Atlas Cement Co., New York.
- [93] Frauenkirche, Dresden, built by G. Bahr. Built 1726-1743, burned out 1945.
- [94] Market, Sidi Bel Abbes, Algeria. Arch: M. J. Mauri. Eng: Considéré and Coquot. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 60, p. 28 and No. 64, p. 49.
- [95] Gymnasium in Porto, Portugal. Arch: J. Loureiro. Eng: A. dos Santos Soares. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 58, p. XVI; *Architectural Forum* 1956, No. 5, p. 159.
- [96] Convention hall in Tokyo. Arch: K. Tange. Eng: Y. Tsuboi. In *Architectural Forum* 1955, No. 7, p. 159.
- [97] Basilica in Algiers. Arch: Le Couteur and P. Herbé. Eng: Sarger. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. XIII; supplemented by information provided by the engineer.
- [98] Water tower in Livorno, Italy (proposal). Arch. and eng.: R. Morandi. See Piccinato: *Strutture di Calce struzzo armato e di Calce struzzo precompresso de Riccardo Morandi* (Rome 1954), reviewed in *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 55, p. XIII.
- [99] Synagogue of the University of Jerusalem. Arch: Ezra Rau. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 77, p. 77; *Architectural Forum* 1958, No. 7, p. 167; *Baukunst und Werkform* 1960, No. 1, p. 14.
- [100] Liquidity tanks. Built by Chicago Bridge and Iron Co. In Torroja: *Philosophy of Structures* (Univ. of California Press), p. 291; see also Flügge: *Statik und Dynamik der Schalen*, 2nd ed. (Springer-Verlag), p. 39.
- [101] Wind tunnel, Berlin-Adlershof. Arch: W. Deutschmann, H. Brenner. See Joedicke: *Geschichte der modernen Architektur* (Verlag Hatje, Stuttgart), p. 144.
- [102] Settling tanks, Frankfurt-am-Main. See Lücking: *Neue Gesichtspunkte für die konstruktive Ausbildung von Faulbehältern*, in *Der Bau* 1957, No. 19, p. 583.
- [103] Dyckerhoff and Widmann experimental shell. See Dischinger: *Weitgespannte Tragwerke*, in *Bauingenieur* 1949, No. 7, p. 193.

- [104] Rubber factory, Brynmawr, Wales. Arch: Architect's Cooperative Partnership. Eng. O. Arup and Partners. In *Architectural Forum* 1952, No. 5, p. 142; *Bauen und Wohnen* 1952, No. 5, p. 254; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 39, p. 64.
- [105] Exhibition halls, Belgrade, Yugoslavia. Arch: M. Pantovic. Eng: Kostanivic. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 78, p. XVIII. *Bauingenieur* 1958, No. 8, p. 299.
- [106] M.I.T. auditorium, Cambridge, Mass. Arch: Saarinen and Assoc. See *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 50-51, p. 48 and No. 64, p. 50; *Architectural Forum* 1953, No. 1, p. 127.
- [107] Nakashima residence, New Hope, Penn. Arch: G. Nakashima. Eng: Weidlinger and Salvadori. In *Architectural Record* 1957, No. 11, p. 183; *Engineering News Record* 1957, No. 5 Dec., p. 46.
- [108] University cosmic-ray pavilion, Mexico City. Arch: G. Reyna. Eng: F. Candela. In *Architectural Forum* 1952, No. 9, p. 104; *Baukunst und Werkform* 1954, No. 11, p. 693 and 1958, No. 8, p. 439; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 59, p. 15.
- [109] Catalano residence, Raleigh, N.C. Arch: E. F. Catalano. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. XXIII.
- [110] Church in Coyoacan, Mexico. Arch: E. de la Mora. Eng: F. Candela. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 25.
- [111] Congress hall in Shizuoka, Japan. Arch: K. Tange and Y. Tsuboi. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 76, p. 23; *Bauwelt* 1958, No. 23, p. 541.
- [112] Experimental roof of the School of Engineering and Architecture, Kansas University, Lawrence. See W. Strode and D. L. Dean: *Design, Construction and Testing of a Plywood Hyperbolic Paraboloid Lattice Structure* (Univ. of Kansas Publications, The Bulletin of Engineering and Architecture, No. 41).
- [113] Girls Grammar School, London. Arch: Chamberlin, Powell and Bon. See A. R. Flint and A. E. Low: *The construction of hyperbolic paraboloid type shells without temporary formwork*. International Colloquium on Construction Processes of Shell Structures, Madrid 1959, No. a-15; *Bauen und Wohnen* 1958, No. 10, p. 349.
- [114] "Mid-City" shopping center, Denver, Col. Arch: M. I. Pei and Assoc. Consulting Eng: Roberts and Schafer. In *Architectural Forum* 1958, No. 7, p. 110; *Architectural Record* 1958, No. 2, p. 229; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 83, p. 43.
