3

太城藤吉

ズ

動作研

於ける動作と時

書 第2巻

書館發行

依照教育部修正課程標準編輯

復興高級中學教科書

物理學

上冊

周昌壽編著

商務印書館發行

編輯大意

(1) 本書係根據民國二十五年四月教育部頒行之修正課程標準,編輯而成,以供高級中學校教科書之用,兼作師範學校職業學校等之參考書之用.

(2) 初中畢業生,對於物理學雖已具有相當之認識,對於數學,亦有相當之根底. 但初中所習者,注重在日常習見之簡單現象,並未受系統之訓練,應用數學之能力,更說不上. 一方面國內初中程度,亦大有參差,萬難一致. 故本書敍述事項,一律從初步入手,循序而進,自成一整個系統. 即令初中習過者,偶或遺忘,使用本書亦無妨礙.

(3) 本書專爲課室講演而編,採用實驗,大都輕而易舉,雖經濟能力不充足,亦不至感受設備上之困難. 至於實驗室專用之課本,則已別成一册,名爲『復興高級中學教科書物理學實驗』,與本書互相銜聯,極便採用.

(4) 編者前有新時代高中物理學兩册,在教育部之暫行課程標準未定以前,即已出版,當時一意提高高中學生程度,內容未免失之過深. 該書雖盛行於世,但據數年來自行試用所積之經驗,終嫌欠妥. 又承各地同人,時加指示,更覺有修改之必要,事未及成,乃遭一二

八之劫,種種稿件,悉付一炬. 今則暫行標準,又成過去,遂徹底改編而成此册. 一切標準,均遵照部定,但資料仍有一部分取自前書. 所取者,均極平易,所增者,尤切實用,至於前書中稍涉理論之項目,現已一律删去. 採用前書所感之種種不便,在本書中均一掃而盡矣.

(5) 本書使用各種名詞,全係中國物理學會所決定而經教育部頒行者,此種名詞,用之於書中者,以本書為第一種,於初學物理學時,即開始使用,不特一勞永逸節省精力不少,並對於國內此後出版之物理書籍,亦不致覿面不識,即自身欲有所表白,亦當不難於遣辭矣.

(6) 本書於每章之後,各附以問題若干條. 一則使學生根據所習原理,解釋自然現象,一則訓練之使其應用定律,計算各種量間之數理關係. 命題概重實用含義亦極淺明,使用數學又都限於平面幾何代數等極淺近之一部分,雖平面三角,亦盡力避去,以免教學困難卷末並附答數,以資校對.

(7) 本書編輯排校,雖極注意,但錯誤仍將難免,倘望採用者,隨時賜教,以便更正.

民國二十三年二月　編者識

民國二十五年九月　修正

改排第二十版序言

本書出版以來,恰滿兩年,其間每一次發覺錯誤,立即修改一次總計此兩年中,修改次數當不在六七次以下. 最初不過挖改紙版而已,其後竟須改排一部分,始足濟事. 今歲教育部頒佈修正課程標準,乃不得不從頭改編,以符功令. 舉凡新標準中所規定之項目,莫不一一遵照增補,並皆列入各節標題之中,俾其醒目. 舊版僅有374節,茲已增至417節,插圖亦增多十餘幅. 與前相較,雖不至判若兩書,然其面目確已大改舊觀矣. 雖尚不敢引為自滿,但既承各方面指正之後,似無大疵,則可斷言. 其中得力於國立編譯館者,尤為不少,用誌端末,聊表謝忱.

二十五年九月九日　編者識.

復興高級中學教科書

物 理 學

總 目

上 冊

下 冊

上冊目次

緒論

第一篇 力學

第一章 運動學

第二章 力

第三章 功能

第四章 剛體力學

第五章 摩擦

第六章 簡單機械

第二篇 物性學

第一章 物質之組成

第二章 液體

第三章 氣體

第四章 分子現象

第三篇 熱學

第一章 熱及膨脹

第二章 狀態變化

第三章 熱與功

第四篇 聲學

第一章 波動

第二章 聲波

第三章 發音體之振動

附 錄

復興高中教科書

物理學

緒論

§1. 物質.

一人之身,內有五臟血骨,外有耳目四肢,食有菜飯茶水,衣有帽履衫褲,住有房屋窗壁,行有車馬轎船,學有書籍紙筆,此外更有山川草木,鳥獸蟲魚,日月星辰,塵埃細菌,爲數之多,直不可以數計. 形色雖殊,但均有一共通之性質,即在空間(space)中,各占有一定之地位,吾人對之,又可經由感官之知覺,而知其存在. 凡具有此種性質者,曰物質 (matter), 即上舉種種,無一非物質也.

取物質之一有限部分,與其周圍分離而論之時,則

曰物體(body). 既云有限部分,則其本身周圍當有分劃之境界面存在,是卽物體之表面 (surface), 有表面始有大小形狀可言. 物體之內部各點間距離,比較現所考察之長度,可以略去不計時,此物體可稱爲質點 (material point 或 particle). 質點係就比較上而言,大如行星,如論其公轉,不過一質點而已;小如分子,如論其振動,則非看成物體不可. 質點之集團,曰質點系(material system),物體大都可目之爲質點系

§2. 物理學之範圍.

自然界中之一切物體,其位置性質,大小形狀,每隨時而之變化,是爲自然現象 (natural phenomena). 研究自然現象以明其因果關係之學科,曰自然科學(natural science). 自然現象之種類浩繁,故自然科學亦有種種分科. 其中研究物理現象(physical phenomena)之一科,曰物理學 (physics), 卽本書所欲論及者.

物理學之中,又因現象之性質不同,爲便利計,更細別爲下列之七科:

(1)力學(mechanics);

(2)物性論(properties of matter);

(3)熱學(heat);

(4)聲學(sound);

(5)光學(light);

(6)磁學(magnetism);

(7)電學(electricity).

本書亦依照此次第分爲七篇詳述之

§3. 物理學之研究法.

就天然發生之物理現象中,注意其經過之詳細情況,曰觀察(observation). 例如刻卜勒(Kepler)經歷十八年之歲月,注意觀察日月星辰之位置變化,以研究行星軌道,由是發見太陽系(solar system)行星運動之三大定律,即其最著名之一例.

專賴觀察以求因果關係,爲事頗難. 自然發生之現象,機會既不多,且出現時情形又極複雜. 此類伴同存在之事項,是否爲此現象所必需,勢非分別加以檢查,無從決定. 故由人力,使用適宜器械,俾所研究之現象,得以再行出現,以供隨時研究,此法曰實驗(experiment). 例如伽利略(Galileo)研究落體運動,特自畢沙(Pisa)之斜塔上,令石落下,即其一例. 用實驗研究,不特可以從容

從事,並可任意變更條件,探求何種有關,何種無涉,極其便利. 物理學之所以日逐進步者,皆實驗之賜也. 實驗中最關緊要之事項,莫如量度(measurement),即用數字表出所求之關係,以達正確之結果.

§4. 定律.

由觀察及實驗,知一切現象,彼此互相關聯,決無獨立存在之理. 有一現象出現,必有另一現象,繼之而起,前者曰因(cause),後者曰果(effect). 且不問發生之地點及其時間如何,因果關係,恆一定不變,是即所謂**自然之一致**(uniformity of nature),或稱之曰**因果律**(law of causality).

就一現象而言,亦有其因果關係,即在某種情形,當呈某種景況,是曰**自然律**(natural law). 自然律之關於物理現象者,曰**物理定律**(physical law). 物理定律須將其質及量,兩方面並行表出,始臻完備. 例如引力定律,僅言有引力作用,實嫌不足,必須表明引力與兩物體之質量之相乘積成正比,與其間之距離平方成反比,方克蕆事. 一現象所遵從之定律,如已求得,則曰此現象已得其**解釋**(explanation)或**說明**.

任何一種定律,如可由其他更普遍者演繹而出,則

其為定律之資格,立即消失. 例如刻卜勒之行星定律,可由更普遍之牛頓萬有引力定律演繹而出,故從嚴格言之,刻卜勒之定律,不能再稱為定律,惟習慣上仍沿用之而已. 物理學之最大目的,即在求得極少數之普遍定律,而能用以解釋極多數之物理現象.

普遍定律之中,如萬有引力定律之類,包含多數定律於其中者,特稱之曰**原則**(fundamental principle),與原則名似而實不同者,則有**原理**(principle). 原理之義,極為庬雜,無一定之界說,大都用於業經證明之命題,如阿幾米得原理,即其一例.

§5. 假說及理論.

對於甲之現象,以乙之現象解釋之,對於乙又以丙解釋之,循是以往,最後所達之現象,不能再以其他任何現象解釋之之時,則僅憑思考,立一想像之說,以為之解釋,是曰**假說**(hypothesis). 以假說為基礎,由此演繹而成之結論,曰**理論**(theory),或曰**學說**. 例如玻璃管內水銀之昇高,可由空氣壓力解釋之,空氣壓力又可由分子運動解釋之,分子運動說即假說,由此演繹而成之氣體動力論,即一種理論.

§6. 物理量.

凡有大小多寡可得而計量者,曰量(quantity). 關於物性或物理現象,必須將其量之大小多寡求出,方得精確之解释,如是者,曰**物理量**(physical quantity). 例如體積,密度等,為關於物性之物理量;速度,力等,為關於物理現象之物理量. 物理量種類繁多,大別為二: 由基本概念而得者,曰**基本量**(fundamental quantity);由基本量誘導而得者,曰**導出量**(derived quantity).

自然現象旣不能超越空間,時間及物質,則其變化中出現之量,莫不可由此三種基本量誘導而成.

空間可由長度(length)决定,物質可由質量(mass)决定,故此三種基本量,卽長度,質量與時間.

§7. 基本單位及導出單位.

欲論一量,必須有同種類之別一量以作標準,此項標準,是卽**單位**(unit). 一量如為其單位之n倍,則n卽為此量之**數值**(numerical value). 量之**大小**(magnitude),與其數值,不可混同;大小本一定,而數值則視其所用之單位以為轉移.

每一種量旣可任設一單位,則各種單位間,當然無

絲毫關聯. 爲研究便利計,通常僅對於長度,質量及時間三種基本量獨立制定其單位,其餘一切導出量之單位,均可由此導出之. 基本量之單位,曰**基本單位**(fundamental unit),由此導出者,曰**導出單位**(derived unit)三種基本量之單位,分條論列如次.

§8. 長度之單位.

學術上關於長度,面積,體積,質量等之單位,概用法國所規定之**米制**(metric system),亦即我國現行之標準制. 十進制最初以通過巴黎子午線由赤道至北極之距離,作長度之標準,命其一千萬分之一爲**米**(meter),用白金造成與此同長之棒,是曰**米原器**(standard meter). 後經國際度量衡會議,於1891年,改用白金90%及銥10%之合金,造成一特殊形狀之棒,如圖1,是曰**國際原器**(international standard). 此棒長約1.02米,橫斷面作X形,在溝內距兩端約1厘米處,各刻標線一條,與棒長成垂直. 此兩標線間之距離,在攝氏1°時,表正確之1米. 此種特

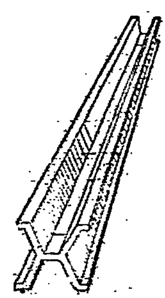


圖 1. 國際原器

殊形狀之棒之優點如下:(1)使全棒容易與其周圍成同一溫度;(2)不易彎曲;(3)縱面偶有彎曲,長度亦不受其影響.因此,兩標線間之距離,恆常不變.

1 米合我國現行市用制之 3 市尺,此兩種長度單位之差別,如圖 2.

又 1 米之千倍曰**仟米**(kilometer),又稱**公里**.1 米之百分之一曰**厘米**(centimeter),1 米之千分之一曰**毫米**(millimeter).

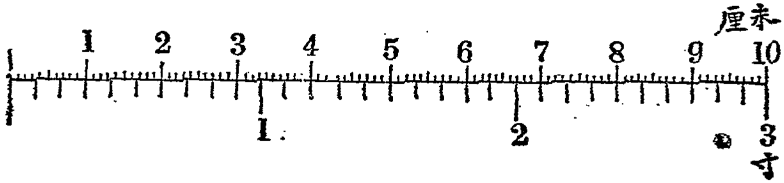


圖 2. 三市寸與十厘米之長恰相等

§9. **角之單位.**

平面角之單位,共有兩種:以一直角之九十分之一,作 1 **度**(degree);1 度之六十分之一,作 1 **分**(minute);1 分之六十分之一,作 1 **秒**(second),是曰**六十分法**(sexagesimal system).以等於半徑之圓弧對於圓心所張之角度,是 1 **弧度**(radian),是曰**弧度法**(circular system).如命 D 表任意角之度數,θ 表其弧度數,則兩者之間,有

$$D^\circ : 360^\circ = \theta : 2\pi$$

之關係,因 $\pi = 3.1416$

故 1 弧度 $=57^\circ\,17'\,44.8''$

1 度 $=0.017$ 弧度.

立體角之單位則以等於半徑自乘之球面積對於球心所張之角度表之,曰 1 立體弧度(solid radian),故全球面所作之立體角,等於4π.

§10. 時間之單位.

時間之單位,須以一種自然現象作爲基礎,然後始能決定. 此項自然現象本無限制,不過爲便利計,通常均採用地球之自轉. 對於恆星,地球自轉一周之時間定爲時間之單位,曰恆星時 (sidereal time)之一日 (day).或簡作 1 恆星日 (sidereal day). 觀測一恆星連續中天(culmination)兩次所歷之時間,卽爲一恆星日之長.

恆星對於日常生活,無直接關係,轉不如太陽之爲密切,故以太陽時 (solar time) 代之. 太陽時之 1 日卽當太陽連續兩次中天其間所歷之時間,是曰 1 太陽日(solar day). 地球公轉之速度,隨時略有不同,軌道面又與赤道面不一致,故太陽日之長短,不能一律,就一年中

之太陽日而平均之,曰**平均太陽日**(mean solar day). 1日分作24**小時**(hour), 1 小時分作60**分**(minute), 1 分又分作60**秒**(second).

通常量度時間之器,爲**鐘錶**(clock and watch),其盤面上等分爲十二分度,每一分度又細分爲五小分度.中心軸上有長短兩針,短者表小時,每轉一周爲十二小時,長者表分,每轉一周爲六十分. 盤之下方别有小針,每轉一周爲六十秒.

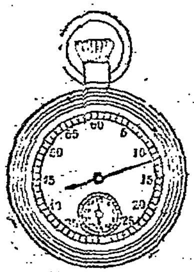


圖 3. 停錶

在物理學上,量度短時間,最爲重要,以用圖 3 所示之停錶 (stop watch) 爲最簡便,可將五分之一秒讀出.

§11. 質量之單位.

據經驗知宇宙間之物質,既不能創生,亦不能消滅是曰**物質不滅定律**(law of conservation of matter),表示此項多寡之量,曰**質量**(mass).

質量之單位,亦有標準原器,仍由鉑 90% 及銥 10% 之合金製成,形爲一圓柱,直徑與高相等,保存於國際度量衡局內,是爲 1 **仟克**(kilogram),又名**公斤**,合市斤 2 斤

1仟克之千分之一曰克 (gram). 1克之千分之一曰毫克 (milligram).

温度爲攝氏4°之水,卽最大密度之水,每1000立方厘米之質量,大致與1仟克相等,嚴格言之,則爲$\frac{1}{1.000028}$仟克,故通常均視1立方厘米之水之重量爲1克.

§12. 度量衡.

度量衡(weights and measures)爲日常生活所必需,各國皆有定制,以齊一之. 度指長度,量指容量(capacity),衡指質量. 其中長度及質量,均屬基本量,其單位已如前述. 容量之單位,在米制用升(litre),爲1仟克攝氏4°之純水所佔之容積,大致等於1000立方厘米,故爲一種導出單位.

我國現行之度量衡制,與米制同,卽度用米,亦稱公尺;量用升,亦稱公升;衡用仟克,亦稱公斤. 更有市用制取1米三分之一,定爲1市尺,1升定爲1市升,1仟克定爲2市斤.

§13. C. G. S. 單位制及英制.

物理學中對於長度,質量及時間三種基本量,各取

其一定之單位,以相組合. 對於長度則用厘米,對於質量則用克,對於時間則用秒. 如是聯合而成為厘米克秒制 (centimeter-gram-second system),或各取其英文之首一字母,連綴而成 C. G. S. 制 (C. G. S. system).

英制表長度用英尺(foot),表質量用磅(pound),表時間仍用秒,故聯合而成英尺磅秒制 (foot-pound-second system),其進位過繁,不適於科學使用,但實用上,仍多沿用者,政府現正積極推行米制與市用制於民間,使英制漸受淘汰. 英制之進位及與C.G.S.制之關係如表1:

表1. 英制單位及換算

1英尺 =12英寸(inch)

1碼(yard)=3英尺

1英里(mile)=5280英尺

1加倫(gallon)=4夸脫(quart)

1磅 =16英兩(ounce)

1噸(ton)=2240磅

1英寸 =2.54厘米

1米 =39.37英寸

1升 =1.06夸脫

1仟克 =2.20磅

1磅 =453.6克

§14. 密度及比重.

物體中物質密集程度之狀況,可用單位體積內所具有之質量表出之,是曰密度(density),通常以 ρ 代之.例如1立方厘米之銅,質量等於8.8克,故銅之密度,即以此8.8表出之,而稱之曰8.8**每立方厘米克**(gram per cubic centimeter),或簡寫作 $8.8\frac{\text{克}}{\text{立方厘米}}$.

各種物質之質量,對於同體積4°C.之水之質量之比,曰**比重**(specific gravity). 但4°C.之水,每1立方厘米適等於1克,故對於任何物質,如以每立方厘米克作單位,表出其密度,則其數值,恆與比重之數值相等. 但比重爲純粹之數字,密度則有一定之單位,性質逈不相同.

各種常見物質之比重,及C.G.S.制之密度數值如表2:

表2. 各種物質之比重

鉑	21.5	鋅	7.1
金	19.3	玻璃	2.4—4.5
汞	13.6	石	2.5—3.0
鉛	11.4	鋁	2.65
銀	10.5	堅硬木料	0.7—1.1
銅	8.93	冰	0.911
鐵	7.1—7.9	人體	0.9—1.1

軟木	0.25	清潔水	1.00
濃硫酸	1.84	火油	0.80
海水	1.03	汽油	0.75
牛奶	1.03	空氣	約 0.0012

§15. 天平.

量度物體質量之物曰**天平** (balance), 係利用等臂槓桿(參照§97)而成,如圖 4. 其主要部分爲上端之水平框架,曰**梁** (beam). 梁之中央有三角柱,取水平位置,其稜正向下方曰**刀口** (knife edge), 以支柱上端之瑪瑙平板承受之. 梁之兩端,亦各有同樣之刀口,其稜向上,以承盛物及砝碼之盤(scale-pan). 三刀口之稜互相平行,且與梁垂直. 梁之中央附有長針一枚,曰**指針** (pointer), 下有象牙標度板,通常刻爲20格.梁旁有架,可由下方之螺旋使其上下移動,上則將梁舉起,俾不用時,刀口不致受傷;下則將梁放於瑪瑙平板上,以備使用. **砝碼**(weights)在 1 克以上者,用銅,十分之一克以下者,用鉑或鋁. 一套砝碼計有下列各種:

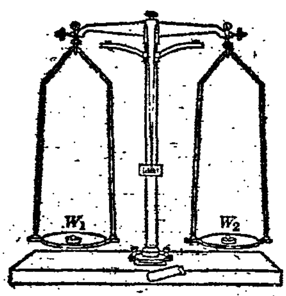


圖 4. 天平

100, 50, 20, 10, 10, 5, 2, 1, 1,

5, .2, .1, .1, .05, .02, .01, .01,

005, .002, .001, .001.

單位均為克,對於百克以上,其配合亦與此同. 又對於過於微小之質量,有於梁上適當處所懸一游碼 (rider) 以求之者.

問題第一

1. 知 1 英尺 (foot) 等於 30.48 厘米,求 1 市尺等於若干英尺?

2. 知 1 英里(mile) 等於 5280 英尺, 1 市里等於 1500 市尺, 試將 1 英里, 1 市里,及 1 仟米各化成米數,而比較之.

3. 知 1 加侖(gallon)等於 231 立方英寸(cubic inch),問 1 升合若干加侖?

4. 知 1 磅(pound)等於 453.6 克: 試將 1 仟克, 1 磅及 1 市斤各化成克數而比較之. 又 1 市斤合若干磅?

5. 1 磅等於 16 英兩 (ounce), 1 市斤亦等於 16 兩. 試比較中英之兩,孰大孰小? 又 1 中兩合若干英兩?

6. 上海至南京之鐵路全長 312 仟米 (公里), 合市里幾里? 最近特別快車早晨八點鐘由上海開出, 午後兩點三十分鐘即到南京,平均每小時可行若干仟米,若干市里?

7. 現在飛機昇高之紀錄為 38500 英尺,合若干米?

8. 太古糖每包十磅,售價二元,1市斤之價若干?

9. 一人體重140磅,合若干市斤?

10. 直徑1市尺深1市尺之桶,可盛若干市斤之水?

11. 牛奶1升之重爲若干?

12. 5加侖之汽油重若干?

13. 有鉛一塊,重2850克,求其體積.

14. 有長方形之木塊,已知其長爲6寸,寬2寸,厚4寸,質量爲1125克,求其比重.

15. 通常表示金質用開(carat),係以全體分作24分,如金占18分,銅占6分,則稱爲18開金,如係純金,則稱爲24開金.試求18開金之密度.

16. 設有一段飛機用木材,長4英尺,寬1英尺,厚半英尺,重14.6磅,試求其密度. 並與軟木比較,孰輕孰重?

17. 有200立方尺之冰塊,熔化成水可得體積幾何?

18. 有金與銀混合成爲一種合金,比重爲16,全體重100克. 其中含有之金銀各若干克?

第一篇　力學

第一章　運動學

§16. 位置.

一物體對於他物體之空間的關係,曰位置(position) 言及位置,必先有其依據之物體存在,故爲一種相對的 (relative)觀念,而非絕對的(absolute). 日常使用之位置, 均以地球爲其依據.

表示位置之方法如圖 5. 任取一點O, 曰原點(origin). 通過此點引縱橫兩直線,橫者爲 XOX' 曰橫軸 (axis of abscissa),或曰 **X** 軸(X-axis);縱者爲 YOY', 曰縱軸 (axis of ordinate),或曰 **Y** 軸 (Y-axis); 合稱之則曰坐標軸 (coordinate-axes). 凡在同一平面內之各點,均可依據坐標軸決定其位置. 例如有一 P 點, 欲決定其位置時,可引 PM 及

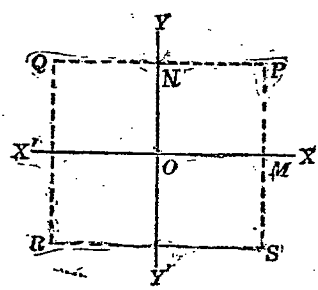


圖 5.　直角坐標

PN 與坐標軸平行,命 x 表 PN 之長,y 表 PM 之長. 由 x 及 y 之值,即可決定 P 之位置,或逕稱爲點 (x, y). 如是之 x 及 y,曰點 P 之坐標(coordinates),其值可正可負. 為正,則點在右,負則在左;y 爲正,則點在上,負則在下. 如 $P(x, y)$,$Q(-x, y)$,$R(-x,-y)$,$S(x,-y)$. 兩軸恰相垂直時,計算最便,應用亦最廣,特稱爲直角坐標 (rectangular coordinates).

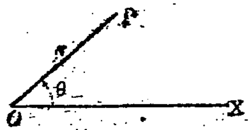


圖 6. 極坐標

除直角坐標而外,又有所謂極坐標(polar coordinates)者,其法亦甚便. 如圖 6,任取一定點 O,名曰極點(pole),通過此點引一直線 OX,名曰原線(initial line). 由此亦可決定各點之位置. 例如求 P 點之位置時,先連結直線 PO,命 r 表其長,θ 表角 XOP. 由 r 及 θ 之值,即可決定 P 之位置,或逕稱之爲點(r, θ). 如是之 r,曰向徑(radius vector),而 θ 則曰極角(polar angle). r 恆取正值,θ 則自 OX 起,沿反時針(counter-clockwise)方向測得者爲正,沿順時針,(clockwise)方向測得者爲負. 兩種坐標間之關係如下:

$$\left.\begin{aligned} x &= r\cos\theta, \\ y &= r\sin\theta. \end{aligned}\right\} \qquad \left.\begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2, \\ \tan\theta &= \frac{y}{x}. \end{aligned}\right\}$$

§17. 運動.

不問時間之經過若何,位置恆一定不易者,曰**靜止**(rest),與時共變者曰**運動**(motion). 論運動與靜止,亦必有所根據,故亦爲相對觀念. 在運動中之點,曰**動點**(moving point),其經過之各點,連成**路線**(path),或曰**軌道**(orbit). 路線如爲直線,即以直線之方向表**運動之方向**(direction of motion);如爲曲線,則以各點之切線,表在此一點時運動之方向. 運動之方向一定不易者,曰**直線運動**(rectilinear motion);與時共變者,曰**曲線運動**(curvilinear motion). 又一物體各點間之相互位置,曰**相對位置**(relative position),其相互位置之變化,曰**相對運動**(relative motion).

一物體運動時,其中各點均作完全同樣之運動者曰**移動**(translation);各點均以同一直線爲軸,在其周圍畫一圓形者,曰**轉動**(rotation). 凡作移動之物體,只須求得其中任何一點之運動狀況,即足.

§18. 位移

專論動點所起之位置變化,而不涉及其所歷之時間;曰**位移**(displacement). 決定位移之量有二,即**大小**

(magnitude),及發生之方向(direction and sense). 如圖 7,

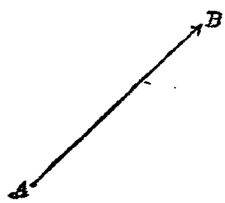


圖 7. 位移

動點由位置 A 移至 B 時,其大小以 AB 間之距離表之,方向以 A 至 B 之方向表之. 卽用一有限直線,加一箭頭於其末尾一端,可將位移完全表出,或逕寫作 $\overline{AB}$. 如作 $\overline{BA}$, 卽表由 B 至 A 之位移,與前相反. 又長短相同,箭頭亦在同一端之平行直線所表之位移,彼此相等.

§19. 位移之合成及分解.

動點由一點 A 出發,如圖 8,經位移 $\overline{AB}$ 至 B, 再經第二位移 $\overline{BC}$ 至 C,結果與由 A 出發僅經一度位移 $\overline{AC}$ 卽至於 C 者同. 卽兩位移 $\overline{AB}$ 及 $\overline{BC}$,與單一位移 $\overline{AC}$ 同等 (equivalent). $\overline{AC}$ 曰合位移 (resultant displacement), $\overline{AB}$ 或 $\overline{BC}$ 曰分位移 (component displacements). 由分位移求其合位移時,曰位移之合成 (composition of displacement). 反之,由合位移求其分位移時,曰位移之分解 (resolution of

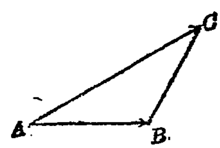


圖 8. 位移之合成

displacement).

合成之法,先由任意一點引一有限直線,代表第一位移,次由其終點再引一有限直線,代表第二位移,最後連結第一位移之出發點及第二位移之終點卽得. 全體適成一三角形,如 ABC, 曰**位移之三角形** (triangle of displacements), 其第三邊 AC, 卽代表合位移.

又合成與位移之次序無關,例如圖 9, 先作 $\overline{AB}$, 次作 $\overline{BC}$,固得合位移 $\overline{AC}$;先作與 $\overline{BC}$ 同等之 $\overline{AD}$,次作與 $\overline{AB}$ 同等之 $\overline{DC}$, 亦得同一之合位移 $\overline{AC}$. 且 $ABCD$ 成一平行四邊形,合位移 $\overline{AC}$ 適成其對角線,故由此亦可求得合位移,是曰**位移之平行四邊形** (parallelogram of displacements). 用算式表之,則爲

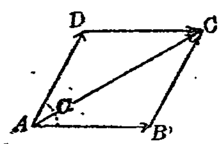


圖 9. 合成不依次序

$$\overline{AC} = \overline{AB} + \overline{BC}$$

運算用**幾何加法**(geometrical addition),與通常之代數量不同. 如欲改作通常之**算術加法**(arithmetical addition) 命 a 表兩位移間之角度,則成

$$AC^2 = AB^2 + BC^2 + 2\,AB \cdot BC \cos a.$$

如 $a=0$,兩位移均向同一方向,上式成爲 $AC=AB+BC$,完全與算術加法一致. 此時之合位移,大小與分位

移之和相等,方向亦相同. 如$\alpha=\pi$,兩位移之方向正相反對,上式成爲 $AC=\pm(AB-BC)$, 與算術減法一致. 此時之合位移,大小與分位移之差相等,方向與較大者同. 如$\alpha=\frac{\pi}{2}$,兩位移之方向,互成垂直,上式成爲 $AC=\pm\sqrt{AB^2+BC^2}$. 命合位移與分位移$\overline{AB}$間之角度爲θ,則合位移之方向,可由 $\tan\theta=\frac{BC}{AB}$ 決定.

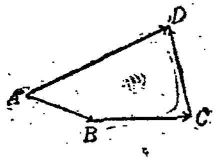


圖 10. 位移之多角形

遇有二個以上之位移,則依圖10之方法合成之. 卽將$\overline{AB}$, $\overline{BC}$及$\overline{CD}$等依次銜接,最後用一直線連結其最初出發之一點及最末之終點,如$\overline{AD}$. 如此,得一多角形,曰**位移之多角形** (polygon of displacements), $\overline{AD}$ 卽合位移.

反之,由一位移分解爲二個以上之分位移時,結果可多至無限. 例如圖11之$\overline{AC}$,旣可分爲$\overline{AB}$,$\overline{BC}$,又可分爲$\overline{AD}$,$\overline{DE}$,$\overline{EC}$等. 通常以分解爲二分位移時爲最多,且分成之兩分位移中,如有其一,例如 $\overline{BC}$, 爲已知,則其餘之$\overline{AB}$, 卽成爲一定不變之量. 以式表之,當作

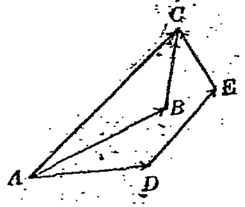


圖 11. 位移之分解

$$\overline{AC}-\overline{BC}=\overline{AB}$$

但一方面若將$\overline{AC}$,$\overline{CB}$合成之,則得

$$\overline{AC}+\overline{CB}=\overline{AB},$$

故 $$\overline{CB}=-\overline{BC}.$$

即大小相等方向相反之位移,可作成負位移表出之.

又分解後之兩分位移,其方向互相垂直時,尤為重要. 例如圖12之$\overline{AC}$,如分解為互相垂直之兩分位移$\overline{AB}$及$\overline{BC}$,命a表其中之一分位移$\overline{AB}$,與原有之$\overline{AC}$間之角度,則

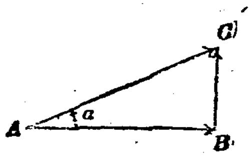


圖 12. 垂直之位移

$$\overline{AB}=\overline{AC}\cos a,\quad \overline{BC}=\overline{AC}\sin a.$$

§ 20. 向量及無向量.

物理學中所用之量,大別為兩種: 例如質量,體積等,僅有大小可言者,曰無向量 (scalar quantity); 又如位移,及後述之速度等,除大小而外,尚須指定其方向者,曰向量(vector quantity).

無向量之大小,可用數值表出之,其運算概照通常之算術方法. 向量則須用有限直線,方能將其大小及方向同時表出,其運算概照幾何方法. 兩者之性質,根本不同,須隨時注意區別之. 但在同一直線上之向量,

則與具有正負號之代數量,性質相同, 如將向量沿坐標軸方向分解後,其各分向量,亦與單純之代數量性質相同. 故凡在同一坐標軸上之分向量,均可用代數方法處理之

§21. 速度.

物體完成一位移所歷之時間,長短不一,表示此種運速之量,曰速度 (velocity). 為簡便計,先就在一直線上運動之動點論之. 圖13之 O 表原點,當 t_0 之一時刻,動點與原點間之距離為 s_0, 時間成為 t, 距離即成為 s. 換言之,在時間 $t-t_0$ 之間,所起之距離變化等於 $s-s_0$. 故 $\frac{s-s_0}{t-t_0}$ 表單位時間內所起之距離變化,是即速度,通常均以 v 表之,即

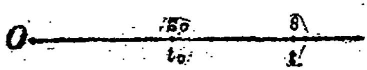


圖 13. 速度

$$v=\frac{s-s_0}{t-t_0}.$$

如不拘在任何時刻,不問經歷時間之長短如何,v 之值均一定不變時,曰等速度運動 (uniform motion),因係直線上之運動,故又有等速度直線運動(uniform rectilinear motion) 之稱. v 之數值由 $\frac{s-s_0}{t-t_0}$ 決定,其方向則由動點

移動之方向決定．旣有大小與夫方向,故爲向量．因之,速度之合成分解,均遵從向量合成之規定．如略去方向,專論數值,則稱爲**速率**（speed），以示與速度有別例如有兩火車,一向東行,一向北行,雖於同一時間內,進行相等之距離,但因其方向不同,只能謂其速率相等,而不能謂其速度相等．

又$\frac{s-s_0}{t-t_0}$之數值,如因時而異,則其所表者,係動點在時刻t與t_0間之**平均速度**(mean or average velocity)．尤以t與t_0相隔極近，s與s_0亦相差不遠之時，最爲重要．此時之$t-t_0$，特以Δt代之,同樣$s-s_0$則以Δs代之，兩者之值均甚微小．當Δt趨近零時,此極短時間內之平均速度$\frac{\Delta s}{\Delta t}$有一定之值,是爲動點在時刻$t_0$之**瞬時速度**(instantaneous velocity)．凡速度因時而變之運動,曰**變速度運動**（motion with variable velocity），論此種運動之速度,卽須使用瞬時速度．

速度之單位,爲在單位時間內進行1單位路程時之速度．在C.G.S.制,單位速度爲每秒間進行1厘米之等速度運動之速度,稱之曰1**每秒厘米**（centimeter per second），故每秒進行n厘米之路程時,其速度爲n每秒厘米．

§22. 加速度.

變速度運動之 v,其值因時而異. 為簡便計,先就直線運動論之. 動點在時刻 t_0 之速度為 v_0,時刻成為 t,則速度成為 v. 換言之,在 $t-t_0$ 之期間中所起之速度變化等於 $v-v_0$. 故 $\frac{v-v_0}{t-t_0}$ 表單位時間內所起之速度變化,通稱之曰**加速度** (acceleration),而以 a 表之,即

$$a=\frac{v-v_0}{t-t_0}.$$

a 之數值由 $\frac{v-v_0}{t-t_0}$ 決定,其方向則由速度變化之方向決定. 加速度既有大小與夫方向,故亦為向量,其合成及分解均遵從向量合成之規定.

如不拘在任何時刻,不問經歷時期之長短如何,a 之大小與夫方向,均一定不變時,曰**等加速度運動** (motion with constant acceleration). 反之,兩者之中,有一變動,或兩者共變時,曰**變加速度運動**(motion with variable acceleration). 對於變加速度運動,$\frac{v-v_0}{t-t_0}$ 之值,表動點在時刻 t_0 與 t 間之**平均加速度** (mean acceleration). 尤以 t 與 t_0 相隔極近,v 與 v_0 亦相差不遠時,最為重要. 此時以 Δt 代 $t-t_0$,以 Δv 代 $v-v_0$,兩者之值均甚小. 當 Δt 趨近零時,此極短時間內之平均加速度 $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ 亦有一定之值,

是爲動點在時刻 t 之瞬時加速度(instantaneous acceleration). 論變加速度運動之加速度,即須使用此項瞬時加速度.

加速度之單位,爲單位時間內起單位速度變化之等加速度運動之加速度. 在 C. G. S. 制,速度之單位爲 1 每秒厘米,故加速度之單位,爲每秒間發生 1 每秒厘米之速度變化之等加速度運動之加速度,稱爲 1 每秒每秒厘米(centimeter per second per second), 如每秒間發生之速度變化爲 n 每秒厘米時,則其加速度爲 n 每秒每秒厘米.

§ 23. 速度圖示法.

如圖 14,取橫軸 OA 表時間,其長與時間 t 爲比例,將 OA 分爲許多相等之小區間,每一區間 ab, 代表一極短之時間. 於通過 O 點之縱軸上,取 B 點,令 OB 之長與動點在時間 t 開始時之瞬時速度爲比例. 同樣就各分點,沿縱軸各取相當之長,如 ac 及 bf 等,與各瞬時速度成同一之比例. 連結各頂點,得曲

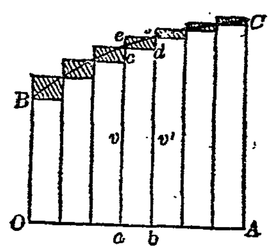


圖 14. 速度曲線

線 $BcfC$,稱曰速度曲線(speed curve),由此曲線,可以研究運動狀況,是卽圖示法(graphical representation).

試就一極短時間 ab 而言,假使在此短時間內,速度不變,恆與最初速度 v 相等,則 ab 間所通過之路程,應爲 $v\times ab$,卽與矩形 $acdb$ 之面積相等. 假使在此短時間,其速度不變,恆與最末之速度 v' 相等,則 ab 間所通過之路程,應爲 $v'\times ab$,與矩形 $acdb$ 及小矩形 $cdfe$ 之和相等. 兩者之差,僅小矩形 $cdfe$ 之面積而已. OA 間之區間劃分愈多,小矩形 $cdfe$ 之面積愈行減少,達於極限時,區間分爲無限數,同時此小矩形 $cdfe$ 之面積,趨近零. 故 ab 間所通過之路程,卽等於 ab,兩縱坐標 ac 及 bf,以及曲線 cf 等四線所範圍之面積. 不僅一小區間如此,卽全部亦復如此. 卽在全時間 t 內所通過之路程,與 OB, OA, AC,及曲線 BC 等四線所範圍之全面積相等.

§24. 等速度運動

作等速度運動之動點,無論在任何時刻,其速度恆一定不變. 照前述圖示法作成之速度曲線,爲與橫軸平行之一直線. 命 v 表速度, s 表時間 t 內進行之路程,則其關係如下:

$$s = vt$$

§25. 等加速度運動.

命 v_0 表在時間 t 開始之一瞬間之速度, v 表其臨末之一瞬間之速度,則每單位時間內增加之速度,當爲 $\frac{v-v_0}{t}$,是卽加速度 a, 故得

$$v = v_0 + at.$$

作等加速度運動之動點,其 a 之值恆一定不變. 故照前述之圖示法,作速度曲線,在其上各小區分點所立之縱軸,與其鄰之差,恆一定不變. 如是之速度曲線成一直線,與橫軸作一定之傾斜,如圖 15 之 BC. 又 OB 表初速度(initial velocity) v_0, 而 AC 則表末速度(final velocity) v_0+at. 面積 $OBCA$ 表時間 t 內動點所進行之路程. 引 BD 與 OA 平行,將此面積分爲兩部,下方爲矩形 $OBDA$, 上方則爲三角形 BDC. 此三角形之一邊 DC,表經歷時間 t 後所增加之速度,卽等於 at, 其他一邊 BD 則表時間 t. 故知全面積 $OBCA$ 等於 $v_0t + \frac{1}{2}t \cdot at$. 命 s 表時間 t 內動點進行之路程,則

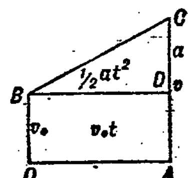


圖 15. 等加速度運動

$$s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

由以上兩式中消去時間 t, 得

$$v^2 = v_0^2 + 2as.$$

此三式極爲重要,以下數節所述,均其應用

§ 26. 自由落體之運動.

凡在地球表面附近未受他物支持之物體,均以一定之加速度,向地表面落下,故其運動爲等加速度運動.嚴格言之,此種加速度,其值隨地而異,不過相差極微,通常卽視爲相等,亦無大礙. 在緯度45°之海面上,此加速度等於 980.6 每秒每秒厘米,通常對於大略計算,則用 980 每秒每秒厘米,而以 g 代表之,稱之曰落體之加速度(acceleration of a falling body),又因此項加速度,由重力而來,故又名重力加速度(acceleration of gravity).

由靜止狀態開始落下之物體,曰自由落體(free falling body),此種物體之初速度 v_0 等於 0, 故將落體加速度 g 代替前節所得等加速度運動式中之 a, 卽得自由落體之運動式如下:

$$v = gt,$$

$$s = \frac{1}{2}gt^2,$$

$$v^2 = 2gs.$$

§27. 拋體之運動.

以一定之初速度將物體拋出時,物體除依初速度方向上作等速度運動而外,同時更受重力加速度作用,向地面落下. 初速度之方向不同,則其結果亦異.茲分作三種情況述之.

(1)<u>拋下運動</u>: 初速度 v_0 之方向係鉛直向下時,因初速度與重力加速度 g 之方向相同,故可適用等加速度運動之公式,得

$$v = v_0 + gt,$$

$$s = v_0t + \tfrac{1}{2}gt^2,$$

$$v^2 = v_0^2 + 2gs.$$

(2)<u>拋上運動</u>: 初速度 v_0 之方向係鉛直向上時,因初速度與重力加速度 g 之方向相反,若以初速度之方向爲正,則 g 之方向爲負,應於其前加負號後,始能適用前式,故得

$$v = v_0 - gt,$$

$$s = v_0t - \tfrac{1}{2}gt^2,$$

$$v^2 = v_0^2 - 2gs.$$

當 $t=\frac{v_0}{g}$ 時, $v=0$, 物體不能再向上昇,由開始運動至此時爲止所進行之路程,即其所能昇達之高,故曰昇高(height of ascent),其值由 $s=\frac{v_0^2}{2g}$ 而定. 由此以後,物體折而下墜,達於地面時, $s=0$, 應在 $t=2\frac{v_0}{g}$ 之一瞬間. 故由運動開始至再達地面爲止之期間,恰等於由地面達昇高之期間之二倍. 換言之,由地面至昇高,及由昇高降至地面,需時彼此相等.

(3)抛射體運動: 初速度 v_0 之方向,與重力加速度不在同一直線上時,例如斜向或水平方向射出之物體,通稱之曰拋射體(projectile).

如圖 16, AB 表初速度之方向,假使不受重力作用,物體當沿 AB 往前直進,速度永不變化. 例如由 A 出發,第 1 秒之末到達點 *1*, 第 2 秒之末到達點 *2*, 第 3 秒之末到達點 *3*, 餘倣此. 實際既須受重力作用,決不若是簡單. 當物體初離 A 點時,即因重力作用,開始其落下運動. 應行落下之距離,與自由落體同. 例如在第 3 秒之末,應落下 $s=\frac{1}{2}gt^2=\frac{1}{2}\times 980\times 3^2=4410$ 厘米.

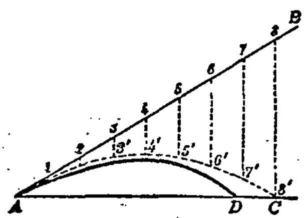


圖 16. 拋射體之路線

故第3秒之末,物體不當在 3,而在其直下之一點 $3'$, 3 與 $3'$ 之間之距離爲 4410 厘米. 對於其他各點,亦復如是. 故實際之路線應爲曲線 $A\ 1'\ 2'\ 3'\cdots\cdots C$. 此曲線曰拋射體之軌道(trajectory),即通常之拋物線(parabola).

上述之軌道 AC, 係就在眞空中而言. 如在空氣中運動,更須受空氣之阻力作用,物體能達之高度及遠度,均因是而減,在下降之一側,爲勢略峻,即在空氣中之路線,成爲圖中曲線 AD 之狀況.

§28. 圓周運動.

如動點所經過之路線,爲一圓周,此種曲線運動,曰圓周運動(circular motion). 圖 17 之 O 表圓心, P 表動點, 當其在 P 時,切線 PP' 即代表其在此一點之速度. 由此經歷極短時間 Δt 之後,動點已移至 Q, 此時之速度,則由 QQ' 代表之. 假定 PP' 及 QQ' 之長短相等,即速度之大小不變,但方向既已由 PP' 改作 QQ',就速度而言,早已不同矣.

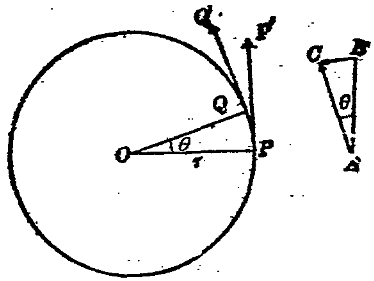


圖 17. 圓周運動

試自任意一點 A 引 AB 與 PP' 平行,引 AC 與 QQ' 平行,兩者之長短均與動點之速度大小 v 相等. 如此,$\overline{AB}$ 可代表動點在 P 時之速度,$\overline{AC}$ 可代表其在 Q 時之速度. 命 r 表圓半徑,θ 表角 POQ,則角 BAC 亦等於 θ. 連結 BC,由向量合成之規定,知 $\overline{AC}$ 應為 $\overline{AB}$ 及 $\overline{BC}$ 之和. 故知動點由 P 達 Q 之時期中,其速度所受之變化為 $\overline{BC}$. 因 Δt 為時極短,故

$$v=\frac{PQ}{\Delta t}=\frac{r\theta}{\Delta t}.$$

一方面因
$$BC=AB\cdot\theta=v\theta=\frac{v^2\Delta t}{r}.$$

照定義以 Δt 除之,應得加速度 a,故

$$a=\frac{v^2}{r}.$$

其值一定不變,方向則為角 POQ 之二等分線. 又因 P 與 Q 極相接近,故此二等分線恆與半徑 OP 相重. 即圓周運動之加速度,方向恆正向圓心.

§29. 斜面上之運動.

物體沿斜面(參照§95)運動時,其加速度亦可分解作兩成分研究之. 命 i 表斜面對於水平所作之傾斜角度,則與斜面垂直之分加速度等於 $g\cos i$,與斜面平

行之分加速度等於 $g \sin i$， 斜面垂直之方向上,因受斜面阻止,不能發生運動,僅餘平行方向上之運動，故實際上之運動為以加速度 $g \sin i$ 沿斜面順滑而下．故若以 $g \sin i$ 代去§25中之等加速度運動公式中之 a，即得

$$v^2 = v_0^2 + 2g \sin i \cdot s.$$

如圖18,命 h 表斜面之高, s 表斜面之長,則得

$$h = s \cdot \sin i,$$

$$\therefore \quad v^2 = v_0^2 + 2gh.$$

即沿斜面滑下垂直路程 h 時之速度,與在拋下運動中,經過同一路程時之速度,彼此相等．

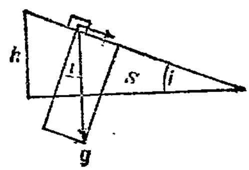


圖 18.　斜面上之運動

問題第二

1.　何種運動係速率一定而方向變化?　何種運動係方向一定而速率有變化?　何種運動其速率及方向兩者共同變化?　何種運動其速率與方向兩者共同不變?　各舉例明之．

2.　在雨中急走,傘應如何撐法?

3.　自由落下之球,其第一秒所經過之路程,何以與其在第一秒末所得之速度不同?

4. 一人向東步行3里後,折而向北,又步行4里. 試用一單獨之位移表出之.

5. 一船向南行1里後,再向西南方行$\sqrt{2}$里,求此船之位移.

6. 在赤道上地球之半徑爲6400仟米,求赤道上之物體之速度.

7. 一人向東北方步行,其速度爲4每小時里,其在東方及北方之分速度,各爲若干?

8. 設有一質點,在一直線上以10每秒尺之速度進行,試作一直線與其進行方向成30°之傾斜,求質點在此直線上之分速度.

9. 設有一物體,沿一斜面滑下,斜面之傾斜角度爲60°.求其在水平方向及鉛直方向上之分速度.

10. 船行速度爲18每小時里,河流速度爲6每小時里,如河面寬300尺,而船行方向與河岸垂直,則船到對岸時,去最初船首所向之一點若干遠?

11. 有水夫行船,其速度倍於河流速度,欲與河岸成直角渡過河面,開船時所向之方向如何?

12. 船向北行,水流則向西,開船一小時後,船已去有$8\sqrt{3}$仟米之遠,方向在北方之西邊30°.求水流及船之速度.

13. 命v_0表初速度,v表末速度,a表加速度,s表經過路程,t表時間,求下列各題:

(i) $v_0=2$每秒厘米,$a=3$每秒每秒厘米,$t=5$秒,求v及s.

(ii)　$v_0=7$ 每秒厘米，$a=-1$ 每秒每秒厘米，$t=7$ 秒，求 v 及 s.

(iii)　$v_0=8$ 每秒厘米，$v=3$ 每秒厘米，$s=9$ 厘米，求 a 及 t.

(iv)　$v=-6$ 每秒厘米，$s=-9$ 厘米，$a=-\frac{3}{2}$ 每秒每秒厘米，求 v_0 及 t.

14. 設有一物體以 2 每秒每秒厘米之加速度由靜止開始運動．求第 20 秒之末，其速度幾何？　又共行若干路程？

15. 一物體由靜止開始作等加速度運動，經歷 10 秒鐘後，共進行 10 米之遠，求其加速度．

16. 一物體以 2 每秒每秒厘米之加速度，由靜止開始運動，須歷若干時間，始能得 30 每秒厘米之速度？　又從開始起至此時止，共行若干路程？

17. 一物體之速度為 100 每秒厘米，受 −2 每秒每秒厘米之加速度作用若干時後，始停止？　又至停止為止共進行若干遠？

18. 一物體由靜止開始運動，於 10 秒鐘內共進行 171 厘米之路程，求其加速度．

19. 沿鉛直方向拋上之物體，歷 10 秒鐘後，復返於其出發之地點，其初速度幾何？

20. 鉛直拋上之物體，通過 54.5 厘米高之地點時，其速度等於 436 每秒厘米．求初速度及通過此點之時刻．

21. 鉛直拋上之物體復行降下通過某一點時，速度成為 50 每秒米，問前此若干時，物體亦曾以大小與此相同之速度，向上昇起？

22. 鉛直拋上之物體其初速度爲6540每秒厘米，能昇高至何處，時幾何?

23. 由塔頂自由落下之物體當其降落地面最後之一秒間經過路程，爲其全路程之$\frac{16}{25}$，求塔高。

24. 又前題如最後一秒間內經過之路程等於其全路程之$\frac{9}{25}$時，塔高若干?

25. 沿傾斜30°之斜面將物體拋上，如其初速度爲2500每秒厘米，求其在斜面上昇上之路程，及其時間。

第二章 力

§30. 慣性.

靜止之物體開始運動,必有其原因,此項原因,係由其他物體而來之作用. 例如以磁鐵近鐵片,鐵片發生運動,其原因由於受磁鐵之作用. 又如抽去支持物體之臺,物體自行落下,其原因由於受地球之作用. 如不受外部之作用,則靜者恆靜.

又運動中之物體,開始改變其速度時,亦必有其原因,此項原因,仍爲外物之作用. 例如滑行地面之球,速度漸減,最後成爲靜止,其原因由於受地面之摩擦作用又由高處落下之物體,愈行愈速,由於受地球重力作用.如不受外物作用,則動者恆繼續其等速度直線運動.

總之,一切物體,不論或動或靜,均有保持其現狀之性質,是曰**慣性**(inertia)

§31. 力

使靜者動,動者改變其速度,卽打破慣性之原因,爲外物之作用,如是之作用,曰**力** (force). 換言之,使靜者

動,或使動者改變速度,均不外使其得一加速度,故力爲發生加速度之原因. 反之,不受外力作用者,不能得加速度.

§32. 牛頓之運動第一定律.

上述之慣性,及力與加速度之關係,本屬同一意義,爲支配運動之第一定律,曰牛頓之運動第一定律(Newton's first law of motion),從制定者之名也,其原文如下:

一切物體,必維持其靜止或沿一直線作等速度運動之狀態,非受外力強迫,其態不變.

因所言者爲物體之慣性,故又有慣性定律(law of inertia)之稱.

§33. 質量.

據實際經驗,欲使靜者動,或使動者改變速度時,物體之質量愈大,愈覺其難. 換言之,質量大者,其慣性亦大. 故利用慣性之大小,即可得量度質量之標準. 試以同一之力,作用於甲乙兩物體上,取其所得之加速度比較研究之. 如兩者之加速度相等,即表示兩物體之慣性相等,可推知其質量亦相等. 如甲之加速度,等於

乙之加速度之n倍,即表示乙之慣性等於甲之慣性之n倍,故可推知甲之質量等於乙之質量之$\frac{1}{n}$. 更據實驗證明,只須用同一之力,作用於甲乙兩物體上,不問力之大小如何,所得之兩加速度之比,恆一定不變. 故於甲乙兩物體之中,擇定其一為質量之標準,則其他一物體之質量,即可由此種加速度之一定不變之比決定之.

§34. 力之量度.

物體受力之作用,則於作用力之方向上得一加速度,故利用加速度之大小,即可得量度作用之力之標準. 如以甲乙兩力,分別作用於同一物體,取其所得之加速度比較研究之. 如兩次之加速度相等,即表示甲乙兩力相等. 如甲力作用時之加速度,等於乙力作用時之加速度之n倍,即表示甲力等於乙力之n倍. 據實驗證明,只須用同一質量之物體實驗,不問其質量之大小如何,所得之兩加速度之比,恆一定不變. 故於甲乙兩力之中,擇定其一為力之標準,則其他一力,即可由此一定不變之比決定之.

§35. 力之絕對單位.

質量及力之量度,均可由加速度之大小,爲之決定.如命 f 表力,m 表質量,a 表加速度,則此三者之間,當有 $f\propto ma$ 之關係. 命 k 爲比例常數,則成 $f=kma$. 式中之 k,其值由力,質量及加速度三者之單位而定. 如命作用於單位質量之物體上,發生單位加速度之力,爲力之單位,則 k 等於 1,卽成

$$f=ma.$$

如是決定之力之單位,曰**力之絕對單位**(absolute unit of force).

在 C. G. S. 制,質量之單位用克,加速度之單位用每秒每秒厘米,故作用於質量 1 克之物體上,發生 1 每秒每秒厘米之加速度之力,爲力之絕對單位,特名之曰 1 **達因**(dyne).

§ 36. 重量.

自由落下之物體,不問其質量如何,地點如何,恆以一定不變之加速度 g,沿鉛直方向下降. 由是可知,凡在地球表面之物體,均受有沿鉛直方向作用之一定不變之力作用,是曰**重力**(gravity),或曰物體之**重量**(weight). 如命 f 表質量 m 克之物體所受之重力,則

$$f = mg\text{ 達因.}$$

故知單位質量所受之重力,應爲$\frac{f}{m}$,即g,曰**重力之强度**(intensity of gravity). 同一之g,從加速度方面言之,則名重力加速度,其單位爲每秒每秒厘米;從力之方面言之,則名重力之強度,其單位爲達因.

§37. 力之重力單位.

單位質量之物體所受之重力,亦可用作量度力之標準,是爲**力之重力單位** (gravitational unit of force). 重力之強度,隨地而異,非明定地點,不能確定其值,以此作單位,殊欠正確. 但選用此項單位者,多係工業或日常生活,其要求止於大略,故對於因地點不同而生之重力差別,直可略去不計.

對於力之重力單位,無特殊名稱,即於質量單位名稱之後,綴一"重"字表之. 例如與質量W克之物體所受之重力相等之力,曰W**克重**(gram-weight). 有時並此"重"字,亦略去不用,僅稱之曰"W克之力." 此時之"克,"已非質量之單位,而爲力之單位,須注意之.

又重力單位與絕對單位之關係如下:

$$1\text{ 克重} = 980\text{ 達因} \qquad 1\text{ 達因} = \frac{1}{980}\text{ 克重}.$$

§ 38. 彈簧秤.

實際量度力之器械,為彈簧秤(spring balance). 其要部為一彈簧,如圖19之S. 上端固定不動,下端懸盤,以備盛物,如W,附一指針P,指示彈簧之伸長程度. 由虎克定律(參照 § **105**),知伸長之長度與作用之力為正比例. 先用已知之力,引長彈簧,於指針指示處,標明力之數值. 用時以欲測之力引彈簧秤之下端,由指針停止處之標度,即可讀出此力之值為若干.

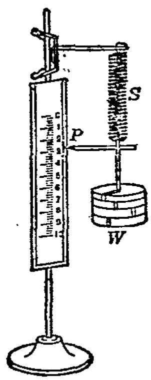


圖 19. 彈簧秤

實際使用之彈簧秤,多於彈簧周圍,加一外殼,以資保護,如圖 20,有時盛物之盤,移至頂上,或將指針移動,用槓桿(參照 § **97**)使其擴大,或將指針之上下移動,改作圓周運動,形狀名稱,種種不一. 又工業上測定大規模之力,使用之測力計 (dynamometer),亦彈簧秤中之一種,如測定汽車或火車等之牽引力,即須用之.

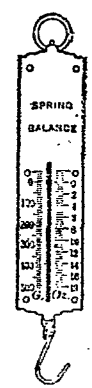


圖 20 常用彈簧秤

§ 39. 質量與重量之區別.

在同一地點，g 之值一定不變，故物體之重量與其質量成爲一定不變之比例，重量相等者，質量亦相等．量度質量之器械，爲天平，標準卽砝碼，但砝碼自身之重量，亦隨地而異，故由此量度而得者，決不能成爲物體之重量．如用彈簧秤，則其伸長，完全由牽引力而定，故其量度而得者，爲物體之重量，而非其質量．例如用同一之彈簧秤，測同一物體，其結果因所在之地點不同而有差別，但用同一天平同一砝碼，量度同一之物體，則任在何處，結果均同，卽其明證．

在同一地點，因質量與重量互爲比例，故通常多未加以區別，實屬大謬．例如支持物體使其不墜，爲重量之問題；而阻止運動中之物體，使其停止，則爲質量之問題．在平地懸巨石，固須粗繩，在高山之頂，繩卽稍細亦無礙．然如用同一速度沿水平方向推動此石，使與其他之物體相碰撞，則無論其所在地點爲山頂或爲平地其破壞之效應均相同．

§40. 動量．

用同一之力使靜止之車開動，或使進行中之車停止，所需之時間，與車之速度及其質量，均有關係，質量大

者,需時固久,速度大者,需時亦久. 對於運動中之物體,欲表明此項性質,特設一量以便比較,即質量與速度之乘積,曰動量(momentum). 動量大者,欲阻止其運動較難;動量小者,欲阻止其運動較易.

動量爲質量及速度之乘積,質量爲無向量,速度則爲向量,除大小而外,有其一定之方向. 此兩量之乘積,除大小而外,亦有一定之方向,其方向與速度之方向一致,故亦爲向量. 因之,動量之合成分解,應依向量合成之規定.

動量以單位質量及單位速度之乘積爲其單位,在C. G. S. 制,速度之單位用每秒厘米,動量之單位爲1克與1每秒厘米之乘積,即稱之曰**1克每秒厘米** (gram centimeter per second).

§41. 牛頓之運動第二定律.

一物體之質量,一定不變,故其動量如有變化,則必由於速度變化而來. 即動量之變化率,等於質量與速度變化率之乘積. 但速度之變化率爲加速度a,其與質量之乘積爲ma,等於作用之外力. 此項關係,通稱曰牛頓之運動第二定律(Newton's second law of motion),

其原文如下:

動量之變化率與作用之力爲正比例,其變化卽發生於力所作用之方向上.

此定律可用數式表出之.命m表物體之質量,v_0表其原有之速度,此物體受外力f之作用,經歷時間t後,其速度變成v,則動量之變化應爲$mv-mv_0$,其對於時間之變化率爲$\frac{mv-mv_0}{t}$,卽$m\frac{v-v_0}{t}$,與作用之外力爲正比例,卽$f\propto m\frac{v-v_0}{t}$.如用力之絕對單位,卽成

$$f=m\frac{v-v_0}{t}.$$

與前之$f=ma$,完全一致.換言之,物體受力之作用,必得一加速度,發生於力所作用之方向上.有一力作用,卽有一與之相應之加速度發生.數力同時作用於一物體上,則各有一相應之加速度發生,彼此各不相涉.故此定律又有**力之獨立作用定律**(law of independence of force)之稱.

如作用之力,悉成爲零,加速度亦無從發生,於是靜者恆靜,動者恆作等速度直線運動,與慣性定律相符.可知慣性定律,不過第二定律之一特殊情形而已.慣性定律爲$f=0$,與之相對,f不成爲零時,曰**運動定律**(law of motion).

§42. 衝量.

力之作用於一物體也,其效應與作用之時間爲比例. 爲便利計,稱作用之力與其作用之時間之乘積,曰**衝量** (impulse),其值大者,效應亦大. 力爲向量,時間爲無向量,故其乘積之衝量,亦爲向量,以力之作用方向,爲其方向. 命 I 表衝量, f 表作用之力, t 表作用之時間,則

$$I = ft.$$

由第二定律,得

$$ft = mv - mv_0.$$

即衝量與動量之變化,彼此相等.

§43. 衝力及漸力.

在極短之時間內,作用於一物體,而能使其得一有限速度變化之力,曰**衝力** (impulsive force). 反之,在有限時間內,作用於一物體,使其得一有限速度變化之力,曰**漸力**或**連續力** (continuous force).

速度之變化,由於作用之力及其作用時間而定,故在極短時間內所起之速度變化甚小. 由 $ft = mv - mv_0$ 論之,如 f 極大, t 極小,則 $v - v_0$ 仍能成爲有限數 故當衝力作用時力之本身誠爲無限大,不能測定,但若作用

之時間極短,使衝量成爲有限數,即可由其有限之動量變化決定之.實際並無所謂無限大之力,只不過動量變化率過大之時,對於力之效應,不用ma量度,而以$mv-mv_0$代替之,較爲便當而已.例如用鎚擊釘,及汽車相碰撞,均屬於衝力作用而非漸力,其所生效應,應由其動量之變化量度之.

§44. 作用及反作用.

立足於船或鞦韆板等可以自由運動之物體上,加力於其他之物體,則受力者固得一加速度,同時發動者亦作反對方向之運動.命m, m'表兩者之質量,a, a'表兩者所得之加速度,f, f'表產生加速度之力,則

$$f = ma, \qquad f' = m'a',$$

如是一對之f, f',合稱之,曰物體m, m'間之**相互作用**(mutual action),或曰**應力**(stress);分稱之,則其一曰**作用**(action),其他曰**反作用**(reaction).應力之方向,互相正對者,曰**壓力**(pressure);互相反背者,曰**張力**(tension).

§45. 牛頓之運動第三定律.

據實驗結果,作用及反作用,不特同時發生,缺一不

可,且兩者之大小恆相等,僅其作用方向互相反對而已.此項關係,曰牛頓之運動第三定律 (Newton's third law of motion). 其原文如下:

一切作用均有大小相等方向相反之反作用,換言之,兩物體間之相互作用,大小恆相等,方向恆相反.

置書於桌,則桌受一向下之壓力作用,同時書受桌抵得一向上之壓力. 此兩力之大小相等,方向相反,恰成作用及反作用之關係. 但若專就書而言,一方面須受重力作用,他方面又受桌之壓力作用,兩者爲同一物體所受之力,不能成爲作用及反作用之關係. 書所受之重力,爲地球對於書之引力,其反作用應爲書引地球之力. 同樣,用線懸球,則球將線墜下之力,與線將球引上之力,爲作用及反作用. 至於球所受之重力,與線將球引上之力,關係完全不同. 作用及反作用,爲兩物體間直接作用之力,如須經由第三者爲之媒介,即不成其爲作用及反作用矣. 例如用線懸球,手執線之他端,則對於手及球直接作用者爲線,故線引球之力,及球引線之力,爲作用及反作用,又線引手之力及手引線之力,亦爲作用及反作用. 至於球所受之引力,及手所受之引力,雖大小相等,方向相反,嚴格言之,因其有線亙於其間,

爲之媒介,故不能成爲作用及反作用之關係. 便宜上如線之重量可以略去不計,則其結果,與直接作用者並無差別,故從寬論之,未嘗不可視之爲作用及反作用. 如線之重量,不能省略,則亦只有從嚴格論之之一法而已.

§ 46. 內力及外力.

物體所受之作用力,便宜上分爲兩種:由本物體以外而來者,曰**外力**(external force);在本物體內部,任設一境界面,在此境界面之兩方之部分,互相作用之力,曰**內力**(internal force). 例如置書一册於桌上,用線繫住,執線之他端曳之. 此時線之張力,書之重力,桌面之壓力及摩擦力等,同爲書所受之外力. 但若就書中任何一頁而論,以此頁爲境界面,其前後兩部分間互相作用之力,即爲內力. 內力爲大小相等方向相反之應力,由物體全體論之,對於物體之運動,不生影響. 外力雖亦同時有反作用,但反作用係此物體對於其他物體作用之力,當然與本物體之運動無涉. 故論一物體之整個運動時,只須考慮其所受之外力即足. 如論及物體中之一部分,始有考慮其內力之必要. 不過此時之內力,對

於所考慮之部分,又成爲外力矣.

馬以力曳車,車亦必以同大之力,反而曳馬,就馬與車之全體而言,成爲內力,與馬車之進行與否無涉. 但馬曳車時,同時以其足向後蹴地,應受地面之反作用,此力對於馬車適爲外力,得此項外力作用,馬車始能前進.

§47. 動量不滅原理.

設有兩物體,互相以力作用,命 m_1, m_2 表兩者之質量, a_1, a_2 表各得之加速度. 第一物體所受之力,應等於 m_1a_1; 第二物體所受之力,應等於 m_2a_2. 依第三定律,得

$$m_1a_1 = -m_2a_2.$$

命 u_1, u_2 表未受力前兩者之初速度, v_1, v_2 表受力作用時間 t 後之末速度,則

$$v_1 - u_1 = a_1t, \qquad v_2 - u_2 = a_2t,$$

代入上式,即成爲

$$m_1(v_1 - u_1) = -m_2(v_2 - u_2),$$

或改書作

$$m_1v_1 - m_1u_1 = m_2u_2 - m_2v_2.$$

左端表 m_1 之動量增加,右端表 m_2 之動量減少,換言之,即 m_1 之動量增加,等於 m_2 之動量減少. 上式又可改書作

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2$$

右端表未受力作用前兩者之動量之和,左端表既受力作用經歷時間 t 後兩者之動量之和,換言之,兩物體之動量之和,在相互以力作用之前後恆一定不變,此關係曰**動量不滅原理**(principle of conservation of momentum)

例如發礮時,礮彈以速度 v_1 前進,礮身則以速度 v_2 後退,卽所謂**反動**(recoil)是也. 此兩速度之比,等於兩者質量之反比,故礮彈所行甚遠而礮身反動甚小. 又如蘋果落地,地球應亦同時昇起,但兩者之質量,相差甚遠,故通常只見蘋果之落下,而不覺地球之昇起.

§48. 向心力與離心力.

動點沿圓周作等速度運動時,如 §27 所述,如命 r 表圓半徑,v 表動點之速度,則所得之向心加速度應爲 $\frac{v^2}{r}$. 由第二定律,知產生此加速度之力 f,應爲

$$f = m\frac{v^2}{r}.$$

其方向亦恆向圓心,此力曰**向心力**(centripetal force)如無此力作用,則動點必沿切線方向作等速度直線運動,不成其爲圓周運動矣. 由第三定律,知向心力之反作用,爲動點對於欲打破其慣性而使其作圓周運動之

外力所呈之阻力,通稱之爲離心力 (centrifugal force).故離心力等於 $-m\frac{v^2}{r}$.

例如以線縛石,執其他端搖之,此時線之張力,卽石所受之向心力,石引手之力,則爲離心力. 又如置球於圓桶而轉之,球循桶壁而行,此時球所受之桶壁壓力爲向心力,而壁受球之壓力,則爲離心力. 同樣,月繞地轉,地球作用於月之引力爲向心力,而月作用於地球之引力,則爲離心力.

§49. 萬有引力定律

自由落下之物體,其加速度由地球之引力而來;行星遶日作圓周運動,其向心力由太陽之引力而來. 宇宙間一切物體相互之間,均有此種作用之力存在,卽

兩質點在其連結之直線上,互相以引力作用;其大小則與兩者之質量乘積爲正比例;與其間距離之平方爲反比例.

此關係曰萬有引力定律 (law of universal gravitation).

命 m, m' 表兩質點之質量,r 表兩者間之距離,f 表兩者相互作用之引力,則萬有引力之定律可用下式表出,卽

$$f = k\frac{mm'}{r^2}.$$

k 爲比例常數,由選用之單位而定,稱曰**萬有引力常數** (constant of universal gravitation),在 C. G. S. 制,其值如下:

$$k = 6.6579 \times 10^{-8}.$$

如質點之質量均爲 1 克,距離爲 1 厘米,則成

$$f = k = 6.6579 \times 10^{-8} \text{ 達因}.$$

換言之,k 之值,與兩單位質量隔單位距離互相作用時之引力之值相等.

又天文學上選定之質量單位,即以萬有引力定律爲其根據,即質量相同之兩質點,相隔 1 厘米,互相作用之引力等於 1 達因時,其質量即定作質量之單位. 此種單位,曰**天文學上之質量單位** (astronomical unit of mass). 用此單位,則 $f = 1, m = m' = 1$, 故其結果 $k = 1$, 因之,萬有引力定律之公式,成爲

$$f = \frac{mm'}{r^2}.$$

§ 50. 合力及分力.

決定力之必要條件有三,一曰**大小** (magnitude), 二曰**方向** (direction),三曰**作用點** (point of action), 此三者是謂**力之三要項** (three elements of force). 由作用點,

沿力之作用方向引一直線,長短與力之大小成比例,且於力所向之前方,加一箭頭,以表向背,則此直線,即可將力完全表出. 性質與前述之向量,完全相同,故其合成分解,概遵從向量合成之規定. 由數力合成之一力曰**合力** (resultant force), 由一力分解而得之數力,曰**分力** (component force).

§51. 力之平行四邊形定律.

設有兩力 P, Q 同時作用於 A 點,如圖 21, 引 AB 及 AE 表之,再引直線 BC 及 EC, 完成平行四邊形 $ABCE$. 從 A 點引平行四邊形之對角線 AC. 此 AC 即代表合力 R 之大小及方向,是爲**力之平行四邊形定律** (law of parallelogram of forces).

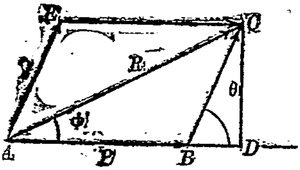


圖 21. 力之合成

又因 BC 與 AE, 大小方向均相等,故又可用 BC 表 Q. 如此則兩分力 P, Q 與其合力 R, 恰好完成一三角形 ABC. 故由三角形作圖法,亦可由分力 P, Q 求出其合力 R 之大小及方向.

次命 θ 表兩力 P, Q 之方向間之角度,則

$$R^2 = P^2 + Q^2 + 2PQ\cos\theta.$$

引 CD 垂直於 AB，命 ϕ 表 R 對於 $\overline{AB}$ 所作之角度，則其方向如下：

$$\tan\phi = \frac{CD}{AD} = \frac{BC\sin\theta}{AB+BC\cos\theta},$$

即
$$\tan\phi = \frac{Q\sin\theta}{P+Q\cos\theta}.$$

如有數力同時作用，欲求其合力時，用平行四邊形定律，遞次推求，殊嫌周折，通常均先就坐標軸將各力分解之，再將同一軸上之成分相加，得合力在此軸上之成分，最後再將成分合成，即得所求之合力．如圖22，三力

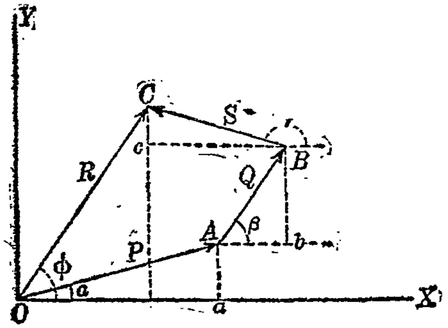


圖 22. 力之合成之解析法

P, Q, S 同時作用，以 $\overline{OA}, \overline{AB}, \overline{BC}$ 代表之．命其合力爲 R，則 R 應由 $\overline{OC}$ 表出．茲將 P, Q, S 就坐標軸分解之，其

在 X 方向者爲 Oa, Ab, Bc, 等於 $P\cos\alpha$, $Q\cos\beta$, $S\cos\gamma$. 命 X, Y 表 R 在 X, Y 方向之分力,則

$$X = P\cos\alpha + Q\cos\beta + S\cos\gamma,$$

同樣
$$Y = P\sin\alpha + Q\sin\beta + S\sin\gamma,$$

故合力之大小,由 $R^2 = X^2 + Y^2$

決定,其方向則由 $\tan\phi = \frac{Y}{X}$

決定.

§52. 作用於一點之力之平衡.

一物體同時受數力作用於同一點上,其合力如等於零,則其效應與未受此數力作用時無異,或保持其靜止狀態或維持其原有之運動. 如是之狀況,稱爲**平衡**(equilibrium). 凡在平衡狀況下之合力 R,應成爲零卽 $X^2+Y^2=0$ 故

$$X=0, \qquad Y=0,$$

爲力之平衡之要件.

§53. 帆船所受之力.

帆船乘風可以航行之理,由合力及分力說明之,至爲清晰. 如圖23,船首斜向上方,風從右方吹來,達帆 CS'

上,一部分作用於帆,他一部分則掠帆面而過,不生作用.前者爲垂直於帆之分力,卽圖中 CP 表示之一部分,後者因不生關係,故未繪出. 帆上實際受到之作用,卽此項垂直分力 CP, 其所生之效應,又可分爲兩項說明.換言之,此 CP 之力,又可分作 CF, CL 兩分力. 其中之

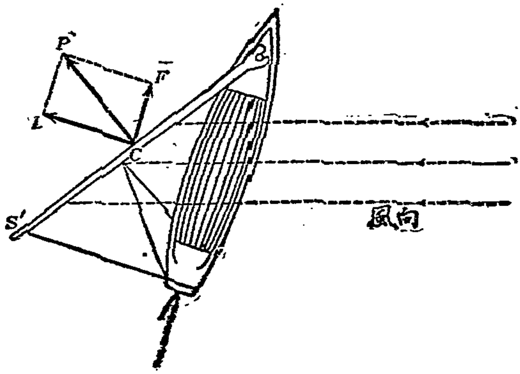


圖 23. 帆船所受之力

CF 與船體平行,且正向前方,故其效應在使船體前進.CL 之方向,適與船體之方向垂直,且向左方,故其效應在使船體傾向一方. 故帆船乘風前進時,恆向一方傾斜,且帆每轉一次,船體傾斜之方向亦隨之變更一次,卽屬此理.

§ 54. 飛機.

現行之飛機 (aeroplane), 有一大而且長之受風面, 如鳥之翼,故名翼面 (wing), 此項翼面有上下兩層者,曰雙翼機 (biplane), 有僅一層者,曰單翼機 (monoplane). 其在陸地上使用者,於機體下部裝有胎輪,與汽車所用者相似,此種飛機稱爲陸上機(airplane);在水面使用者, 下部裝有氣囊,形如小船,以備浮起之用,此種飛機稱爲水上機(seaplane). 圖 24 所示爲軍用飛機之一種,係陸

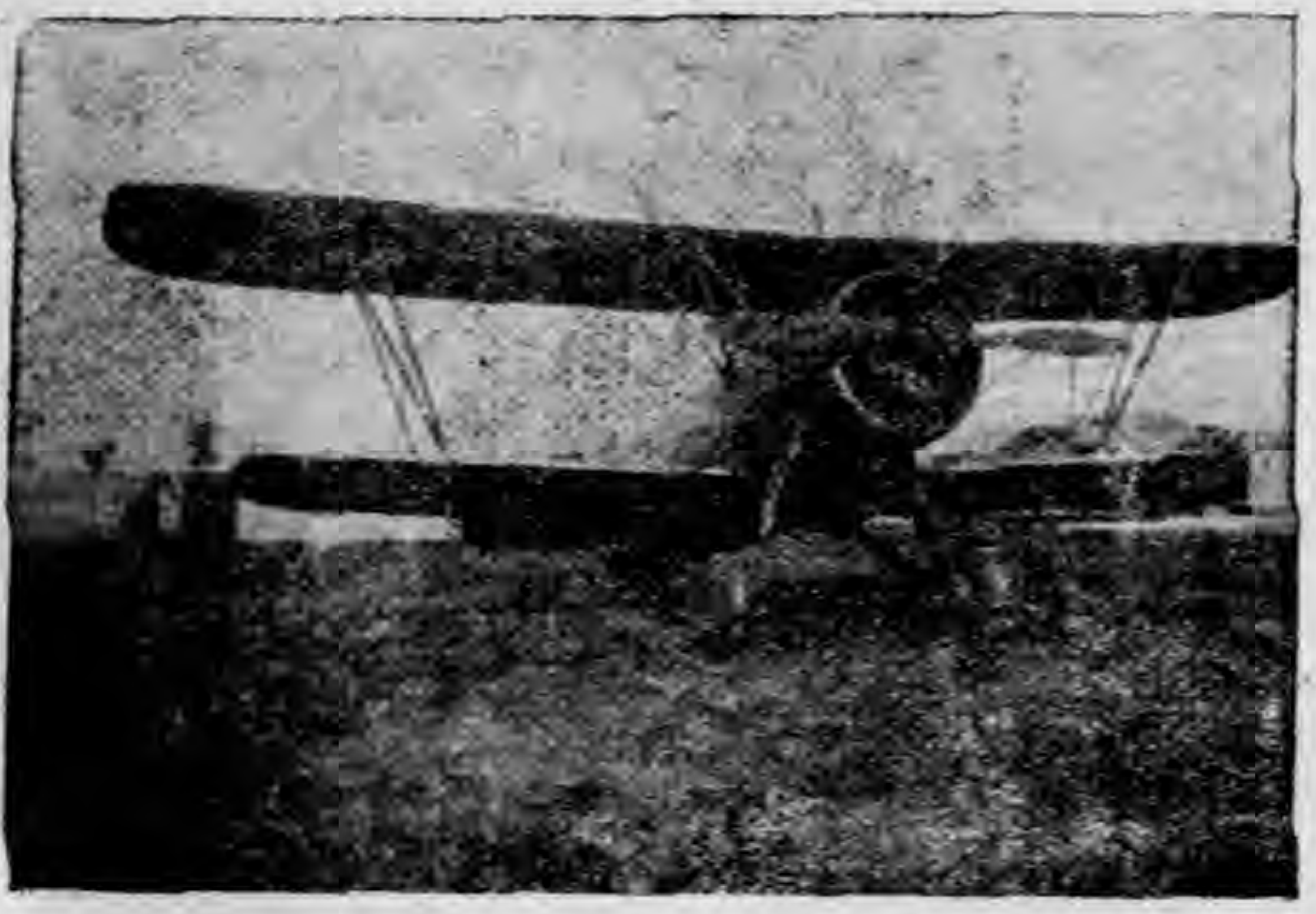


圖 24. 軍用飛機之一種

上雙翼機,其前面有一橈狀之物,爲推進器(propeller), 用汽油機使其迅速轉動,搏擊空氣,使衝擊翼面,此時空氣對於翼面之作用,與前節所述風對於帆之作用,完全相

同,當機體在空中飛行時,因機體與空氣間之相對運動,致令空氣對於翼面之底有壓力作用,翼面上方,則成爲低壓部,發生吸引作用,結局空氣對於機體 AB,如圖25所示,作用之合力成爲 P,其方向與 AB 垂直,大小則由於機體之大小形狀,空氣之黏滯性及密度,翼面之面積,空氣與機體間之相對速度及傾斜角度 α 等而定.此合力之作用點 M,爲壓力中心.命 G 表機體之重心.試將此合力 P,分解作兩分力,一沿鉛直方向,爲 Q,一沿機體進行之方向,爲 R,則

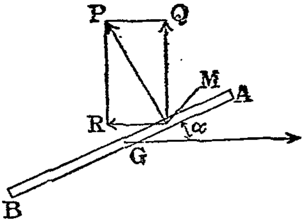


圖 25.　作用於飛機之力

$$Q = P\cos\alpha,\quad R = P\sin\alpha.$$

Q 之作用,在使機體上昇,故此分力通常稱爲**舉揚力**(lift),R 之作用,在阻礙機體之前進,故此分力,通稱爲**後推力**(drift).欲使機體飛起,當然非使舉揚力大於後推力不可.據理論及實驗研究,如翼面之橫截面,成爲圖26所示之彎曲形狀,則迎面而來之空氣,達於翼面時,最先上昇甚高,然後始漸次降下,其結果

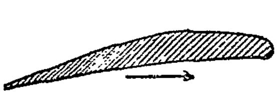


圖 26　翼之横斷面

所得之舉揚力,恆較使用平板時爲大,而後推力則較小,故現今飛機槪用此式之翼面 又壓力中心M既不與重心一致,故恆有使機首之A昇上,機尾之B降下之趨勢,如圖27所示.

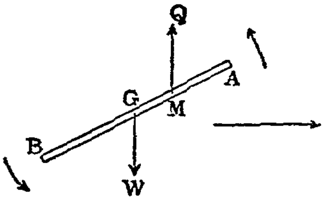


圖27. 機體之傾轉

爲防止此項傾轉,故在機尾,加一尾翼(tail plane),如圖28所示之C. 又水上機下部所裝之氣囊,如圖29中之D,在水面上滑走時,

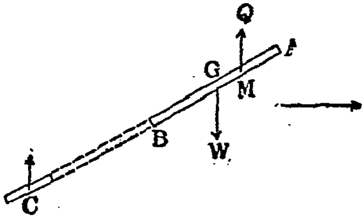


圖28. 尾翼之作用

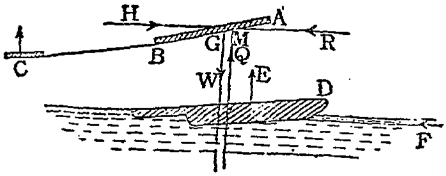


圖29. 水上機上作用之諸力

除上述各力而外,須將水之浮力E及阻力F,加入計算,圖中之H,則表推進機之前進力. 轉動推進器使用之發動機,如圖30所示,排列成輻射形.

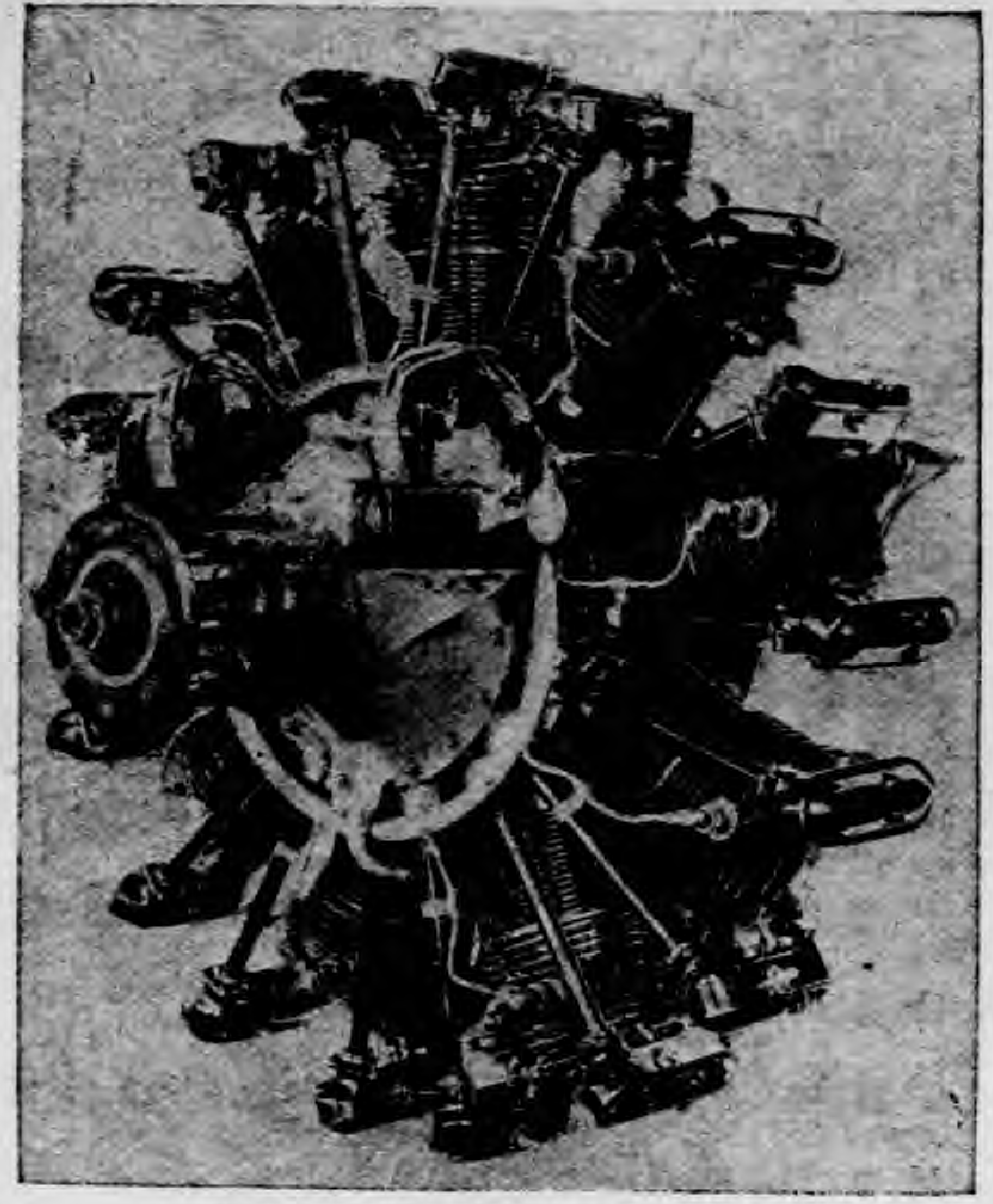


圖 30.　飛機上用發動機

問題第三

1. 滑冰的人,如何利用其慣性?
2. 滑冰的人,當其轉彎時,應如何始可?
3. 刀柄鬆脫時,執柄向下方敲擊,刀自嵌入柄內,何故?
4. 電車未停時,上下均極危險,其理者何?
5. 試舉數例,說明運動第一定律.
6 同一物體之重量何以在赤道近傍略輕,在兩極近

倍略重?

7. 一人從地面跳高,則地球當如何?

8. 一人之力可以提起200斤重之物,但不能將其本身提起,何故?

9. 人在泥中因欲拔起一足,轉令他一足陷入愈深,何故?

10. 船上之人,盡力扇動其帆,能否使船前進? 其理如何?

11. 1達因之力約與1毫克之力相等,試證明之.

12 作用於100克之物體之重力若干?

13. 上海之重力加速度爲979.4每秒每秒厘米,在上海量1磅之物,所受之重力爲若干達因?

14. 使質量500克之物體發生16每秒每秒厘米之加速度之力爲若干?

15. 物體受力之作用後,於10秒間移動7米之遠,求作用之力與其重量之比及最後所得之速度.

16. 以8每秒厘米之速度作等速度運動之物體,因受3.2達因之力作用,於20秒之後,其速度變成24每秒厘米,求其質量.

17. 靜止之物體其質量爲100克,受力作用1分鐘後,其速度成爲200每秒米,求作用之力.

18. 以1仟克重之力作用於一物體,於10秒鐘內,使其移動10米之遠,求此物體之質量。

19. 以 50 達因之力作用於質量 20 克之物體上，歷 5 秒間之久，求物體所得之動量.

20. 礮重 50 噸，彈重 1000 磅，彈以 2000 每秒英尺之速度放出，礮之反動速度如何？（1 噸=2240 磅.）

21. 質量 8 克之物體受力作用 1 分間後，其速度由 12 每秒米減至 6 每秒米，求力之大小及方向.

22. 鎗彈重 20 克，以 400 每秒米之速度射出，在鎗身中共歷時 $\frac{1}{10}$ 秒，始出鎗口，求火藥之炸力.

23. 命 P,Q 表分力，θ 表其間之角度，R 表合力. 試計算下列各題，並作圖檢驗所得之結果，是否正確.

(i) $P=24$; $Q=7$; $\theta=90°$; 求 R.

(ii) $P=13$; $R=14$; $\theta=90°$; 求 Q.

(iii) $P=7$; $Q=8$; $\theta=60°$; 求 R.

(iv) $P=5$; $Q=9$; $\theta=120°$; 求 R.

(v) $P=3$; $Q=5$; $R=7$; 求 θ.

(vi) $P=5$; $R=7$; $\theta=60°$; 求 Q.

24. 設有兩力，一為 12，一為 8，求最大及最小之合力.

25. 兩力作 60° 之傾斜，其合力為 $2\sqrt{3}$，其一力為 2，求其餘之一力.

26. 兩力間之角度為 90° 時，合力等於 $\sqrt{10}$；如為 60° 時，合力等於 $\sqrt{13}$. 求此兩力.

27. 單由作圖法解下列各題：

(i) $P=10$; $Q=15$; $\theta=37°$; 求 R

(ii) $P=9$; $Q=7$; $\theta=133°$; 求 R.

(iii) $P=7$; $Q=5$; $R=10$; 求 θ.

(iv) $P=7.3$; $R=8.7$; $\theta=65°$; 求 Q.

28. 設有一力等於10與水平作30°之傾斜,試分解成兩分力,一與水平平行,一與水平垂直.

29. 將100達因之力分解作大小相等之兩分力,令兩分力間之角度為60°,再用作圖法檢驗所得之結果.

30. 將一力分解作兩分力,使其一分力與原本之力大小相等,方向則成垂直. 求其他一分力.

31. 風力等於15仟克,以30°之傾斜角度吹向帆面,求帆所受到之壓力.

第三章　功能

§55. 功.

如有一力,作用於一物體上,使其作用點得一位移,則曰此力對於物體作**功**(work). 如圖31,命f表力,s表作用點之位移,θ表力之方向與位移之方向間所夾之角度,則此時所作之功W,可由下式決定之:

$$W=f\cdot s\cdot\cos\theta.$$

如圖31,$s\cos\theta=h$,表力之方向上之分位移;又$f\cos\theta=p$,表位移方向上之分力. 故功之定義,又可改寫如下:

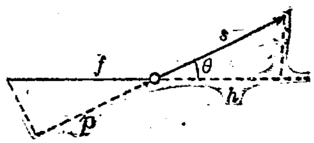


圖31. 功

$W=f\cdot h$ 即力及力之方向上之分位移之乘積.

或　$W=p\cdot s$ 即位移及位移方向上之分力之乘積.

如θ等於零,即位移及力,均在同一方向時,功即等於力及位移之乘積. 如θ等於$\frac{\pi}{2}$,則$\cos\theta=0$,即位移與力互相垂直時,功等於零,此時曰力對於物體未曾作功. 如θ等於π,則$\cos\theta=-1,W=-fs$; 即力之方向與位移之方向正相反對時,功成為負量.

功取正值時,則謂之爲**力對於物體所作之功**(work done by a force on a body),功取負值時,則謂之爲**物體反抗力之作用所作之功** (work done against a force by a body). 故力所作之負功,與物體反抗力之作用所作之正功相同;又物體反抗力之作用所作之負功,與力對於物體所作之正功相同. 總之,功僅有正負大小之分,而無方向可言,故爲無向量,當用代數方法處理之.

§ 56. 功之單位.

單位之力作用於一物體,使其在力之作用方向上得單位長之位移,如是之功,爲功之單位. 在 C. G. S. 制,以 1 達因之力,作用於一物體,使其在力之作用方向上,進行 1 厘米之路程時之功,曰 1 **爾格**(erg). 此值過小,不適於用,故在**實用單位制**(practical system of units)中定爾格之一千萬倍,爲功之單位,是曰 1 **焦耳** (joule),電學,熱學等多用之.