- [115] Texas Instruments, Inc., Dallas, Texas. Arch: O'Neil Ford and R. Colley. Eng: Wilkerson. Shell design. Candela. In *Architectural Forum* 1956, No. 12 and 1958, No. 9, p. 132; *Architectural Record* 1958, No. 9, p. 238.
- [116] Lederle Laboratories, Mexico. Eng: F. Candela. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 42.
- [117] Market in Caserta, Italy. Eng: Baroni. In *Architectural Forum* 1953, No. 1, p. 151.
- [118] Shopping center in Mexico. Eng: F. Candela. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 43; Raafat: *Reinforced Concrete in Architecture* (Reinhold, New York), p. 142.
- [119] Church de la Virgin Milagrosa, Mexico. Arch: De la Mora. Eng: F. Candela. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 22; *Architectural Forum* 1954, No. 8; *Architectural Record* 1958, No. 7, p. 191; *l'architettura* Nos. 19 and 20.
- [120] See Candela: *Les voutes minces et l'espace architectural*, in *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 22.
- [121] See *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 22.
- [122] Philips pavilion at the 1958 Brussels exhibition. Arch: Le Corbusier and Xenakis. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 78, p. 14; *Bauwelt* 1958, No. 1, p. 3; detailed structural information in *Philips Technische Rundschau*, 20, No. 2, pp. 33-68 and No. 3/4, pp. 69-82, extracts in *Bauen und Wohnen* 1959, No. 8, p. VIII and No. 9, p. IX.
- [123] Information center in Brussels. Arch: Baucher, Blondel, Filippone. Eng: Sarger. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 78, p. XI; R. Sarger: *Conceptions, calculs et essais de la couverture du pavillon francais a l'Exposition de Bruxelles*, in *Études et Réalisations* 1959, No. 59, p. 7; R. Sarger: *La technique des voiles prétendues et leurs développements futurs*, in *Études et Réalisations* 1959, No. 67.
- [124] Restaurant in Long Beach, Cal. Arch: Raymond and Rado. Eng: Weidlinger and Salvadori. In *Architectural Forum* 1956, No. 2, p. 152 and 1956, No. 8, p. 155.
- [125] See *Architectural Forum* 1956, No. 8, p. 155.
- [126] Study by Candela. In *Dimension*, student publication, College of Art and Design, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich.
- [127] Study by one of the Catalano school. In *Architectural Forum* 1953, No. 2, p. 159.
- [128] Nightclub in Acapulco. Arch: Sordo. Eng: Candela. In *Bauwelt* 1959, No. 42, p. 1247.
- [129] Restaurant in Xochimilco, Mexico. Arch: Alvarez. Eng: Candela. In *Baukunst und Werkform* 1958, No. 8, p. 438 and 1960, No. 1, pp. 27-28; *Progressive Architecture* 1959, No. 2, pp. 137-139.
- [130] See *Progressive Architecture* 1959, No. 2, p. 141.
- [131] Foundry at Lohr-am-Main, Germany. Arch: C. Siegel. Eng: H. Gall. Not yet published.
- [132] Market in Royan, France. Arch: L. Simon, M. Merisseau. Eng: R. Sarger. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 48; *Architectural Forum* 1957, No. 11, p. 267; *Baukunst und Werkform* 1960, No. 4, p. 190.
- [133] Restaurant in San Juan, Puerto Rico. Arch: Toro, Ferrer. Eng: Weidlinger and Salvadori. In *Architectural Forum* 1956, No. 11, p. 126; *Progressive Architecture* 1959, No. 8, p. 103.

- [134] TWA, terminal building, New York-Idlewild. Arch: Eero Saarinen and Assoc. Eng: Ammann and Whitney. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 77, p. 10; *Architectural Forum* 1958, No. 1, p. 78; Borchardt: *Planung des Flughafengebäudes in New York*, in *Baukunst und Werkform* 1960, No. 5, p. 259.
- [135] See *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 77, p. 10.
- [136] Ronchamp chapel, Belfort, France. Arch: Le Corbusier. See Conrads: *Ronchamp oder die "Travestie der Unschuld"*, in *Baukunst und Werkform* 1956, No. 1, p. 9; *Werk* 1955, No. 12, p. 375; *Architectural Forum* 1955, No. 9, p. 120.
- [137] See Candela: *Understanding the Hyperbolic Paraboloid*, in *Architectural Record* 1958, No. 7, p. 191 and No. 8, p. 205.
- [138] Tachira Club, Caracas, Venezuela. Eng: E. Torroja. See Torroja: *The structures of Eduardo Torroja* (Dodge Co., New York), p. 43 ff.; Torroja: *New Developments in Shell Structures*, Proc. of the 2nd Symposium of Concrete Shell Roof Construction, Oslo 1957, p. 97.
- [139] See Torroja: *New Developments in Shell Structures*, Proc. of the 2nd Symposium of Concrete Shell Roof Construction, Oslo 1957, p. 95.
- [140] Instituto Tecnico de la Construcción y del Cemento, Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción—Castillares, Madrid, Spain.
- [141] Design for the University of Tucuman, Argentine. Arch: Carminos. Eng: Aracibia, Nervi and Bartoli. In *Architectural Forum* 1953, No. 2, p. 156.