又力之單位及長之單位,任用何種,均無不可,由是算出之功之單位,即以此兩種單位連結而名之. 例如在重力單位,力用克,長用厘米,故功之單位即曰**克厘米**(gram-centimeter);如力用克,長用米,則功之單位即曰**克**

米(gram-meter);同樣力用仟克,長用米,則功之單位,卽曰**仟克米**(kilogram-meter),餘仿此. 此各種單位間之關係如下:

$$1\text{仟克米}=1000\times100\text{克厘米}=1000\times100\times980\text{達因厘米}$$
$$=9.80\times10^7\text{爾格}=9.80\text{焦耳}.$$

§ 57. 功率.

單位時間內所作之功,曰**功率**(power),如在時間 t 內所作之功爲 W,則功率應爲 $\frac{W}{t}$. 命 P 表功率,則

$$P=\frac{W}{t}.$$

在 C. G. S. 制,以每秒間作 1 焦耳之功爲單位,曰 1 **瓦特**(watt),其千倍曰**仟瓦特**(kilowatt). 發電機之容量,概以此計算之.

功率之單位,除用瓦特或仟瓦特而外,尙有一種,曰**馬力**(horse power),亦甚常用,爲每秒間能作 550 英尺磅(foot pound)之功率,其間之關係,爲

$$1\text{馬力}=746\text{瓦特}.$$

如就大體言之,1 馬力適爲 $\frac{3}{4}$ 仟瓦特,1 仟瓦特爲 $1\frac{1}{3}$ 馬力. 故由馬力求仟瓦特時,減去其 $\frac{1}{4}$;由仟瓦特求馬力時,加其 $\frac{1}{3}$,卽得. 例如 200 馬力等於 150 仟瓦特;90 仟

瓦特等於120馬力．又通常對於馬力，則以H. P. 或 HP 表之；對於仟瓦特，則以 K. W. 或 kw. 表之．

§58. 能.

凡物體在可以反抗力之作用以作功之狀態，謂之爲具有若干之能(energy)．運動中之彈丸，對於阻礙之者，必破壞之；即對於阻礙之力，可以作相當之功．不僅彈丸如此，凡在運動中之物體，莫不皆然．因運動而具有之能，曰**動能**(kinetic energy)．又伸長之彈簧，壓縮之空氣，以及在高處之物體，亦莫不可反抗外力作用，作相當之功，故亦均具有能．但此種之能，由其所蓄之勢而來，與由運動而來者，性質不同，通稱之曰**勢能** (potential energy)．動能及勢能兩種，又合稱曰**機械能**(mechanical energy)，或曰**力學的能** (dynamical energy)．

能之大小多寡，即以物體所作之功測之．故能之單位，完全與功之單位相同．

§59. 動能.

設有一物體，其質量爲 m，速度爲 v，因受一反對方向之力 f 作用，經歷時間 t 後，成爲完全靜止．命 s 表

在時間 t 內物體反抗力之作用所進行之路程．在此時間 t 內之平均速度爲 $\frac{v+0}{2}$，卽 $\frac{v}{2}$，故經過之路程 s，應等於 $\frac{1}{2}vt$．由第二定律，

$$ft = mv,$$

以 s 乘之，
$$fts = mv\frac{1}{2}vt,$$

$$\therefore \quad fs = \frac{1}{2}mv^2.$$

卽物體由速度 v 起至靜止爲止，其間所作之功，與經歷之時間無涉，恆等於其質量與速度平方之乘積之半，是卽物體所具有之動能．質量爲無向量，速度雖爲向量，但其平方則與其方向無關，故由此決定之動能，亦無方向可言，成爲無向量．

又運動之方向，如與力之作用方向垂直，則無功可言，此時物體雖受力之作用，而其動能之值，恆一定不變．

如運動之物體，受力之作用，因力對於物體作相當之功，故物體之速度，隨之加大．命 v_0 表物體未受力作用前之初速度，v 表受力 f 作用經歷時間 t 後之末速度，則

$$f\cdot s = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2.$$

卽物體之動能增加，等於力對於物體所作之功．

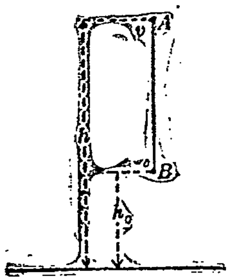


圖 32. 重力與能

§60. 重力之功及動能.

在地球表面附近之同一地點,重力之強度可以看作一定. 設有一物體,其質量爲 m,在圖 32 之 B 點,距地面之高爲 h_0,以初速度 v_0 向上拋起,達於 A 點時,速度成爲 v. 距地面之高成爲 h. 在此期間內物體因反抗重力作用向上昇起,其所作之功爲 $mg(h-h_0)$,動能之減少則爲 $\frac{1}{2}mv_0^2-\frac{1}{2}mv^2$. 此兩者應相等,故得

$$mg\,(h-h_0)=\frac{1}{2}mv_0^2-\frac{1}{2}mv^2.$$

其次再就物體自 A 出發,以初速度 v 向下落下,達 B 點時,假定其速度爲 v', 在此期間內重力對於物體所作之功爲 $mg(h-h_0)$,動能之增加則爲 $\frac{1}{2}mv'^2-\frac{1}{2}mv^2$. 故

$$mg\,(h-h_0)=\frac{1}{2}mv'^2-\frac{1}{2}mv^2.$$

與前式比較,卽知 $v'=v_0$. 卽物體由 B 昇至 A 所減少之動能,與由 A 降至 B 所增加之動能恆相等.

§61. 勢能

由前節所述,知一物體如被拋上 $h-h_0$ 之路程,則其動能當減少 $mg\,(h-h_0)$;但若由此再降下 $h-h_0$, 則由

重力而來之功,使其動能又恢復其原狀. 故在高處之物體,具有與動能同等之利益,即以$mg(h-h_0)$量度之;即所謂勢能是也. 又前節之算式,可以改寫作

$$\frac{1}{2}mv^2+mgh=\frac{1}{2}mv_0^2+mgh_0.$$

左端第一項表物體在A時之動能,第二項則表在同點時之勢能. 同樣,右端表物體在B時之動能及其勢能. 換言之,一物體之動能及其勢能之和,恆一定不變.

§62. 動能與勢能之變化

用斧劈木,斧之動能消失,木則因分裂而得若干之勢能. 拋球向上,速度愈高愈減,即其動能漸減,同時距地面愈遠,勢能亦愈加大. 由冬至迄夏至,地球與太陽之距離日愈遠離,勢能漸增,同時繞日之行漸遲,故其動能日愈減少. 凡此種種,均動能變爲勢能之例. 反之,捲緊之發條放鬆後,使鐘錶之擺得以振動. 曳滿之弓放開後,使箭得以飛去. 高處之水落下後,使水車得以轉動. 凡此種種,均爲勢能變成動能之例.

此類能之變動,曰**能之變化**(transformation of energy)

§63. 保守力及非保守力.

作用於物體之力,因其性質,可分爲兩大類. 一類曰**保守力**(conservative force),其作用之結果,使物體之動能及勢能之總和,恆成爲一定不變,如重力即其一例.又由若干物體而成之一系,如其間作用之力,使全系之動能及勢能之總和成爲一定不變時,則此系曰**保守系**(conservative system). 另一類曰**非保守力**(non-conservative force),其作用之結果,使物體之動能漸次減少,雖同時亦可增加若干勢能,但得失恆不相償,故動能與勢能之總和,有減無已. 如摩擦力(參照§84)即其實例.

§64. 能量不滅

保守系之要件有二:(1)對於系外無能之授受;(2)系內各部分間作用之力,均爲保守力. 此兩條件,均須嚴格滿足,其動能及勢能之總和,始成爲一定不變. 事實上,物體系既不能與其他物體完全獨立,又不能免摩擦力等類作用,故無保守系. 但若就大略論之,亦未嘗無此. 例如太陽系,大致可以看作一孤立系,其中雖有潮汐等類之摩擦作用,但其所作之功與全系之總能相較,爲量甚微,直可略去,故全系動能未見減少. 凡如是者,其機械能之總和,恆一定不變,是曰**機械能不滅原理**

(principle of conservation of mechanical energy). 反之,受非保守力作用時,機械能漸減,同時有熱或音,光,電等發生,仍為能之一態,可由後證明之. 總之,一系所有之能,除受外界之作用而外,其總量恆一定不變. 此關係較之僅着眼於機械能者,更為普遍,是為**能量不滅定律**(law of conservation of energy). 據此,宇宙內之一切物體,亦可看作一系,故宇宙間之總能,其量恆一定不變.

一切之機械,必須由外界供給相當之能,始克作功,能之供給不絕,機械之運動亦不停止. 昔人欲造一器,不必供給以能,亦可自轉不息,如是之運動,曰**永久運動**(perpetual motion). 由能量不滅定律,可知其為妄想,事實上絕不可能.

問題第四

1. (i)試舉兩種實例,表示動能變成勢能.

   (ii)試舉兩種實例,表示勢能變成動能.

2. 試述開鎗後,能之種種變化.

3. 何以接到棒球時,手須向後移動少許距離?

4. 鐘錶何以能運轉? 其動能由何而來?

5. 英制表功之單位用英尺磅,即用一磅之力使物體沿力之方向進行1英尺之功. 問1英尺磅等於若干爾格?

6. 將質量170克之物體,持至高5米之處,須功若干?

7. 體重80仟克之人,(i)登高1545米之泰山,(ii)高900米之衡山,(iii)高2200米之華山,各須功若干?

8. 1馬力等於若干每秒英尺磅?

9. 如1小時可作500仟克米之功,其功率爲幾馬力?

10. 體重80仟克之人於四小時內可登至泰山之頂,其功率若干?

11. 中央廣播電臺使用之機械,其功率爲75仟瓦特,合若干馬力?

12. 高24市尺之瀑布,每秒鐘流下之水量爲14000升,用此瀑布可以運轉若干匹馬力之機械?

13. 重10仟克之礮彈,以50每秒米之速度射出,其動能若干?

14. 重5仟克之礮彈,以500每秒米之速度射出,求其動能. 又如礮身重100仟克,求其反動時之動能.

15. 重80仟克之人,從20市尺高處,躍入游泳池中,其動能若干?

16. 欲使質量5克之物體,得60每秒厘米之速度,須功若干?

17. 質量20克之彈丸,以40每秒米之速度中的,穿入的中有5厘米之深,求的之平均阻力.

18. 重1仟克之物體,沿高9厘米之斜面落下,達於最低點時之速度爲5每秒厘米,求其運動中損失之能爲若干?

第四章 剛體力學

§65. 轉動.

一物體作轉動時,其中各點均在同一直線之周,畫圓形路線運動. 在同一時間內,各點所畫之角度,彼此相等.此項角度,稱爲物體在此時期內之角移 (angular displacement),通常以 θ 表之. 角移之單位,除特殊情形而外,概用弧度.

§66. 角速度.

命轉動經歷之時間爲 t, 則 $\frac{\theta}{t}$ 表角移率,卽角速度 (angular velocity),如角速度之值一定不變,則曰等角速度(constant angular velocity),其值等於單位時間內物體所轉之角度,通常以 ω 表之. 如角之單位用弧度,時間之單位用秒,則角速度之單位,曰每秒弧度 (radian per second). 如角速度與時共變,則以極短時間 Δt 之內之平均角速度,卽 $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ 之極限值,表瞬時角速度(instantaneous angular velocity).

§67. 角加速度.

命 ω 表某物體在某一時刻 t 之角速度,由此再經歷 Δt 之時間,角速度成爲 $\omega+\Delta\omega$. 角速度之增加 $\Delta\omega$,對於所歷時間 Δt 之比,當 Δt 小至極限時,趨近一定值,是爲物體在時刻 t 之**角加速度**(angular acceleration). 在相等之時間中,角速度之增加,如均相等,是爲**等角加速度**(constant angular acceleration),其值等於單位時間中角速度之增加. 命 a 表角加速度,ω_0 及 ω 表時間 t 之開始及臨末之一瞬間之角速度,θ 表在此時間內之角移,則仿照等加速度直線運動例,得下列之關係:

$$\omega=\omega_0+at,$$

$$\theta=\omega_0 t+\frac{1}{2}at^2,$$

$$\omega^2=\omega_0^2+2a\theta.$$

如用弧度及秒作角及時間之單位,則角加速度之單位,曰**每秒每秒弧度**(radian per second per second)

§68. 角量及線量間之關係.

前節所述之角移,角速度,及角加速度等量,總名之曰**角量** (angular quantities). 與此相對,作移動時之位移曰**線位移** (linear displacement),其速度曰**線速度**

(linear velocity),其加速度曰**線加速度**(linear acceleration),總名之則曰**線量**(linear quantities).

如圖33,設想一動點在一定點 O 之周圍,沿半徑 r 之圓周上運動,經歷時間 t 後,得線位移 s, 則 s 當爲圓周之一部分,命 θ 表此部分對於 O 所夾之角,即其角移.故 $s=r\theta$, 由此得 $\frac{s}{t}=r\frac{\theta}{t}$. 但 $\frac{s}{t}$ 表線速度 v, $\frac{\theta}{t}$ 表角速度 ω, 故

$$v = r\omega.$$

由此可知 $\frac{v-v_0}{t}=r\frac{\omega-\omega_0}{t}$, 但 $\frac{v-v_0}{t}$ 表線加速度 a_t, $\frac{\omega-\omega_0}{t}$ 表角加速度 α, 故

$$a_t = r\alpha.$$

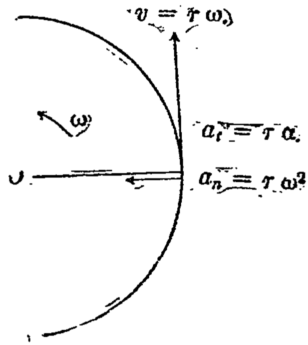


圖 33. 角量及線量之關係

此處之線加速度,特作 a_t 者,因其表運動方向上之加速度,特曰**切線加速度**(tangential acceleration). 同時物體既沿圓周運動,據 § 28,當得一向中心之加速度 $\frac{v^2}{r}$,通常以 a_n 代之,而稱之曰**法線加速度**(normal acceleration),以示區別,如圖33,即

$$a_n = r\omega^2.$$

§ 69. 質量中心.

物體作移動時,其各點均作同樣運動,故任取其一點,均足以代表之. 如其運動兼移動與轉動時,各點之狀況,各不相同,不能如前之簡單 但任何物體之中,必有一特殊之點存在,對於種種方面,此點確能代表此物體之全體,宛如物體之全部質量,均集中於此一點者然. 如是之點,曰此物體之質量中心(center of mass).

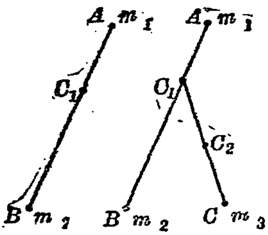


圖 34. 質量中心

例如由兩點 A, B 而成之一物體, 如圖 34 左邊, 命 m_1 及 m_2 表兩點之質量, 又 C_1 表直線 AB 上之一點, 使其具有下列之關係:

$$m_1C_1A = m_2C_1B.$$

如此, C_1 即物體 AB 之質量中心.

如於 A 及 B 之外, 更有一點 C, 其質量爲 m_3, 如圖 34 右邊,則先求出 AB 之質量中心 C_1,將 A 及 B 之質量集中於 C_1, 照前法連接 C_1C, 而於其上求出 C_2 之一點,使其滿足下列之關係:

$$(m_1 + m_2)\ C_2C_1 = m_3C_2C.$$

如此, C_2 即物體 ABC 之質量中心.

對於由多數之點集成之物體,亦可照此法推算.

§70. 質量中心之實例.

(1)均質之對稱形體:　此類物體之質量中心,極易求得,例如棒之質量中心,為其中央點;圓輪或圓板之質量中心,為其圓心;球殼或球體之質量中心,為其球心;平行四邊形或直六面體之質量中心,為其對角線之交點,圓柱之質量中心,為軸之中點.

(2)其他簡單之幾何形體:　三角板或僅有三邊之框架,其質量中心為三中線之交點;錐體之質量中心,與底面質量中心間之距離,等於頂點至底面質量中心間距離之$\frac{1}{4}$;半徑r,長為l之圓弧,其質量中心與圓心間之距離,等於$\frac{r}{l}$(弦長);半徑r之半圓板,其質量中心與圓心間之距離,等於$\frac{4r}{3\pi}$;半徑r之半球,其質量中心與平面中心間之距離,等於$\frac{3}{8}r$.

§71. 力矩.

物體受力作用所生之轉動,不僅與力有關,且須視其轉動軸線之位置如何,方能決定.　如圖35,A表一物體之轉動軸線,f表作用之力,p表由A引至f作用線

上之垂線之長. 乘積fp曰軸周之力矩(moment of force about an axis),或簡稱曰轉矩(torque) 力矩之效應,在使物體繞其軸線作轉動. 通常辨別轉動之方向,採用右向螺旋制,即由物體上面下望,作反時針之轉動者爲正,作順時針之轉動者爲負. 轉動正者,於其軸線上方,取相當之長,使與fp成一定之比例表出之.

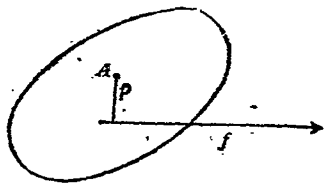


圖 35. 力矩

轉動負者,則於軸線下方取同長表出之. 如是力矩之爲量,既有fp定其大小,又有軸線及其上下定其方向,故亦爲一種向量,其合成及分解,應依照向量合成之規定.

§72. 分力及合力之矩.

命圖36之PA及PB表兩力,PC表其合力. 各力對

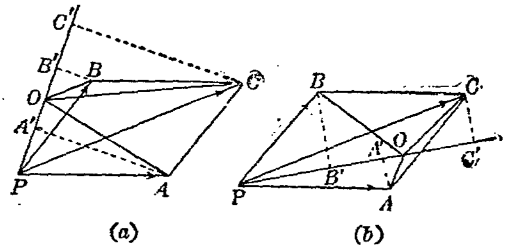


圖 36. 合力及分力之矩

於其軸 O 之矩,就圖中 $(a)(b)$ 兩種情形,分別求之:

(a)　力 PA 之矩等於 PA 及由 O 引至 PA 之垂線之長之乘積,即等於 $2\triangle OPA$. 故由 A, B, C 各點引 PO 之垂線,得 AA', BB', 及 CC'. 故

$$2\triangle OPA = OP\cdot AA' = PA\text{之矩},$$

$$2\triangle OPB = OP\cdot BB' = PB\text{之矩},$$

$$2\triangle OPC = OP\cdot CC' = PC\text{之矩},$$

$$AA' + BB' = CC',$$

$$\therefore \quad PA\text{之矩} + PB\text{之矩} = PC\text{之矩}.$$

(b)　其關係亦與甲相似,但此時

$$AA' = BB' - CC',$$

$$PA\text{之矩} = OP\cdot AA',$$

$$PB\text{之矩} = -OP\cdot BB',$$

$$PC\text{之矩} = -OP\cdot CC',$$

結果仍同,即合力之矩,等於分力之矩之和.

§73. 平行力

作用於一物體之諸力,互相平行時,曰**平行力**(parallel forces). 平行力不能相交,故前述向量之一般合成法,不能適用.

如圖37,命P,Q表兩平行力,R表其合力. 假定P及Q在同一方向作用,則$R=P+Q$,其方向亦同. 至R之作用點C,應在何處,則須利用力矩求之. 於同一平面內取一點O,引直線$OABC$與諸力之方向垂直. 命a,b,及c表OA,OB,及OC之距離. 由前節知兩分力之矩$P\times a$及$Q\times b$之和,應等於其合力之矩$R\times c$. 故

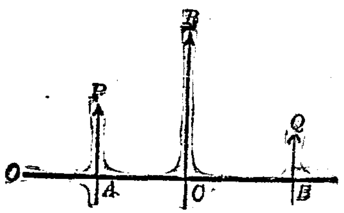


圖 37. 同向平行力之合力

$$R=P+Q,$$

$$Rc=Pa+Qb.$$

$$\frac{b-c}{c-a}=\frac{P}{Q}=\frac{CB}{AC}$$

即合力之作用點應在P Q之間,其與兩分力之距離,與兩分力之大小成反比例. 如是之C點,曰**平行力之中心**(center of parallel forces).

假定P,Q之方向,互相反對,則如圖38所示,其關係如下:

$$R=P-Q,$$

$$Rc=Pa-Qb.$$

$$\frac{b-c}{a-c}=\frac{P}{Q}=\frac{CB}{CA}.$$

即合力等於兩力之差,其

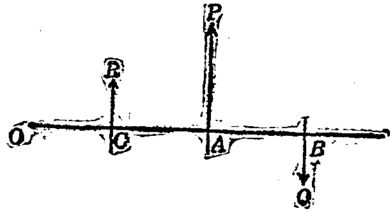


圖 38. 反向平行力之合力

作用點在較大一力之外方,其與兩分力之距離,與兩力之大小成反比例.

§ 74. 力偶.

如作用於一物體之二平行力,如其大小相等,方向相反,則

$$R=P-Q=0, \qquad CB=CA.$$

即合力應等於零,作用點在兩力以外,其與兩力之距離相等. 如是之一點,應在無窮遠處,事實上不能存在. 但此合力對於任何一點之矩,均成爲$0\times\infty$之形式. 凡有如是關係之兩平行力,曰**力偶** (couple), 此兩力所在之平面,則曰**力偶面** (plane of couple). 如圖 39,由任一點 O 引直線 OAB, 與力偶 $P, -P$ 垂直,則

$$\text{力偶對於此}\,O\,\text{點之矩} = P\cdot OA - P\cdot OB$$
$$= P\cdot AB.$$

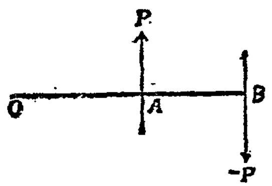


圖 39. 力偶

無論 O 在何處,此 $P\cdot AB$ 之值,恆一定不變,是曰**力偶矩** (moment of couple). 又兩力間之垂直距離 AB, 曰**力偶臂** (arm of couple). 又力偶矩亦名**力偶之强度**(intensity of couple),或即略稱力偶.

力偶矩之效應,與通常之力矩同,在使物體發生轉動,如沿反時針而轉,則取正號,於力偶面之垂線上,向上方取相當之長,與 $P \cdot AB$ 成一定之比例表出之. 如沿順時針而轉,則取負號,於同垂線上,向下方取同長表出之. 故力偶兼大小方向有之,亦爲一種向量,其合成分解,應遵從向量合成之規定.

§ 75. 重心.

在地球表面附近之物體,其各部分所受之重力,爲平行力,且每一部分所受之重力,即與其部分之質量成一定之比例. 此等平行力之中心,曰重心 (center of gravity). 由質量之方面言之,如是之點,適成其質量中心,故重心與質量中心,恆相一致.

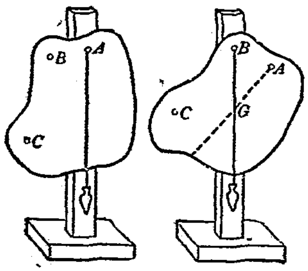


圖 40. 重心

用線懸物體上之一點,則線之方向,當通過物體之重心否則線之張力及作用於重心之重力,當形成一力偶,結果將使物體轉動. 實驗上求重心之法,卽根據此理. 如圖 40,先

將物體上一點A,掛在鈎上,由鈎再掛一細線,下有一錘錘靜止時細線卽表示通過A點之鉛直線方向.在物體上將此時細線之方向繪出.然後,再換其他之一點B,同樣將通過B點之鉛直線在物體上繪出.此前後兩直線之交點G,卽所求之物體之重心.

§76. 平衡之條件.

前於§52,曾述及作用於一點之力之平衡,今再推論及其一般之平衡條件.合力等於零,表示物體無移動;對於任意一條軸線,其力矩之和等於零,表示物體無轉動,雙方均須完全滿足,平衡始克成立.

§77. 特殊情況平衡之條件.

(1)兩力互相平衡時,須在同一直線上作用,且大小相等,方向相反.如大小相等方向並非正相反對,則合力不成爲零應生移動.如大小相等,方向相反,但不在同一直線上作用,則成力偶,應生轉動.

(2)三力互相平衡時,須在同一平面內作用.三力互相平衡時,第三力必與其他二力之合力互相平衡,卽須在同一直線上作用大小相等,方向相反,因其他二力

與其合力同在一平面上,而第三力與該合力同在一直線上,即第三力與其他二力同在一平面上.

(3)三力互相平衡時,如非彼此平行,則必同交於一點. 如互相平行,則其中之一力必與其他兩力之合力大小相等,方向相反,且在同一直線上作用. 如不成爲平行,則其中之一力,對於其他兩力之交點之力矩,亦必等於零,方可免去轉動. 換言之,第三力亦非通過此交點不可,故三力均相交於一點.

§73. 三種平衡.

一物體受數力之作用,而不發生運動之效應時,曰物體之平衡(equilibrium of a body). 由其平衡位置,加以微小之位移,然後放任之, (1)如能自行恢復其原位置者,曰穩定平衡 (stable equilibrium), 如圖41中之 *a*.

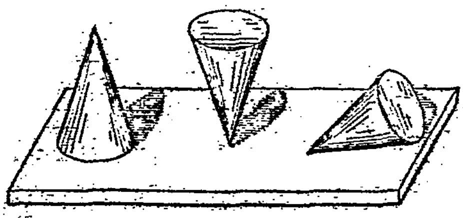


圖41. 三種平衡

(2)由原位置愈去愈遠者,曰不穩平衡(unstable equilibrium),如b. (3)既不恢復原位置,亦無愈去愈遠之傾向,隨處皆可靜止者,曰隨遇平衡(neutral equilibrium),如c.

§79. 週期運動.

動點之位置及其運動狀況,經歷一定之時間後,完全恢復其原狀之運動,曰週期運動(periodic motion). 例如以等速率沿圓周進行之圓周運動,即週期運動之一如圖42,命r表圓半徑,ω表角速度,O表圓心,A表最初出發點,是曰始點(initial point),$P(x,y)$表經歷時間t後,動點之位置,則

$$x=r\cos\omega t,$$

$$y=r\sin\omega t.$$

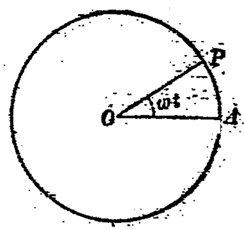


圖42.　週期運動

即P之位置,完全由ωt而定,故稱ωt曰動點在時刻t之相(phase). 命(x',y')表動點由時刻t再經歷$\frac{2\pi}{\omega}$之時間後之位置,則其值如下

$$x'=r\cos(\omega t+2\pi)=r\cos\omega t,$$

$$y'=r\sin(\omega t+2\pi)=r\sin\omega t.$$

與P完全一致;即恢復其原狀,其所需之時間$\frac{2\pi}{\omega}$,曰週期

(period),通常以T代之 單位時間內動點在圓周上環遶之次數n,曰每秒轉數(number of revolutions per second),又稱頻率(frequency). 週期,頻率,及角速度等之間之關係,如下:

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=\frac{1}{n}.$$

§ 80. 簡諧運動.

如圖43,P表動點,在圓周$ABA'B'$上以等角速度ω作圓周運動. AA'表任意一直徑,M表P對於AA'上之正射影. 當P作圓周運動時,M亦連帶在AA'上運動,如是之運動,曰簡諧運動(simple harmonic motion),圓$ABA'B'$則曰參考圓(reference circle),其半徑OA,曰振幅(amplitude)直徑AA'曰全振幅(double amplitude),又M往來全振幅一次所需之時間T,爲圓周運動之週期,亦即簡諧運動之週期. 在單位時間內M往來於全振幅間之次數,即簡諧運動之頻率,全振幅AA'之中央點O,曰平衡位置(position of equilibrium),由平衡位

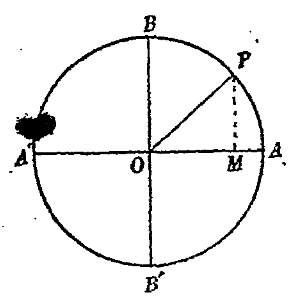


圖 43. 簡諧運動

置至 M 現在所在地點之距離,曰**位移**. 位移以由 O 向右測得者爲正,由 O 向左測得者爲負. 又 M 之位置由 P 而定,故卽以 P 之相,卽角 AOP, 表 M 之**相**.

命 r 表參考圓之半徑, ω 表 P 之角速度,圓周最下點 B',表測時之起點,則當時刻 t 時, P 之角位移爲 ωt, 其在 X 軸上之正射影 M 之位移 x, 由圖可知等於 $r\sin\omega t$. 週期 T 之值與前節同,卽

$$T=\frac{2\pi}{\omega}.$$

§ 81. **單擺.**

設有不伸縮細線一條,其重量又可略去不計,將其一端固定,他端懸一小球,令其左右擺動,是爲**單擺**(simple pendulum). 固定之點,如圖 44 之 O, 曰**懸點**(point of suspension), 線長 OA 曰**擺長** (length of pendulum), 所懸之球體,曰**擺錘**(bob), 其最低之位置 A, 曰**平衡位置**,擺錘在任何時刻之位置,可由 θ 決定之. 設由平衡位置 A 向右移動,則 θ 漸大,勢能增加,故其速度漸減. 至 B 點速度已減成零,不能前進,同時勢能亦成

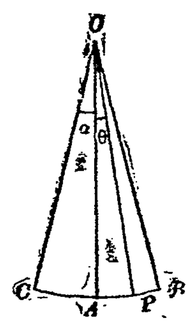


圖 44. 單擺

爲最大. 故由 B 點自行折回向左移動. 此最大之角 AOB 曰幅角(angle of amplitude),通常以 a 表之. 擺由 B 折回後,愈落愈低,速度逐漸加大,卽其動能漸加而勢能則減小. 達於平衡位置 A 時,勢能雖已減成爲零,但動能則成爲最大,故可繼續向左移動,但自通過 A 點以後,勢能又逐漸加大,故動能不得不隨之減小,卽速度漸減. 直至達於與 B 點等高之 C 點,速度已減成零,不能前進,同時勢能又成爲最大. 於是由 C 點自行折回向右移動,速度漸增而勢能漸減. 至於 A 點時,一切情形卽恢復原狀. 由是可知擺之運動,亦週期運動之一種,通稱之爲振動(vibration 或 oscillation) 弧長 AB 或 AC,曰振幅. 由 A 點起先後經過 B 點 C 點折回至再通過 A 點爲止,其間所歷之時間,卽擺完成一全振動之週期. 據理論及實驗,如命 l 表擺長,T 表週期,當幅角不甚大時,其振動爲簡諧運動,其週期如下:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

卽幅角甚小時,週期由擺長而定,與振幅無關. 在同一地點,g 之值一定不變,故等長之擺其週期極相等,是曰擺之等時性(isochronism) 通常計時之鐘(clock),卽利

用此項擺之等時性而成每經過其平衡位置,即每半週期,表示一秒,此種擺卽稱爲秒擺(second pendulum).

§82. 正弦曲線.

如沿橫軸取時間,沿縱軸取各時刻擺錘與平衡位置之距離,且距離向右時取上方,向左時取下方. 將各時刻擺錘之位置,用此法表出,連接之得一連續曲線,如圖45所示,曰**正弦曲線**(sine curve). 曲線上之一點 p'

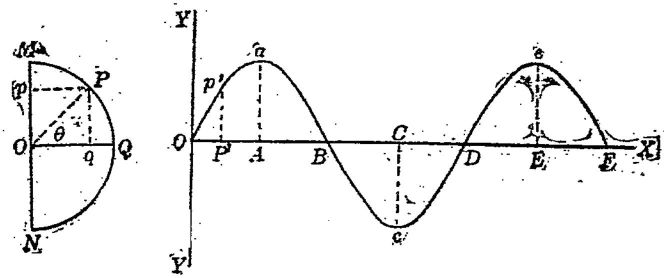


圖45. 正弦曲線

表在 OP' 之一瞬時錘之位移. 擺之運動以及其他簡諧運動,以由此圖研究,最爲簡明.

§83. 共振.

上述之振動,當其振動中,除受重力作用而外,並無其他之力存在. 凡如是之運動,曰**固有振動**(natural vibration),或曰**自由振動**(free vibration).

設有一重錘A,如圖46,在懸點B周圍振動,其運動之平面與紙面垂直.如於懸軸傍,裝一橫棒C,下懸單擺D.因A之振動,D受一週期力之作用,其週期卽A之週期T.又D較A甚小,故週期T,不因D而受影響.試命L表A之擺長,l表CD.D受週期力作用之結果,亦將往返振動不已.

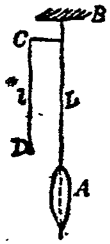


圖46. 共振

(1)如$l<L$,則A發動後,D之振幅漸次由小而大又由大而小,不久成爲一定之振幅,與A作同週同相之振動.卽A若向左,D亦隨之而左;A若向右,D亦隨之而右.一方面l旣小於L,則D自由振動時,其週期應較A之週期爲小,今旣成爲同一之週期,可知其非自由振動矣.凡受週期力作用而起之振動,其週期與所受之力之週期相等者,曰**強迫振動**(forced vibration).

(2)如$l>L$,卽D之自由振動週期,大於力之週期時,當A發動之始,D之振幅變化,仍與前同.僅振幅成爲一定以後,兩者之週期雖亦相同,但兩者之相,則差π.卽A若向左,D卽向右;A若向右,D卽向左.

(3)如$l=L$,當A發動以後,D之振幅,卽無時大時

小之變化,僅有次第加大而已,故其最後所達到之振幅,遠非前兩者所能及. 週期則兩者恆相同. 故凡以週期力作用於擺或其他可以振動之物體上,如力之週期與此物體之自由振動之週期恰相等,則由此引起之振動,其振幅最大,特名之曰**共振** (resonance).

共振對於實際,影響極大,尤以工程上爲最. 建築物等,如遇有週期力作用,其力雖微,但若繼續之時間過久,每每釀成巨災,不可不注意避免之.

問題第五

1. 在完全平滑之桌面上立一釘,釘上繫線一條,線端縛一小球,其質量爲 3 克,線長 50 厘米,令此小球以 40 每秒厘米之速度作圓周運動,求線之張力.

2. 在完全平滑之桌面上立一釘,釘繫一線,長 40 厘米,其力恰足以支持 4 仟克. 今在此線端繫一小球,其質量爲 50 克,使小球在此水平之桌面上旋轉. 欲線不斷,其最大之頻率幾何?

3. 在完全平滑之桌面上立一釘,上繫一線長半米,線端之球其質量爲 10 克,每分鐘旋轉若干次,線所受之力恰與鉛直懸 1 克重之物體時所受之力相等?

4. 有長 1 米,質量 100 克之棒,在其一端縛一鉛球,其質量爲 47.3 克,半徑爲 1 厘米,求重心.

5. 用兩對角線等分正方形作四三角形，去其一，則其餘之重心應在何處?

6. A, B 兩人用一扁擔肩物，物重12仟克，擔長4市尺，物體與 A 之距離爲3市尺。求此兩人分擔之重量。

7. 一人用扁擔肩行李，行李重30斤，縛在擔之一端，擔長6尺，在擔之他端縛小石一塊重2斤。求扁擔着於肩上之點與小石之一端之距離。

8. 棒長12尺，重50斤，一端懸20斤之物，他端懸30斤之物，須支住棒上何處始能平衡?

9. 棒長5尺，重4斤，自其一端量起，在距離1尺，2尺，3尺，4尺等各點，按次各掛重1斤，2斤，3斤，4斤之物體，欲全體平衡，應支住棒上何處?

10. 棒長4尺，重2斤，其四分之一長之一點，固定不動，在較短一段之端掛一10斤重之物體，在其他一端須掛若干重之物體，始能平衡?

11. 棒長10尺，重10斤，距一端4尺遠之點成爲支點，即在此端懸6斤重之物體，在他一端須掛若干重之物體，始成平衡?

12. 橋長30尺，重6噸，兩端放在支柱上。設有一貨車，重2噸，由橋上經過，(1)當車正在橋之中央時，(2)當車在全長三分之一之一點時，兩支柱上所擔負之力各若干?

13. 棒長20厘米，用距離10厘米之兩支架支住，在一端懸2克重，在他一端懸3克重之物體，須知何放在支架上，始能

使兩支點上受到相等之力作用?

14. 上海之重力加速度爲979.4每秒每秒厘米,求秒擺之擺長.

15. 在重力加速度爲980每秒每秒厘米處,週期等於1秒之擺,其擺長幾何?

16. 在某地用長64米之擺,測得其週期爲16秒. 求此地之重力加速度.

17. 長53.41厘米之擺,在$g=981$每秒每秒厘米之地,於242秒間內可振動若干次?

18. 每一晝夜遲5秒之時鐘,今欲使其準確,須將擺長如何修正?

19. 每一晝夜快2分之時鐘,當如何修正?

第五章　摩擦

§84. 摩擦.

一物體沿他物體之表面運動,或欲開始運動時,恆受一種阻止其運動之力作用,是曰**摩擦力** (friction),或略稱**摩擦**.

設有一物體C,如圖47,在水平面AB上,靜止不動,則重力W必與水平面之阻力N,大小相等,且方向相反.

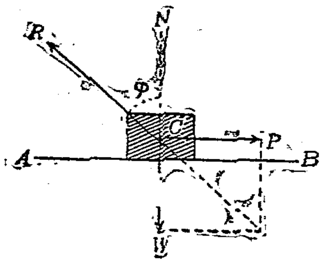


圖 47. 摩擦

如再加一水平力P作用於此物體上,仍不稍動,此時由AB而來之阻力R,應與W及P之合力,相等相反. 命φ表R與法線CN間之角度,N及F表R之鉛直方向及水平方向上之分力,則由圖知

$$N = R\cos\varphi = -W,$$

$$F = R\sin\varphi = -P.$$

此F即水平面AB作用於物體C之摩擦力. 與此相對,沿鉛直方向作用於物體之重力,曰**正壓力** (normal pressure). 正壓力並不限於重力一種,如以手按物體向下之力,亦其一種,通常以Q代之.

§85. **摩擦係數.**

前圖47中作用於物體之水平力P,如再加大,致$\frac{P}{Q}$超過一定值以上,物體即開始運動. 此時與P相等相反之阻力,其值亦有一定,名曰**最大摩擦力** (maximum friction). 命F表最大摩擦力,μ表$\frac{P}{Q}$,則

$$F=\mu Q.$$

式中之μ爲一常數,其值由接觸物質之性質而定,與接觸面之大小無涉,通稱之曰**摩擦係數**(coefficient of friction). 此式所表之關係,則曰庫侖 (Coulomb) 或摩稜 (Morin) 之**摩擦定律** (law of friction).

§86. **極限角及靜止角.**

物體所受之摩擦達於最大摩擦力,即其將次開始運動之一瞬時,其所受之阻力R,與法線CN間之角度φ,通稱之曰**極限角**(limiting angle),亦有時稱爲**摩擦角** (angle of friction).

因此時

$$R\cos\varphi = -Q,$$

而 $$R\sin\varphi = -P = -\mu Q,$$

故得 $$\tan\varphi = \mu.$$

設有一外力 f, 作用於一物體上,此力與法線間之角度 ψ, 較摩擦角為小. 則

$$鉛直分力 = f\cos\psi,$$

$$水平分力 = f\sin\psi,$$

且 $$\tan\psi < \mu,$$

故 $$f\sin\psi < \mu f\cos\psi.$$

即如是之力,其水平分力恆較最大摩擦力 $\mu f\cos\psi$ 為小故不問力之大小如何,物體雖受此力作用,亦決不滑動.

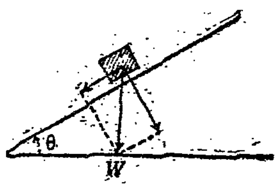


圖 48. 極限角

如圖 48,一物體在傾斜 θ 之斜面上,受重力 W 之作用,則

$$垂直分力 = W\cos\theta,$$

$$平行分力 = W\sin\theta.$$

故當 $$\frac{W\sin\theta}{W\cos\theta} = \tan\theta = \mu$$

時,摩擦適成為最大,物體亦開始滑動. 此時之斜面之傾斜角 θ, 曰靜止角 (angle of repose), 因若超過此值,物體將不復再保持其靜止矣. 又靜止角等於極限角,故可利用之以測定各種物質間之摩擦係數.

§87. 摩擦之種類.

上述之摩擦,爲物體將次開始運動以前所現出者,故曰靜摩擦(static friction). 在物體既已運動以後,其與他物體之接觸面間,亦有摩擦存在,是曰動摩擦(kinetic friction). 如兩接觸面間之相對速度之值,不甚大時,動摩擦亦與直壓力爲正比例. 試命 f 表動摩擦,Q 表直壓力,ν 表比例常數,則得

$$f=\nu Q$$

之關係. 式中之 ν 曰動摩擦係數(coefficient of kinetic friction),其值恆較靜摩擦係數之 μ 爲小. 動摩擦及靜摩擦,又合稱曰滑動摩擦 (sliding friction).

又作轉動之物體,如沿他物體之接觸面滾過,亦有摩擦作用存在,是曰滾動摩擦(rolling friction). 例如車輪在軌道上滾進時,輪下之軌凹下,輪前之軌拱上,以妨礙輪之前進,是卽滾動摩擦. 命 f 表之,Q 表直壓力,r 表輪半徑,則有

$$f=\varphi\frac{Q}{r}$$

之關係,φ 爲一常數,曰滾動摩擦係數(coefficient of rolling friction),其值恆較 ν 爲小.

又飛機或鳥類在空中飛行,受空氣之阻力作用,藉

船在水中進行,受水之阻力;煤氣或自來水在管中流過時,受其管壁之阻力,如是者,概稱之曰**流體摩擦**(friction of fluids).

茲將靜摩擦及動摩擦之實際係數,列表於下.

表 3. 摩擦係數

物質	狀況	靜止	運動	物質	狀況	靜止	運動
黃銅,木	乾燥	0.62	——	鑄鐵,木	乾燥	——	0.49
青銅,青銅	乾燥	——	0.20	鑄鐵,木	塗水	0.65	0.22
青銅,鍛鐵	塗油	——	0.16	鑄鐵,皮帶	乾燥	0.28	——
青銅,鑄鐵	乾燥	——	0.22	木,木	乾燥	0.62	0.48
鍛鐵,鍛鐵	乾燥	——	0.44	木,麻繩	乾燥	0.80	0.52
鍛鐵,鍛鐵	塗油	0.13	——	木,牛皮	乾燥	0.43	0.38
鍛鐵,木	塗水	0.65	0.26	木,貝殼	乾燥	0.64	0.38
鍛鐵,貝殼	乾燥	0.42	0.24	軟木,牛皮	塗水	0.62	——
鑄鐵,鑄鐵	塗水	——	0.31	軟木,牛皮	塗油	0.12	——
鑄鐵,鑄鐵	塗油	0.16	0.15	貝殼,貝殼	乾燥	0.70	0.69

§88. 粗面及滑面.

摩擦係數μ等於0之面,曰**完全滑面**(perfectly smooth surface). 完全滑面上無摩擦作用,故對於在此種面之物體施以一平行之力,無論此力小至若何程度,物體亦決不能保持其平衡. 故在滑面上靜止不動之物體,其與滑面間之作用力,恆與滑面垂直,卽除直壓力而外,無其他之力作用. 反之,如μ等於無窮大,則接觸面曰完

全粗面 (perfectly rough surface). 在完全粗面上之物體,無論施以任何大力,亦不能滑動,故僅有滾動發生.

以上兩種,同為理想上之接觸面,實際上所經驗者,均在此兩種之間,既非完全滑面,亦非完全粗面.

§89. 減少滑動摩擦之方法.

摩擦足以阻礙物體之運動,如其係數過大,則所用之力,大部分等於虛耗,極不經濟. 欲減少摩擦,第一在使接觸面務成滑面,其次則於接觸面之間,塗機械油或石墨等,摩擦卽為之大減,此類物質曰**滑料** (lubricating substance).

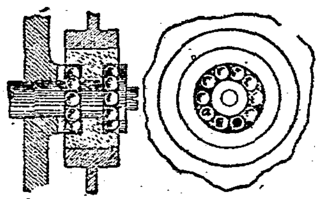


圖 49. 球軸承

又滾動摩擦係數,一般均遠在滑動摩擦係數之下,故利用滾動以代滑動,亦為減少摩擦效應之一法. 例如移動重物所用之**滾子** (roller),為一圓柱形之木,插入物體與地面之間,可使物體沿地面之滑動,一變而成滾子與地面間之滾動,可以省力不少. 圖 49 所示之**球軸承** (ball-bearing),係在車軸及其軸承之間,夾入若干小鋼

球,其目的卽在使軸及軸承間之滑動摩擦,變成鋼球及軸間之滾動摩擦. 又如圖50所示之摩擦輪 (friction wheel), 將一輪之軸,跨在兩輪之上,則其轉動極爲容易.

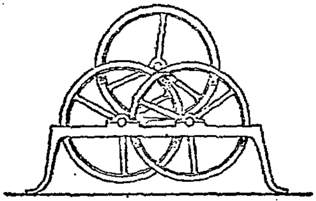


圖 50. 摩擦輪

問題第六

1. 摩擦有何利益,有何害處? 試各舉三例說明之.

2. 馬車在光滑石路上行走較易,在鬆散之泥路上行走較難,何故?

3. 煞車不可過緊,何故?

4. 用車運貨比較用人抬走,有何利益?

5. 減少摩擦,有何方法?

6. 曳車之馬,若不繼續加力,車卽停止,何故?

7. 以重500克之物體,置於滑板上,漸次使滑板傾斜,至30° 時物體卽行滑下,問此時之最大摩擦幾何?

8. 物體重100克,放在長1米之平板上,將板之一端舉高至20厘米時,物體卽開始滑動,求其最大摩擦.

9. 物體平放於地面,物體重40斤,物體與地面間之摩擦係數爲0.25, 欲推動此物體,至少須用力幾何?

10. 在桌面上放一物體,用力推之,力與水平方向作45°

之傾斜，如摩擦係數爲0.5，求物體開始滑動時，所用之力爲物體重量之若干倍？

11.　斜面長5尺，高3尺，上載一物體重20斤，沿斜面方向用8斤重之力，即可將物體支住，使其不動．求摩擦係數．

12.　一物體重4斤，放在板上，如將板之一端舉高，使板面傾斜成爲30°時，物體即將開始滑動．如再將板之傾斜增加至60°，而於板面平行方向上用力以支持之，求所需之力．

13.　物體重100克，放在板上，使板傾斜至45°時，物體即開始滑下．今將傾斜減小至30°，用與板面平行之力推之使上，所需之力最少若干？

第六章 簡單機械

§90. 機械.

凡傳功之物,通稱機械(machine),其功率卽單位時間內所作之功. 工業上,一種機械所能作之最大功率特稱曰輸出(out-put). 欲使機械作功,必由外供給以相當之能,凡使由外供給而來之能,變爲機械能之器,通稱之曰原動機(prime mover),所供給之能,則曰原動力(prime power). 例如蒸汽機(參照§177),電動機(參照§375)等,均爲原動機,而水力,火力,及電力等,則爲原動力.

§91. 效率.

命W表單位時間內供給機械之能. 機械得到此項之能,分化之成爲三部分: (1)使組成機械之各部分運轉,變成動能,以e表之;(2)實際表現於外之有效功,以w表之;(3)反抗摩擦等類作用所作之功,卽一種純粹之損失,以w'表之. 據能量不滅定律,其關係如下:

$$W = e + w + w'.$$

有效功w對於供給之能W之比,即$\frac{w}{W}$之值,恆小於1,通常以其百分數表出之,而稱之曰機械之效率(efficiency).又w爲單位時間內所表現之有效功,亦即此機械之功率.各種機械,因運轉之速度不同,上述各量之值,亦隨之而異,結果功率之w及效率之$\frac{w}{W}$亦不能一定.最大功率與最大效率,不能相伴發生,即功率成爲最大之時,效率不能成爲最大,反之亦然.

§92. 功之原理.

傳功之目的,在加力P於機械上一點,使之反抗另一阻力W,表現相當之功.P及W,同屬作用於機械之外力,但因其性質不同,名稱亦異.P係使機械作功而加之力,曰**適用力**(applied force),或曰**動力**(power),又曰**努力**(effort);W係機械反抗其作用而作功之力,曰**阻力**(resistance),或曰**重量**(weight),又曰**擔負**(load).命p及w各表機械因受此兩種作用,而在其作用方向上所生之位移.假使摩擦作用,可以略去不計,而運動又極遲緩,不致因對付慣性而受損失,則由能量不滅定律,知雙方所作之功,應互相等,即應有$Ww=Pp$之關係.此爲一種極普遍之原則,對於任何機械,均可適用.換言之,無

論何種機械,若其摩擦作用可以略去不計,則對於此機械所作之功,恆與此機械對外所作之功相等. 通稱之曰功之原理 (principle of work).

§ 93. 機械利益.

阻力 W 對於適用力 P 之比,即 $\frac{W}{P}$,曰機械利益 (mechanical advantage), 以 A 表之,則

$$A=\frac{W}{P}=\frac{p}{w}.$$

大多數之機械,利益均較 1 爲大,使用之,可以小力抗大力作功. 但由上式,可知適用力移動之距離,當較阻力移動之距離爲大. 換言之,以適用力作用點之大速度,易得阻力作用點之小速度. 即力及速度二者之間,有一得必有一失,不可得而兼也.

數種機械,亦可結合使用,此時命 A 表其全體之利益, $A_1, A_2, A_3, \cdots\cdots, A_n$ 表各部分之利益,則其關係如下:

$$A_1=\frac{f_1}{P},\quad A_2=\frac{f_2}{f_1},\quad A_3=\frac{f_3}{f_2},\quad \cdots\cdots,\quad A_n=\frac{W}{f_{n-1}}$$

故
$$A=A_1A_2A_3\cdots\cdots A_n.$$

即全體之利益,等於各部分利益之乘積.

§ 94. 簡單機械

一切機械,均由數種要素結合而成,此數種要素,在歷史上有簡單機械(simple machine)之稱,以斜面及槓桿兩者,爲其代表,餘均其變相而已.

茲就各種較爲重要之簡單機械,分節敍述如次:

§95. 斜面.

與水平面作傾斜角度之平面,曰斜面(inclined plane)其中以完全滑面之關係,最爲簡單

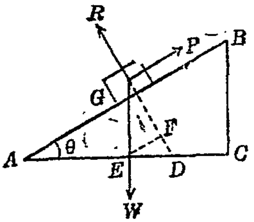


圖 51.　作用於斜面上之平行力

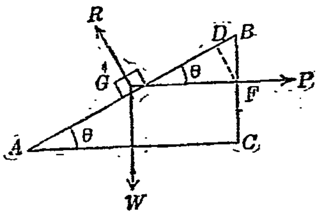


圖 52.　作用於斜面上之水平力

在斜面 AB 上之物體,因受外力 P 之作用,其重心 G 假定由 A 移至 B. 外力 P 之作用方向,如與斜面平行,如圖 51,則其所作之功爲 $P\times AB$; 如爲水平,如圖 52,則其所作之功爲 $P\times AC$. 至於 W 所受之功,則同爲 $W\times CB$. 故若就平行力而論,其關係如下:

$$P \times AB = W \times CB,$$

$$A = \frac{W}{P} = \frac{AB}{CB} = \frac{1}{\sin\theta};$$

就水平力而論,其關係如下:

$$P \times AC = W \times CB,$$

$$\therefore \quad A = \frac{W}{P} = \frac{AC}{CB} = \frac{1}{\tan\theta}.$$

式中之 θ,表斜面之傾斜角度,A 表斜面之機械利益.由式可知斜面之傾斜角度愈大者,其機械利益愈小.

§ 96. 劈.

破柴時插入木中,舉物時墊於其底之三角形木塊或鐵塊,曰劈(wedge),亦斜面之一種應用. 破柴所用者,概爲二等邊三角形,如圖 53 之 ABC,用時,以尖棱 A 嵌入木內,命 P 表自上面而來之適用力,Q, R,表由兩面而來木之阻力,各與劈面垂直,由 § 77,知 P, Q, 及 R 必相交於一點,方成平衡,且兩阻力 Q, R 在 P 之方向之分力,其和應等於 P. 又因 ABC 爲二等邊三角形,由對稱知

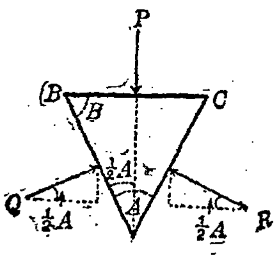


圖 53. 劈

$$R = Q.$$

其在 P 之方向上之分力,各爲 $Q\sin\frac{1}{2}A$, 故

$$P = 2Q\sin\tfrac{1}{2}A = 2Q\frac{\frac{1}{2}BC}{AB} = \frac{BC}{AB}Q.$$

故劈之機械利益應爲

$$A=\frac{Q}{P}=\frac{AB}{BC}.$$

由式可知 BC 愈小,則機械利益愈大,卽劈之頂角愈小者,其機械利益愈大.

§ 97. 槓桿.

具有一固定之點,全體可在此點周圍轉動之直棒,曰槓桿 (lever),其固定之點,曰支點 (fulcrum). 圖 54 之 AB 表槓桿, C 爲其支點. 適用力 P 作用於槓桿上一點 A,可將懸在另一點 B 之重量舉起. A 曰**施力點** (point of application), 而 B 則曰**重點**(point of exertion).

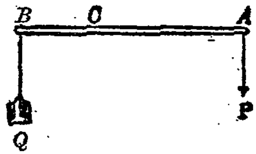


圖 54.　槓桿

因支點,施力點,及重點三者之位置,可將槓桿分爲三種,如圖 55 所示. 就力矩而言,

$$P\times CA=Q\times CB,$$

故其機械利益爲

$$A=\frac{Q}{P}=\frac{CA}{CB}.$$

如命 A_1, A_2, A_3 表三種槓桿之利益,則由上式,可知

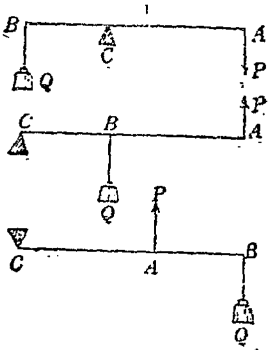


圖 55. 三種槓桿

$A_1 \gtreqless 1, \quad A_2 > 1, \quad A_3 < 1.$ 又 CA 或 CB 之長,曰槓桿臂(arm of lever). 簡單機械中之滑輪,輪軸,齒輪,天平,及秤等,均槓桿之變相,而天平則為等臂之槓桿,卽其支點適在施力點與重點之中央.

§ 98. 滑輪.

輪緣設溝,內跨一繩,曳繩則輪轉,藉以舉起重物,曰滑輪(pulley). 如圖 56 (a), 輪之中心點一定不變者,曰定滑輪(fixed pulley),其用處只在改變力之方向;如(b),其中心點隨所懸物體作上下之移動者,曰動滑輪(movable pulley). 定滑輪之支點在中央,為等臂槓桿之變形,其機械利益等於 1. 動滑輪之重點在中央,支點及力點各在其一端,屬於第二類槓桿,其機械利益等於 2.

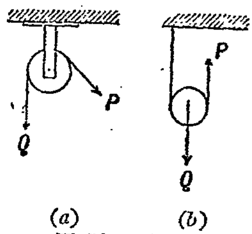


圖 56. 滑輪

聯合若干滑輪使用時,曰滑輪組 (combination of pulleys 或 block and tackle), 用法可分爲兩種:

(1)如圖57僅用一繩貫穿全體者,其各部分之張力,均相等,故

在(a), $P=\frac{1}{4}Q$;

在(b), $P=\frac{1}{5}Q$,

一般如將繩分作 n 部分,則

$$P=\frac{1}{n}Q,$$

故其機械利益爲

$$A=n.$$

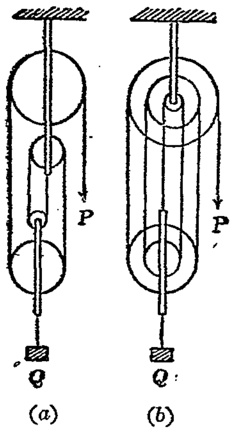


圖 57. 單線滑輪組

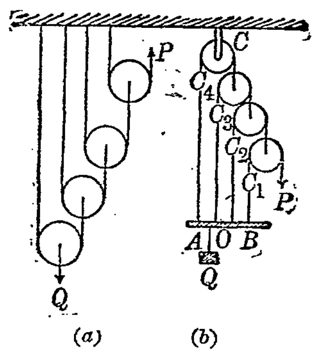


圖 58. 複線滑輪組

(2)如圖58,用繩數條分懸各滑輪時,每一輪之機械利益均爲 2,如輪數爲 n, 則在(a),

$$A=2\times 2\times\cdots\cdots=2^n,$$

$$P=\frac{1}{2^n}Q.$$

在 (b)，可將 (a) 顚倒觀之，命 Q' 表懸點 C 處向上作用之力，則 $Q'=2^nP$，即全體共受三力 Q, Q'，及 P 之作用，而成平衡，故得

$$P+Q=Q'=2^nP,$$

$$Q=(2^n-1)P,$$

故機械利益爲

$$A=2^n-1.$$

又因 $C_1, C_2, C_3, C_4 \cdots$ 各力，順序爲 $P, 2P, 4P, 8P\cdots$，故 Q 之作用點，不在 AB 之中央，而在於圖中所示之處

§99. 輪軸.

半徑不等之兩共軸圓柱，連爲一塊，曰輪軸 (wheel and axle)，徑大之一部分曰輪，徑小之一部分曰軸. 如圖59，FA 爲軸之半徑，以 a 表之；FB 爲輪之半徑，以 b 表之，則

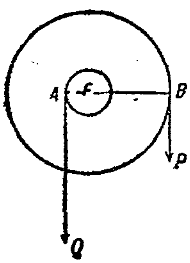


圖 59. 輪軸

$$Pb=Qa, \quad \therefore A=\frac{Q}{P}=\frac{b}{a}.$$

即輪徑大或軸徑小者，其機械利益愈大.

§100. 螺旋.

將紙裁成斜面，卷於圓柱上，如圖60，其斜邊所成之

曲線,曰**螺紋** (screw thread),相鄰兩紋間之距離,如 CD, 曰**螺距** (pitch). 如命 r 表圓柱半徑,α 表斜面之傾斜角,p 表螺距,則其間之關係爲

$$\frac{p}{2\pi r}=\tan\alpha.$$

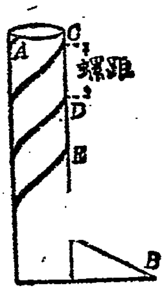


圖 60. 螺旋與斜面

沿螺紋在圓柱周圍刻成突起形狀者,曰**雄螺旋** (male screw). 同樣,在中空圓筒裏面,刻成溝狀者,曰**雌螺旋** (female screw). 此兩者,互相嵌合,其一固定,則其他可隨轉隨進或退,合稱之則泛曰**螺旋** (screw). 其應用極廣,如圖 61 所示,即其一例,曰**螺旋壓榨器**(screw press),轉動上端之盤,下置之物,即被壓緊.

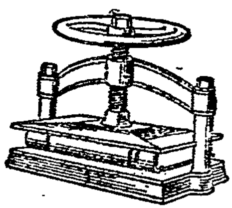


圖 61. 螺旋壓榨機

問題第七

1. 試舉日常所見之物,應用槓桿而成者三種,說明其支點,施力點,及重點各在於何處?

2. 中國秤,天平,及彈簧秤,何者可量重量? 何者可量質量? 並說明其理由.

3. 用一定滑輪曳物,如物體之重,較曳繩者之體重爲

大,能否曳起?

4. 用垂直於斜面之力,支持斜面上之物體,可省力若干?

5. 獨輪車之作用為何?

6. 拳臂槓桿有何機械利益? 何以常常使用此項機械?

7. 下列各種用器,屬於何種簡單機械? (a)掃帚 (b)鋤 (c)磨石 (d)鐵鏟 (e)剪刀.

8. 機械利益與機械效率有何不同,試各舉例說明之.

9. 用一鐵棒技倒重物,作第一種槓桿使用時須如何? 作第二種槓桿使用時又如何?

10. 家中常用之物品,其機械利益比1為小者,試舉數種.

11. 斜面高3尺,底長4尺,欲在其上放質量16斤之物體,用水平力支持之,需力若干? 又斜面之反作用若干?

12. 斜面上放一物體,用與斜面平行之力,只須其重量之一半,即足以支持之. 求斜面之傾斜角度及反作用.

13. 在傾斜60°之斜面上之物體,用與水平作30°之方向上之力支持之. 試證明所需之力及斜面之反作用,均與物體之重量相等.

14. 斜面之傾斜角度為30°,沿與斜面成30°方向上,用力支持物體,求其機械利益.

15. 設有一槓桿,本身並無重量,其一方受10斤重之力,

而支點則受16斤重之力,短臂長3尺,求長臂長若干。

16.　用7尺長之槓桿,欲用6斤重之力,支住8斤重之物體,支點應放在何處?　假如雙方各增加1斤重,槓桿將向何方傾轉?

17.　如一槓桿之支點所受之力,十倍於兩力之差,則其機械利益幾何?

18.　有木棒一條,長3尺6寸,於其兩端各繫一物,一重6斤,一重20斤,須將距一端9寸處放在肩上,方能平衡,求木棒重若干。

19.　槓桿一端懸12斤重之物,他端懸5斤重之物,如成平衡時,其一臂之長,等於他一臂之長二倍,則槓桿之重當爲若干?

20.　槓桿長5尺,重10斤,一端固定不動,在距支點1尺遠及3尺遠處,各懸3斤重及6斤重之物,在他一端用力支持之,求支點所受之壓力。

21.　槓桿長18厘米,重18克,一端懸29克之重,與他一端所懸9克重之物,成爲平衡,求其支點應在何處。

22.　前題懸9克重處,如再加9克,則支點應如何移動?

23.　設有一槓桿,其重量可以不計,兩端一懸8克重之物,一懸4克重之物,使其成爲平衡。次在懸8克重之一端,再加2克,則其支點須移動$\frac{4}{7}$厘米,方能恢復平衡。　求槓桿之長。

24.　中國舊式桿秤,桿重10兩,載物之盤重20兩,錘重50

兩,提繩與懸盤相距4寸,桿之重心與懸盤相距7寸.問桿上標度,應從何處開始?又200兩之標度應刻在何處?

25. 下列各題中,滑輪之重量可以不計,命n表動滑輪個數,Q表所懸重量,P表手拉之力;

(i) $n=4$; $P=20$ 斤; 求Q.

(ii) $n=4$; $Q=112$ 斤; 求P.

(iii) $Q=56$ 斤; $P=7$ 斤; 求n.

26. 用複滑輪吊物,手拉下1尺,物昇上2寸半,如欲拉上200兩重之物,須力幾何?

27. 不計滑輪本身重量,命n表動滑輪之個數,P表手拉之力,Q表所舉之重,試解下列各題:

(i) $n=4$; $P=2$ 斤; 求Q.

(ii) $n=5$; $Q=124$ 斤; 求P.

(iii) $Q=105$ 斤; $P=7$ 斤; 求n.

28. 設輪與軸之半徑為2尺4寸及3寸,欲舉56斤重之物體,須用若干之力?

29. 設輪軸之半徑為30厘米及5厘米,用20斤之力可舉若干斤之重?又軸架上受到之力幾何?

30. 使用輪軸,只用3斤重之力,即可支持30斤重之物體,設軸之半徑為2寸,求輪之半徑.

31. 設有水夫四人,用絞盤拔錨,軸徑4寸,絞盤之臂各長7尺2寸,如每人用112斤重之力,方可拔起,則錨重若干?

第二篇　物性學

第一章　物質之組成

§101. 物質之通性

凡屬物質,必有若干共同之點,是日物質之通性(general properties of matter).

(1) 廣延性: 凡爲物體,必占有若干之空間,亦卽有相當之廣延. 超越此項廣延,卽無從認識物體之存在.是日物質之廣延性(extension),或作塡充性.

(2) 不可入性: 物體旣各有一定之空間,其現在占有之處,當然不能更容他物. 卽二物體不能同時在同一之空間中存在,是日物質之**不可入性**(inpenetrability).

(3) 慣性: 牛頓之運動定律,對於一切物體,均能適用,故第一律所規定之慣性,亦物質通性之一.

(4) 多孔性: 水入海綿,藏而不見;50升之酒精與54升之水混合,容積僅100升. 此事實與不可入性,並不相背,乃各物質均有孔隙所致. 試盛水於密閉金屬空

球;壓之則水出如露;金屬之鈀,可吸氫氣;樹膠薄膜可以使二氧化碳自由透過. 凡此種種,均足以證明物質間確有孔隙存在,是曰物質之多孔性(porosity). 物質中僅有玻璃一種,在現今之實驗範圍內,不呈多孔性,爲唯一之例外.

(5) <u>壓縮性</u>: 第一篇所論之物體,雖受力之作用,形狀決不變化者;曰剛體 (rigid body). 剛體爲理想之物,實際並無之. 事實上,一切物體受力作用,其形狀容積,均不免受變化,以金屬之變化最小,而氣體之變化最大. 是曰物質之壓縮性(compressibility). 物體被壓縮後,恆發一恢復故狀之力,是爲彈力(elastic force),發生彈力之性質,曰物質之彈性(elasticity). 應彈力作用而生之形狀或容積變化,曰應變(strain);生應變之力,曰應力(stress).

(6) <u>分割性</u>: 米麥可搗成粉;糖入水則溶成均勻之甜液;$\frac{1}{100,000}$立方厘米之洋紅,投入1,000立方厘米之水中,亦可染成紅色;麝香在室,滿室爲香. 凡此種種,均足證明物質可以分割成爲微粒,是曰物質之分割性(divisibility).

(7) <u>不滅性</u>: 物質之形態可以變易,大小亦可分割,然既不能於虛無之中使其創生,亦不能將已有者,使其

消滅,卽宇宙內之物質,恆保存不滅,是曰物質之**不滅性**(conservation).

§ 102. 分子.

根據物質之分割性,可使一細粒之物體,分而成二,二又可分成四,準此以往,似可分至無窮. 但據化學現象,知分割達於一定限度以後,再加分割,卽成爲性質全異之別種物質. 此極限之最小微粒,曰**分子**(molecule),創自英人道爾頓,故曰**道爾頓之分子說**(Dalton's molecular hypothesis). 分子再分,則成爲**原子**(atom).

分子之形體甚小,決非目力所能窺見,但由放射性(參照 § 410) 及下述之實驗,可以證實. 將顏料溶解於水,取其極淡色液一滴,置於玻璃片上,插入顯微鏡之物鏡下面,令液與物鏡接觸.從目鏡窺之,卽見水中之浮粒,作圖 62 所示狀況之運動,毫無紀律之可言,是曰**布朗運動**(Brownian motion). 如嫌不甚明瞭,則令視界成爲暗黑,由側

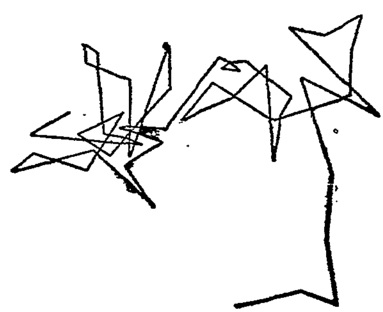


圖 62.　布朗運動之狀況

面反射之光照之,則浮粒卽耀若朗星矣. 爲此目的而設之器,曰超顯微鏡(ultramicroscope).

§103. 附着力及內聚力.

分子與分子之間,有互相作用之力,曰**分子力**(molecular force). 分子之不得飛散,全恃此力,其値雖尙不得而知,但距離愈近,則效愈著,稍遠卽驟減. 例如欲將一鐵條截成兩段,則感分子力之反抗,一旦截斷之後,雖再加以壓力,亦不克接合之矣. 由此可知通常之壓力,決不能使兩段上之分子,接近至於能受分子力作用之範圍內. 如將斷面燒熱,再用鎚擊之,分子之接近程度增高,兩段始克接合. 以任一分子爲中心,以此分子力所能及之最大距離爲半徑,在物體內作一球,則凡在球內之其他分子,均與中心之分子間,有分子力作用. 如是之球,曰**作用範圍**(sphere of action),由實驗測得作用範圍之半徑在8×10^{-6}毫米以下.

同類分子間之分子引力,曰**內聚力**(cohesion),異類分子間之分子引力,曰**附着力**(adhesion). 水與玻璃間之附着力,較水分子之內聚力爲大,故玻璃入水,卽被其潤濕,如用玻璃棒蘸水,有水滴附於棒端,而水銀則否.

又如膠水,漿糊,及洋灰等之爲用,均全在其附着力.

§104. 物質之三態.

物質因其分子集合之狀態不同,而有三態之分別.一曰氣體(gas),其分子間之距離最大,除互相碰撞時而外,不受分子力作用,故其分子之運動,極其自由. 二曰液體(liquid),分子距離較小,極受分子力作用,不過相互之位置,變動仍極容易而已. 三曰固體 (solid),分子距離亦甚小,相互位置又復一定,故其分子之運動範圍,極其狹小,只能在此一點之周圍作振動而已. 氣體及液體,又合稱**流體** (fluid).

各種物質爲固體液體氣體,完全由物體狀況而定,只須適宜變更周圍之狀況,固體者旣可變爲液體,亦可變爲氣體;液體氣體亦然. 例如水在常温常壓之下固爲液體,然遇冷則成固體之冰,遇熱又成氣體之水蒸氣矣. 總稱此三種狀態曰**物質之三態** (three states of matter),其狀態之變遷,則曰**物態變化**(change of states),詳見第三篇第三章.

§105. 固體之彈性與虎克定律.

通常之固體受外力作用時,大都生容積或形狀之變化,外力一去,又由彈性恢復其故狀. 但如外力過大,則不能完全恢復. 故欲其完全恢復,不可用過大之力,卽適用之力,有一定之範圍,是曰彈性限度(limit of elasticity). 外力與彈力,形成一種應力. 由實測,知在彈性限度內,以小力於短時間內作用於一固體,其所生之應變當與應力爲正比例. 此項關係,通稱曰虎克定律(Hooke's law). 卽應力對於應變之比,等於一常數,此常數曰此物體之彈性係數(modulus of elasticity).

前在力之量度項下所使用之彈簧秤,卽利用彈性係數爲常數而成

§106. 材料强度.

建築房屋,紡織布帛,製造機械,以及日用品文具等,均須計算其所負擔之重,與其本身之大小厚薄,能否勝任. 關於此項問題,別爲一科,曰材料强度學(strength of materials).

一切材料,均非剛體,故受力作用後,均呈相當之彈性. 因受力之狀況不同,所受之應力及所生之應變,遂有種種不同之名稱. (1)如懸掛電燈之線,絞鍊之鐵

鏈,傳達動力之皮帶等,所受之力,在於兩端,其效應在使受力之物被拉而張緊,如力過大,足以使其拉斷,如是之應力曰張應力 (tensile stress), 或即略稱張力 (tension). (2) 如橋柱,屋基,凳脚等,所受之力,雖亦在兩端,但其效應則在使受力之物,被壓而縮,如力過大,足以使其壓碎,如是之應力,曰壓縮應力 (compressive stress), 或略稱為壓縮力(compression). (3) 如承放屋頂之梁,曬衣之竹竿,街旁横架之電線等,所受之力在於支點間之一部分,其效應在使受力之物,發生彎曲,如力過大,足以使其折斷,如是之應力,曰彎曲應力 (bending stress). (4) 電機之軸,螺旋鑿等,所受之力,在使其扭轉,如是之應力,曰扭應力(torsional stress). (5) 裁紙之刀,剪衣之剪刀,施於物體之力在使物體切為兩段,如是之應力,曰切變應力 (shearing stress).

物料之強度與應力之種類,有密切關係. 故使用物料時宜分別選擇之. 例如造屋之磚,對於壓縮應力雖可抵抗,但不適於其他之應力. 又如鋼則對於任何應力均能擔負.

§107. 斷點强度.

虎克定律只能適用於彈性限度以內．如應力已超過此項限度,則應變與應力,不能成一定之比例,應力增加不多,應變亦將大爲增加．凡使物體斷裂爲二所需之最小限度之力,曰**極限强度** (ultimate strength),或稱**斷點强度** (breaking strength).

問題第八

1. 如有高而狹長之房屋,受風災後,向旁彎曲二尺,試繪一圖將其所受之張力及壓縮力作用處標出.

2. 製造彈簧,概用鋼絲,何以不用銅絲等?

3. 單箭易折,數箭則不易折,其故安在?

4. 茅蓬只用竹竿即可支立,瓦房大都用木柱,而高大洋樓則概用鐵筋鐵柱,何以有此區別?

5. 在彈簧秤上懸10斤重之物體時,其指標移下4厘米,今將一不知重量之物體懸在其下,結果指標移下12厘米,求此物體之重量.

6. 彈簧秤受1斤重之力作用時,延長2寸,欲其延長半寸,須力若干? 如懸重$\frac{2}{3}$之物體,延長幾何?

7. 有一木條,其兩端用架支住,中央懸80斤重之物體時,中點下墜4分,如欲其墜下1寸,應懸若干重之物體?

8. 彈簧秤下懸1仟克重之物體時,全長50厘米,懸1.5仟克之物體時,其長爲55厘米．問不懸物體時,其長若干?

9. 由實驗求得一條桂受壓力作用時,其彎曲如下:

重量(單位為斤)	10	20	30	40	50	60	70
彎曲(單位為寸)	0.05	0.10	0.15	0.21	0.25	0.29	0.35

試用縱橫坐標將此結果畫出,並求其彈性係數。

第二章 液體

§108. 流體.

流體包括液體及氣體而言. 壓縮液體雖難,而壓縮氣體則甚易,故兩者對於容積變化之彈性係數,大小迥不相同,但分子之移動,兩者均極容易,故流體之形狀咸依其容器爲轉移. 一完全彈性體(perfectly elastic body) 中祇具各向均等之壓力而無摩擦力者,曰理想流體 (ideal fluid 或 perfect fluid): 流體之體積壓而不縮者,曰理想液體(perfect liquid);反之,流體之體積(受壓縮)與壓力成反比者,曰理想氣體 (perfect gas). 如水,酒精,頗與理想液體相近,而空氣,氫氣等,則頗與理想氣體相近.

§109. 靜止流體之壓力.

於流體內設想一任意之平面,或流體與其他物體之接觸面亦可. 在此平面兩邊之部分,必互以壓力作用;如爲靜止之流體,此項壓力之作用方向,當與面成直角. 假使壓力不與所想之平面垂直;可將其分解成爲

平行與垂直之分力. 既有平行分力作用,流體又不呈阻力,只有沿其作用方向移動之一途,果爾,卽不成其爲靜止液體矣. 故無論設想之平面之方向及其位置如何,在其兩邊之流體,互相作用之力,恆與此面垂直. 又液體與氣體接觸之面,曰自由表面(free surface). 由同理,知氣體及液體間作用之壓力或重力,均與靜止液體之自由表面垂直,否則液內亦必發生滑動. 於曲管內盛醚或酒精,留一氣泡,密封之,

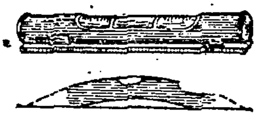


圖 63. 氣泡水準

如圖63,其自由表面,欲取水平方向,非據管中最高之一點不可,故利用此器,不難求得水平之位置,是曰**氣泡水準**(spirit level).

通常對於單位面積上所受之壓力,卽**壓力强度**(intensity of pressure),恆略稱之曰**壓力**(pressure),同時一物體之全面積上所受之壓力,則曰**總壓力**(total pressure),以示區別.

在 C. G. S. 制,壓力之單位用每平方厘米達因,或曰1巴(bar),其百萬倍,卽 10^6 巴,約等於1大氣壓.

§ 110. 靜止流體內一點之壓力.

如圖64,於靜止液體內任意一點O之周圍,作任意之小直三角柱$ABCFED$,命P_1, P_2, P_3表其側面$BCFE$, $CADF$, $ABED$上之垂直總壓力,p_1, p_2, p_3表壓力.因液體不動,故三力P_1, P_2, P_3相交於一點,且與底ABC之邊a, b, c成比例,

$$\therefore \quad \frac{P_1}{a}=\frac{P_2}{b}=\frac{P_3}{c}$$

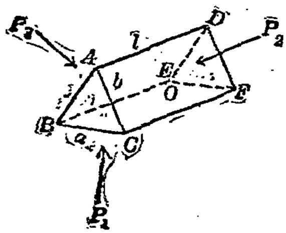


圖 64. 一點之壓力

命l表柱長,則面積為al, bl, cl.

$$\therefore \quad p_1=\frac{P_1}{al},$$

$$p_2=\frac{P_2}{bl},$$

$$p_3=\frac{P_3}{cl},$$

故 $$p_1=p_2=p_3.$$

不問三角柱之方向如何,此式均能成立,且無論三角柱小至若何程度,亦然.其極限成為一點O,此時之p,即表在O點作用之壓力,即靜止液體內一點之壓力,對於任何方向,均必相等.

§111. 靜止流體內壓力之分佈.

先就在同一水平面上之兩點A, B論之,如圖65,以AB為軸線,作一小方柱,就此方柱而論,其側面上作用

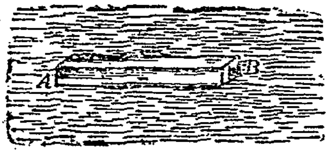


圖 65.　同水平之兩點之壓力

之力,對於軸線方向上,並無分力,可置不問. 液體既成平衡,則兩端所受之力,必相等相反. 端面之各邊小至極限時,在其兩端作用之力,即表作用於兩點 A,B 之壓力. 由前節,可知 A 處任何方向之壓力,均與 B 處任何方向之壓力,恰相等,即凡在同一水平面上之點,其所受之壓力恆相等.

次就在同一鉛直線上之兩點 A,B 論之,如圖 66,仍如前法,以 AB 爲軸線,作一小方柱,命其橫斷面積等於1平方厘米. 命 ρ 表流體之密度,h 表方柱之長,即 AB 間之距離,則方柱之容積爲 h 立方厘米,質量爲 $h\rho$ 克,重量爲 $h\rho g$ 達因. 再命 p_1,p_2 表在 A,B 兩點作用之壓力,則此小方柱之平衡條件,應爲

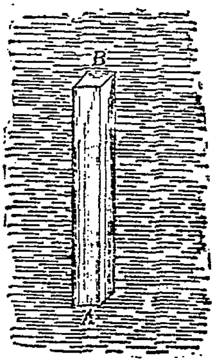


圖 66.　同鉛直線上兩點之壓力

$$p_1+h\rho g-p_2=0,$$

故
$$p_2-p_1=h\rho g.$$

即在同一鉛直線上兩點之壓力之差,等於以兩點間之距離爲高,以單位面積爲底之液

體柱之重.

最後再就液內任意之兩點 A,B 論之,如圖67. 不問容器之形狀如何,均可用水平及鉛直線若干條,在液內將設想之兩點 A, B 連結之. 由上所述,知 C 與 D,E 與 F,G 與 H,各成爲在同一水平面上之兩點,故 C 與 D 之壓力相等,E 與 F 及 G 與 H 亦然. 故 AB 之壓力差,等於以 $(AC+DE+FG-HB)$ 爲高,以單位面積爲底之液體柱之重. 如命 h 表 A,B 之鉛直差,ρ 表密度,則結果仍成爲

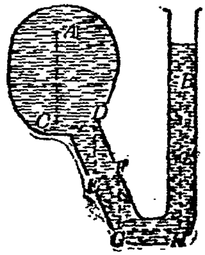


圖 67. 任意兩點之壓力

$$p_2-p_1=h\rho g.$$

§112. 巴斯噶原理與水壓機.

由前節知液內兩點之壓力差,與兩點之深度差成正比例. 如有一點之壓力增加若干,其他各點對於此點之深度差如仍其舊,則爲維持平衡計,勢必增加同大之壓力. 換言之,增加流體內一部分之壓力,勢必令凡有流體連絡之各處,均增同大之壓力,是曰巴斯噶原理(Pascal's principle). 因所加之壓力,傳達及於各部,故

此現象曰壓力之傳達(transmission of pressure).

利用此理,於任意面積 A 上,加力 P 作用,則其壓力強度 $p=\frac{P}{A}$,可以傳至其他任何部分.假定

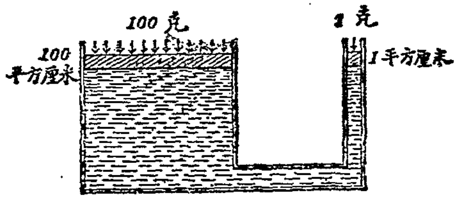


圖 68. 壓力之傳達

如圖68,大小兩面積之間有液體連絡,且大者之面積等於 100 平方厘米,小者之面積,等於 1 平方厘米.如於小者之上加 1 克之力作用,則大者之上所受到之壓力強度,當然亦爲1每平方厘米克,故其總壓力等於100克加於小者之上者小,而大者上所得者甚大.圖69之水

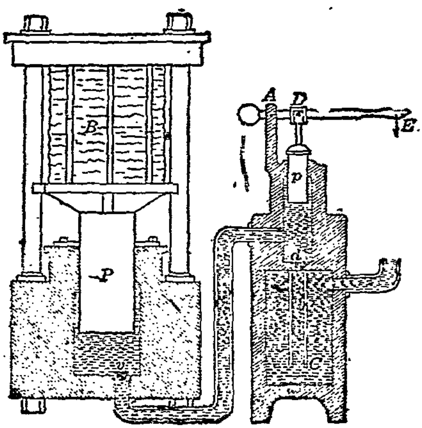


圖 69. 水壓機

壓機(hydraulic press),即利用此理造成.施力於E,將活塞p壓下,壓力即經由下面之液體傳達至於左方,將P推上,使在B處之物體,受到強大之壓力作用.

§113. 接觸之液面.

將不相混合之兩種液體,盛入同一器內;假定其接觸面如圖70之$AGKB$.於液中任意取在同一水平面上之兩點,如E及F.命ρ_1及ρ_2表上下兩種液體之密度,則就平衡而言,作用於E及F上之壓力,應互相等,即

$$HG\rho_1 g+GE\rho_2 g=LK\rho_1 g+KF\rho_2 g$$

$$(HG-LK)\rho_1=(KF-GE)\rho_2.$$

又因E及F同在一水平面上,故有下列之關係,

$$HG+GE=LK+KF,$$

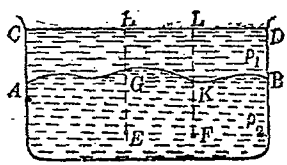


圖70. 接觸之液面

故 $$HG-LK=KF-GE,$$

與上比較,可知非

$$\rho_1=\rho_2,$$

或 $$HG-LK=KF-GE=0$$

不可.第一結果表兩液之密度相等.第二結果表GK應在同一水平面上.故密度不同之兩液,在同一容器內時,其境界面必成水平,且與其自由表面平行.

§114. 連通管.

圖71為U形容器,曰**連通管**(communicating tubes).命 h_1 及 h_2 表由境界面 CC' 至兩管內液面之高. 因 C 與 C' 既在同一水平面上,壓力應相等,即

$$h_1\rho_1 g = h_2\rho_2 g,$$

或
$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

即兩管內液面之高,與密度成反比例.

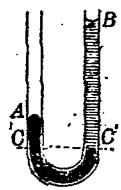


圖71. 連通管

如 $\rho_1 = \rho_2$,即兩管內均為同一種類之液體時,由上式可知 $h_1 = h_2$,即兩管內之液面高度,應互相等. 由此更可推知,不拘連通管之支管數多寡如何,形狀如何,當其盛有同一種類之液體時,必須各支管內之液面等高,方能平衡.

§115. 液體比重之測定(海耳方法).

應用前節連通管之理,測定液體之比重,為事極便,通稱為**海耳方法**(Hare's method). 用一三支連通管介其兩端支管各與一玻璃長管相連,長管下端各浸入盛有液體之容器 A,B 之內,如圖72,中央支管連一橡皮管,管上有活鋏(pinch cork)P. 先開放 P,從管口吸氣,即見容器內液體從管內上昇,俟昇達相當高度,再將 P 夾

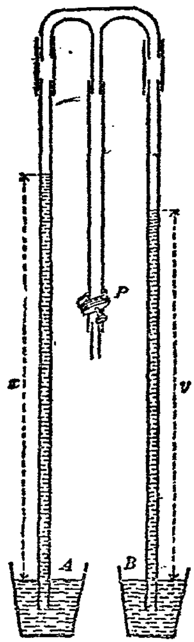


圖 72. 海耳方法

緊,管內液面即停止不動. 命 ρ_x, ρ_y 表兩容器內液體之密度, x, y 表兩管內液面與 AB 之距離,命 P 表作用於兩容器內液體表面 A, B 上之大氣壓力, Q 表作用於管內液柱頂上之氣體壓力,欲保持平衡,則由 x, y 兩液柱所生之壓力,必須同爲 $P-Q$, 卽 $x\rho_x = y\rho_y$,

或
$$\frac{y}{x} = \frac{\rho_x}{\rho_y}.$$

如右方液體爲水,則 $\rho_y = 1$,故

$$\rho_x = \frac{y}{x}.$$

卽所求液體之比重,等於以液柱之高除水柱之高時所得之商.

§116. 器底之總壓力.

容器之底上各點,均在同一之深度,故任何一點之壓力,均相等. 如圖 73 所示之三種容器,如其底面積相等,則無論其側壁作何形狀,底面所受總壓力,均必相等,可用天平實測證明之,通稱曰靜液之怪事(hydrostatic paradox).

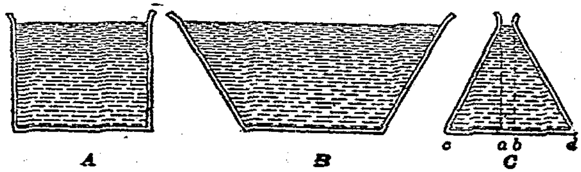


圖 73.　形狀不同之容器

再用圖74所示之儀器,即可由實驗證明此理. C 為任何形狀之容器,其底用活動金屬薄片. 器內盛水,金屬薄片受壓力作用後,中心降下,與彈簧秤之作用相類似,因此牽動標度圓盤上之指針發生偏轉 (deflection). 由偏轉之度數,即可將金屬薄片上受到之壓力表出. 舉高蓄水器 T,可使容器 C 中盛水,降低 T 則可使 C 內之水流盡,極便於實驗. 換用圖73所示之各種形狀之容器實驗,即知容器內之水面高度相等時,其底所受到之壓力亦相等.

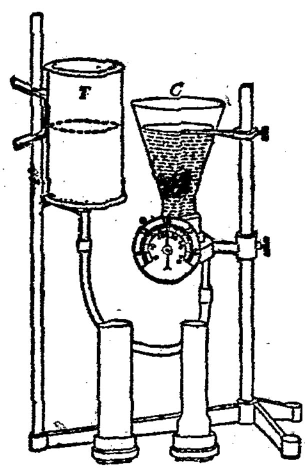


圖 74.　靜液怪事之實驗

§ 117. 自來水.

都市中所用之**自來水**(water supply)卽巴斯噶原理之一利用.其供給情況,如圖75所示. a 表水源,中途經過道路 r,河底 b,山脈 H 之下層,然後入水池 e 內.經過種種過濾,將有害之微生物及雜質取去後,再用喞筒 p 將池內之水,壓迫進入貯水管 P 中.由此再用支

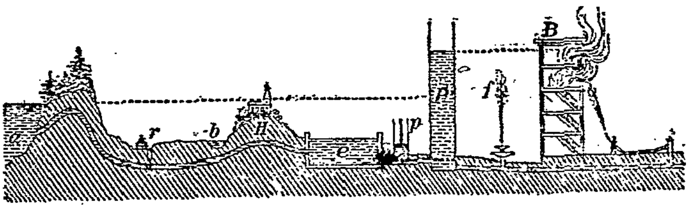


圖 75. 自 來 水

管分送至全市各處,以供使用.如全部之水,均遵從巴斯噶原理,則 e 內之水,勢必與 a 等高,而用戶之住宅 B 中所裝之水管,其中之水,亦應與 P 內所蓄之水齊平.但水由 a 流來,中途旣須經過各種孔道與細管,當受管壁等之阻力作用.故事實上 e 內之水面,恆較 a 處爲低而 B 內之水面,又遜於 P.若在 f 處設一噴水池,由此噴出之水,更須受空氣之阻力,故其達到之最高處,又更遜一籌,決不能到理論上之高度.

§118. 浮力.

試於靜止液體內,任取其一部分而論,其周圍之部分對於此一部分,均有壓力作用,如圖76所示. 至各點所受之壓力,並不相同,視其深度如何而定. 但全體所受之壓力之合力,則與此一部分之重量相等,否則不成其爲平衡. 故任何部分所受之總壓力,恆與其重量相等,方向則相反. 卽令設法將此一部分之流體取出,另以同一形狀之別種物體代替之,周圍對此所呈之壓力,仍不稍變. 故在液體內之物體,莫不受一向上作用之力,是曰**浮力** (buoyancy). 浮力之作用點,爲與此物體同一形狀之液體之重心,是曰**浮力中心** (center of buoyancy).

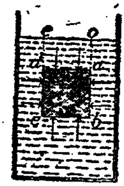


圖 76. 浮力

§119. 阿基米得原理.

物體因受浮力作用,其視重量 (apparent weight) 減輕,所減去之量,卽同容積之液重,此項關係曰阿基米得原理(Archimedes' principle),可用圖77之實驗證明之. 杯內未盛水以前,先使天平成平衡. 注水入杯,令 B 全沒水內,則其右端下降 加水於 C,則又昇起,至 C 內水

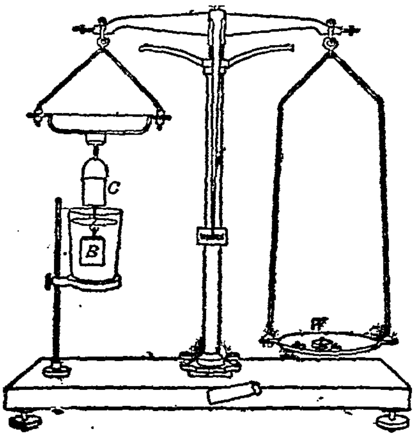


圖 77. 阿基米得原理

滿時,平衡又恢復故狀.C內之水與B同一體積,故如上云.

命W表物體之重,P表浮力,即與物體同容之液重,則在液體內時,物體之重量成爲$W-P$. 如$W>P$,則物體可以全部沒入液中,曰沈(to sink). 如$W<P$,則物體只有一部分在於液內,而與其沒入部分同容積之液重,恰與此物體之重量相等,是曰浮 (to float). 如$W=P$,則物體可在液內任何處所靜止,無所謂浮沈.

§ 120. 浮體之穩度.

物體浮在液面上時,不特浮力應與重量相等,且須浮力中心適在通過重心之鉛直線上,方能穩定. 命G表物體之重心位置,A表其浮力中心位置,則G對於物體永不變動,而A則視沈在液下之部分形狀如何而定.

圖 78,浮體由平衡位置(a)傾斜至(b),其浮力中心

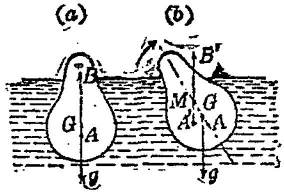


圖 78.　穩定之浮體

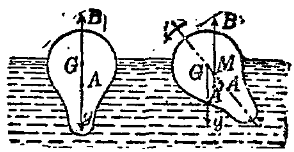


圖 79.　不穩之浮體

亦由 A 移至 A',作用方向在鉛直線 $A'B'$ 上,與重力 g,成爲力偶,效應在使其恢復原狀. 直線 AG 與 $A'B'$ 之交點 M,曰**定傾中心**(metacenter). 此定傾中心如在 G 之上,則浮體成穩定平衡. 反之,如圖 79,定傾中心在 G 之下,則力偶之效應使其愈加傾倒,故成不穩平衡.

§ 121. 物體比重之測定.