- [142] Sidney Opera House, competition design. Arch: J. Utzon. See Kultermann: *Une Architecture Autre*, in *Baukunst und Werkform* 1958, No. 8, p. 425.
- [143] Airport building, seminar project directed by E. Torroja, Instituto Tecnico de la Construcción y del Cemento, Madrid. See publication of the Institute, No. 180, *Formas Resistentes de la Construcción Moderna*, p. 61.
- [144] Municipal swimming pool, Wuppertal. Arch: Municipal Building Dept. Wuppertal. Eng: F. Leonhardt, W. Andra. See Leonhardt, Andra: *Entwurf eines Leichtbetonhängedaches*, in *Bauingenieur* 1957, No. 9, p. 344; *Deutsche Bauzeitschrift* 1957, No. 10, p. 1189.
- [145] Hall, designed and built by Dyckerhoff u. Widmann.
- [146] Exhibition hall Rio Grande do Sul, Brasil. Eng: Borges, Alliana. See Frei Otto: *Neues Bauen in Brasilien*, in *Bauwelt* 1956, No. 39, p. 915.
- [147] Livestock judging arena, Raleigh, N.C. Arch: Novicki, Deitrick. Eng: Severud, Elstad and Krueger. In *Architectural Forum* 1952, No. 10, p. 134; 1953, No. 6, p. 170 and 1954, No. 4, p. 133; Frei Otto: *Die Arena in Raleigh, USA*, in *Bauwelt* 1953, No. 5, p. 89; *Bauingenieur* 1953, No. 8, p. 294; Frei Otto: *Das Hängende Dach* (Bauwelt-Verlag), p. 90.
- [148] Congress Hall, Berlin. Arch: H. A. Stubbins; with W. Düttmann, F. Mocken, Ass. Archts. Eng: Severud, Elstad and Krueger. Published in *Bauwelt* 1956, No. 42, p. 999 and 1958, No. 1, p. 7; *Baukunst und Werkform* 1958, No. 1, p. 16; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 64, p. 70; *Architectural Forum* 1955, No. 9; 1955, No. 10, p. 155 and 1958, No. 1, p. 117; *Architectural Record* 1957, No. 12, p. 145; see also Lessing: *Suspension Structures*, in *Architectural Forum* 1957, No. 12, p. 135; Curt Siegel: *Ein Beitrag zur Kongresshallen-Debatte*, in *Bauwelt* 1958, No. 23, p. 549.
- [149] Gymnase St. Ouen, Paris (proposal). Design and structure: R. Sarger. Unpublished; information supplied by designer.
- [150] Swimming pool for Monaco (proposal). Design and structure: R. Sarger. Unpublished; information supplied by designer.
- [151] R. Sarger: *Valeur Plastique des Structures à l'Exposition de Bruxelles*, in *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 78, p. 6.
- [152] French pavilion at the 1958 Brussels exhibition. Arch: G. Gillet. Eng: R. Sarger. In *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 76, p. 102 and No. 78, p. 8; R. Sargers: *Conceptions, calculs et essais de la couverture du pavillon de la France à l'exposition de Bruxelles*, in *Études et Réalisations* 1959, No. 59, p. 7; R. Sargers: *La technique des voiles prétendues et leur développements futurs*, in *Études et Réalisations* 1959, No. 67.
- [153] U.S. pavilion at the 1958 Brussels exhibition. Arch: E. D. Stone. Steelwork: Kohn-Wesseling Eisenbau. In *Architectural Record* 1957, No. 2, p. 10; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 78, p. 30; see also Cornelius: *Die statische Berechnung eines seilverspannten Daches am Beispiel des US-Pavillons auf der Weltausstellung in Brüssel 1958*, in *Stahlbau* 1958, No. 4, p. 98.
- [154] Mast at the 1958 Brussels exhibition. See *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 78, title page and p. 3.
- [155] Tensegrity mast (designed by R. B. Fuller), displayed at the Museum of Modern Art, New York (R. B. Fuller exhibition). See also Marks: *The Dymaxion World of Buckminster Fuller* (Reinhold, New York), p. 158.
- [156] Tents, designed by Frei Otto. See *Bauwelt* 1957, No. 30, p. 754; Frei Otto: *Das Hängende Dach* (Bauwelt-Verlag).
- [157] Yale University hockey stadium, New Haven, Conn. Arch: Eero Saarinen. Eng: Severud, Elstad and Krueger. In *Architectural Record* 1957, No. 8, p. 186 and 1958, No. 10, p. 152; *l'architecture d'aujourd'hui*, No. 76, p. 44 and No. 85, p. 20; *Architectural Forum* 1958, No. 12, p. 106; *Bauen und Wohnen* 1959, No. 8, p. 270. See also Lessing: *Suspension Structures*, in *Architectural Forum* 1957, No. 12, p. 135. Bandel: *Betrachtungen über Hängedachkonstruktionen*, in *Bauingenieur* 1958, No. 6, p. 227.