量度比重之方法及器械,爲數甚多,前述之海耳方法,僅其一例而已,可大別之成爲兩類: 第一類由物體之重量及同容積之水重求之. 第二類由阿基米得原理求之. 玆將比較重要之數種,略述於下:

先述第一類之方法.

(1) 物體如作立方或球形,有簡單之幾何學形狀者,其體積可由長度推算,重量則由天平量度. 以體積除重量,卽得密度;用 C. G. S. 制時,其值等於比重.

(2) 比重瓶: 圖 80 所示者,曰**比重瓶**(specific gravity

圖 80. 比重瓶

bottle). 瓶內盛液,使液面昇至塞中指標爲止. 此時瓶內液體成爲一定之容積. 命 w 表瓶重, W 表盛液後之重量,再將液體傾出,以純粹之水代之,命 W' 表其重. 以 s 表液體之比重,則

$$s=\frac{W-w}{W'-w}$$

(3) 金屬之細片以及不溶解於水之粉末細砂等,均可用比重瓶求其比重. 命 W' 表盛水時之重, W 表物體之重, W'' 表將物體放入瓶內,使瓶內之水流出一部分,水面仍在指標處時之重,則

$W+W'=$ (物重)+(瓶重)+(全瓶水重),

$W''=$ (物重)+(瓶重)+(全瓶水重)−(同容水重).

故與物體同容積之水重,等於 $W+W'-W''$, 以此除 W, 即得比重,故

$$s=\frac{W}{W+W'-W''}.$$

其次再述第二類之方法.

(4) 水秤: 圖 77 之天平,一端之盤下附一鈎,可以懸物,與普通之天平不同,特曰水秤(hydrostatic balance),可利用之以求比重. 如所求之物體較水重,則先在空氣

中權之,得 W,浼入水權之,得 W',故同容之水重爲 $W-W'$.

故
$$s=\frac{W}{W-W'}.$$

(5) 如所求之物體較水輕,則於物體上添一錘,俾其全部得入水內. 仍命 W 表物體重量, W' 表加錘沒入水後之重, W'' 表錘之本身在水內之重,則物體本身在水內之重爲 $W'-W''$,而同容之水,重 $W-(W'-W'')$,故
$$s=\frac{W}{W-(W'-W'')}.$$

(6) 如所求之物,入水卽被溶解,則選用其他不溶解之液體,照前法求其對於不溶解之液體之比重 s',再求此液體對於水之比重 s'',則此物體之比重 s,卽可由此算出,其結果爲
$$s=s's''.$$

(7) 求液體之比重時,可以選定一種固體,對此液體及水,均不溶解. 命 W 表此物體之重, W' 表其沒入水中時之重, W'' 表其沒入所測液體中時之重,則與此固體同容之水,重 $W-W'$,液重 $W-W''$,故
$$s=\frac{W-W''}{W-W'}.$$

§ 122 水車及輪機

利用河水或瀑布之水頭,使由高處落下之水,直下衝擊板面,由此引起全輪轉動之機械,曰水車(water wheel) 直接受水衝擊之板面,排列輪周,作輻射狀,曰葉板(blade). 受水衝擊之部份,在於輪之上端者,曰上擊水車(overshot wheel),如圖81,其在於輪之下端者,曰下擊水車(undershot wheel),如圖82. 比水車更進一步,則

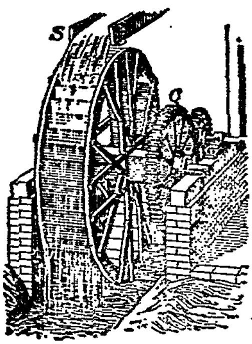


圖 81. 上擊水車

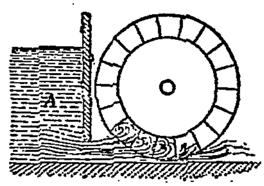


圖 82. 下擊水車

有水輪機(water turbine),其中以拍爾吞輪機(Pelton's turbine)最爲著名. 當水之來源不旺,而其壓力甚高,或其水頭(head)甚大時,以用圖83所示之拍爾吞水車(Pelton wheel)最爲得當,其效率遠在舊式下擊水車之上. 如水之來源較旺,而水頭適中之時,則以用圖84所示之拍爾吞輪機爲當. 右方(1)表外函,即左方全圖中

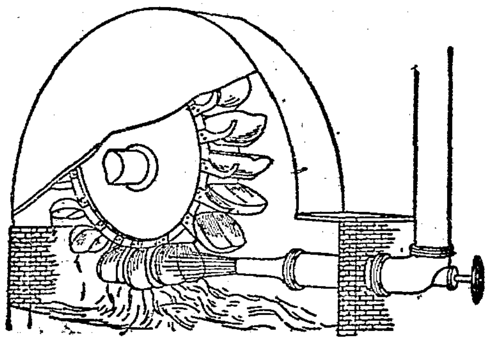


圖 83.　拍爾吞水車

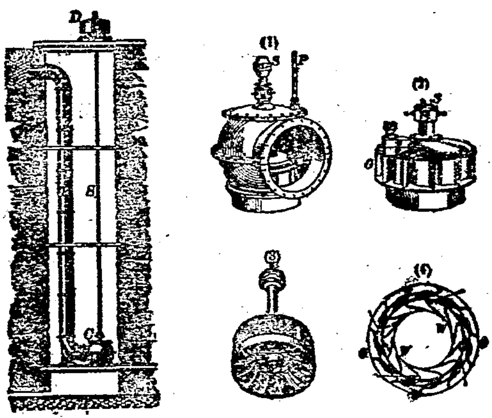


圖 84.　拍爾吞輪機各部之構造

之 G; (2)表內面,裝有多數渦狀固定板,名曰導翼 (guide vane),如 G; (3)表輪機本身; (4)表導翼及輪機之橫斷面,

水自 P 流下,經導翼而達葉板,衝之使動,再經 S 而達於地面之 D. 轉動之遲速,則由節制水量之 P 司之. 廢水經由 T 排出器外.

利用流水之動能,此外尚有一器,曰衝擊起水機(hydraulic ram),或稱自動起水機. 在低處水流途中,裝一空氣室,下裝一活門. 如水流過速,則衝開活門,進入室內,再由室內空氣之壓力作用,將水送至高處.

問題第九

1. 露面何以能成爲球面?

2. 木桶近底處所用之箍,必較近口處粗,其理安在?

3. 試有兩瓶,底面積相等,瓶重亦相等,但形狀則不相同. 今在此兩瓶中盛水,至同一高度,然後放入天平之兩盤中權之,結果當如何?

4. 用氣泡水準檢查桌面是否水平,須就互相垂直之兩邊,各加以檢查,其理由安在?

5. 浮在水面上之冰塊,熔化成水後,水面增高否?

6. 用一玻璃杯盛水半滿,放在天平之一盤中,在他一盤內加適當砝碼,使其平衡,然後用線懸一銅塊,將銅塊放入杯內水面下,上端之線仍持在手內. 此時天平當作何現象? 又必如何始能恢復其平衡?

7. 自來水管中水之壓力幾何,如何量度?

8.　阿基米得原理,傳說係欲辨別王冠是否由純金製成而得,試懸想其當時如何應用此法。

9.　瓶內盛水令滿,而加重16仟克之砝碼於其木塞上,知瓶之內面積爲120平方厘米,口面積爲4平方厘米,求瓶內受到之總壓力。

10.　水壓機之小活塞面積爲5平方厘米,大活塞之面積爲100平方厘米,將2仟克重之物放在大活塞上,欲使其昇上,在小活塞上須用若干大之力?

11.　用U形管盛水,在一方之水面上,用面積等於100平方厘米之活塞加500克之力,則兩方之水面相差若干?

12.　設有一杯,內盛水銀,高至12厘米。假定水銀每1立方厘米,重13.6克。杯之直徑爲6厘米,求底面所受之壓力強度,及其總壓力。

13.　一立方金屬塊。各邊長6厘米,在水中重700克,求其在空氣中之重量。

14.　一木塊長22厘米,寬6厘米,高4厘米,在水中浮起,出水面有1厘米之高,其重量若干?

15.　一玻璃球,其體積爲76立方厘米,在水中重100克,求其在空氣中重若干?

16.　設有一桶,其底面積爲900平方厘米,高50厘米,滿盛以水,由蓋上插入長160厘米之管,使恰與桶內之水相接,水面至管頂爲止。求桶底所受之總壓力。

17.　船底在水面下7米處,有面積等於10平方厘米之

小孔,欲用板擋塞,須力若干?

18.、知冰之比重爲0.911,今有50立方尺之冰塊,如溶化成水,可得若干容積?

19. 知鐵之比重爲7.5,水銀之比重爲13.6,今有立方形鐵塊,每邊長10厘米,放入水銀盆內,其浮在水銀面之體積幾何?

20. 一人左手提水一桶,右手提魚一尾,桶與水重49斤,魚重1斤,其比重爲1. 如將魚放入桶內水中,求魚所失之重量,及提桶之力應若干.

21. 設有一器滿盛水銀,如放鐵塊於其中,則有78克之水銀溢出器外,而鐵在水中之重量則爲68克. 求鐵之比重.

22. 海水比重爲1.03將3360克之鉛錘放入海水中,則重3051克,求其在淡水中應重若干?

23. 將比重等於0.8之木塊放入水中,應浮於水面上,求其在水面上之體積與在水面下之體積之比.

24. 浮在海面上之冰山,在海面上之體積共7百萬立方尺,如海水之比重爲1.03,冰之比重爲0.911,求冰山之全體積.

25. 以比重7.5之鐵塊浮在水銀面上,更注以水,將鐵塊全部浸在水面下,問鐵塊在水銀中之部分幾何?

26. 設有比重0.25之軟木1050克,比重爲8.5之銅3400克,用線連結之,放入水中,應沉應浮?

27. 地球之平均比重爲5.6,平均半徑爲6.37×10^8厘米,

求地球之質量.

28. 有比重0.9之液體3升與比重1.5之液體2升，互相混合，求混合液體之比重.

29. 比重0.8之液5升，與水10升混合後，體積減至$\frac{41}{42}$. 求混合液體之比重.

30. 鉛塊在空氣中重7.88克，在水中重7.19克，在酒精中重7.33克. 求鉛塊之體積，及鉛塊與酒精之比重各若干.

31. 有冰糖13克，在火油中重6.6克，知火油之比重為0.8，求冰糖之比重.

32. 一固體在水中失去重量25克，在油中失去重量23克，在酒精中失去重量20克. 求油及酒精之比重.

第三章　氣體

§123. 氣體之壓力.

氣體受壓力作用時,不僅變形,並且收縮,僅此一點與液體不同. 故除去與壓縮性有關之部分而外,液體之一切定律,對於氣體,均可適用. 例如在定壓下之靜止氣體,如其形狀容積不變,則與液體完全相同. 如有一部分受某種壓力作用,立傳於他處(壓力之傳達). 又氣體內一點之壓力,對於任何方向均相等(巴斯噶原理) 氣體亦受重力作用,應有重量,故在空氣中之一切物體均受空氣之浮力作用,視重量較實重量略輕(阿基米得原理). 氣球飛艇之浮游空中,即由於此. 茲將溫度0° C. 大氣壓760毫米時,各種重要氣體之密度列下:

表 4. 氣體之密度

氣體	密度	氣體	密度	氣體	密度
一氧化二氮	0.001977	空氣	0.001293	蒸汽(100°C.)	0.000598
乙炔	0.001179	氙	0.005851	氫氣	0.0000899
亞硫酸	0.002927	氪	0.003708	煤氣	0.000414
氬	0.001781	一氧化碳	0.001250	二氧化碳	0.001977
氨	0.000771	一氧化氮	0.001340	氮氣	0.001250
氯化氫	0.001640	氧氣	0.001429	氦	0.000178
氯氣	0.003221	溴化氫	0.003616	氡	0.009729

§124. 大氣之壓力及托里拆利管.

地球周圍之空氣全體,曰**大氣**(atmosphere),由其重量而生之壓力,曰**大氣之壓力** (atmospheric pressure),或簡稱**大氣壓**.

用托里拆利管(Torricelli's tube),即長約1米一端封閉之玻璃管,滿盛水銀,按塞管口倒立水銀槽中,放開其口,管內水銀隨之降下. 無論管是否直立,管內外水銀面之鉛直距離約爲76厘米,如圖85. 管外水銀面,爲一水平面,凡在其上之各點,應受相等之壓力作用. 在管底之點所受之壓力,則等於76厘米高之水銀柱重;在管外之點所受之壓力,則爲大氣壓力. 故知大氣壓力等於高76厘米之水銀柱之重量. 此實驗曰**托里拆利之實驗**(Torricelli's experiment),管內水銀面上之部分,則曰**托里拆利眞空**(Torricelli's vacuum),管內外水銀面之高差,曰**氣壓高度**(barometric height).

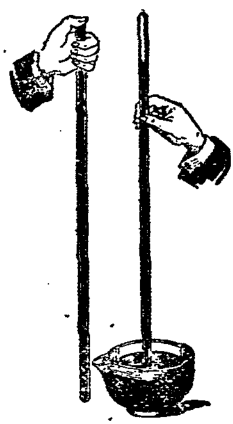


圖85. 托里拆利之實驗

大氣壓力隨時隨地而異;通常以在緯度45°之海面上,溫度等於0°C.,即水銀柱之高適等於76厘米時之大

氣壓,定為大氣壓之標準,此時之壓力,特稱之曰 **1** 大氣壓(one atmospheric pressure). 按在 0°C. 之水銀密度為 13.596 每立方厘米克,故

$$1\text{ 大氣壓} = 76\times13.596\times g_{45} = 76\times13.596\times980.62$$
$$= 1013270 \fallingdotseq 10^6 \text{ 每平方厘米達因}$$
$$= 1033.3 \text{ 每平方厘米克}$$

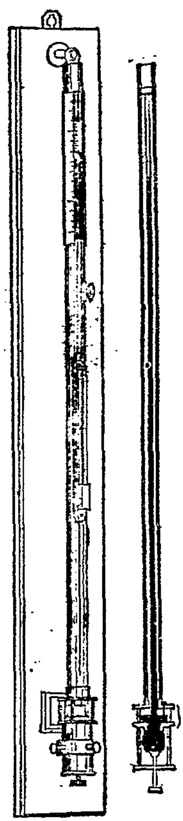


圖 86. 福延氣壓計

§ 125. 氣壓計.

利用托里拆利實驗,可以量度大氣之壓力,但欲精確讀出水銀之高,須有特殊之設備,福延氣壓計 (Fortin's barometer), 卽為此目的而設者. 其外形如圖 86 所示,內部為一直立玻璃管,內盛水銀,管中水銀面上,卽托里拆利眞空. 其下部為水銀容器,詳細狀況,如圖 87 所示. 玻璃管 T 外,有金屬套護住,上有標度,表水銀柱之高. 槽內水銀面,則以象牙針 P 之尖端決定

之. 使用時,先觀金屬管上所附之温度計,得知當時之温度. 次轉槽下螺旋 S, 使水銀面恰與針尖接觸. 最後移動標度處之游標尺,詳細讀出水銀柱之高度. 並施以温度,毛細管作用,及汞汽壓力等之改正,即得.

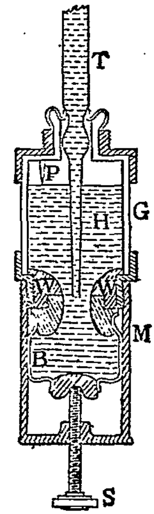


圖 87. 氣壓計內部

水銀不便攜帶,故用圖 88 之無液氣壓計 (aneroid). 要部爲一金屬圓盒,盒面有凹凸溝紋,內容稀薄空氣,中央承一支柱,柱上有刀口,下壓一橫槓桿,其一端爲固定之彈條,他端經由數

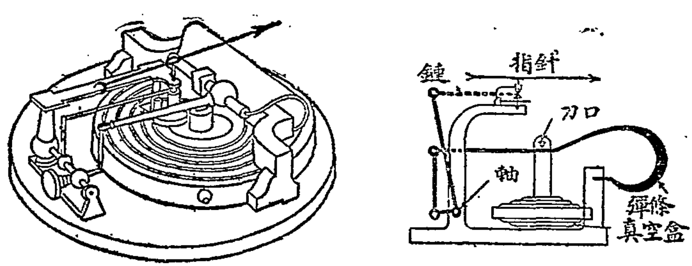


圖 88. 無液氣壓計

個槓桿及鏈條而達於上方之指針. 氣壓變化,則盒面溝紋,發生高低變化,牽動支柱而及於槓桿,鏈條使指針移動,故由此可以讀出大氣壓. 如嫌一器不足,則合數

器使用之,是曰氣壓記錄器(barograph),或稱自記無液氣壓計(self-recording aneroid),如圖89. 由數個溝紋金屬盒相重而成之箱,經槓桿等,將箱面變化擴大,由末端

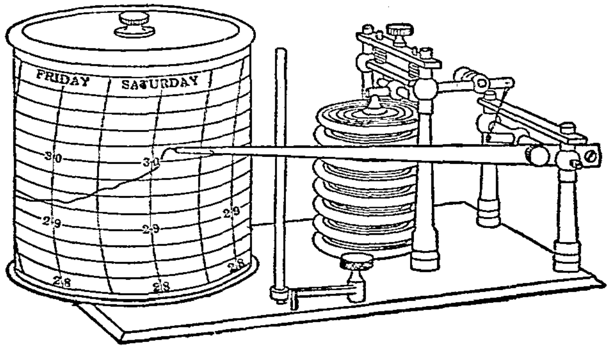


圖 89. 自記無液氣壓計

之筆尖在左方圓柱上之紙,畫出各時刻之大氣壓曲線,極便研究.

§ 126. 氣體之浮力.

氣體本身既有重量,故在氣體中之物體,當受氣體之浮力作用,按阿基米得原理,此浮力卽等於與物體同容積之氣體重量. 試取一空心銅球,懸於天平一端,他端懸砝碼,使成平衡,全體放在抽氣機之接受器內,如圖90,抽去空氣,卽見銅球一端下沉. 因銅球體積遠大於

他端砝碼之體積,故在空氣中時,銅球所受之浮力,大於砝碼所受之浮力. 換言之,銅球之實重量,較砝碼之實重量爲大,但在空氣中因受有較大之浮力作用,可使兩者之視重量恰相等,在眞空中時,兩者之實重量,既不相等,當然不能平衡.

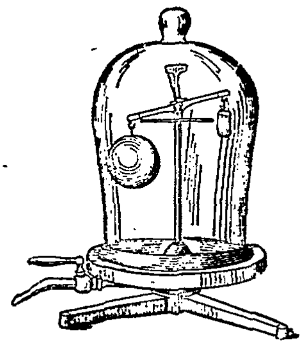


圖 90. 空氣之浮力

大多數物體之重量,均較同容積空氣之重量爲重,例如一桶麵粉(約 166 升),在眞空中與在空氣中,相差不及半市斤,儘可略去不計. 如遇體積龐大而重量輕微之物體,如氣球之類,則空氣之浮力,影響極大.

§127. 氣球.

氣球 (balloon) 爲一龐大之球,如圖 91,其囊用塗有橡膠之布數層製成,質料旣輕,又不漏氣,內盛氫,下懸柳條編成之筐,備搭載貨物乘客. 由表 4,知空氣密度爲 0.001293,氫氣密度爲 0.0000899,相差約爲 0.0012,卽每 1 立方米之浮力,約有 1.2 仟克之多.

氣球初離地面時,囊內氣體,不可令滿,因氣球漸次

昇高,則大氣壓隨而減低,內部氣體即向外膨脹,容積自行增加. 如初起時氣體已滿囊內,則昇高後囊內氣壓過大,必致破裂.

從高空使氣球下降時,可曳開囊上備就之氣門,放去一部分氣體,即可降落,遇有意外,則用圖92所示之降

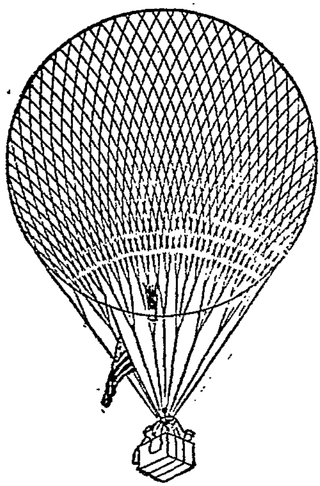


圖 91. 氣 球

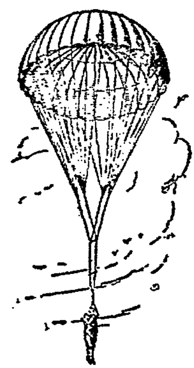


圖 92. 降落傘

落傘 (parachute) 其形如一大傘,傘頂有孔,使空氣由孔出,可保直立狀況,不致傾斜,且降落極緩,俾得安全到達地面.

§ 128. 飛艇.

氣球僅能昇高,隨風飄蕩,若再裝上推動機,即可任意航行,如飛機然,是爲飛艇(airship) 通常飛艇之形狀,如一龐大之雪茄烟,首尾兩端尖銳,故航行時受空氣之阻力絕小,圖93所示,即德國最近造成之興登堡號飛

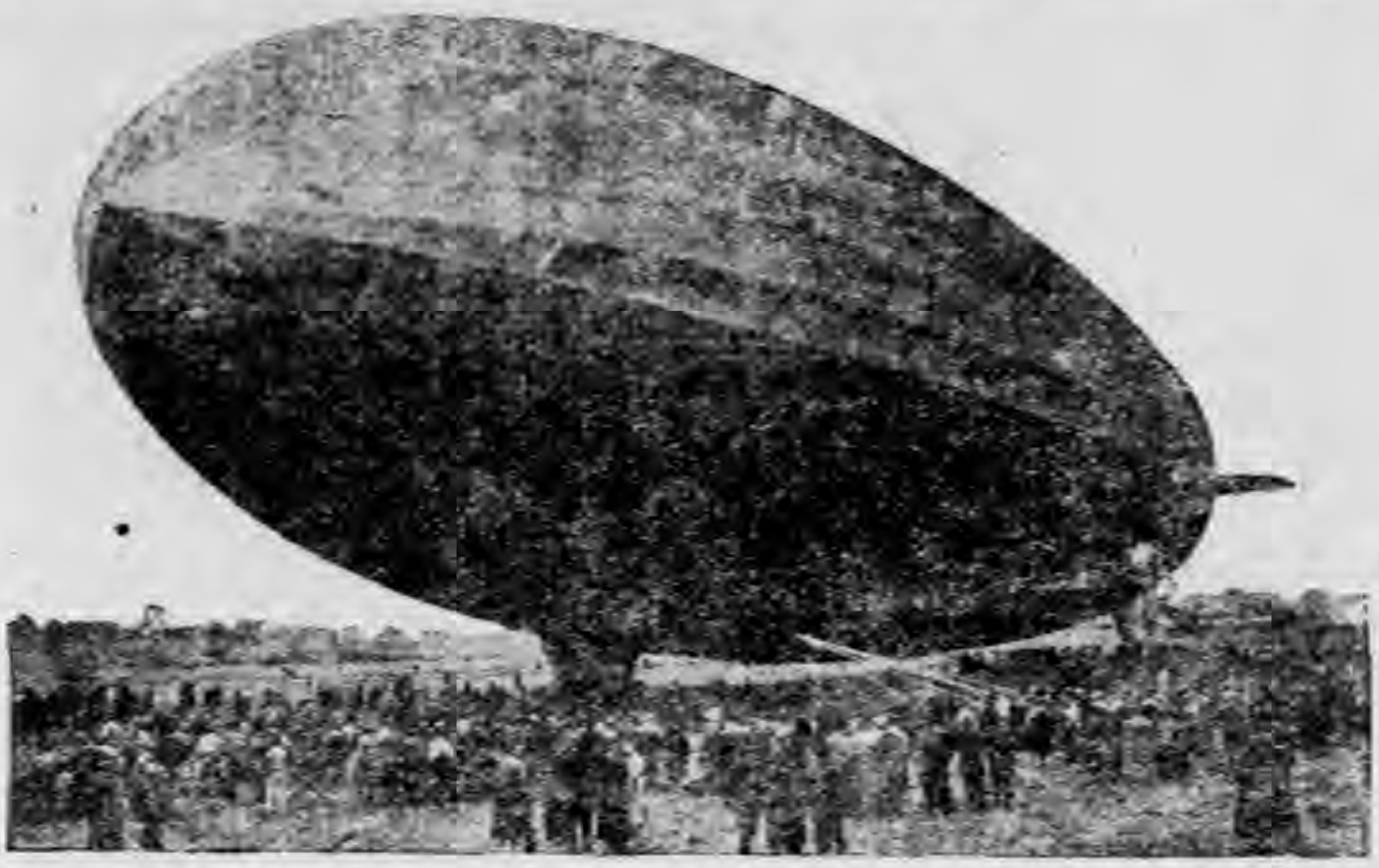


圖93. 德國興登堡號飛艇

艇,內部爲剛體網架,由輕金屬製成,外罩不受天氣影響之布,網架中每格各有一氫囊,爲現在世界最大之飛艇.

飛艇之危險莫如火災,故多用氦代氫,以保安全.氦之密度雖較氫略大,然仍遠在空氣之下,故其浮力依然不小.

§129. 壓力與氣體容積之關係: 波義耳定律.

用玻璃管二,其一上有標度,如圖94之B,上端有一管塞,以便啓閉,其一爲開管A. 兩者之間有橡皮管連結,內盛水銀. 先開管塞,使B,A內水銀在同一高度,此時B內空氣之壓力,等於氣壓高度H. 次閉管塞,提高A,命h表兩管內水銀面之高差,則B內空氣壓力,等於$H+h$. 再使A降下,至其水銀面在B之水銀面下h處,則B內空氣壓力爲$H-h$. 如同時並將B內空氣之容積求出,則無論h之值如何,恆有下列關係:

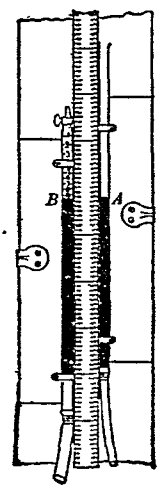


圖 94. 波義耳實驗

$$pv=\text{定數},\quad \text{或}\quad \frac{p}{\rho}=\text{定數}$$

不用空氣而用其他氣體,亦然. 即一定量之氣體,當溫度不變時,其壓力與容積爲反比例,或與其密度爲正比例是曰波義耳定律(Boyle's law),亦稱馬略特定律(Mariotte's law).

§ 130. 壓力計.

利用波義耳定律,用圖95之器械,可以量度流體之壓力,是曰流體壓力計(manometer),由一曲玻璃管,內盛

水銀而成. 兩端開放者如(1),曰**開管壓力計**(open manometer);一端封閉者如(2),曰**閉管壓力計**(closed manometer). 以開管壓力計之左端,與欲量度壓力之處相通,命 h 表兩液面之高差,P 表所求之壓力,ρ 表水銀密度,則由

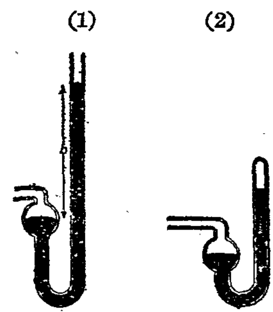


圖 95. 壓力計

$$P=\rho gh+(\text{大氣壓力}),$$

即可求出. 如不用水銀而用別種液體亦可,ρ 即表所用液體之密度. 如用閉管壓力計,則 P 與密閉空氣之壓力平衡. 但壓力與容積,即管長,成反比例,故由氣柱之高度,可推出氣壓,再加兩液面之高差,即得所求之結果.

§131. 各式唧筒.

利用大氣壓力吸取低處之水,或使器內氣體密度增大或減小之器,總稱曰唧筒(pump). 用以汲水者稱曰**抽水唧筒**(water pump),又名**抽水機**. 用以增減氣體密度者,曰**空氣唧筒**(air pump),亦稱**抽氣機**.

唧筒之主要部有三,一曰圓筒(cylinder),二曰活塞

(piston),與圓筒緊接,且能在筒內上下運動,三曰活門(valve),爲氣流通路中司啓閉之器,開則氣流通行無阻閉則交通斷絕.

各式喞筒之構造,分節述之如次:

§132. 空氣喞筒.

空氣喞筒中,最簡單者亦用活塞,其原理如圖96所示. R爲欲抽去空氣之容器,C爲圓筒,內容活塞,A, B爲兩錐形活門. 提上活塞,則R內之氣推A使開,由此進入C內. 按下活塞,則B開A閉,C內空氣自左方排出. 如是數度行之,R內空氣,逐漸稀薄. 但活塞與筒底,不免留有餘隙,故無論如何反復行使,仍必留有若干空氣於其內. 故用此器而得之眞空,程度必不見高. 欲免此弊,多於筒內,加入適當分量之油,且可免漏氣,是曰**油喞筒**(oil air-pump).

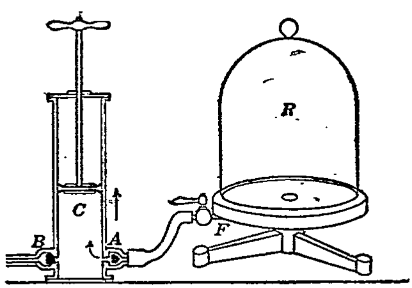


圖96. 空氣喞筒

反之,如活門之開閉方向,恰與上相反,則成壓縮喞

筒(compression pump),又稱打氣筒.

§133. 抽水喞筒.

抽水喞筒又名抽水機,其原理,與活塞式空氣喞筒同,可分爲兩類. 一曰吸取喞筒(suction pump),如圖97,活塞昇起,則筒底成眞空,水入其內;活塞降下,則 B 開 A 閉,水由旁管流出. 一曰壓力喞筒(force pump),如圖98,動作同前. 其出口處,多添一空氣室,活門 B 卽裝在空氣室下,因空氣室中之壓力可使出水繼續不斷. 又若用槓桿連結兩喞筒,使其交互上下,則成消防喞筒(fire pump),出水更多.

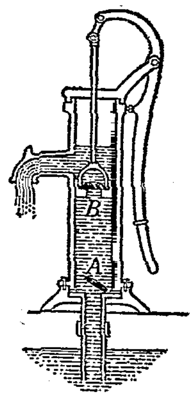


圖 97.　吸取喞筒

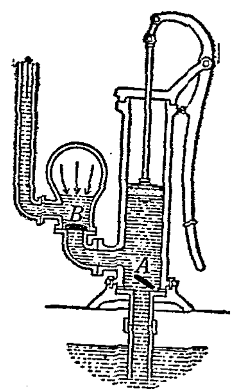


圖 98.　壓力喞筒

§134. 虹吸管.

用橡皮管一條,兩端各結玻璃管一小段,全部盛液

令滿,然後將其兩端之玻璃管,各各倒插入高低不同之兩容器中,如圖 99. 試就圖中 B 點論之,由左方而來之力,等於大氣壓力減去由 B 至液面 AA' 間之液柱之重;由右方而來之力,等於大氣壓力減去由 B 至液面 DD' 間之液柱之重. 此兩者之差,即等於由液面 AA' 至液面 DD' 間之液柱之重. 左方所受之力,大於右方,故液體由左向右,陸續流去,直至高處容器中之液體,全部流入低處容器,始行停止. 如是之曲管,曰**虹吸管** (siphon).

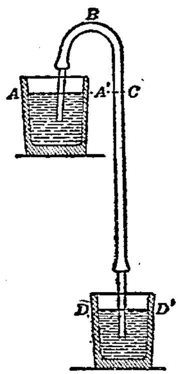


圖 99. 虹吸管

問題第十

1. 管口如甚細,則雖倒立,其中之液體亦不流出;何故?

2. 天平之一端放一皮球,他端放適宜砝碼,令其平衡. 然後用玻璃罩將天平全體蓋住,將罩內空氣抽去,結果如何?

3. 在天平上量度而得之空杯之質量,係杯本身之質量,抑係杯與杯內所容空氣之總質量. 試述其理由.

4. 氣壓計之管如未懸成鉛直時,有無妨礙?

5. 登高山之頂,恆感呼吸切迫,是何緣故?

6. 將氣壓計放在鐘罩內,抽去罩內空氣,結果將如何?

虹吸管

7.　在沙灘上之船,遇雨積水滿船,有何方法使其中所積之水流出? 虹吸管

8.　有何方法可以量度呼出之氣量及吸入之氣量?

9.　平常人之血壓約爲每平方寸17斤.　乘飛機飛至高空時,血壓有無變化?

10.　在標準大氣壓時每1平方寸上所受到之壓力若干斤?

11.　假定一人之表面積爲1.2平方米,問在標準大氣壓時,共受到若干斤之壓力作用?

12.　暴風雨時氣壓降低至72厘米,比較在標準氣壓時,每1平方米上,壓力可減少若干斤?

13.　用水代替水銀作托里拆利實驗時,須用若干長之管,方足敷用?

14.　用開管壓力計量度容器中氣體之壓力,得兩水銀面之高差爲4厘米,求容器中之氣壓.

15.　假如空氣密度由地面至最高處,均一定不變,求大氣層之厚.

16.　大氣壓等於73厘米時,有10升之空氣,合標準大氣壓之若干升?

17.　在標準大氣壓時之氫氣1升,須加若干大之壓力始能壓縮至800立方厘米?

18.　在托里拆利之玻璃管內,導入少許之醚,則水銀面降下,至內外水銀面相差僅25厘米.　求管內醚汽壓.

76－25＝

19. 使用圖15中(2)所示之閉管壓力計連至煤氣管上，則右端，即密閉之一端，水銀面與閉端相距20厘米，而左端之水銀面，又在其下10厘米。將左端從煤氣管上取下，左右兩水銀面，恰在同一高度。求煤氣管中之氣壓。

20. 用喞筒抽水，最多只能將水送至如何高處？

21. 取粗細均勻之玻璃管，垂直插入水銀盆內，在標準大氣壓時，管露出水銀面20厘為止。然後以指密封管口，漸漸將管提上，使管內之空氣柱長38厘為止 (i) 求此時管內空氣之壓力等於水銀柱若干厘米？(ii) 管內外水銀面相差若干？

第四章　分子現象

§135. 分子運動說.

物體因其分子之集合狀態不同,分爲固,液,氣三態,已詳前述.更由布朗運動,知此等分子,均作漫無紀律之運動,未嘗停止.固體分子相距較近,故其運動不甚顯著.氣體之各種性質,大都可由此種運動爲之說明,是爲**氣體動力論**(kinetic theory of gas).

§136. 擴散.

密度不同之兩種氣體,彼此相接,不久卽互相混合.如圖100,上器盛氫氣,下器盛二氧化碳,開放其間之管塞,使彼此相通,不久,較輕之氫氣自行降下,而較重之二氧化碳,自行昇上,全體成爲密度均一之混合氣體.此現象曰**擴散**(diffusion).氣體分子均作漫無紀律之運動,故能由一容器,飛入他一容器.濃度大者,單位容積中含有之分子數亦大,故由此飛出之分子數亦

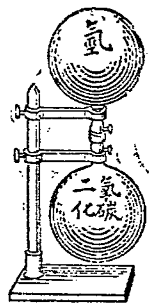


圖100.　擴散

較多,結果必至成爲密度相等爲止.

又液體對於液體,亦有擴散作用. 例如酒精與水,或硫酸銅之濃溶液與水,均有同樣現象.

又兩氣體不必直接接觸,卽隔一瓷壁,或薄膜,亦能擴散. 但由一方進入他方之分子,因速度不同,故在同一時間內之擴散量,彼此不相等而已.

§137. 溶解.

兩種物質混合後,成密度同一之物質,如上述擴散後之氣體,無論用何種機械方法,均不克使其再行分離之現象,曰溶解(dissolution),混合後之物質,曰溶體(solution). 氣體與氣體,可以任意之分量,混合成爲溶體. 固體中如金屬,亦然,其混合而成之物,曰齊(alloy). 各種溶體之中,以液態者,最爲重要,特名之曰溶液 (solution),其溶解於液體中之物質,曰被溶質(solute),用以溶解被溶質之液體,曰溶劑 (solvent),單位容積內含有被溶質之質量,曰溶液之濃度 (concentration).

在一定狀況下,一定容積之液體所能溶解之物質,有一定之最大量,卽濃度有一定之極限,此極限値,曰在此狀況下之溶解度(solubility). 溶液之濃度已達於其

最大限度時,曰**飽和溶液** (saturated solution).

§ 138. 結晶.

既達飽和狀況以後之溶液,如因溫度變化,或其他原因,溶劑繼續蒸發不已,殘餘溶液中之被溶質,已超過其溶解度,則過餘之量,立即由液內析出. 如其進行甚緩,則此項析出之被溶質之分子,各依一定之方向排列而成極有規律之形狀,如是而得之固體,曰**晶體**(crystal).如水晶(quartz),岩鹽(rock salt)等,均最常見之晶體. 與此相對,如玻璃等類,並無一定幾何學形狀者,曰**非晶體**(amorphous body).

溶液中有時雖超過飽和狀態,依然能暫時維持現狀,將過餘之量,保留於其中而不析出. 如是之狀態,曰**過飽和** (supersaturation). 此種過飽和溶液,或受些微振盪,或遇他種物體投入,均立即將過餘之量,全部析出,其進行頗驟,不能得大形之晶體.

§ 139. 滲透.

能互相混合之兩種液體,亦如氣體,可隔一薄膜進行擴散,但在液體則別有一名,曰**滲透**(osmose). 如圖101.

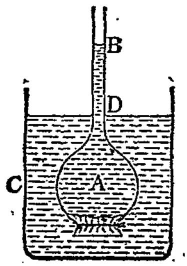


圖 101. 滲 透

將無底瓶 A 之下面用羊皮紙包住作底,內盛硫酸銅溶液,其液面在 D 處. 將此瓶沈入水盆 C 內,卽見管內液面逐增昇高至 B, 同時 C 內之水,亦略帶色. 或用染色酒精,白糖,食鹽等之溶液代替硫酸銅溶液試之,亦同樣可以透過,但蛋白質,澱粉等則否. 凡能自由透過薄膜者,曰晶質 (crystalloid), 完全不透過者,曰膠質(colloid). 利用此項性質,使混合後之物質互相分離之法,曰**滲透分析法** (dialysis).

上述之實驗,當管內硫酸銅溶液達於一定之高以後,雖歷久亦不再增. 由此可知水透過羊皮紙滲入硫酸銅溶液中之量,有一定之極限值,此值可由羊皮紙內面之壓力量度之. 凡溶液對於側膜,均有相當之壓力用以防止膜外溶劑滲入其中,此項壓力,曰**滲透壓**(osmotic pressure). 兩種溶液隔一薄膜而停止其滲透時,正彼此之滲透壓相等,如是者曰**等滲壓液** (isotonic solution).

§ 140. 吸收,吸附,吸留.

氣體溶解於液體中時,曰吸收(absorption). 在一定溫度下,單位容積之液體所能溶解之氣體容積,恆一定不變,是曰本生之吸收係數(Bunsen's absorption coefficient),可由氣體溶解時之壓力量度之,此項壓力曰吸收壓(absorption pressure). 因氣體之密度,與其壓力成正比例,故又可作"氣體溶液之濃度與吸收壓爲正比例."

固體之表面上,通常集有多量氣體,是曰吸附(adsorption),尤以多孔質之木炭,最富於此項性質,對於氨,可吸附本身容積之90倍;對於二氧化硫可吸附65倍;對於二氧化碳可吸附35倍. 平滑之表面,亦有此現象,例如玻璃表面有一層水蒸氣吸附於其上,鉑表面之氫氣,亦極著名.

金屬不僅表面吸附氣體,其內部亦能吸收一部分,是曰吸留(occlusion). 例如通常溫度之鈀,可吸留其本身容積之370倍之氫氣,如用作陰極分解水時,可增至982倍.

§141. 表面張力.

液體之分子力,雖不及固體之強,但卻遠在氣體之

上,對於固體亦能表現,如水之附於器壁,即其一例. 液體因有此項分子力存在,互相牽引之結果,令其表面收縮成爲最小面積. 在同一容積之中,以球形之表面最小,故不受重力作用之液體如葉上之露,水中之油點,均作球形. 又如圖 102, 環內繫一線圈,蘸石鹼液,由分子力張成薄膜,以燒紅鐵箸刺破線內膜面,線外分子牽引線圈成爲圓形. 一切液體表面,均有此項收縮之力存在,使其表面與緊張之膜相似,如是之力,曰**表面張力**(surface tension).

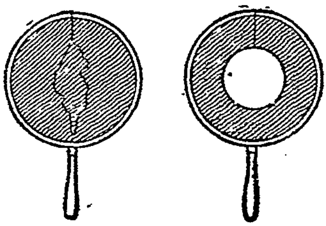
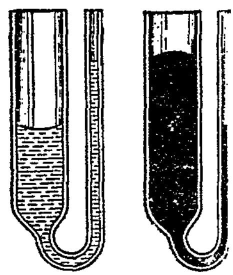


圖 102. 表面張力

§142. 毛細現象.

液體與固體接觸處,一般均曲而不平,如能潤濕固體則凹,否則凸,如圖 103. 前者如水與玻璃,後者如汞與玻璃. 液面之或高或低,以在細管內,尤其顯著,故稱爲**毛細現象**(capillary phenomena),



(a) (b)

圖 103. 毛細現象

而內徑特別細小之管,則曰**毛細管**(capillary tube).

毛細現象,可由各分子間作用之力說明之.與管壁接觸之液體分子,一方面須受本身同志之液體分子之內聚力作用,他一方面又須受玻璃分子之附着力作用.如內聚力小,而附着力大,則此分子即被玻璃分子吸引而去;如內聚力大而附着力小,則被後方之液體分子吸引而回.前者即水與玻璃之例,如圖中之(*a*);後者即汞與玻璃之例,如(*b*).

§143. 粘滯性.

用同大同長之鋼絲及鋅絲各一條,固定其上端,下各懸一同大同長且同重之水平棒,令兩棒成同一角度,然後放任之.此時兩者所受空氣之阻力完全相同,但鋼絲所懸之棒,來回振動,歷久不停,而鋅絲所懸者僅往返數次即止.可知使此物體停止之力,與由空氣而來之阻力無關,而爲物質內部分子間之摩擦力.此項內部存在之摩擦,曰物質之**粘滯性**(viscosity).即鋼之粘滯性小,而鋅之粘滯性大.

粘滯性不僅限於固體有之,即液體氣體,亦均有之.理想液體(perfect liquid)及理想氣體(perfect gas)之各層

間,固無摩擦作用,但實際之液體及氣體,則不能免,故各有相當之粘滯性存在.

液體中之糖漿甘油等,粘滯性極大,爲人所共知,即水與汞,亦不能免.

氣體之粘滯性,更遠在液體之下,但亦有顯著之影響,例如空氣因有粘滯性故能妨礙塵埃或雲中水滴下降. 直徑$\frac{1}{1,000}$英寸之水滴,因受空氣之粘滯性作用,每秒鐘僅能降落0.8英寸之距離,直徑$\frac{1}{10,000}$英寸者,更只能每秒降落0.5英寸而已. 通常之雨滴,因形體頗大,已不受空氣之粘滯性之妨礙,僅受空氣阻力之影響而已.

問題第十一

1. 破鏡不能重圓,其故安在?

2. 破鏡必欲重圓,有何方法辦到?

3. 加糖入水,必須用匙攪勻,則溶解即進行甚快,何故?

4. 大氣中以氧氣氮氣爲最多,無論何地其混合比例均大致相同,其故安在?

5. 汽水啤酒等,瓶塞極牢,去塞則泡發如沸,其故安在?

6. 玻璃管端或玻璃板邊角,新破時尖銳異常,如在火上燒後,則可成爲圓滑表面,手指觸及,亦不致受傷,是何理由?

7. 衣服上遇有洋蠟斑點時,可用吸墨水紙一張,蓋在

斑點上面,用熨斗在吸墨水紙上熨過,即可取去,其理安在?

8. 保安剃刀之刀片,如輕輕平放於水面,可以不沉,其故安在?

9. 從管口滴下之水滴,每滴之體積均相等,其故安在?

10. 一滴水與一滴水銀,如放在桌面上,有何不同?

11. 由杯內將水傾出時,如在杯口處放一玻璃棒,則傾出之水,均沿玻璃棒,安全流下,不致由杯邊流去,其故安在?

12. 寫字時所用之紙,墨水,鋼筆尖,吸墨水紙等之作用如何?

第三篇　熱學

第一章　熱及膨脹

§144. 溫度及溫度計.

表示物體冷熱之程度,曰**溫度**(temperature). 手指觸物,亦可略辨冷熱,但不準確,非用適宜之機械方法,不能得精密結果. 通常利用物體熱漲冷縮之性質,造成量度溫度之器,曰**溫度計**(thermometer). 各種物質之中,以汞之漲縮,比較正確,故多用之,是為**汞溫度計**(mercury thermometer). 用汞溫度計量得之結果,與後述之**標準溫度計**(normal thermometer),雖略不同,大致尚無大差.

汞溫度計之標度,通常以水之**冰點**(ice point)為其零度,以水之**沸點**(boiling point)為其百度,是為**百分度**(centigrade),或曰**攝氏溫標**(Celsius scale). 溫度計使用過久,其所示溫度,即不正確. 使用前,須先將其放入熔化之冰中,次再放入沸水發出之水蒸氣中,以驗其標度,

是否準確.

除攝氏溫標而外,尚有**華氏溫標**(Fahrenheit's scale)亦頗常見,係以水之冰點作32度,以水之沸點作212度.

表示攝氏度數用°C.,表示華氏度數用°F.,兩者之關係如下:

$$C=(F-32)\frac{5}{9}.$$

例如人之體溫爲37° C.,亦卽98.6° F.

§145. 最高及最低溫度計.

能示一時期內最高之溫度之溫度計,曰**最高溫度計**(maximum thermometer). 同樣,表示一時期內最低之溫度者,曰**最低溫度計**(minimum thermometer). 前者於汞溫度計內裝一小鐵針而成,溫度昇高,針被推上,溫度降低,針留原處. 後者於酒精溫度計內裝一玻璃柱而成,溫度降低,柱受表面張力作用,隨醇降下,溫度昇高,柱留原處. 又有將此兩部分併爲一器者,曰**息克斯最高最低溫度計**(Six's maximum and minimum thermometer),如圖104所示. 由*B*至*A*盛酒精,由*A*至*C*盛汞,由*C*至*D*又盛酒精. 溫度昇高,*B*內酒精膨脹,汞移向右管;溫度降低,則移向左管. 兩方之汞表面,各有一小

鐵針,以記汞表面曾經達到之處. 又檢查疾病用之**醫用溫度計** (clinical thermometer), 如圖 105 所示,亦最高溫度計之一種. 昇高後之水銀,受表面張力作用,在管徑縮小處截斷,故仍留於原處,非用力搖之,不克降下. 因常人體溫概在 37°C. 附近,故醫用溫度計上之標度,限於體溫相近之範圍內,即由 35° C. 至 42°之間,過此均無用處.

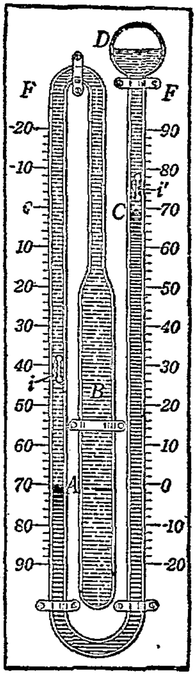


圖 104.
息克斯溫度計

圖 105.
醫用溫度計

§ 146. 膨脹.

一條金屬線,在溫度 $t°$ C. 時,長 l, 溫度昇至 $t'°$ C., 長爲 l'. 故每昇高溫度 1° C., 其長度增加 $\frac{l'-l}{t'-t}$. 以 l 除此數,即得每昇高 1° C., 每單位長度之線所增加之長度, 通常以 a 表之,即

$$l' = l\{1 + (t' - t)\alpha\}.$$

α 表一常數,其值由物質之性質而定,稱曰線脹係數 (coefficient of linear expansion).

同樣,一物體在溫度 $t°$ C. 時,體積為 V, 溫度昇至 $t'°$, 體積增成 V'. 故每昇高 1° C., 體積增加 $\frac{V' - V}{t' - t}$. 以 V 除之,卽得單位體積每昇 1° C. 之增加,通常以 β 表之,則

$$V' = V\{1 + (t' - t)\beta\}.$$

此 β 亦一常數,其值由物體之性質而定,稱曰體脹係數 (coefficient of cubic expansion).

如命 ρ, ρ' 表溫度 t, t' 時之密度, 則 $\rho V = \rho' V'$, 故得

$$\rho = \rho'\{1 + (t' - t)\beta\}.$$

又在線脹係數 α 與夫體脹係數 β 之間,有一定之關係. 試就 0° C. 時, 每邊長 l 之立方體論之. 命 V 表其體積,則 $V = l^3$. 溫度昇至 $t°$ C., 體積變成 $V(1 + \beta t)$, 每邊變成 $l(1 + \alpha t)$. 故

$$V(1 + \beta t) = l^3(1 + \alpha t)^3.$$

展開後略去高次項,卽成

$$V(1 + \beta t) = l^3(1 + 3\alpha t)$$

故得

$$\beta = 3\alpha.$$

茲將數種常見固體之線脹係數列表於下:

表 5.　固體線脹係數表

鉑	0.000009	鋼	0.000010
金	0.000014	黃銅	0.000019
銀	0.000019	鋁	0.000029
銅	0.000017	錫	0.000022
鍛鐵	0.000011	玻璃	0.000009
鋅	0.000029	因鋼(鎳 36%)	0.000009

§147. 膨脹之應用

固體膨脹之應用極多;如鐵軌接合處,必留相當空隙,以防溫度昇高時,因膨脹而生彎曲. 又如車輪及木桶之鐵箍,均於燒熱後加上,遇冷收縮後,即固着不脫. 又或將不同種類之兩金屬板,釘合成一,曲作環狀,一

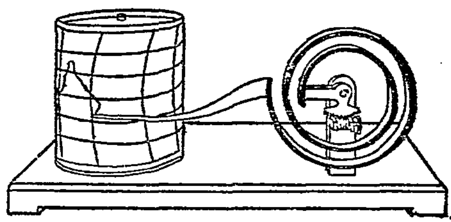


圖 106. 溫度記錄器

端固定,他端載一筆尖,沿轉動圓筒之紙面,畫連續曲線,如圖 106 所示,是爲溫度記錄器(self-recording thermometer),可將各時刻之氣溫變化記出. 又由 §81,知擺之週期,由擺長決定,但擺長須受溫度影響,故所計時間,不能準確. 欲免此弊,須用圖 107 之擺,聯合數棒而成,其中

之 c, c 爲黃銅棒，i 及 e, d 則爲鋼棒. 溫度昇高，各棒均同時膨脹，其中鋼棒之膨脹在使擺錘降下，而黃銅棒之膨脹，則在使擺錘昇上. 由表 5，知黃銅之膨脹係數，約及鋼之膨脹係數之倍，故只須配合適宜，可令擺長不因溫度變化，而有短長，如是者曰補償擺(compensated pendulum). 又或選用膨脹係數極小之物質亦可，例如含鎳 36 % 之鎳鋼齊，膨脹係數最小，幾與無變化者相近，故此種齊又名因鋼(invar)，通常製造精確之器械時使用之.

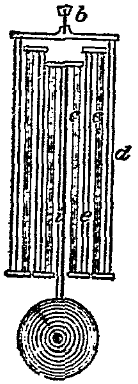


圖 107. 補償擺

§ 148. 液體之膨脹.

論液體之膨脹時，通常均指其容積之膨脹而言，但液體必盛於容器之中，故同時不得不考量其容器之膨脹.

將液體盛入圖 108 之細頸玻璃管內. 命 V_0 表 0° C. 時管內液體之容積，B 表其頂點. 假令溫度昇高至 $t°$ C.，如僅論玻璃之膨脹，因容器內容增加，其結果當使管內液頂降下至 C. 即容積 BC，表玻璃管內容，對於 $t°$

C. 之增加. 命 β_g 表玻璃之膨脹係數,則容積 BC 應等於 $V_0\beta_g t$. 事實上,溫度昇高,管內之液體亦必膨脹. 再命 β_l 表液體之膨脹係數,通常 β_l 之值均大於 β_g,故實際頂點均在 B 之上端,如 D. 卽容積 CD,表液體對於 t°C. 之增加,故等於 $V_0\beta_l t$. 通常吾人眼中所見者,僅原在 B 之液頂,膨脹後昇高至 D 而已,故以 $V_0 t$ 除此視膨脹 BD,稱為視膨脹係數(apparent coefficient of expansion),以 β_{lg} 表之. 與此相對,以 $V_0 t$ 除液體單獨之膨脹 CD,則曰眞膨脹係數(true coefficient of expansion).

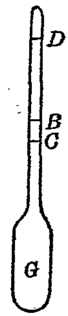


圖 108.

由此定義,可以立卽證明

$$\beta_{lg} = \beta_l - \beta_g.$$

換言之,視膨脹係數,等於眞膨脹係數內減去容器物質之膨脹係數.

§ 149. 水之膨脹.

液體之中,以水之膨脹最爲特別. 溫度自 0°C. 昇高,其密度逐漸增加,至 4°C. 時,成爲最大密度. 此後溫度再行昇高,密度轉逐漸減小. 實測所得水之密度,如表 6.

表 6. 水之密度

0°	0.99988
1°	0.99993
2°	0.99997
3°	0.99999
4°	1.00000
5°	0.99999
6°	0.99997
7°	0.99994
8°	0.99988
9°	0.99982
10°	0.99973
20°	0.99823

故水之膨脹係數,隨温度之範圍而異,其值如表7.

表 7. 水之膨脹係數

5°–10°	0.000053
10°–20°	0.000150
20°–40°	0.000302
40°–60°	0.000458
60°–80°	0.000587

湖水冷却時,其表面温度降至4°C.,密度成爲最大;故由表面下降,而原在其下面較温之水,則昇至表面以代之. 如是交替,繼續至全湖之水均成爲4°C. 以後空氣如再冷却,則僅有表面之水結冰,在其下者,因密度較大,無法昇起,故仍保持4°C.,水族之得生存,全賴乎此.

水中如含鹽分,例如海水,則其最大密度,卽不在4°,更在其下 大洋中之水温,能低至2.5°C.,卽由於此。

§150. 氣體之膨脹.

氣體之膨脹,極爲顯著,可用圖109之器量度之.用玻璃瓶一個,內容空氣,由塞中插入,U形玻璃管,管內有染色之水一小段.如將本生燈移近玻璃瓶,使瓶內空氣變更其溫度,觀測管內水面之移動,即可求得瓶內所盛空氣對於溫度變更所生之膨脹.

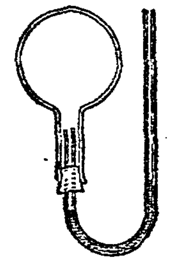


圖 109.　氣體之膨脹

據實測結果,瓶內之氣體,不拘其種類如何,溫度每昇降1° C.,其體積卽隨之增減其在0° C.時之體積之$\frac{1}{273.2}$.此項關係,曰給呂薩克定律(Gay-Lussac's law)或查理定律(Charles' law).再據最近精密實測,結果如下,式中之β,表各種氣體之膨脹係數.

$$氫之\beta = 0.0036604 - 0.0000019\,p_0$$

$$氫之\beta = 0.0036604 + 0.0000012\,p_0$$

$$氮之\beta = 0.0036604 + 0.0000127\,p_0$$

第二項之p_0,表氣體之壓力,係以高1米之汞柱之壓力爲其單位.由此可知氣體之β隨其壓力而變,亦卽隨其密度而異.但若密度極小,則一律成爲

$$\beta = 0.0036604 = \frac{1}{273.2}$$

且液化愈易之氣體,其膨脹係數與此相差愈遠.

§151. 理想氣體.

由前節所述,知氣體之密度,如達極小,則其膨脹係數,一律取$\frac{1}{273.2}$之值.反之,凡具有此膨脹係數者,均為氣體,是可看作氣體之一特性.物質之密度漸大,則其膨脹係數,亦與此值次第不同,即漸失去此項特性.又不僅查理定律如此,即波義耳定律亦然.密度漸大之物質,對於波義耳定律,亦逐漸不能適用.故波義耳定律,又可代表氣體之一特性.

無論在任何溫度任何壓力之時,均能適用波義耳定律,且以$\frac{1}{273.2}$為其膨脹係數之氣體,曰理想氣體(ideal gas).例如氫氣,氧氣,氮氣,及氦等,在常溫常壓中,均可看作理想氣體.

§152. 理想氣體方程式.

一定量之氣體,當其壓力溫度同時變化時,可由波義耳及查理之定律,求其容積上之關係.例如(I)表壓力為p_0,溫度為0°,容積為v_0之氣體,當其變化成為(II)之狀態時,即壓力為p,溫度為t,容積為v時,各量間之關

係,可如下求之.

$$\begin{array}{cccc} \text{(I)} & p_0 & 0 & v_0 \\ \text{(III)} & p_0 & t & v' \\ \text{(II)} & p & t & v \end{array}$$

先於此兩狀態之間,假想有一過渡狀態,如(III),壓力仍爲p_0,僅溫度由$0°$變成$t°$,容積因之由v_0變成v'此時按查理定律,得

$$v' = v_0(1 + \frac{1}{273.2}t).$$

其次再論由(III)變至(II),卽溫度不變,僅壓力由p_0變成p,同時容積由v'變成v. 此時按波義耳定律,得

$$p_0v' = pv.$$

故得
$$pv = p_0v_0(1+\frac{t}{273.2}).$$

是曰波義耳給呂薩克定律(Boyle-Gay-Lussac's law),又或稱爲波義耳查理定律(Boyle-Charles' law). 如將在0°C.以下之273.2°處,取作量度溫度之起點,卽以此一點,定作零度,標度仍採用百分溫標,如是而得之度數以T表之,則通常之$t°$C.,在此種溫度標中應成爲

$$T = 273.2 + t.$$

如是之溫度,曰絕對溫度(absolute temperature),其起點,

卽 $-273.2°C.$ 之溫度,則曰絕對零度(absolute zero-point)如命 T_0 表絕對溫度之冰點,卽 $T_0=-273.2°C.$,則上述之波義耳查理定律,可改寫成爲

$$\frac{pv}{T}=\frac{p_0 v_0}{T_0}.$$

換言之;一定量之氣體,其 $\frac{pv}{T}$ 之值,恆一定不變,如以 k 代之,則

$$pv=kT.$$

k 爲一常數,其值由氣體之性質而定.

§153. 氣體溫度計.

實際之溫度計,多利用汞之膨脹,不過取其便利而已,在理論上,則並無根據. 但若利用上節所述氣體之特性,可爲溫度下一新定義如下:使理想氣體之容積,增加其 $0°C.$ 時之容積之 $\frac{1}{273.2}$ 之溫度,是爲1度,或容積一定不變,使其壓力增加其 $0°C.$ 時之壓力之 $\frac{1}{273.2}$ 之溫度,是爲1度. 不僅定義而已,並可利用氫氣或空氣等與理想氣體相近者,將溫度精密量出,爲此目的而設之

器,曰氣體溫度計 (gas thermometer). 如所用之氣體爲空氣,則曰空氣溫度計 (air thermometer),如爲氫氣,則曰氫氣溫度計(hydrogen thermometer).

氣體溫度計之構造,如圖 110 所示,玻璃球 A 內盛欲量度其溫度之氣體,與曲管 BC 相連,BC 中盛汞,下接橡皮管與外面汞槽相連.

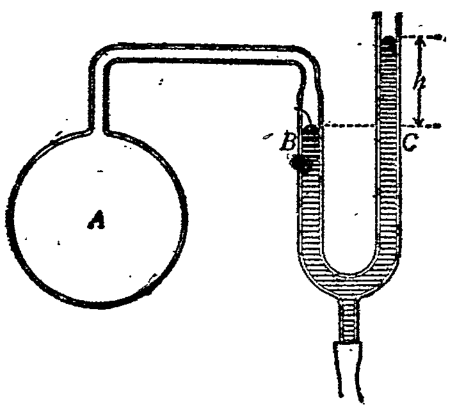


圖 110. 氣體溫度計

使用時先將 A 放入冰水中,提高汞槽使 B 內汞表面與管內固定之針尖接觸,讀出此時兩管內汞表面之高差 h. 由氣壓計上指示之度 H 及此處讀出之 h, 可將 A 內氣體之壓力 P_0 算出. 其次將 A 放入欲測其溫度之處,照樣,使尖端與汞表面接觸,讀其高差,算出 A 內

氣體之壓力 P. 假定 A 內之容積爲 V_0, 則由

$$\frac{P_0 V_0}{273.2}=\frac{PV_0}{T},$$

可知

$$T=\frac{P}{P_0}\times 273.2,$$

故 T 之正確數值,可由 P 及 P_0 算出

§154. 熱量及單位.

爲說明物體溫度之變化,特假想有一特性之物,存在一切物體之中,其量增多則溫度昇高,減少則溫度降下,此假想之物名曰熱(heat). 熱之本性姑置不論,玆先定其單位. 通常以純水1仟克由14.5°C.昇高至15.5°C.所需之熱,定爲熱之單位,是曰1仟克卡(kilogram-calorie),或稱之曰大卡(great calorie),其千分之一曰克卡(gram-calorie),或稱之曰小卡(small calorie). 間亦有用0°–1°C.之區間,而稱之曰零度卡(zero-point calorie)者,仍以用14.5°–15.5°C.者爲多.

§155. 熱之傳播.

熱由一物體移至他一物體或由同一物體之一部

分,移至他一部分,其方法共分三種,分述如次:

(1) 傳導: 一物體之各部溫度,如有不同,則熱經由物質,次第傳達,由高溫部分,移至低溫部分,直至全部溫度相等,始行停止. 同樣,如有兩種溫度不同之物體,互相接觸存在時,亦復如此. 此種移動方法,曰傳導(conduction). 凡容易導熱之物,如金屬等,曰導體(conductor),反之,不容易導熱者,如空氣,木,綿等,曰非導體(non-conductor).

(2) 對流: 導熱最易者,爲金屬,尤以銀及銅爲特甚,流體最不易. 故流體中熱之移動,不由傳導,其一部分受熱,則起膨脹,密度減小,向上昇起,其他部分密度大而冷者,移來補充,再受熱又移向上方. 如此交相代替,熱亦隨之傳至全部之現象,曰對流(convection). 水之煮沸,烟囱之通風,均對流之實例. 又氣象上之貿易風,亦自然界之一大對流.

(3) 輻射: 熱除上述兩種移動方法而外,又可不憑藉物質之助力,逕行傳至遠處,是爲輻射(radiation). 例如太陽之熱,可以直接傳至地上. 此項由輻射而來之熱,性質與光同,有反射,折射等現象. 在光有透明與不透明之分,在熱亦然. 凡能使熱自由透過者,曰透輻射

熱體(diatherman),遮斷輻射作用使其不能透過者曰不透輻射熱體(atherman). 不能透過之熱,即被不透輻射熱體吸收,結果使其溫度昇高.

§156. 煖室設備.

冬日可利用對流,使全室生煖,其設備有種種

(1) 火爐煖室: 此法最爲簡單,即在室內設爐生火,受熱之空氣上昇,周圍冷空氣沿地板流來,以代其位,如是循環往復,如圖 111 所示,直至全室煖熱. 此時最宜注意者,爲通風(ventilation). 須有充足之新鮮空氣,以助燃燒,及供呼吸之用. 廢氣尤須排除. 如裝有烟囪,即可由此排除廢氣,新鮮空氣,則由門縫窗穴流入,以補其缺.

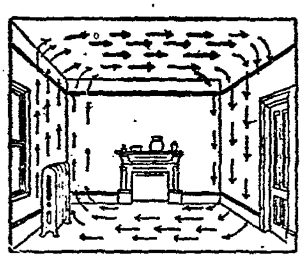


圖 111. 火爐與通風

(2) 熱空氣煖室: 通常火爐僅能使一室溫煖,如欲使其遍及全屋,則用熱空氣煖室(hot-air heating). 法將大火爐裝在房屋之最下層,周圍用鐵板護套,屋外之冷空氣由房屋下層之進氣管進入護套中,受熱上昇,供煖室之用,如圖 112 所示. 室內失熱後之空氣,一部自門

管逸出,一部則重返護套,至於火爐內燃燒生成之廢氣,則由烟囱排出.

(3) 熱水煖室: 在屋底裝設鍋爐 (boiler),將水熱至幾達沸點,則由對流作用,熱水沿管上昇,進入各室中裝設之輻射器 (radiator) 內,如

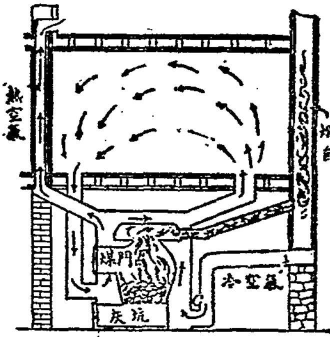


圖 112. 熱空氣煖室

圖 113 所示. 輻射器均用鐵製成,露出面積甚大,散熱極易,周圍空氣由此受熱,致令全室温煖. 輻射器內之熱水,失熱冷却後,則從回水管降下,復返鍋內. 過餘之熱水,則昇入房頂之膨脹池 (expansion tank) 中,經溢水管 (overflow pipe) 流出溝渠中.

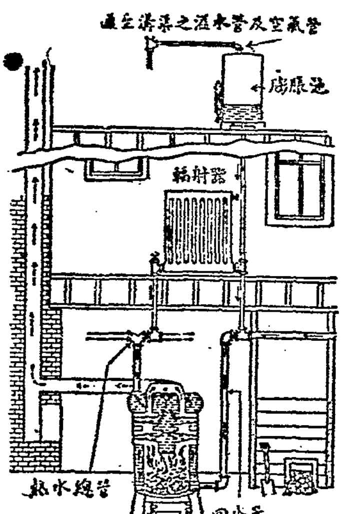


圖 113. 熱水煖室

熱水煖室並無通風設備,室內雖煖,但缺清潔新鮮之空氣,按每人每分鐘內必

需有 1.4 立方米之新鮮空氣,方足敷用. 故在近代建築物內,多用風扇自室外抽入空氣,用布濾淨,加熱後再送入室內. 室中污濁空氣,則由地板近傍之排氣管逸出室外.

(4) 蒸汽煖室: 如在圖 113 中,將房頂之膨脹池取去,鍋內之水只令半滿,則成爲蒸汽煖室(steam heating)

§157. 比熱及卡計.

使物質 1 克由溫度 t°C. 昇高至$(t+1)$°C. 所要之熱,以卡爲單位表出之數字,曰此物質在溫度 t°C. 時之比熱(specific heat). 一物體之質量爲 m 克,其比熱爲 C,則使其溫度昇高 1°C., 應須 mC 卡之熱,此熱曰物體之熱容量(heat capacity). 量度熱量之器械,曰卡計(calorimeter). 此方面之研究,則曰量熱學(calorimetry). 比熱之量度,即量熱學中之一問題,其方法種類甚多,其中較爲重要而又最常用者,曰混合法(method of mixture).

如圖 114 所示,懸欲量度其比熱之物體 A 於圓筒 B 內,B 爲複壁之金屬筒. 送水汽從圓筒下方之支管進入筒中,從在上方之支管放出,使 A 受熱,其溫度可由溫度計 D 讀出 卡計 G 內盛水,並附溫度計,攪拌器等. 外

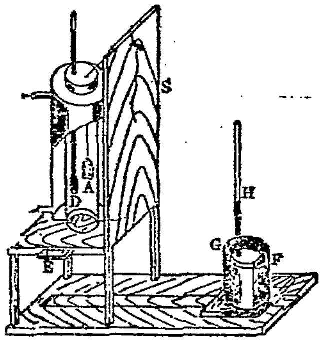


圖 114.　混合量熱法

面更用不良導體之箱F包住．卡計與圓筒之間，加一遮板S，以防B內之熱輻射至G.

用時先量度A之質量m，G內水之質量M，及其溫度t_0．次使A之溫度，保持一定，命之爲t，然後除去遮板S，移G至A下，令A落於G內，攪水使勻，量度其溫度命爲t'．命C表A之比熱，則A失去之熱爲$Cm(t-t')$，等於G內水得之熱量$M(t'-t_0)$，

$$\therefore \quad C=\frac{M(t'-t_0)}{m(t-t')}.$$

實際上不特G內之水，溫度昇高，卽容器本身與夫溫度計，攪拌器等之溫度，亦莫不隨之昇高．同時更有一部分之熱，由輻射逸散於空中．欲得精確結果，非將各種之熱，一一加入計算不可．爲簡便計，可將此種種影響所需之熱，折合之，使其與若干克之水相當，而稱之爲卡計之水當量(water equivalent)，以w表之．欲知w之實值，先用m_0克之水，代替A，熱至t度，然後放入M克水之卡計，攪勻後溫度成爲t'，則由

$$m_0(t-t')=(t'-t_0)(M+w),$$

求出 w，代入前式，卽得

$$C=\frac{(M+w)\,(t'-t_0)}{m(t-t')}.$$

據實測結果，各種常見物質之比熱如下：

表 8. 比熱

水	1.00	鋅	0.094
冰	0.50	銅	0.093
空氣	0.24	銀	0.056
鋁	0.22	錫	0.055
乾泥	0.20	汞	0.033
鐵	0.11	鉛	0.031

問題第十二

1. 溫度與熱有何不同，試舉例說明之。

2. 固體，液體，氣體，受熱均必膨脹，試各舉三例。

3. 欲使溫度計上之標度細密，以便精確量度，則 (a) 管徑之粗細應如何？(b) 下面盛汞之球大小如何？

4. 醫用溫度計用後何以要用力搖下？ 洗滌時，何以只能用冷水，切忌使用熱水？

5. 注熱水入玻璃器內，玻璃厚者易裂而薄者較爲安全，其故安在？

6. 用水作溫度計，有何不妥？

7. 能將一段銅絲，熔入玻璃器中否？ 並說明其理由。

8. 冬日屋內生有火爐，如將樓上與樓下之窗，各開放

一半,則屋內空氣應如何流動? 試繪圖表出之.

9　冬日着羊毛織成之衣,倍覺其煖,何以夏日反用羊毛氈包裹冰塊,以防其溶化?

10.　藏冰之房,何以要用極厚之牆壁?

11.　攝氏溫標與華氏溫標相等時,係若干度?

12.　夏日晝間最大之溫度爲 90° F., 晚間最低之溫度爲 45° F., 如用百分度記之,各爲若干?

13.　地球表面上最低之溫度爲 −98° F., 最高之溫度爲 136° F., 相差若干度;試用攝氏及華氏之溫標表出之.

14.　華氏溫標等於攝氏溫標之二倍之溫度爲何?

15.　黃銅製米尺,在 15° C. 時,恰爲 1 米,在 20° C. 時,相差幾何?

16.　在 20° C. 時長 180 尺之鐵管,如送 100° C. 之水蒸氣由其中通過,當增加若干長?

17.　平浦鐵路全長 1462 仟米,假定夏日之溫度爲 40° C., 冬日之溫度爲 −5° C. 問全鐵路之長度,冬夏相差若干?

18.　玻璃筒在 4° C. 時之容積爲 1 升,在 100° C. 時如何?

19.　黃銅製成之升,設冬夏之溫度相差 40° C., 問此升之容量相差若干?

20.　0° C. 時 400 立方尺之空氣,在 100° C. 時體積幾何?

21.　欲使在 0° C. 時之氣體容積,減去一半,應如何變更其溫度?

22.　欲使在 100° C. 時之氣體容積,減成一半,應如何變

更其溫度?

23. 在0° C.及大氣壓時100立方厘米之氣體,如在50° C.及750毫米之大氣壓時,容積若干?

24. 在溫度20° C.及壓力72厘米之氣體100立方厘米,試化為標準大氣壓及0° C.時之容積.

25. 當溫度18°,大氣壓75厘米時,將200升之氫氣,盛入氫氣球內.昇至高空,測得溫度為5° C.,大氣壓為48厘米,求此時氣球之容積.

26. 將鋅塊在天平上量過,知其質量為20克,熱至98° C.後投入15° C.之水50克之中,結果水之溫度昇高3° C.求鋅之比熱.

27. 有10° C.之水41克,28°之醇15克,互相混合後,其溫度成為13° C.,求醇之比熱.

28. 將120克之銀塊,熱至85° C.,投入456克之某種液體中,結果液體之溫度由18.5° C.昇至30° C. 求此液體之比熱.

29. 設有一卡計,內容水20克,其溫度為10° C. 由外再加入溫度40° C.之水40克,攪勻後其溫度成為28° C. 求此卡計之水當量為若干?

30. 0° C.之冰2仟克,與45° C.之水3仟克混合後,其結果如何?

31. 設有碎冰50克,在0° C.時,與20° C.之水100克相混合,其結果如何?

32. 以鋅50克與錫120克造成之合金,比熱應若干?

第二章、狀態變化

§158. 汽化.

托里拆利眞空內,送入少許液體,立化爲汽(vapor),昇入眞空中,管內水銀面,隨卽降下 h, 此 h 卽表示管內新增氣體之壓力,而此現象,則曰汽化(vaporization). 再送入液體少許,水銀面又降下若干,表示汽之壓力,次第增大. 如保持一定溫度,水銀面之降下,亦有一定制限,是後雖再送入液體,仍當保持液態,不再汽化. 卽在一定溫度中,汽之壓力有一定限度,故其密度有一定之極大值. 達於最大密度之汽,曰飽和汽 (saturated vapor).

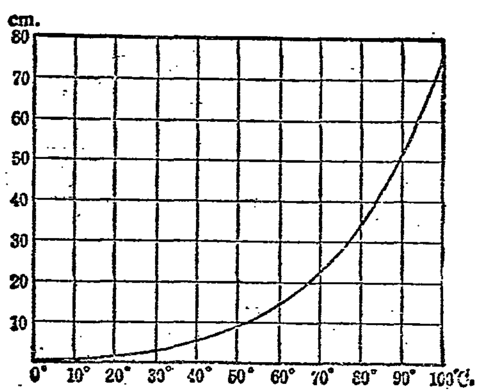


圖 115. 水汽之最大壓力與溫度

飽和汽所呈之壓力,曰**最大壓力** (maximum pressure),其密度曰**最大密度**(maximum density) 圖115表水汽之最大壓力與溫度共增之狀況.

上述現象,可由氣體動力論解釋之. 液體之分子亦四向飛動,其在表面近傍者,飛動頗自如,甚至有動能足以勝過周圍液體分子引力,而逸出液外者,同時汽分子亦有飛入液中者. 汽之密度尙小時,飛出之分子多於飛入之分子,故液體次第減少,汽量加多,是卽汽化之現象. 汽之密度旣達其最大值,則出入之分子數,彼此相等,液體及汽之量,均一定不變,此時之狀態,亦曰平衡. 此種平衡,與力學中之平衡不同,非言其不動,乃言其出入之分子數,恰足相償,外觀上不生變動而已,故特名之曰**統計的平衡**(statistical equilibrium),以資區別.

在此種平衡中之液體,如其溫度昇高,則分子之動能增大,逸出之分子數亦隨之增多,非至汽密度增至相當程度,不克保持平衡. 最大密度與溫度共增,卽由於此.

§ 159. 等溫線.

在一定溫度中,使一定量之汽,受壓而縮,則其容積

與壓力之關係,如圖 116 所示. 最初容積減少壓力加大,如(21.5°) A. 迨壓力達於此溫度之最大壓力後,雖再行壓縮其壓力亦不稍增,僅有一部分之汽,化成液體,共同存在而已,如直線部分 AB. 此後再加壓縮,液量逐漸

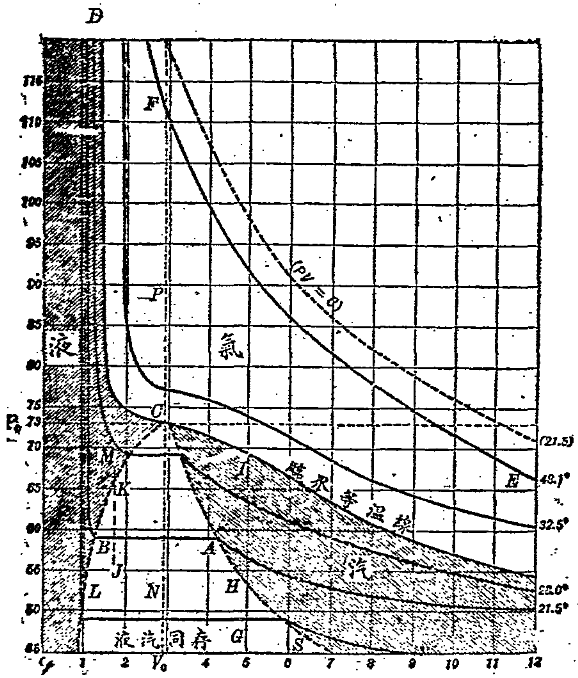


圖 116.　等溫線

增多,直至全部成爲液體始止,如 B. 是後再行壓縮,壓力又驟然增加,如 BD 之部分. 所得之曲線(21.5°)ABD,即等溫線. 就同一質量之汽,變更其溫度試之,又各得一

等溫線,與前此相彷. 溫度漸高,則等溫線中之 A 及 B 兩點,漸相接近,最後合而成為一點 C, 曰臨界點(critical point), 此時之壓力 P_c,曰臨界壓力 (critical pressure), 此時之溫度,曰臨界溫度(critical temperature),此一點 C 所表示之狀態,曰臨界狀態(critical state). 各種常見物質之臨界值,如表9.

表 9. 臨界值

物質	臨界溫度 (°C.)	臨界壓力(大氣壓)
氨	130.0	115.0
醇	243.6	62.76
一氧化碳	−141.1	35.9
醚	197.0	35.77
氯氣	141.0	83.9
空氣	−140.0	39.0
氧氣	−118.0	50.0
氫氣	−240.8	14
炭酸	31.2	73
氮氣	−146.0	35.0
氦	−268.0	2.3
水	374	217.5

臨界狀態之意義,可由圖說明之. 溫度上昇,則 A 移左,表示飽和汽密度,與溫度共增. 同時 B 移右,表示與飽和汽共存之液體密度,次第減小. 至 AB 合而為一如 C 之時,飽和汽之密度與共存之液體密度相等,不可得而分別之矣.

在臨界溫度以上,液體無存在之可能. 故欲使氣

體化爲液體,除壓縮外,必使其溫度降至臨界溫度以下.舊時以爲氧氣氫氣等,不能液化,故有永久氣體之稱,其實不過臨界溫度太低,當日無法達到而已.在臨界溫度以上,加熱於物質,使其溫度昇高,則其狀況與波義耳定律一致,等溫線成直角雙曲線.

§160. 永久氣體之液化.

壓縮氣體,使其變成液體之現象,曰**液化**(liquefaction).通常物質中,如氨,氯氣,及炭酸氣等,液化極易,而氧氣,氫氣,氮氣,一氧化碳,及甲烷等五種氣體,無論如何壓縮,均不能變成液體.此外尙有氦,亦屬此種不能液化氣體之一,舊時遂認爲與汽不同,特名之曰**永久氣體**(permanent gases).其後因硏究炭酸氣之液化,發見各物質均各有其特殊之臨界點,凡在臨界溫度以上者,無論如何加壓,決不能液化.所謂永久氣體,並無與其他氣體不同之處,僅其臨界溫度甚低,決非通常冷劑所能到達而已.一般氣體受驟急之膨脹時,則生低溫,1895年林得(Linde)始利用此現象,造成多量之液態空氣(liquid air),如圖117.左方容器 A 內盛生石灰,吸收空氣中之炭酸氣,再經唧筒 B 壓縮後,送入 C 中.經 D 處

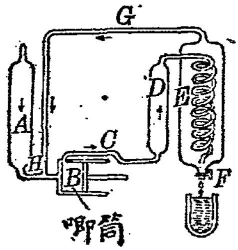


圖 117. 空氣液化法

苛性鉀吸去水分,由銅管 E 通過,自細口 F 噴出,近傍溫度爲之大降. 冷空氣一面使銅管 E 冷却,一面上昇,經 G 而至於 H,與新入空氣相合;再進 B 內,受同樣壓縮及噴出. 如是反覆行之,空氣次第冷却. 最後由 F 噴出者,已成爲液體,可用容器承之. 此外如氫氣及氦,均可照此液化.

§161. 汽化熱.

使 1 克之液體,化爲同溫度之氣體,所需之熱,由物質種類而定,是曰**汽化熱**(heat of vaporization). 反之,由汽液化時,亦必放出同量之熱. 例如 100° C. 之水每 1 克化爲同溫度之水汽,需熱 539 卡. 同時 100° C. 之水汽,每 1 克凝結成爲同溫度之水,亦必放出 539 卡之熱,即水之汽化熱爲 539 卡. 汽化係反抗分子力,使其分子距離增加,同時反抗外力,使容積膨脹. 兩者所需之功均取給於汽化熱. 舊時視熱爲物質,由汽化而得者蘊藏於內,不可得見,故有**潛熱**(latent heat)之稱,今仍沿用此名,但意義已不同矣.

量度汽化熱之法,如圖 118. 加熱使 A 內液體沸騰,汽經 B 進入 D 內. B 之中央用橡皮管 C 連結,周圍纏布防其凍冷. 在 C 之中途凝成之液體,經 G 流入 H. 不含液滴之汽,則經 E 在同種液體 F 內凝結. 此時放出之熱量 Q,

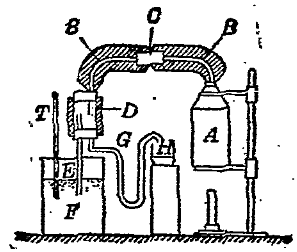


圖 118. 汽化熱之測定

可由溫度計及 F 之熱容量推出之. 如命 m 克表凝結之汽量,L 卡表其汽化熱,C 表液體之比熱,T 表沸點,t 表卡計最後之溫度,則其關係爲

$$L=\frac{Q-mC(T-t)}{m}$$

實測結果,L 之值如表10,因其隨沸點 T 而異,故爲註明

表 10. 汽化熱

物質	汽化熱(卡)	沸點(°C.)	物質	汽化熱(卡)	沸點(°C.)	物質	汽化熱(卡)	沸點(°C.)
氨	341	–	二乙醚	19.38	190	液態炭酸	57	0
硫	362	316	液態氯	17	–22	液態炭酸	32	22
乙醇	220.9	0	液態空氣	約50	–	液態氮	50	–
乙醇	220.6	20	醋酸	84.05	20	水	539	100
乙醇	197.1	100	醋酸	92.32	100	甲醇	289.2	0
乙醇	116.6	200	液態氧	58.	–188	甲醇	284.5	20
乙醇	40.3	240	溴	46	58	碘	24	174
二乙醚	92.52	0	松節油	70	159	磷	130	287
二乙醚	87.54	20	水銀	68	358			
二乙醚	68.42	100	液態氫	123	–			

§162. 由汽化而生之冷卻.

在液體表面之分子,其動能較大者,足以反抗其鄰近分子之作用力,飛出液外,是爲汽化,已詳前述. 一旦有此種分子飛出以後,殘留分子之平均動能,自必較前減少. 此時如無其他之熱,自外進入其內,則其液體之溫度,必當降下. 製冰器卽利用此理而成,又在實驗室製造低溫,亦可應用之. 如用一唧筒,將由液態空氣汽化而成之氣態空氣排去,則殘餘之液態空氣,漸次冷卻,最後成爲固態之空氣,其溫度僅 $-218°$ C., 此現象曰眞空汽化. 同樣,由液態氫之眞空汽化,可得固態之氫,其溫度爲 $-259°$ C.; 由液態氦之汽化,可得固態之氦,其溫度爲 $-272°$ C. 此爲現今實驗室內力所能及之最低溫度,距離絕對零度,僅差 1.2° C. 而已.

§163. 發冷設備.

前述之製冰器,以及家用之發冷器(refrigerator),俗稱電冰箱,大都使用氨(ammonia)作汽化之資料. 在常態中,氨係氣體,但若增加壓力至10大氣壓之多,卽化爲液體. 用此發冷之原理如圖 119 所示. 中央爲壓縮器(compressor),係一唧筒,在其內將氨壓縮後,送入右方

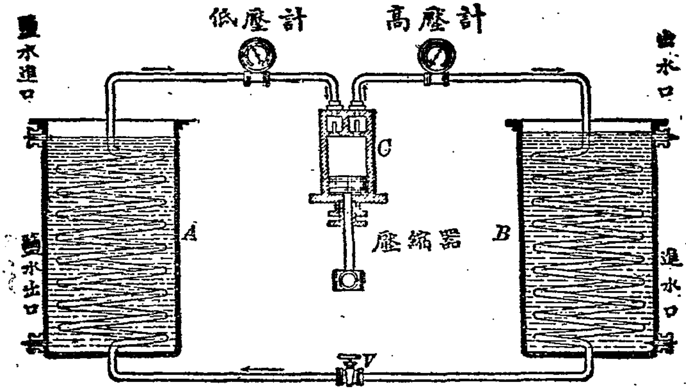


圖 119. 發冷組

之冷凝器(condenser) B 中,使成為液體. 此時因凝結成為液體而放出之熱,由曲管周圍周流不息之冷水,挾與俱去. 液化後之氨,則經從下方之節制活門(regulating valve) V,徐徐進入左方之蒸發器(evaporator) A 內. 然後使用唧筒,從 A 內將氨迅速抽出. 因此汽化,遂令周圍之水,溫度驟降,凝固成冰. 由圖可知,由 A 抽出之氨,又復回壓縮器內,以供再壓入 B 內之用.

§164. 大氣中之汽化.

液體在空氣中汽化時之最大壓力,可用圖 120 之器量度之. 玻璃管 A 上有管塞 D,下有橡皮管與別一

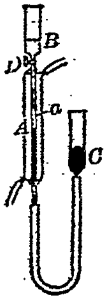


圖 120.

玻璃管 C 相連.用時,先旋開 D,使 A 及 C 內之汞面同高,讀其標度爲 a.次閉 D,由 B 注入欲量度之液體,降下 C 使 A 之壓力減小.再開 D,令液體滴入 A 內,一二滴後,又旋閉 D.此時 A 內因受汽之壓力,故汞面降低.提高 C,使其汞面仍留 a 處.如此,則 A 及 C 兩汞面之高差,表示 A 內汽之壓力.此時,A 之汞面上,如有液體存在,則其所表者,卽爲最大壓力.再用種種溫度之水,環遶 A 之周圍流過,卽可檢出各種溫度所應有之最大壓力.

由上述實驗量度而得之結果,與在托里拆利眞空中求得者,完全相同.可知汽之最大壓力,與有無其他氣體存在無關.因最大壓力,係飛出液外之分子數,適與飛入液內者相等時之壓力,無論液上有無空氣,終須達於同一之汽密度,始克保持其平衡.

§165. 濕度.

大氣中之水汽壓力,已達於最大壓力時,皮膚上之水分,停止汽化,感覺潮濕;反之,大氣中之水汽壓力,距離最大壓力甚遠時,皮膚上之水分汽化極速,感覺乾燥.

故由現在大氣中實有之水汽壓力,對於同溫度應有之水汽最大壓力之比,可以決定乾濕程度,通常則以 100 乘此比表出之,曰**相對濕度** (relative humidity), 或略稱**濕度** (humidity). 一方面又可用 1 立方米之空氣中含有水汽之克數表出之,是曰**絕對濕度** (absolute humidity).

命 t 表氣溫,p 表其水汽壓力,P 表在 t 應有之水汽最大壓力,則其關係如圖 121. 假定此空氣冷至 t_0 時,水

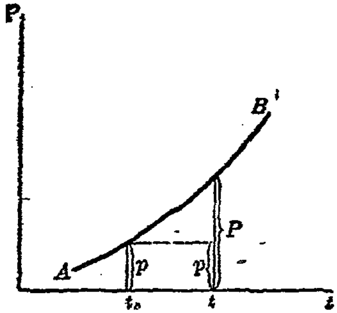


圖 121. 露點

汽之最大壓力恰等於 p, 此時當有水分析出,凝結成露如是之溫度,曰**露點** (dew point). 知露點即可由表 11 檢出與之相當之最大壓力 p. 命 H 表相對濕度,則

$$H=\frac{p}{P}\times 100.$$

表 11. 水汽之最大壓力

溫度 (°C.)	壓力 (毫米)	溫度 (°C.)	壓力 (毫米)	溫度 (°C.)	壓力 (毫米	溫度 (°C.)	壓力 (毫米)	溫度 (°C.)	壓力 (毫米
−10	2.151	15	12.779	40	55.13	90	525.8	140	2709
− 9	2.327	16	13.624	42	61.30	92	567.1	142	2866
− 8	2.514	17	14.517	44	68.05	94	611.0	144	3033
− 7	2.715	18	15.460	46	75.43	96	657.7	146	3200
− 6	2.930	19	16.456	48	83.50	98	707.3	148	3381
− 5	3.160	20	17.51	50	92.30	100	760.0	150	3589
− 4	3.496	21	18.62	52	101.9	102	815.9	152	3764
− 3	3.669	22	19.79	54	112.3	104	875.1	154	3908
− 2	3.950	23	21.02	56	123.6	106	937.9	156	4181
− 1	4.219	24	22.32	58	135.9	108	1004	158	4402
0	4.579	25	23.69	60	149.2	110	1074	160	4633
1	4.942	26	25.13	62	163.6	112	1149	162	4874
2	5.290	27	26.65	64	179.1	114	1227	164	5124
3	5.981	28	28.25	66	195.9	116	1310	166	5384
4	6.097	29	29.94	68	214.0	118	1397	168	5655
5	6.541	30	31.71	70	233.5	120	1489	170	5937
6	7.011	31	33.57	72	254.5	122	1586	172	6229
7	7.511	32	35.53	74	277.1	124	1687	174	6533
8	8.042	33	37.59	76	301.3	126	1795	176	6848
9	8.606	34	39.75	78	327.2	128	1907	178	7175
10	9.205	35	42.02	80	355.1	130	2026	180	7514
11	9.840	36	44.40	82	384.9	132	2150	182	7866
12	10.573	37	46.90	84	416.7	134	2280	184	8230
13	11.226	38	49.51	86	450.8	136	2416	186	8608
14	11.980	39	52.26	88	487.1	138	2560	188	8999

§ 166. 濕度計.

量度濕度之器,曰濕度計(hygrometer). 如前所述,由露點推算者,曰露點濕度計(dew-point hygrometer),其構造如圖122. 用兩玻璃管 B 及 C,壁上 D 及 E 之部分鍍銀,揩抹光潔. B 內盛醚,插入玻璃管 F,及溫度計 T_2,管口加塞,使其密閉. 用適當之吸氣器與 H 連結,抽去空氣,使 B 內之醚汽化,溫度降低,銀面 D 上即有露現出. 命 t_1 表此時之溫度,則 t_1 當較真正之露點略低. 停止抽氣,D 之溫度漸高,露亦減少,終至消滅,此時之溫度 t_2,當較露點略高. 兩者之平均值 $\frac{t_1+t_2}{2}$,是為真正之露點.

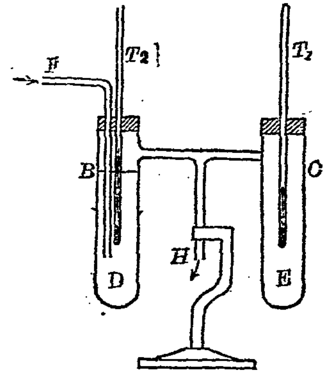


圖 122. 露點濕度計

毛髮遇濕則伸長,乾燥則收縮,故利用毛髮之伸縮性,亦可量度大氣之濕度,此器稱曰毛髮濕度計(hair hygrometer), 大體構造如圖 123 所示. 其標度係與他種濕度計比較而定,故由

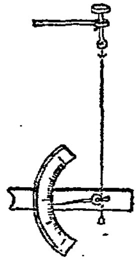


圖 123. 毛髮濕度計

指針所示之度數,立卽可以讀出濕度之數字.

§167. 濕度與氣象問題.

大氣中之濕度,與氣象之關係,至爲密切. 由濕度之量度,可以預知風雨之來臨. 各地測候所,均用此法觀測天候. 濕度與氣象之關係,極爲繁多,其中以達於飽和時之情況不同,而有種種現象,極爲注目. 例如夜間地面上之草木土石等,其溫度之降低,較大氣略早,故與此類物體接近之空氣層之溫度,亦隨之降低而達於飽和,過餘水分因而析出,卽成爲露(dew),凝結於物體表面上. 如此時之溫度,已在冰點之下,則結成霜(frost),冬日在草地上及玻璃窗上,最易得見. 如夜間地面散熱過甚,則不僅與草木土石直接接觸之一部分而已,卽凡與地面鄰近之空氣,全體溫度,亦均降至飽和狀態之溫度之下. 此時不僅地面爲然,卽浮游於大氣中之微塵,其周圍亦有水粒凝成,而成爲霧(fog). 如大氣之溫度下降,不在地面而在空中,則由下方昇起之熱空氣,驟入其內,達於飽和,過餘水分卽在此等處所之塵埃周圍,凝而成雲(cloud). 如其溫度甚低,足以凝出多量之水分則由小粒聚而成滴,降下爲雨(rain). 雨尙未達地面以

前,如再遇冷,卽凝結成霰 (sleet). 如開始凝結時之温度,卽在冰點之下,則結成雪 (snow). 如遇暴風,挾此輾轉於冷熱氣層之間,往返若干遍始行降下,則成爲雹 (hail).

§168. 蒸發及沸騰.

液體之汽化,在任何温度均能進行,然亦僅限於在液體表面之分子,其在內部者則不與焉. 對於此種專限於表面部分之汽化,特稱曰蒸發(evaporation). 但若液體受熱,達於一定温度後,則其內部亦有汽發生,集成泡狀,向上昇起,是曰沸騰 (boiling). 此時之温度,曰沸點 (boiling point). 換言之,在沸點以下之汽化爲蒸發;在沸點以上之汽化,則爲沸騰.

§169. 沸點與壓力之關係.

各種物質雖各有其一定之沸點,但其數值則由液面所受之壓力而定. 液中之氣泡,爲與液體同温之飽和汽,其壓力恰足與周圍液體分子之壓力相抗. 如液面所受之壓力加大,則氣泡所受者亦大,欲仍保存泡形,非增加其汽壓力不可. 結果除昇高温度而外,別無他

法. 水之沸點,卽其最顯著之一例,如表12.

表12. 水之沸點

壓力(毫米)	沸點(°C.)	壓力(毫米)	沸點(°C.)	壓力(毫米)	沸點(°C.)	壓力(毫米)	沸點(°C.)	壓力(毫米)	沸點(°C.)
681	96.95	701	97.75	721	98.53	741	99.29	761	100.03
682	97.00	702	97.79	722	98.57	742	99.33	762	100.07
683	97.03	703	97.83	723	98.61	743	99.37	763	100.11
684	97.07	704	97.87	724	98.65	744	99.41	764	100.15
685	97.11	705	97.91	725	98.69	745	99.44	765	100.18
686	97.15	706	97.95	726	98.72	746	99.48	766	100.22
687	97.20	707	97.99	727	98.76	747	99.52	767	100.26
688	97.24	708	98.03	728	98.80	748	99.56	768	100.29
689	97.28	709	98.07	729	98.84	749	99.59	769	100.33
690	97.32	710	98.11	730	98.88	750	99.63	770	100.37
691	97.36	711	98.14	731	98.91	751	99.67	771	100.40
692	97.40	712	98.18	732	98.95	752	99.70	772	100.44
693	97.44	713	98.22	733	98.99	753	99.74	773	100.47
694	97.48	714	98.26	734	99.03	754	99.78	774	100.51
695	97.52	715	98.30	735	99.07	755	99.81	775	100.55
696	97.56	716	98.34	736	99.10	756	99.85	776	100.58
697	97.59	717	98.38	737	99.14	757	99.89	777	100.62
698	97.63	718	98.42	738	99.18	758	99.93	778	100.66
699	97.67	719	98.45	739	99.22	759	99.96	779	100.69
700	97.71	720	98.49	740	99.25	760	100.00	780	100.73

清潔瓶內盛蒸餾水,自下徐徐加熱,雖其溫度達於沸點,亦不發生沸騰現象,溫度仍繼續上昇不已,如是之現象,曰過熱 (superheating). 又在紅熱之金屬板面上滴下水滴,降至板面,成為球形,暫時仍能維持其形狀,不致汽化,如是之現象,曰球騰態 (spheroidal state). 於過熱之液體中,投入炭粉或砂粒等類,當卽以之作為核心,

發生氣泡,成爲沸騰. 球態則因其周圍之汽不易傳熱,故能暫時阻止汽化.

§170. 熔解及凝固.

固體化爲液體,曰熔解 (melting), 此時之溫度曰熔點(melting point). 反之,由液體化爲固體,曰凝固 (solidification), 此時之溫度,曰凝點 (solidifying point). 化學上凡純粹之物質,其熔點均各有一定. 固體物質 1 克,熔解成爲同溫之液體所需之熱,曰熔解熱 (heat of fusion). 例如 0° C. 之冰每 1 克熔解成爲同溫度之水需熱 80 卡,而 0° C. 之水每 1 克凝固成爲同溫度之冰,亦須放出 80 卡之熱. 卽冰之熔解熱等於 80 卡. 舊時以爲此項熱量,蘊藏於熔解後之液體中,故名熔解之潛熱 (latent heat of fusion), 實則均用以供破壞各分子間相互位置所作之功而已.

各種常見物質之熔點,沸點,及熔解熱,如表 13.

純粹之水,徐徐冷卻,雖達 0° C., 亦不凝固,有時可降低至 −4° C., 始驟然凝固者. 如水面有油層,更可繼續降低至 −7° C. 以下. 如是之現象,曰過熔(superfusion), 或曰過冷(supercooling).

初三

表 13.　各種物質之熔點,沸點,及熔解熱

物質	熔點(°C.)	沸點(°C.)	熔解熱(卡)
鎢	3000	5830	
鉑	1755	3910	27
鋼	1300－1400		
玻璃	1000－1400		
鐵	1100－1200	2450	
銅	1083	2310	
金	1063	－	
銀	960	1955	22
鉛	327	1525	5
錫	232	2270	14
硫	115	445	115
白蠟	約 54	－	
冰	0	100	80
汞	－39	357	[illegible]
醇	－112	78	[illegible]
氨	－75	[illegible]	[illegible]

§ 171.　冷劑.

物質溶解於液體中,同時必供給以相當之熱,各物質每溶解 1 克所需之熱,曰**溶解熱**(dissolving heat). 例如食鹽 1 克,溶解於水,須吸收 18.22 卡之熱,此項溶液之凝點,遠在純粹之水之下. 圖 124 之橫軸表溫度,縱軸表鹽水之濃度,點 O 表純粹之水,不含些微食鹽,點 O' 表純粹食鹽,不含些微之水. 其間之任意一點,如 F 所

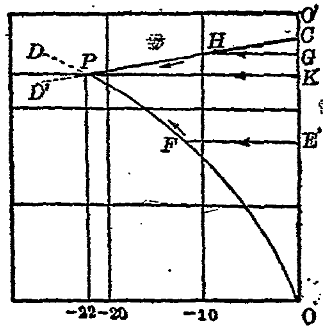


圖 124. 溶液之凝固點

表之混合量,爲(鹽):(水)$=OE$:$O'E$. 鹽溶入水,所需之熱,卽取給於其本身,溶液溫度次第降下,雖達0°C.,亦不凝固. 但在0°C. 以下,純粹之水,漸次析出,殘液濃度,逐漸加大,進行狀况,如曲線 OD. 次取濃溶液冷卻之,與前恰相反,食鹽次第析出,殘液漸淡,進行狀况如曲線 CD'. 此兩曲線之交點 P, 與溫度 $-22°$C. 相當. 在曲線OP, CP, 及OC包圍之三角形內,任何一點所表示之狀態,均有相當之液體存在,在三角形外之點則否.

試取任意濃度E之溶液,徐徐使冷,最初沿直線EF進行,濃度不變,僅溫度降低而已. 旣達F以後,改沿FP進行,有一部分之水析出,濃度漸增,至P全部凍結. 如取濃溶液G, 徐徐使冷,則沿GHP進行,亦至P全部凍結. 引PK與橫軸平行,如取濃度K之溶液冷之,則當沿直線KP進行而達於P, 其間濃度不變,卽達於$-22°$C.,宛如食鹽水係以$-22°$C.爲其凝固點之一單純物質然. 又冰與食鹽混合,亦復如是,達於$-22°$C.以後,溫度卽不再降.

凡如此類,利用兩種或兩種以上之物質,互相混合,可得相當之低溫,如是之物質曰冷劑(freezing mixture).

§ 172. 昇華.

冰雪等雖在零度以下,亦漸能消滅,因其表面隨時汽化成爲水汽發散而去所致. 此時之溫度既在零度以下,當然不經熔解之一階級,逕由固體化爲氣體. 如是之現象,曰昇華(sublimation). 樟腦,碘,麝香等,均有此種性質.

問題第十三

1. 盛冰兩塊,互相重疊,自上用力壓下,不久卽合而爲一,其理如何?

2. 盛水於玻璃瓶內,令其半滿,煑沸後加塞,倒放於架上,用冷水自上淋下,卽見瓶內之水,又復沸騰,其故安在?

3. 瓶塞過緊,則煑沸後,往往炸裂,其故安在?

4. 放手於口邊,徐徐哈氣則覺其煖,用力吹氣,則覺其涼,試說明之.

5. 將一滴水,一滴醇,放在掌內,能辨別何者爲水,何者爲醇否?

6. 浴後須用毛布拭乾身體,否則卽易着涼,試說明之.

7. 酒瓶必須密封,何故?

8. 用熱汽煖屋,較用熱水煖屋,效力更大,何故?

9. 夏日驟雨之前,特別悶熱,雨後始覺清涼,其故安在?

10. 玻璃杯內盛水,半滿,投冰塊入其中. (i)冰塊何以浮在水面上? (ii)杯外何以有水滴發生? (iii)冰塊熔完後,水面之高低如何?

11. 冬日因手冷,故由口吹氣入手,即覺其煖,夏日嫌茶熱,亦同樣用口吹氣向茶,即可使冷. 同一吹氣,何以效應不同?

12. 夏天市內溫暑,多有乘汽車至郊外以兜風者,其理爲何?

13. 放一小碟於抽氣機之玻璃鐘罩內,將空氣抽去後,即見碟中之水,一部分凝結成冰. 試言其故.

14. 每年十月二十二日爲霜降節. 認爲此時應有霜降下,試指出其錯誤之點.

15. 濕衣之乾,有難有易,(i)展開易乾,(ii)有風之日易乾,(iii)在太陽光直射處易乾,(iv)冬日不易乾,(v)雨天不易乾. 試說明其理由.

16. 以0° C.之冰10克,投入100 °C.之水500克中,結果成爲86.47° C.之水. 求冰之熔解熱.

17. 由同一熱源加熱於0° C. 100克之冰塊,歷4分鐘全部熔解完盡,再歷5分鐘即開始沸騰. 求冰之熔解熱.

18. 將0° C.之冰50克投入80° C.之水200克中,求結果所

得之溫度:

19. 將 $-10°$ C. 之冰 3 克投入 $40°$ C. 之水 9 克中,求結果所得之溫度.

20. 有 $0°$ C. 之冰 100 克與 $0°$ C. 之水 100 克, 欲將此混合物之溫度,昇至 $30°$ C., 須加熱若干?

21. 沸水 1 升中須加若干克之冰,用手入其內既不感其熱亦不感其冷?

22. 將 $80°$ C. 之熱水,注於 $0°$ C. 之冰塊上, 200 立方厘米之熱水,可使若干克之冰熔化成水? 計算時知 $80°$ C. 時之水之比重爲 0.97.

23. 設有 $100°$ C. 之水汽 25 克, 遇冷凝成 $15°$ C. 之水, 放出之熱若干?

24. 將 $-5°$ C. 之冰塊 10 克變成 $100°$ C. 之水汽需熱若干?

25. 以 $100°$ C. 之水汽通入 $20°$ C. 之水 500 克中, 結果水量較前增加 10 克. 求結果所得之水之溫度.

26. 以 $100°$ C. 之水汽混入 $17°$ C. 之水 3 仟克內, 結果得 $37°$ C. 之水. 求水汽之量.

27. 如知露點爲 $10°$ C., 問如何求 $20°$ C. 時之相對溼度?

第三章　熱與功

§173. 能之變化.

前於§154曾述及溫度之昇高,由於有熱進入物體,至於熱之本性,則未論及. 據氣體動力論,則氣體之壓力,由於其分子與器壁碰撞所生. 實際上,加熱於氣體,使其溫度昇高,則壓力增大,即分子之衝力亦隨之而增加. 故溫度昇高,無異乎增大其分子之動能. 又在液體或固體,則其溫度昇高無異乎增大其分子之振動能,概括言之,則熱之本身,爲分子之動能,離開物質,即無所依存. 且不僅熱而已矣,即後述之光,電等,亦無一不爲能之一態,與前述之機械能,均可互相變換,是爲能之變化(transformation of energy). 熱既爲能之一態,故亦用能之單位量度之.

§174. 熱功當量.

熱之單位用卡,但依前節所述,亦可用能之單位爾格表出. 與1卡相當之爾格數,曰熱功當量(mechanical equivalent of heat),可用圖125之器械量度之. C表卡

計,內有攪拌器,於其軸上纏線,跨過滑輪,下懸錘 w 及 w'

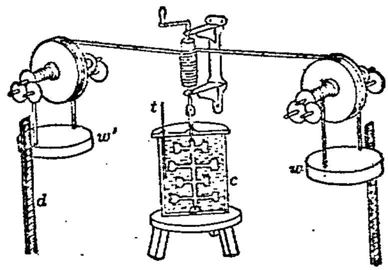


圖 125. 熱功當量之測定

命兩錘之總質量爲 m 克,錘降下之距離,由尺 d 上讀出,命爲 h 厘米,重力對錘所作之功等於 mg 爾格. 因錘降下,牽動攪拌器在水內轉動. 錘停後,攪拌器受水之內部摩擦,速度次第減小,水之溫度則漸高. 命完全停止時,水所得之熱爲 Q 卡, J 表熱功當量,則由能量不滅定律,知 $QJ = mgh$. 據精密實測之結果,

$$J = 4.2 \times 10^7 \text{ 爾格}$$
$$= 4.2 \text{ 焦耳.}$$

§ 175. 熱機.

前節所述之熱功當量之測定,卽利用機械能變換成爲熱能之一例. 反之,由熱能變換成爲機械能之例,亦頗不少.

凡將熱能改變成爲機械能之工具,通稱熱機(heat engine).

§ 176. 蒸汽機.

熱機中最常見而又最爲重要者,爲**往復蒸汽機**(reciprocating steam engine),其構造原理,如圖126所示.圓筒內之活塞P,與**推動棒**(driving rod) R相連,經**曲柄**(crank)連至轉軸(shaft) S. **偏心棒**(eccentric rod) R'與**滑動活門**(slide valve) B相連. 活門滑至左端,則N開放,令蒸汽進入圓筒右端. 活門滑至右方,則M開放,蒸汽進入左方. 當蒸汽由A而來,經N進入筒內右方時,由其壓力作用,將活塞P推向左方. 在此動作中,原在

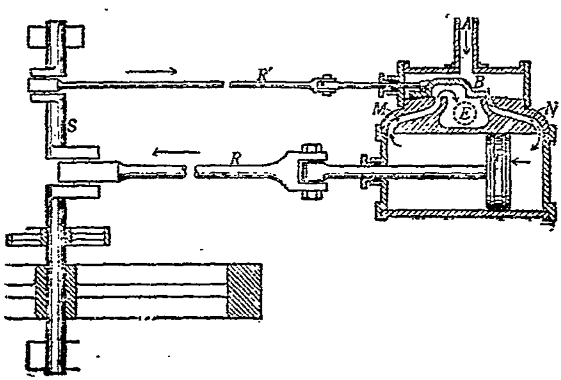


圖 126. 往復蒸汽機原理

活塞左方之蒸汽,即經由 M 通路,從排氣口 (exhaust) E,出至外面. 活塞運動,即牽動推動棒及曲柄,使轉軸發生轉動,因此轉動遂將活門 B 牽向右方. 圖中所表,係活塞滑門俱略微移動稍許距離時之情況. 滑門先將通路 N 塞斷,次又將左方與排氣口之交通阻斷. 當活塞達於左方極端時,圓筒右方又經由通路 N 而與排氣口 E 相通,新蒸汽則從 M 進入圓筒左方. 準此活塞 P 作左右往復運動,活門亦隨之左右往復不已,時而使蒸汽由右方進入,時而又使其由左方進入. 因此活塞得以往復循環,轉軸亦得以繼續其轉動.

為避免轉動不勻計,特於軸上附一飛輪以調準之又每轉動一周所歷之時間,亦有短長,故又附一節速器 (governor),以作補救,其構造如圖127要部為兩重球,在鉛直軸周,隨軸而轉. 軸轉過速,則兩球所受之離心力大,因而上昇,遲則兩球降下. 下端滑環 c 亦隨球上下滑動. 此滑環 c 經由槓桿與節汽活門相連,當 c 昇上時,蒸汽通路被其阻塞一部分,因而使軸之轉動,為之減遲. 軸轉既已減遲,則球下降,c 亦隨下,蒸汽之路又大通,轉動速度

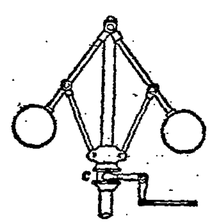


圖 127. 節速器

又復增加．故能自行調準其速度．

§177. 蒸汽輪機．

如圖 128, 於轉動輪周,裝若干葉片,使高壓蒸汽噴至其上,則輪轉動不已,其理同水輪機,僅以蒸汽代替水而已,如是者曰**蒸汽輪機** (steam turbine). 蒸汽輪機有兩種:一種係使高壓蒸汽由適當之管口噴出,因其突然

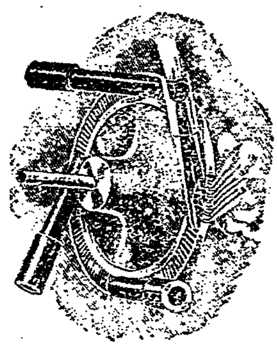


圖 128. 蒸汽輪機

膨脹,發生極大速度,與葉片相衝,使葉片轉動,此種曰**衝動輪機** (impulse turbine). 一種爲具有特殊形狀之翼片輪,介在若干固定翼片間轉動,蒸汽一面膨脹,一面由此兩種翼板間貫穿而過,此種曰**反動輪機**(reaction turbine).

蒸汽機開始本爲直線往復運動,經種種傳動,始改

爲轉動,其間不免損失一部分之能. 蒸汽輪機則不然,開始卽爲轉動,不須其他之補助,因之亦無此項損失. 故蒸汽輪機之效率,一般均較蒸汽機之效率爲高. 又蒸汽機之往復運動,每每件之以動搖,在蒸汽輪機,卽可完全避免,此又蒸汽輪機之一優點. 因此種種,故輪船上多採用蒸汽輪機

§ 178. 內燃機.

上述蒸汽機及蒸汽輪機,燃料均在汽筒之外,所需之能由外進入汽筒以內. 反之,以一圓筒而兼汽罐及圓筒之用,卽燃料亦在筒內,無須自外供給以能者,曰內燃機(internal combustion engine). 其最著名者,爲四動程機(four stroke cycle engine),如圖129. 下端爲飛輪,I

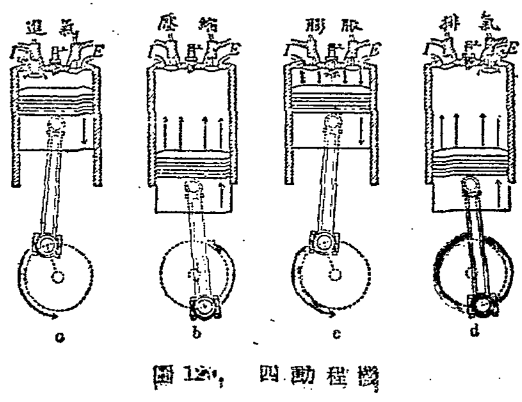


圖 129, 四動程機

表混合氣體入口,此處有活門,曰進氣活門(inlet valve), E表排出廢氣之口,亦有活門,曰排氣活門(exhaust valve). 其動作如下: (a) 飛輪轉動,活塞被提起,氣自 I 入. (b) 飛輪繼續轉動,活塞被壓下,氣體受壓縮. (c) 壓縮氣體燃燒膨脹,將活塞推出. (d) 飛輪繼續轉動,推進活塞,使廢氣由 E 排出. 經此四段動作後,一切又恢復其原狀,即完成其一循環(cycle),每一段動作,曰一動程(stroke). 在一循環中,僅第三動程,可以對外作功,其餘之三動程,均非自外供給以能不可,飛輪之用,即在於此. 飛機上因不能使用飛輪,故恆聯合數機,使其順次爆發,以供其餘各機運轉之用.

§179. 汽車.

圖 130 所示,即現今盛行之汽車(automobile),內部構造詳圖註,頗為複雜,但其主要部分,則為發動機,即利用上節所述之內燃機,使用燃料則為汽油(gasoline). 圓筒周圍有水套(water jacket),其中冷水周流不息,將圓筒內發生之熱,挾至輻射器內,再用冷却扇,使其放散於空氣中. 若無此項設備,則圓筒中活塞,因溫度昇而起膨脹,塞滿筒內,不能移動,即失去作用.

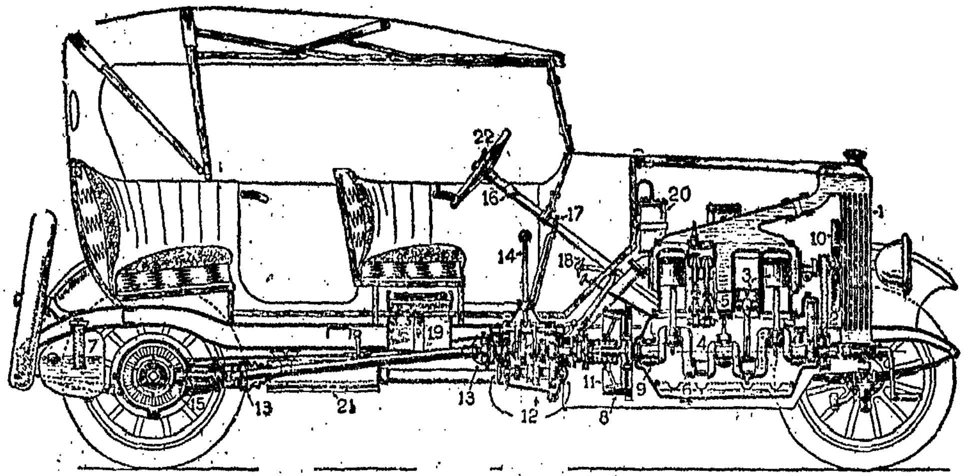


圖 130. 汽車內部之構造

1.	輻射體	(radiator)	12.	變速器	(transmission)
2.	正時齒輪	(timing gears)	13.	自由節	(universal joint)
3.	活塞	(piston)	14.	變速桿	(gear-shift lever)
4.	曲柄軸	(crank shaft)	15.	主發動機關及小齒輪	(main driving gear and pinion)
5.	活門桿及推動桿	(valve stem and push rod)	16.	電開關	(electric control switch)
6.	油池	(oil reservoir)	17	緊急輪掣槓桿	(emergency brake lever)
7.	汽油箱	(gasolin tank)	18.	脚踏輪掣槓桿	(service brake foot lever)
8.	飛輪	(fly wheel)	19.	蓄電池	(storage battery)
9.	主後軸承	(main rear bearing)	20.	眞空饋電組	(vacuum feed system)
10.	冷却扇	(cooling fan)	21.	減聲器	(muffler)
11.	離合器	(clutch)	22.	轉向輪	(steering wheel)

問題第十四

1. 試舉三例表示熱能變爲機械能.

2. 試舉三例表示機械能變爲熱能.

3. 地球上一切能之源,均出於太陽,試舉數例說明之

4. 飛機上何以不用蒸汽機而用汽油機?

5. 使水一磅昇高華氏一度所需之熱,定爲英國熱單位,通常即以B. T. U.表示之. 求1 B. T. U.等於若干卡?.

6. 前題之1 B.T.U.與若干英尺磅之功相當? 即求英制之熱功當量.

7. 10仟克重之物體,以200每秒米之速度落下,與地面碰撞,所生之熱量幾何?

8. 作熱功當量之實驗時,用質量30仟克之錘,從20米高處落下,可使2仟克之水,昇高溫度幾度?

9. 空中雨滴落至地面後,其溫度昇高1° C.,求水滴落下之高.

10. 有0° C.之冰塊,從高處落下,進入0° C.之水中,其全質量之$\frac{1}{10}$因而熔解成水. 求落下之路程.

第四篇　聲學

第一章　波動

§180. 波動.

彈性體之一部分受外力作用,則生一定之應變,其周圍部分,同時均受此項應變所引起之彈力作用,各生類似之應變. 準此,則一應變在彈性體內,可由近漸及於遠. 外力如為週期性,則傳來之應變,亦為週期性,此時彈性體內各部分,均各作其週期性之振動,僅各點之相,次第落後而已. 如是之運動,曰**波動** (wave motion); 發生波動之彈性體,曰**介質** (medium), 波動由近及遠,曰**傳播**(propagation), 表示傳播方向之線,曰**波射線** (wave ray).

§181. 横波.

繫繩於柱,用手曳平,略向上下搖動,繩曲而作波形,沿繩而進. 假定在繩上取等距離之點如圖131之I,II, III,……, IX 等. 先使其第一質點 I, 向上運動,其週期爲 T. 由此經歷時間 $\frac{1}{8}T$ 後,第二質點 II, 繼作同樣運動. 再歷 $\frac{1}{8}T$, 卽由開始時共歷 $\frac{2}{8}T$ 後,第三質點 III,又作

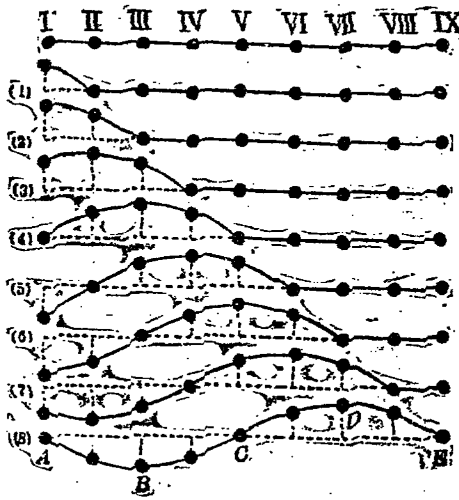


圖 131. 橫波

同樣運動. 以下仿此,至第一質點完成一振動,復歸原位時,其他各質點之排列狀況,如(8). 用曲線連結各質點,成一正弦曲線,與繩上出現者同,是爲**波形曲線**(wave curve). 波形雖沿繩傳播,但各質點僅以其平衡位置爲中心,在波射線之垂直方向上往復振動,並不隨波前進. 凡質點振動之方向與波射線垂直之振動,曰**橫振動**

transversal vibration),由此所生之波,則曰**橫波**(transversal wave). 波形上最高之點曰**波峯**(crest),最低點曰**波谷**(trough). 相鄰兩同相點間之距離如 AE,曰**波長**(wave length),以 λ 表之. 命 v 表波形傳播之速度,n 表質點之頻率,則其關係成爲

$$v = \frac{\lambda}{T} = n\lambda.$$

§ 182. 縱波.

如圖 132, 各質點之排列,仍與前同,但質點振動之方向與波射線一致,經歷一週期 T 後,排列狀況,如(8);各

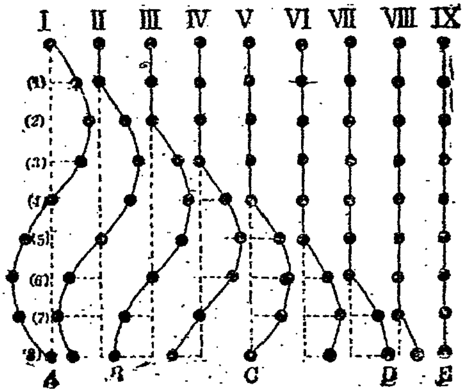


圖 132. 縱波

質點仍在其水平位置上,但相互間之距離,有遠有近,各不相同. 凡如是質點振動之方向,與波線一致之運動,曰**縱振動**(longitudinal vibration),由此所生之波曰**縱波**(longitudinal wave). 如 *BCD* 間,質點排列稀疎處,曰**疎區**(region of rarefaction),而 *AB* 及 *DE* 間排列稠密處,曰**密區**(region of condensation). 故縱波亦曰**疎密波**(wave of condensation and rarefaction),其波長,週期,頻率,及傳播速度之關係,完全與橫波處相同.

§ 183. 水波.

投石於水,卽生輪狀之凹凸波紋,傳於四方,是爲**水波**(water waves). 凡在水平面上之質點,無論移上移下,重力之作用,均必使其恢復原位,遂成振動,由近而遠,卽成水波. 凡如此類專由重力作用而生之波,曰**重力波**(gravitational waves), 如海面出現之洪濤巨浪,卽其一例. 又液體表面除重力作用而外,尚有表面張力作用亦爲波之成因,專由表面張力作用而生之波,稱曰**表面張力波** (capillary waves), 因其波長特小,故又曰**紋波**(ripples).

水波之各質點,均在包含波線之鉛直面內,沿一定

之曲線軌道運動．水深則曲線爲圓,淺則爲橢圓．其狀況頗爲複雜．在波峯之質點,運動方向與波之進行方向一致;在波谷者,則與之相反．

§184．波之干涉．

波長振幅均同之兩波,同時傳達於介質中之一點如兩波之相,亦復相同,則合成結果,當使振動加強一倍反之,如兩者之相,彼此相反,則合成結果,使振動成爲零波雖前進不已,而此等合成結果等於零之各點,恆靜止不動．凡如此類,由兩波合成使一點靜止或加強其運動之現象,曰**干涉**(interference)．試就水波說明之．於靜止水面上之兩點 A 及 B,同時各投一小石,則由 A, B 發出之兩水波,相均相同．如用實線表波峯,虛線表波谷,其狀況當如圖 133 所示．峯與峯相合於 C, 谷與谷

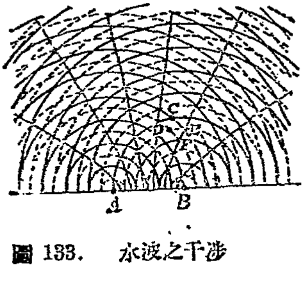


圖 133．　水波之干涉

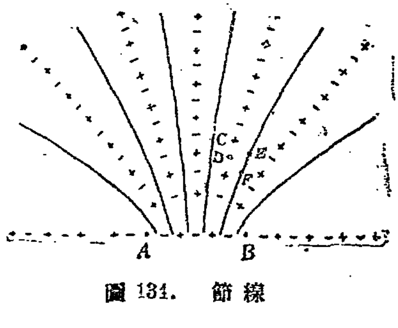


圖 134．　節線

相合於D,同屬增強. 至於E及F等,則爲峯谷相合之點,寂然不動. 由此再歷$\frac{1}{2}T$以後,C成爲兩谷相合,而D則成爲兩峯相合之點,E,F依然爲峯谷相合處. 凡如此種寂然不動之點,曰節點(nodal point),連合節點之曲線,曰節線(nodal line),與此相對,如C,D等振動加強一倍處,曰波腹(loop). 如以＋表波峯,－表波谷,實線表節線,則其位置如圖 134 所示.

§185. 惠更斯原理.

波在介質內進行時,屬於同相之各點相連而成之面,曰波前(wave front),波前進行之方向卽波射線. 在組織均一之介質內,由一點發出之波,其波前爲球面,波射線則與此球面垂直. 在組織不均之介質內,波前通常不能成爲球面,波射線亦不與之垂直. 波前爲球面者,曰球面波(spherical wave),其爲平面者,曰平面波(plane wave) 如圖 135, O表波源,由此發出之波,經歷若

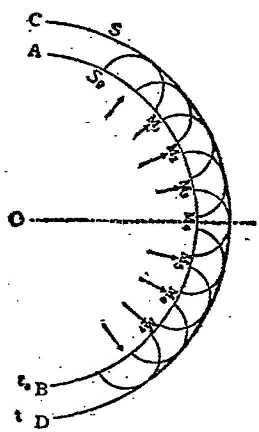


圖 135 惠更斯原理

干時後,達於S_0,此時波前上之各點,如M_1, M_2, M_3,……等均可看作新波源,各自發出一相同之**元波** (elementary wave),再經若干時後,各元波各達於相當之地點. 試作一曲面,與此等元波相切,如S,此S即新得之波前,與逕由O發至S者相同. 用此法以研究波動,極爲方便,是曰惠更斯原理(Huyghens' principle).

186 波之反射.

設有兩種介質,其境界面爲AB,如圖136. 由第一介質中O點發出之波,進行至AB,分成兩部分. 一部

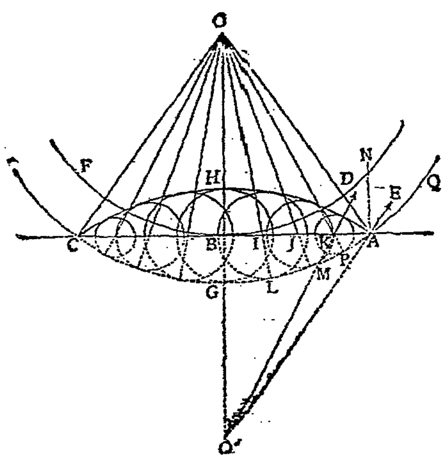


圖136. 波之反射

分折回第一介質內,一部分則改變方向而入第二介質中. 此現象可由惠更斯原理說明之. 波在第一介質中時,爲球面波,假使無第二介質存在,則行至B,仍不改其爲球面,更經若干時,應達於AGC. 實際上因有境界面AB存在,故成爲對於AB而與AGC作對稱形之球面,折回第一介質,此球面之中心爲O',即O對於AB之對稱點. 如以B, I, J, K等爲源點,以BG, IL, JM, KP爲半徑,按惠更斯原理,各作元波,則其切面即折回之球面. 最初自O向AB發出之波,其波射線OA,稱曰**入射線** (incident ray); 折回第一介質之波,其波射線AE,曰**反射線** (reflected ray); 入射線與境界面之交點,即A,曰**入射點** (point of incidence); 在入射點引境界面之法線AN. 此AN與入射線包含之平面,曰**入射面** (plane of incidence); AN與反射線包含之平面,曰**反射面** (plane of reflection); 入射線與AN間之角OAN,曰**入射角** (angle of incidence); 反射線與AN間之角NAE,曰**反射角** (angle of reflection). 因三角形OBA, $O'BA$相等,故可證明入射角等於反射角,兩者均在同一平面內,是爲**波之反射定律** (law of reflection of waves).

§187. 波之折射.

前節所述者,爲由境界面折回第一介質中之一部分,尚有他一部分改向進入第二介質中,此項現象,曰折射 (refraction). 圖 137 之 DM 表入射波之波前, CD, EF,

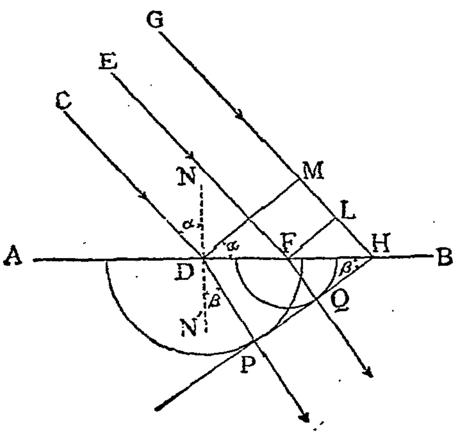


圖 137. 波之折射

GH 等爲波射線. 由 M 點發出之元波,以第一介質所特有之速度 v_1 繼續前進,經時間 t 而達於 H, 由 D 出發之元波,則以第二介質所特有之速度 v_2 向 DP 進行,經時間 t 而達於 P. 卽 $MH=v_1t$; $DP=v_2t$. 其在 D 及 H 兩點間之各點發出之元波,當在此兩者之間. 包含此等元波之波前,爲自 H 引至由 D 發出之元波之切面 HQP, 卽

折射後之波前,其波射線 DP, 曰折射線 (refracted ray); 折射線與法線 NN' 所定之平面,曰折射面 (plane of refraction);折射線與法線間之角 $N'DP$, 曰折射角(angle of refraction). 因

$$\angle NDC = \angle MDH;$$

$$\angle PDN' = \angle PHD,$$

故如命 α 表入射角, β 表折射角,則

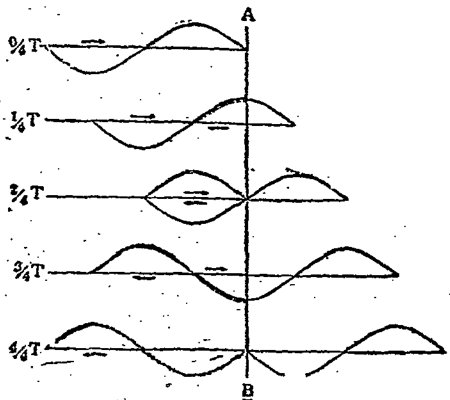
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = \mu$$

式中之 μ 爲一常數,其值由 v_1 及 v_2, 卽兩種介質之性質而定,與入射角之大小無關,此常數曰折射率 (index of refraction). 換言之,入射面與折射面恆在同一平面上,入射角之正弦與折射角之正弦之比等於一常數,其值由介質之種類而定,與入射角之大小無關,此關係曰波之折射定律(law of refraction of waves).

如 $v_1 > v_2$, 則第一介質稱爲較第二介質稀疎 (rare); 反之,如 $v_1 < v_2$, 則第一介質稱爲較第二介質稠密(dense). 此項稀疎與稠密之分,純就介質傳遞波動之性質而言,與介質本身之密度不同,須注意之.

§ 188. 反射波之相.

因介質疎密不同,故由境界面反射之波,其相亦異.茲先論由密入疎之波;其反射波之相,與入射波相連續,不生間斷. 圖 138,在境界面 AB 兩方之介質,左密



稠密　　稀疏

圖 138. 由密入疎之反射波

右疎,波由左向右,開始時如第一排,由是每經歷 $\frac{1}{4}T$ 之後,各如以下各排,實線表入射波,點線表反射波. 如將入射波在 AB 右方繼續畫去,沿 AB 將圖折轉,則即與反射波完全相重.

次論由疎入密之波,其反射波之相與入射波不相連續,須受 $\frac{1}{2}\lambda$ 之落後 (lag). 圖 139 之 AB 兩方介質,左疎

右密,波仍由左向右,其各瞬間之狀況,如各排.如將入射波向AB右方繼續畫去,且在AB右邊曲線中,從AB起

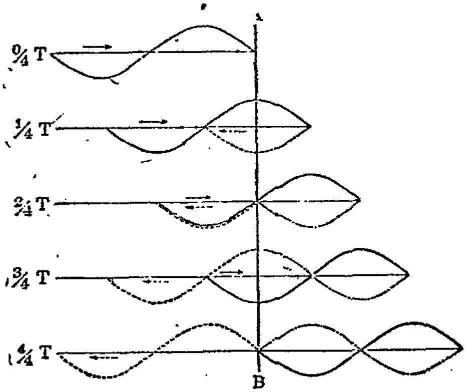


圖 139. 由疏入密之反射波

抽去長$\frac{1}{2}\lambda$之一部分,然後將其餘部分移前與AB相接,再沿AB折轉,即與反射波完全相重.

§ 189. 定波.

設有波長相等之兩波沿反對方向互相會合時,其合成波中現若干靜止不動之節點,在節點間之各點雖仍作同樣振動,但並不見波形前進,是曰**定波**(stationary waves),以其位置一定不變也.在兩種介質之境界面,入射波與反射波相合,即成為定波.

由密入疎時,反射波與入射波同相,而進行方向則相反,其合成結果如圖 140. 境界面 GH 兩方之介質,左密右疎,實線表入射波,點線表反射波,粗線表合成波,K_1, K_2 爲節點,B_1, B_2, B_3 爲波腹. 卽境界處成波腹;由此至各節點之距離爲 $\frac{1}{4}\lambda$, $\frac{3}{4}\lambda$,……, $\frac{2n+1}{4}\lambda$,式中之 n 爲零或爲正整數.

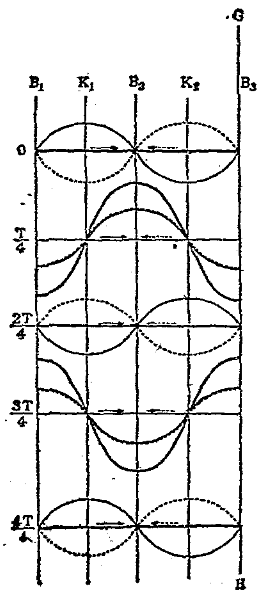


圖 140. 由密入疎之定波

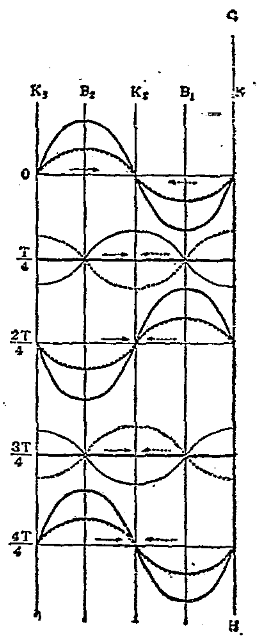


圖 141. 由疎入密之定波

由疎入密時,方向及相均異,結果如圖 141 所示.此時境界面 GH 成節,由此至各節點間之距離為 $\frac{2}{4}\lambda$, $\frac{4}{4}\lambda$, ……, $\frac{2n}{4}\lambda$.

如僅有第一介質存在時,其端面 GH 曰**自由端**(free end);如第二介質之密度極大,即第一介質之端面曰**固定端**(fixed end). 故從自由端反射折回之定波,其自由端成波腹;從固定端反射折回之定波,其固定端成節.

問題第十五

1. 春日郊外散步,見麥田中,有微風吹過時,麥穗起伏,成為波浪形狀,試說明其作用;又屬於縱波或橫波?

2. 設有一物體,每秒可振動 150 次,其每一波長為 2 厘米,求其速度.

3. 投石於水,現為波紋,每相鄰兩波峯間之距離為 2 厘米,歷 5 秒鐘而達於對岸. 兩岸相隔 4 米,求此時水分子之頻率.

4. 設有頻率等於 250 之物體,以 340 每秒米之速度傳播而去,其波長如何? 又如速度不變,而波長為 2 米,則其每頻率若干?

5. 有速度 450 每秒米之波,其波長 6 米. 求其週期及

頻率.

6. 設有頻率爲500次之波,於5秒鐘後應至1700米之遠,求波長.

第二章 聲波

§ 190. 聲.

通常所謂之聲(sound),發源於物體之振動,引起其周圍介質之波動,傳播至耳,始感其音. 此項振動之物體,曰發聲體(sounding body). 發聲體之振數每秒不及20次或超過40000次以上,即波長在16.54米以上或8.3毫米以下者,雖傳入耳中,亦不能引起音感. 音樂中之音,範圍更狹,其振數每秒在30次至4000次之間,即波長在於11.02米至8.3厘米之間. 又通常人類之聲帶所能發出之聲,範圍更在此下,振數每秒不過80次至1000次,波長在4.13米至33.1厘米之間而已. 研究聲之學科,曰聲學(acoustics).

§ 191. 聲波及其速度.

如圖142,將螺簧 AB 之一端 A 掛在音叉(tuning fork)之右方叉股(prong)上,他一端 B 掛在壁上. 敲音叉使其左右振動,即見螺簧中,發生稀疎與稠密之部分,由左而右,次第傳遞而過. 如將螺簧取去,而以空氣代之,其

情形亦同．每逢叉股由其平衡位置向右振動時,其鄰接之空氣層受壓而密．空氣具有彈性,既密之後,又必膨脹,故轉瞬次層之 c, 繼之成密．準此,則稠密部分 c

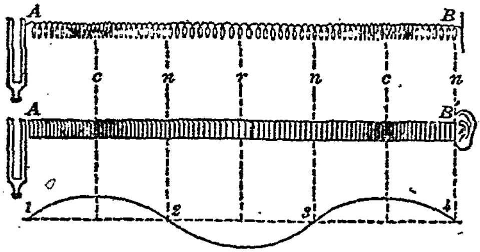


圖 142. 聲波之傳播

及稀疏部分 r 次第向右傳播而去．同樣,當叉股由平衡位置向左振動時,疏部次第向右傳播而去．換言之,AB間之空氣,因叉股之振動,遂呈時疏時密之狀態,次第向右移動,此種疏密波,即聲波(sound wave)．

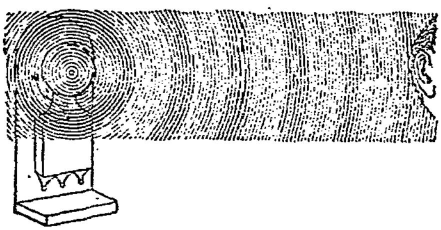


圖 143. 鈴聲傳播至耳之狀況

圖中下端由 *1* 到 *2* 之波峯表稠密部分,由 *2* 到 *3* 之波谷,表稀疎部分. 又曲線上 *1*, *2*, *3*, *4* 等各點均在通過 *1 2* 各點之水平直線上,表示此各點與通常未振動時之狀況相同,無疎密之分,卽其振動極弱;反之如 *1* 與 *2* 之中點,*2* 與 *3* 之中點,均與水平直線相距極遠,表示此等點或則最密,或則最疎,卽其振動極強. 此種振動之振幅,則由各質點移動之距離而定,亦卽由曲線與水平直線間之垂直距離而定. 通常任何發聲體發出之聲波,亦與此相同. 此項聲波達於耳內,始能聞知其聲. 如圖 143 所示. 假使耳與鈴之間,無傳播聲波之介質存在,鈴縱照常振動,亦將聽而不聞矣. 真空中鈴聲不能傳出,卽由於此.

傳聲之介質,不限於空氣,任何物質,均能傳播,但均不及空氣之爲重要. 據實驗得知,在 0°C. 時,空氣中聲波傳播之速度爲

$$v = 331 \text{ 每秒米.}$$

如空氣之溫度不同,則聲波傳播之速度,亦隨之而異. 每溫度昇高 1°C.,其速度增加 0.6 每秒米. 故若命 v_t 表在 t°C. 時之聲波速度,則得

$$v_t = 331 + 0.6\,t.$$

通常之温度爲15°C.附近,故常温中之聲波速度,大致爲 340 每秒米.

在其他之介質中,聲波傳播速度,大都較在空氣中更快. 例如在水中,聲之傳播速度,等於在空氣中之4.5倍;在鋼中則等於在空氣中之15倍.

§ 192. 回聲.

前在波動論中所述之反射定律,對於聲波當然可以完全適用. 由一點發出之聲波,達於境界面時,宛如自其對稱點發出者然,折而復回. 是爲**聲之反射** (reflection of sound). 立於懸崖絕壁前大聲而呼,此項折回之聲卽可得聞,是曰**回聲**(echo). 空氣亦有疎密層之分;聲波傳至此等分界處,應起相當之反射. 晝間因受熱不同,反射次數頗多,轉難察覺;夜間氣溫,大致一樣,反射次數較少,故易聞知. 夜間可聞遠處傳來之音,卽屬此理. 又霧天較晴天,聲之傳達距離略遠,其理亦同.

§ 193. 聲之折射.

又波之折射定律,對於聲波,亦完全適用. 遵好斯(Sondhause) 用橡皮袋,製成透鏡形,內盛二氧化碳,在其

軸上一邊放錶,則於他一邊之共軛點(參照§229)可聞其音. 是爲聲之折射(refraction of sound). 又赫則胡斯(Hesehus)用兩鐵網,一作球面形,一作平面形,相合而成一透鏡狀之盒,內塡絨毛,在其軸上一邊鳴笛,則音集中於他一邊之共軛點上,可用靈焰(sensitive flame)檢出之. 靈焰係使高壓之煤氣,自玻璃管尖端噴出,用火燃之,其焰細長,約及40厘米之高,直立不動. 遇有聲波傳到,焰卽縮短,同時焰幅增寬,發爲尖銳之聲. 此焰對於聲波感覺極其靈敏,故名.

§194. 聲之性質.

物體之振動,有漫無秩序,及紀律整齊之分,由此發生之聲,亦可大別爲二. 例如雷鳴礮響以及車輪轆轆之聲,屬於前者,令人聞之,感其不快,是曰噪聲(noise). 反之,如琴瑟簫笛之聲,屬於後者,令人聞之,感覺爽快,是曰樂音(musical tone). 噪聲之振動旣極雜亂,又無若何重要,故聲學所研究者,概限於樂音. 樂音之特性有三,曰響度(loudness),音調(pitch)及音品(timbre),分節述之如次:

§195. 聲音之響度.

擊鼓鳴琴時,用力愈強,音愈宏大,表示宏大之量,曰響度(loudness)　響度無嚴密方法以作比較,但可用傳至耳鼓之聲波之動能決定之.　按在一波前上之質點總數,或其全體之質量,應與球之半徑之平方爲比例.故一質點,或波前單位面積上之質點之振動能,與球半徑之平方爲反比例,因而振幅亦與球半徑爲反比例.故由一點發出之音,其振幅與距離爲反比例,振動能則與距離之平方爲反比例.　因此,如於聲波之射線(sound ray)之垂直面上,取單位面積,於單位時間中經此面積上通過之能,即爲響度.

§196. 音調.

音之高低,曰音調(pitch),由頻率之多寡而定.　欲量度音之頻率,可用圖.144 之測音器(siren).　此器之要部爲一金屬圓盤 D,沿圓周有等距離

圖 144.　測音器正面

之小孔,全盤可繞軸 A 轉動自如. 盤下有一圓筒,其蓋上亦有小孔,數與 D 上者同,但兩者均非直立,其傾斜又互相反. 軸 A 上端有螺旋與轉動計相聯,如圖 145,轉動

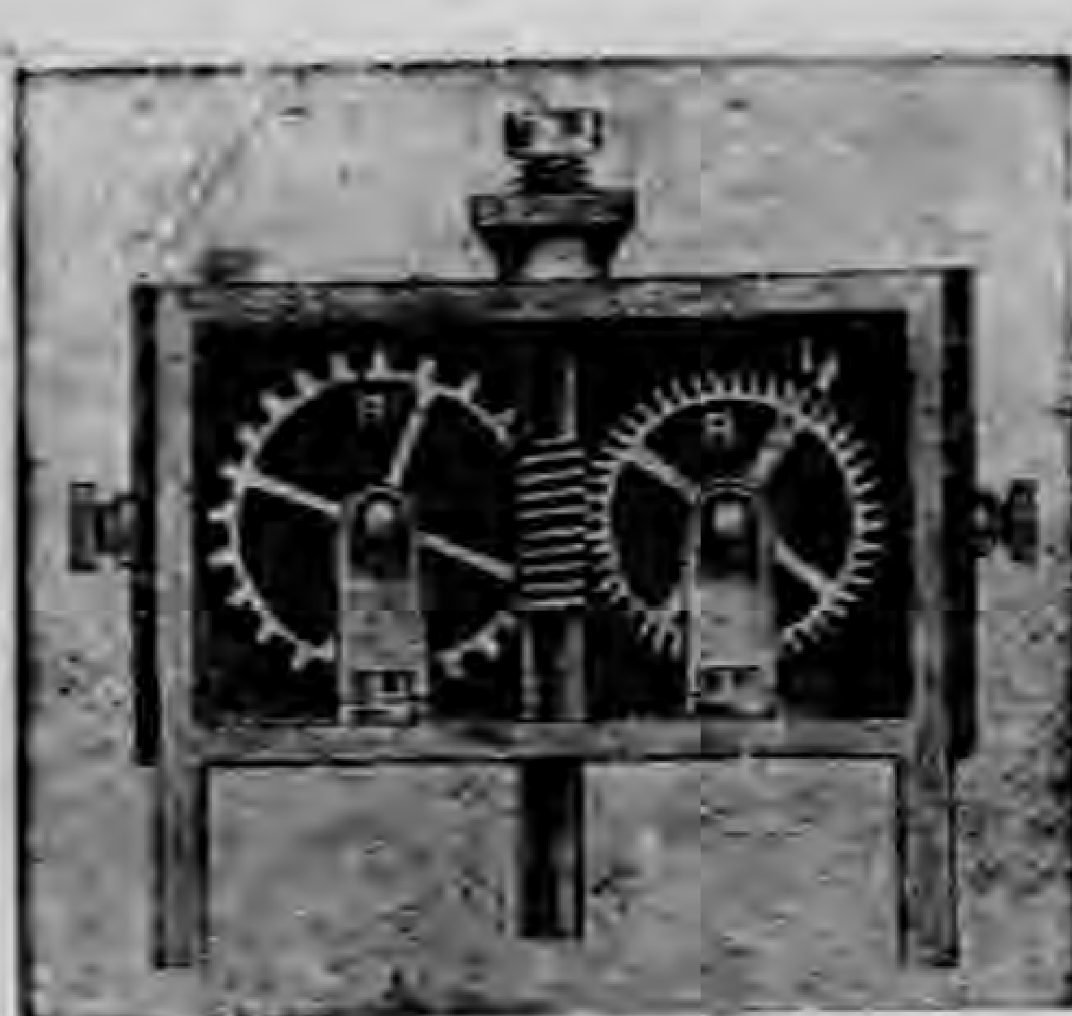


圖 145. 測音器背面

次數可由前面之指針讀出. 用時由下管送入氣流,經 C 之孔道噴出,衝動 D,使其轉動如是兩孔相重則氣流通過,相錯則氣流塞斷. 通則孔上之空氣收縮,塞則膨脹,一縮一脹,爲一次振動. 如孔數爲 n,軸在 t 秒內轉動 N 次,則發出之音之頻率等於 $\frac{nN}{t}$.調準送氣量,可使此音與欲測者同高,則由指針,可讀出其頻率.

上述方法,非有經驗,不易辨別兩音是否完全同高,故多用圖 146 所示之器,例如欲量度音叉之頻率,則於叉股上裝一小針,與玻璃平板上所燻之油烟接觸. 推動玻璃板,使其在槽上作水平方向之滑動,此叉股上之針尖,卽在烟板上晝成一條連續直線. 一方面在支架上,有一擺垂下,擺之下方亦有一針尖,與煤烟板相接觸配準擺之懸點,先將其每 1 分鐘內之振動次數,精確量

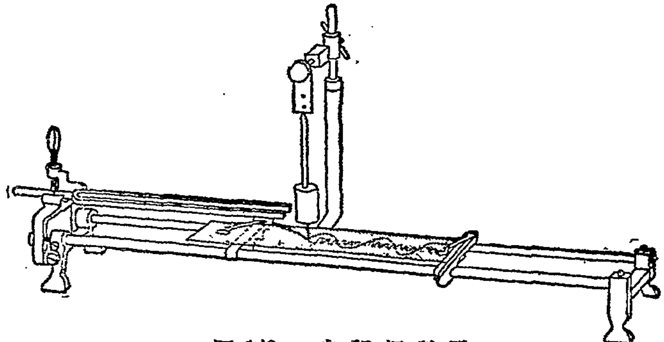


圖 146. 自記振數器

出,由此卽可推算其振動一次所要之時間. 擺之振動方向,與玻璃板滑動方向,恰相垂直,故擺振動中若將烟板推動,則擺下之針尖,卽在煤板上畫成正弦曲線. 同時如再令音叉振動,則叉股上之針尖,亦畫成蜿蜒之小波線,如圖中所示. 大者爲擺下針尖所畫,用以計時,小者卽音叉之針尖所畫,兩者相並而立,以資比較. 每秒間音叉振動若干次,由此圖卽可讀出.

§197. 音品.

各種發音體發出之音,雖響度及音調相等,亦自各別,此種差異,歸之於音品(timbre)不同. 任何樂音,只須精密觀察,卽可見其頻率,決不止一種,如其主要之頻率爲 n, 則同時必有 $2n$, $3n$, $4n$,……等之音,混在其中. n 之

音曰基音(fundamental tone), $2n$, $3n$, $4n$,……等之音,則曰泛音(overtones). 僅有基音而無泛音時,其振動可用正弦曲線表出,音亦特別清朗,是曰單音(simple tone) 反之,有泛音混入者,曰複音(compound tone). 發音體所發之音,概為複音,音品有別,即由於此. 圖 147 為三種樂器發同一響度同一音調之音時,所作之振動. a 為音叉所發者, b 為提琴所發, c 為開管所發. 此種複音,可分解成為若干單音,各成分單音之響度及音調,各不相同. 其中以基音之振幅最大,遠在其他之上,複音之音調,即此基音之音調.

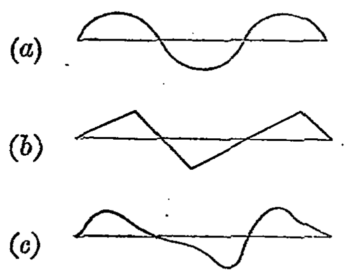


圖 147. 音 品

§ 198. 聲之干涉.

聲波亦有干涉現象,在干涉處,無音可聞. 圖 148 之 $ACEPB$ 為一曲管,其兩端經管套 K 及 K' 與右邊之曲管 D 相連,且能在套內自由

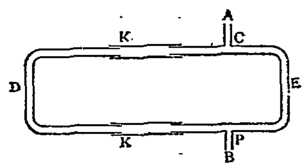


圖 148. 干涉管

進退,使 CDP 之長,得以任意變更. 於 A 前放一振動中之音叉,聲波由 A 傳入管內,至 C 分爲兩途,一沿 CDP,一沿 CEP 進行,至 P 復合爲一. 因兩路程長短不同,復合時兩波之相,不能一致. 如兩路程之差適等於半波長,復合時兩波之相正相反對,發生干涉,在 B 無音可聞. 如兩路程之差,適等於波長,則兩波之相,恰好一致,發生加強,在 B 可聞加強一倍之音. 故如沿管套使曲管進出,在 B 點卽可聞見或強或弱之音.

音叉發音時,其兩叉股(如圖 149 之 A 及 B)間之距離,時遠時近,變動不已. 其中間一點 C 成稠密狀態時,兩外側之 E 及 F,成爲稀疎. 故由 C 發出之波,與由 E 及 F 發出者恰相反,因之,凡在曲線 MAN 及 $M'BN'$ 上之各點,均成干涉,無音可聞.

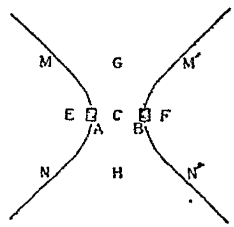


圖 149.　音叉之干涉

§ 199. 拍.

頻率相差無多之兩音叉,同時振動,則由干涉結果,成爲時強時弱之音,曰拍(beat). 試命 N 及 $N+n$ 表兩音叉之頻率,兩者成同相時,空氣振動之振幅最大,其音

亦最強. 由此歷$t=\frac{1}{2n}$秒後,一叉完成$\frac{N}{2n}$次,他一叉完成$\frac{N}{2n}+\frac{1}{2}$次之振動,其相恰相反,故空氣振動之振幅最小,音亦最弱. 如由最強時歷$t=\frac{2}{2n}$秒後,則一叉完成$\frac{2N}{2n}$次,他一叉完成$\frac{2N}{2n}+1$次,其相又復一致,音又最強. 準此,每逢$t=\frac{2}{2n}, \frac{4}{2n}, \frac{6}{2n}, \cdots\cdots, \frac{2n}{2n}$秒時,均成最強;$t=\frac{1}{2n}, \frac{3}{2n}, \frac{5}{2n}, \cdots\cdots, \frac{2n-1}{2n}$秒時,均成最弱. 即在1秒間內共發生$n$次之强大(waxing)及弱小(waning). 換言之,1秒時內之拍數,等於兩音叉之頻率差. 圖150之

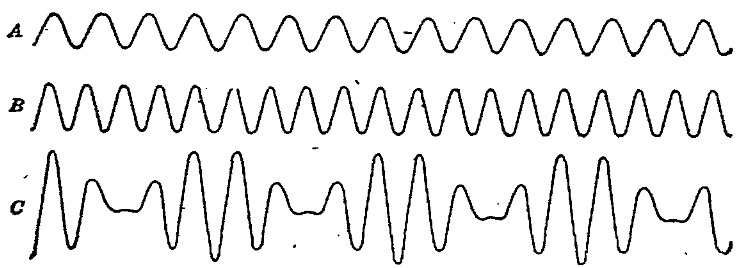


圖 150. 拍之成因

A表每秒振動15次之音叉,B表每秒振動19次之音叉,C表合成之音. 即$N=15, n=4$時之狀況,可知每秒之

拍數等於 4.

§ 200. 共鳴.

發音體遇有頻率相同之音波傳來,雖無其他原因,亦漸能自行振動發音,是曰**共鳴** (resonance) 或稱**共振**. 由共振而發音之物體,曰**共振器**(resonator). 圖 151 爲赫爾姆霍斯**共振器**(Helmholtz's resonator),爲黃銅球殼,有大小兩孔,其大孔 a 備接收傳來之聲波,小孔 b 備插入耳道,以察其由共振而生之音. 器內空氣雖有各種**固有音**(proper tones),但實際上僅最低之音特別顯著極易察知. 故傳來聲波中,如其含有此器之最低音,即生共振,否則寂然. 利用此器,可將樂音中所含之各種單音,分析而出.

圖 151. 赫爾姆霍斯共振器

問題第十六

1. 試說明下舉各種聲音,由何而來? (i) 放爆竹, (ii)海岸濤聲, (iii)風吹電線, (iv) 拍手,

2. 設有一手鎗,一停錶,一溫度計,如何量度湖面之寬?又應如何計算?

3. 雷聲何由而出?

4. 雷聲何以殷殷不絕?

5. 有人見電閃後,歷5秒鐘始聞雷鳴,求雷與人之距離.

6. 夜半鐘聲隔半分鐘後,始到客船. 求船與廟之距離.

7. 遠望輪船放出白煙後又2.6秒鐘,始聞汽笛之聲,求輪船與此人之距離.

8. 前題之氣溫如爲30° C. 時,距離幾何?

9. 在船上放礮,於6秒鐘後,聽見由對山折回之回聲,此時之溫度爲62° F. 求對山與船之距離.

10. 用圖148所示之干涉管,檢查頻率等於425之音叉,欲聽見最強之音,兩管之差應爲若干?

11. 用頻率等於250之音叉,作干涉管實驗,求得兩管相差60厘米時,其音最弱. 求音之速度.

12. 用一已知頻率爲130之音叉,與一未知頻率之音叉比較,每1分鐘內,數得拍音120次. 求第二音叉之頻率.

13. 測音器之孔如有16個,在20秒內,測音器共轉300次,與比較之音合成結果,發生60次之拍音. 求未知之音之頻率.

第三章 發音體之振動

§201. 絃之橫振動.

樂器中用絃(string)發音者為數最多. 絃為兩端張緊之線,其由獸類之腸製成者,曰腸膜絃(catgut string),其由金屬製成者,曰金屬絃(metal string). 用弓(bow)拉過,或用指撥槌敲,均可使其發音.

研究絃之振動,以用圖 152 之絃音計 (sonometer)

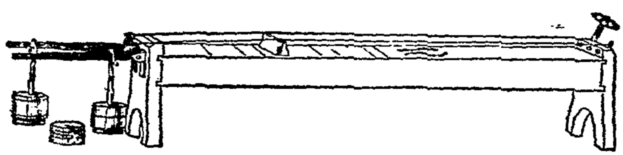


圖 152. 絃音計

為便. 下端為一空箱,曰共振箱(resonance box),其上有支柱,曰絃柱(bridge),可以自由移動. 上張絃一,其一端固定,他端用砝碼墜下. 撥絃使其振動,則以絃柱及固定端作節點而成定波. 由實驗測得所發之音之頻率(1)與絃之長度成反比例,(2)與砝碼重量,即絃之張力之平方根成正比例,(3)與單位絃長之質量之平方根

成反比例．當全絃作整個振動，即僅兩端成節時，此時所發之音爲基音，如圖 153 之 N_1．如分作兩段振動，即中央亦成節點時，所發之音，爲第一泛音，如 N_2，其頻率 N_2 應爲基音頻率 N_1 之二倍．如分作三段振動時，發第三泛音，如 N_3，其頻率爲 N_1 之 3 倍．

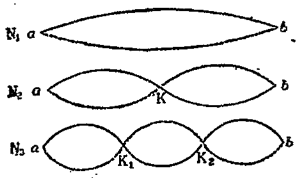


圖 153. 絃之振動

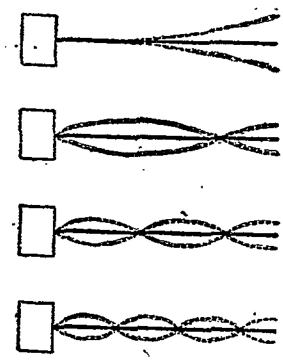
§ 202. 棒之橫振動.

絃若不受張力作用，則對於形狀變化，不呈彈性，故無橫振動．棒 (rod) 則不受張力，亦具有形狀變化之彈性，故能發生橫振動．棒之橫振動，較絃複雜；據實測得知，其基音之頻率與音速成正比例，與振動方向之厚成正比例，與棒長之平方爲反比例，與棒之廣狹無涉．

又棒之支持方法，與其振動亦有關係，分述之如次：

(1) 一端固定他端自由之棒：其振動之狀况如圖 154 所示．其泛音之頻率，與通常不同，增加極速，不能成爲基音頻率之整數倍．風琴所用之簧 (reed)，即此種棒之應用．又人類發音之機官，爲皮膜兩條，曰聲帶 (vocal chords)，其作用亦與簧同．

(2) 兩端自由之棒:　其振動狀况如圖 155, 樂器中之八音琴,係將玻璃板,或木板,鐵板等,架於兩平臺上,以槌擊之作聲,卽其實例.



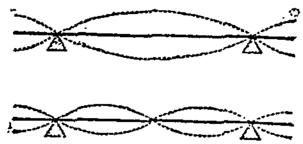


圖 155.　兩端自由之棒

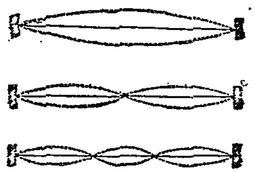


圖 154.　一端固定之棒

圖 156.　兩端固定之棒

(3) 兩端固定之棒:　其振動狀况如圖 156, 頻率與兩端自由時同.

§203.　音叉.

圖 157 之 a, 表兩端自由之棒,當其發基音振動時,應有兩節點. 如將此棒,自其中點漸次折彎,如 b, c, d 等,其兩節點亦漸次接近. 在 d 之中部附柄,卽成音叉;用弓沿其一端拉過,則振動如 e, 發基音. 如在其中央近傍拉過,則其振動如 f, 發第一泛音. 按一切樂器,鳴

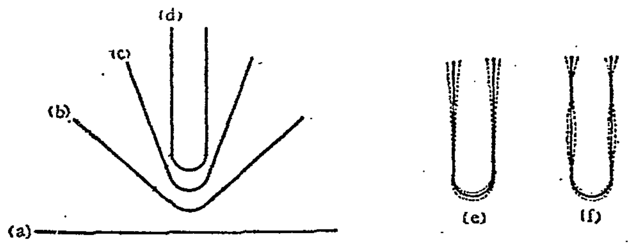


圖 157. 音叉之振動

奏時,均必有若干泛音混入,音叉獨能免此,恆發單音,故在聲學上極爲重要. 又音叉通常均裝在木箱上,使箱內空氣與之共振,尤以氣層之長等於音叉所發聲波之波長之四分之一時爲最佳.

§ 204. 棒及絃之縱振動.

絃及棒除橫振動外,又可作縱振動. 如用松香擦過之紙,沿絃音計上緊張之絃之方向擦之,則發尖銳之音. 又用酒精浸濕之布,擦玻璃棒,或塗松香之牛皮擦金屬棒,亦然.

棒作縱振動時,各質點均沿棒之方向往來略爲移動,如將此項移動沿垂直方向表出,其情況當如圖 158 所示. 振動最盛處如(1)(2)之自由端及(3)之中點,成爲波腹;靜止處如各固定點,成爲節點,與橫振動時同. 茲

更就圖中所示三種情形,分別論之:

(1) 一端固定之棒: 發基音時,其固定端成節,自由端成波腹. 其泛音之頻率爲 $3n, 5n, \cdots\cdots$ 等.

(2) 中央固定之棒: 此時摩擦自由端近傍,則發基音,中央成節,兩端成波腹,其基音之頻率爲 n',則其泛音之頻率爲 $2n', 3n', 4n', \cdots\cdots$ 等.

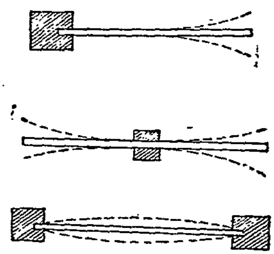


圖 158. 棒之縱振動

(3) 兩端固定之棒: 擦其中央,則發基音,兩端成節中央成波腹,基音之頻率,與(2)完全相同,泛音亦然.

§205. 板之振動.

板之振動較棒絃複雜,其狀況可由實驗觀測. 法將細砂均勻散佈於板上,使板振動,砂即集於節點,銜聯成線,曰節線 (nodal line),其全部圖形,則曰克拉德尼圖形 (Chladni's figure). 如爲正方板,使其中央固定,全部成水平面,以指按 d,如圖 159, 用弓在 b 點拉過,則克拉德尼圖形當視 d 及 b 之位置而異. 如爲圓板,則圖形成爲直徑及同心圓. 固定中心,用弓沿邊綠拉過,則成

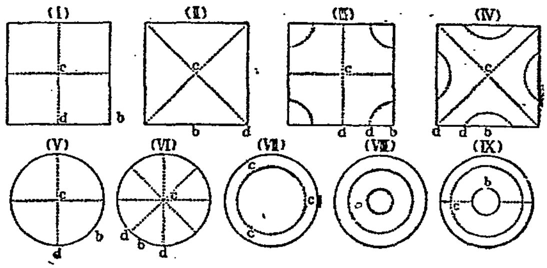


圖 159. 克拉德尼圖形

V及VI. 固定圓上三點,用槌擊其中心,或於中央立一棒,用塗松香之皮擦之,即成同心圓如 VII 或 VIII. 於中央穿孔,用弓由孔內拉過,同時手按圓上一點,則成直徑及同心圓之混合圖形,如IX.

鐘(bell)之振動與板同,其最簡單者,如圖 160 之 A,

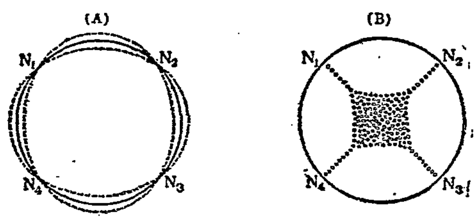


圖 160. 鐘之振動

分作四象限. 鐘內盛醚,振動時均集於節線上如 B, 即其明證.

§206. 膜之振動.

周圍用相等之力張緊之膜 (membrane),如用槌擊其中央,亦起振動. 膜之振動狀況,與板同,但其周圍恆成節線而已. 佈砂於膜上,照前實驗,亦可現出種種節線. 樂器中之鼓,即利用膜之振動而成.

§207. 氣柱之振動.

以上各節所論之發音體,概爲固體,其振動經空氣傳播,始成聲波,故空氣之職務,專在於傳播,即傳音之介質. 實則在管內之空氣,其本身亦能振動,是曰**氣柱** (air column) 之振動,音叉下附之空箱,即其一例. 如管壁較厚,則不問管之物質爲何,基音恆有一定,音品則隨物質而異. 管之兩端開放者,曰**開管** (open pipe),一端開放一端閉塞者,曰**閉管** (closed pips).

閉管如圖161之 AB,一端 A 開放,他端 B 閉塞. 由開端吹入空氣,或置振動中之音叉於其傍,均可使管內

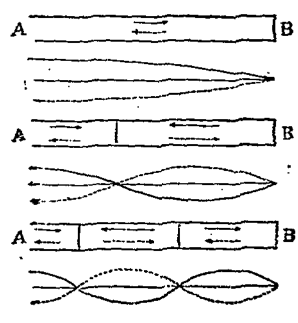


圖 161.　閉管之振動

氣柱發生振動. 由 A 進入之波,至 B 反射而回,干涉結果,在管內成爲定波. 又因 B 端固定不動,波在此處係由疎入密而生反射,故其各節點與 B 之距離,應爲 $0\cdot\frac{\lambda}{4}$, $2\cdot\frac{\lambda}{4}$, $4\cdot\frac{\lambda}{4}$,……, $2m\frac{\lambda}{4}$,其中之 m 表任意整數,即 B 成一節點. 又由 A 進管內之入射波,與反射波同相時,始能使管內氣柱振動增強,故 A 點應成波腹. 如命 l 表管長,則其關係應成爲

$$l=(2m-1)\frac{\lambda}{4},\quad 或\ n=(2m-1)\frac{v}{4l}.$$

其振動狀況,如圖中所示. 基音及泛音之頻率比當爲

$$n_1:n_2:n_3:\cdots\cdots=1:3:5:\cdots\cdots,$$

即等於連續奇數之比.

開管如圖 162 之 AB, 外氣之膨脹甚爲自由,故管內空氣之阻力較強. 波達於 B,係由密入疎之反射;由此至各節點之距離,應爲 $\frac{\lambda}{4}$, $3\frac{\lambda}{4}$, $5\frac{\lambda}{4}$,……, $(2m+1)\frac{\lambda}{4}$. 其 m 表任意整數. 故 A 及 B 兩端均同時成波腹,其關係式爲

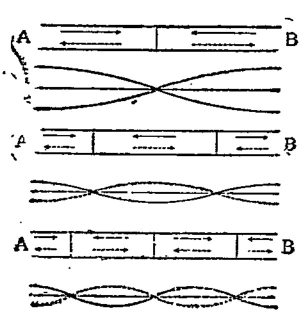


圖 162. 開管之振動

$$l=2m\frac{\lambda}{4},\quad 或\quad n'=2m\frac{v}{4l}.$$

故基音及泛音之頻率比爲

$$n'_1:n'_2:n'_3:\cdots\cdots,=1:2:3:\cdots\cdots,$$

卽等於連續整數之比,其振動狀況則如圖中所示. 又因

$$n_1=\frac{v}{4l},$$

$$n'_1=\frac{2v}{4l},$$

故得　$$n'_1=2n_1.$$

卽同長之開閉兩管,開管基音之頻率,較閉管增加一倍.反之,兩管發同一原音時,開管之長較閉管增加一倍.

§208. 風琴管.

研究氣柱振動狀況,以用風琴管(organ pipe)爲便,如圖163. 下端P爲吹入空氣之口,上有細隙O,其旁有氣流出口,上邊L削尖,尖端向下,曰**上唇**(upper lip),下邊K曰**下唇**(lower lip). 由P吹入之空氣,經細隙O後,與上唇L衝擊,因壓縮而成稠密,傳入管內. 因此項稠密之結果,使由O流來之

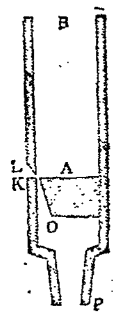


圖163. 風琴管

氣,經由橫口逸出管外,不致影響管內,於是發生稀疎,亦傳入管內. 一密一疎,相間而來,成爲種種之音. 其中僅有與管長相當之一音,在管內成爲定波,音亦特著.

§209. 利用共振以測音速.

如圖 164, 玻璃管 B 內盛水,從上方插入較細之第二玻璃管 A,持 A 上下,則 A 內氣柱之長短,亦隨之而變. 持一振動中之音叉於 A 上,則當 A 內氣柱達於適當長度時,卽發生共振,音極強大. 命此時氣柱之長爲 l, 則由閉管之公式,知 $n=\frac{v}{4l}$. 再將 A 提高,使其內氣柱長度成爲 $l'=\frac{3}{4}\lambda$ 時,音叉強大,則 $n=3\frac{v}{4l'}$. A 內氣柱長度再增至 $l''=\frac{5}{4}\lambda$ 時,音再加強,則 $n=5\frac{v}{4l''}$. 由此實驗,將 l, l', l'' 等實值測出,卽可求得音速 v.

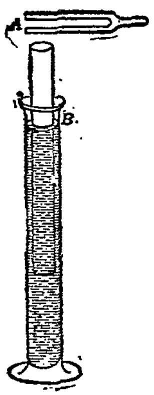


圖 164. 音速之測定

§210. 昆武管.

圖 165 之 AB 表金屬棒,中點 K 固定不動,一端 B 上

貼厚紙,恰可嵌入玻璃管 C 內. C 之他端有管塞 D, 上附柄 S, 由 S 可使 D 自由移進移出. 用塗松香之皮,沿棒擦過,使生縱振動,則 B 點應成波腹. 左方氣柱,受其牽動,亦生強迫振動. 移 D 使氣柱之長度等於所發音

圖 165. 昆式管

波長之 $\frac{1}{4}$ 之偶數倍,則氣柱之振動最盛. 管內預佈石松粉(lycopodium)或木屑,振動時此等粉屑均集於各節點,如圖中所示,成為昆式圖形(Kundt's figure),此管則曰昆式管(Kundt's tube). 由節間距離,可求所發聲波之波長. 各種氣體中之音速,均可用此法測定之.

§ 211. 歌焰.

圖 166 之 AB 為玻璃管,自下送入氫氣,在上端用火點燃. 將開管 CD 籠罩於其上,火焰在 CD 內某一點,可發樂音,是曰歌焰 (singing flame). 當 CD 罩於焰上,開管內之空氣,受熱昇起,故先發出噪聲. 由此項噪聲中,CD 特別選出一種,與管長相當者,與之共振,遂在管內

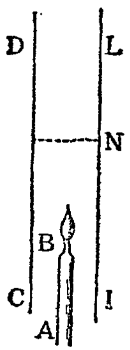


圖 166. 歌焰

成爲定波. 定波作用於焰,調準其振動,然後始成爲樂音.

又或放金屬網於一較粗之管內,燒網令紅,使管直立,亦能發生強大之音,至網冷爲止. 此時管內空氣,受網熱膨脹上昇,遇冷又復收縮,成爲不規則之振動,經管選擇其適宜之一種,與之共振,而成強大之音. 如將管放平,即無氣流發生,音亦消滅.

§ 212 音程.

兩音之頻率比,曰**音程**(interval). 兩音相繼而發或同時並奏時,對於吾人聽感有快與不快之分,其能引起快感之兩音,曰**互相諧和**(consonance),引起不快感之兩音,曰**不諧和**(dissonance). 由實驗得知,兩音能否諧和,完全由此兩音之音程而定,與各音本身之頻率無關. 音程愈簡單,音愈諧和. 音程等於 1:1 之兩音,最爲諧和,如是者曰**同音**(unison). 其次爲 2:1 之兩音,曰**倍頻程**(octave),倍頻程之兩音中,頻率小者曰**基音**(tonic),頻率大一倍者,曰**八音度**(octave). 更次尚有 3:2, 4:3, 5:4,

6:5, 5:3, 8:5, 9:8, 10:9, 15:8, 9:5 等音程,均屬諧和.

§ 213. 音階.

通常在音樂中選出一定頻率之音,作為基礎,定為基音. 然後再選出若干樂音,均能與此基音諧和者,按其音調高低,排成一列,是為音階 (musical scale). 常見之音階有兩種,一曰大音階 (major scale),適於演奏豪壯快活之曲,餘一種曰小音階(minor scale),適於演奏悲哀抑鬱之曲,此兩者之中,以大音階尤為重要,尋常使用者,即屬此種音階. 茲將大音階中包含各音,列表如次:

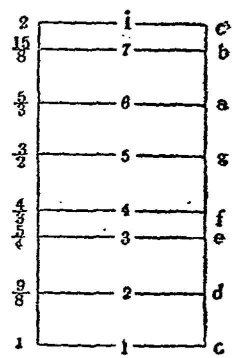


圖 167. 大音階

表 14　大音階

記號	c	d	e	f	g	a	b	c'
讀法	*do*	*re*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*do*
對於基音之頻率比	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
相鄰兩音之頻率比	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$	

如用橫線表音階中一音之位置,兩線間之距離表此兩音之音程,則大音階中包含之各音狀況,當如圖167所示.

§214. 簡單樂器.

凡有彈性之物體,用適當方法使之作迅速振動,均能發聲. 但能發出樂音者已不多,用以作音樂中之器具者更少. 茲就各種簡單樂器(simple musical instrument)之振動方法,爲之分類如次:

(1) 絃樂器 (string instrument),係利用絃之振動發音者,更就使絃振動之方法,細列爲三項:

(a) 彈絃樂器(plucked string instrument).

例: 三絃,琴,琵琶,曼度林(mandolin),箜篌(harp)吉泰琵琶(guitar).

(b) 拉絃樂器(bowed instrument).

例: 胡琴,小提琴(violin),中提琴(viola),大提琴(cello).

(c) 擊絃樂器(percussion string instrument).

例: 洋琴,鋼琴(piano).

(2) 吹奏樂器 (wind instrument),係利用空氣柱或

簧之振動發音者,更就樂器之物質,細列為二項:

(a) 木質吹奏樂器(wood-wind instrument).

例: 簫,笛,風琴管(organ pipe).

(b) 金屬吹奏樂器(brass instrument).

例: 口琴(harmonica),簧風琴(harmonium),觱栗管(clarinet),喇叭(horn),法國銅角(French horn)

(3) 擊奏樂器(percussion instrument)係用膜或棒之振動發音者.

例: 鼓,鈴鼓(tambourin),旋轉鼓(kettledrum),銅三角(triangular),音叉.

(4) 鍵盤樂器(key-board instrument),係具有一組鍵盤,每鍵各司一音者.

例: 風琴(organ),鋼琴(piano)

§ 215. 留聲機.

保留發出之音,至必要時使其復行發生之器,曰留聲機(phonograph). 其收音器如圖 168, 喇叭 LM, 由線懸住,末端經曲管與收音盒 R 相連,其反對一方附錘 P. 使其成平衡. R 底為振動板,由玻璃或雲母薄片而成 R 及其連結部,由一可動之腕支住,其移動則由螺旋 S

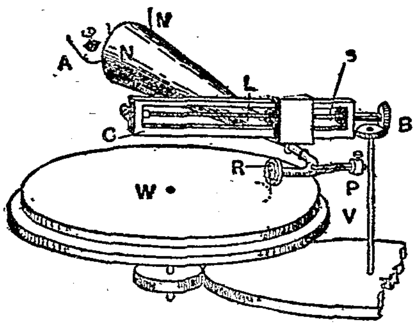


圖 168. 收音器

司之. 轉臺 V 上,放蠟盤 W,用鐘機關使其轉動經齒輪 B 傳至 S. 收音盒放大之,如圖 169, CD 曰針 (style), 一端 C 與振動板中心相連,更由棒 EF 與 AB 接合, AB 與振動板平行, CD 在 AB 周圍,可以轉動.

收音時人對喇叭口發聲,聲波經喇叭管內傳至振動板,引起板之振動,針端 D 在蠟盤上沿螺線而轉,同時

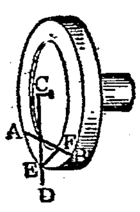


圖 169. 收音盒

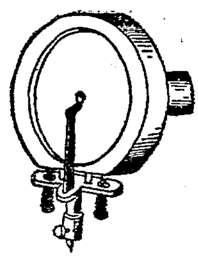


圖 170. 發音器

向半徑方向振動,刻成彎曲溝紋.用電鑄法由蠟盤製成陰陽相反之銅版,再用硬橡皮等類物質,壓於銅版上,即成記音盤,俗稱唱片(record).

欲發生同樣之音,可用圖 170 所示之發音器,與收音盒相似,僅不用尖銳之針,而以略微圓突者代之,使其沿記音盤上之溝紋進行,因溝紋屈折,引起振動板之振動,遂成為音,與原音完全相同.

問題第十七

1. 奏胡琴者,弓極用在絃之下端,何以不在中央拉過?

2. 提琴上有四絃,粗細各不相同,其目的何在?

3. 量度頻率之方法有三種,試述其大略.

4. 灌開水入熱水瓶中,水愈多其音愈高,何故?

5. 單絃拉戲,能否眞與人唱之聲相同? 並說明其理由.

6. 冬日笛聲與夏日笛聲能完全相同否? 何故?

7. 音樂家鳴奏提琴,笛,鋼琴等時,如何變更音調?

8. 胡琴與笛伴奏時,如配絃不準,將生何種影響?

9. 一音叉之共振之最短空氣柱長 32 厘米,求其頻率.

10. 長 50 厘米之開管,求其基音及泛音之頻率.

11. 長 50 厘米之閉管,求其基音及泛音之頻率.

12. 有長 1 米之開管,其發出基音之頻率,每秒 170 次,求

空氣中音之速度.

13. 管內盛氫氣,將振動中之音叉,放於管口,量得此時管中所發之音,頻率爲每秒490次。如音叉之頻率爲126次,求氫氣中音之速度。

附　錄

上冊問題答數

問題第一(15頁—16頁)

(1) 1.09 英尺. (2) 1609 米, 500 米, 1000 米. (3) 0.26 加侖. (4) 1000 克, 453.6 克, 500 克; 1.1 磅. (5) 28.53 克, 31.25 克, 1.1 英兩. (6) 624 里, 48 仟米, 96 里. (7) 11,735 米. (8) 2 角 2 分. (9) 126 市斤. (10) 58.2 市斤. (11) 1,030 克. (12) 28.4 市斤. (13) 250 立方厘米. (14) 0.84 (15) 1.4 每立方厘米克. (16) 0.12, 比重小於軟木. (17) 184 立方尺. (18) 75.4 克、24.6 克.

問題第二(35頁—38頁)

(4) 5 里, 向東北, 與東方之角度為 $53°8'$. (5) $\sqrt{5}$ 里, 向西南, 與西方之角度為 $26°34'$. (6) 445 每秒米. (7) 各 $2\sqrt{2}$ 每小時里. (8) $5\sqrt{3}$ 每秒尺. (9) $\frac{v}{2}$, $\frac{\sqrt{3}}{2}v$. (10) 100 尺. (11) 對岸作 30° 之傾斜. (12) $4\sqrt{3}$ 每小時仟米, 12 每小時仟米. (13) (i) 17 每秒厘米, 47.5 厘米. (ii) 0, 24.5 厘米. (iii) $-3\frac{1}{18}$ 每秒每秒厘米, $1\frac{7}{11}$ 秒. (iv) ± 3 每秒厘米, 6 秒或 2 秒. (14) 40 每秒厘米, 行路 4 米. (15) 20 每秒每秒厘米. (16) 10 秒, 150 厘米. (17) 50 秒, 25 米. (18) 18 每秒每秒厘米. (19) 4900 每秒厘米. (20) 545 每秒厘米; $\frac{1}{9}$ 秒. (21) 10.2 秒. (22) 218 米, $6\frac{2}{3}$ 秒. (23) 3062 厘米. (24) 12,250 厘米. (25) 3377 厘米, 須時 5.1 秒.

問題第三(63頁—66頁)

(12) 98,000達因. (13) 444,256達因. (14) 8000達因. (15) 14:980;140每秒厘米. (16) 4克. (17) $\frac{100,000}{3}$達因. (18) 49仟克. (19) 1000克秒厘米. (20) 18每秒英尺. (21) 80達因,方向反對. (22) 8×10^6達因. (23) (i) 25;(ii) $3\sqrt{3}$; (iii) 13; (iv) $\sqrt{61}$; (v) 60°; (vi) 3. (24) 20; 4. (25) 2. (26) 3; 1. (27) (i) 23.8; (ii) 6.64; (iii) 68°12′; (iv) 2.56. (28) $5\sqrt{3}$;5. (29) 57.735. (30) $\sqrt{2}$ R; 135°. (31) 7.5仟克.

問題第四(75頁—76頁)

(5) 13.55×10^6爾格. (6) 8.33×10^5爾格. (7) (i) 123,600仟克米, (ii) 72,000仟克米; (iii) 176,000仟克米. (8) 550每秒英尺磅. (9) $\frac{1}{510}$馬力. (10) 84.1瓦特. (11) 約100馬力. (12) 1471馬力. (13) 125×10^9爾格. (14) 625×10^{10}爾格; 3125×10^8爾格. (15) 784×10^5爾格 (16) 9000爾格. (17) 32×10^6達因. (18) 88×10^5爾格.

問題第五(95頁—97頁)

(1) 96達因. (2) 每秒7次. (3) 每分13.4次. (4) 距鉛球中心34.6厘米. (5) 距中心等於邊長之$\frac{1}{9}$. (6) 3:9. (7) $5\frac{5}{8}$尺. (8) 距20斤之一端6.6尺. (9)距同一之端$2\frac{6}{7}$尺. (10) $2\frac{2}{3}$斤. (11) $2\frac{1}{3}$斤, (12) (i) 4噸; (ii) $3\frac{2}{3}$噸; $4\frac{1}{3}$噸. (13) 距懸3克之端3厘米. (14) 99.2厘米. (15) 25厘米. (16) 987每秒每秒厘米. (17) 330. (18) 縮短0.000116倍 (19) 伸長$\frac{1}{360}$.

問題第六(104頁—105頁)

(7) 250克重. (8) 20克重. (9) 10斤重. (10) 0.4714. (11) .25. (12) 2.8斤. (13) 136.6克.

問題第七(115頁—118頁)

(11) 12斤; 20斤. (13) 30°; $\frac{\sqrt{3}}{2}W$. (14) $\sqrt{3}$. (15) 6斤; 5尺. (16) 距6斤處4尺; 向7斤重之一方傾倒. (17) $\frac{11}{9}$ (18) 2斤. (19) 4斤. (20) $9\frac{4}{5}$斤. (21) 6厘米. (22) 向中點移近$1\frac{5}{7}$厘米. (23) 12厘米. (24) 1寸; 17寸. (25)(i) 320斤; 7斤; 3個. (26) 50兩. (27) (i) 30斤; (ii) 4斤; (iii) 4個. (28) 7斤. (29) 120斤; 140斤. (30) 2尺. (31) 8512斤.

問題第八(126頁—127頁)

(5) 30斤. (6) $\frac{1}{4}$斤; $1\frac{1}{3}$寸. (7) 200斤. (8) 40厘米.

問題第九(146頁—149頁)

(9) 460仟克. (10)100克. (11)5厘米. (12)163.2克; 4612克. (13)916克. (14)336克. (15) 266克. (16)207000克. (17) 7000克. (18) 45.55立方尺. (19) 448.5立方厘米. (20) 1斤; 41斤. (21) 7.8. (22) 3060克. (23) 1 : 4. (24) 6.06×10^{7}立方尺. (25)全體積之$\frac{65}{126}$. (26) 浮. (27) 6063×10^{21}仟克. (28) 1.14. (29)0.956. (30)0.69立方厘米; 11.4; 0.79. (31)1.624. (32)0.92; 0.80.

問題第十(162 頁—164 頁)

(10)22.9 斤. (11) 約 24800 斤. (12) 1088 斤. (13) 10.333 米. (14) 1088 或 979.2 每平方厘米克. (15) 8610 米. (19) 9.6 升. (17) 水銀柱 95 厘米. (18) 水銀柱 51 厘米. (19) 1291.6 每平方厘克. (20) 34.4 尺. (21) (i) 40 厘米; (ii) 36 厘米.

問題第十二(194 頁—196 頁)

(11) −40°. (12) 32.2° C., 7.2° C. (13) 234° F., 112.2° C. (14) 320° F. (15) 約 $\frac{1}{10}$ 毫米. (16) 約 1 寸 6 分. (17) 658 米. (18) 1002.6 立方厘米. (19) 0.00228 升. (20) 546 立方尺. (21) −136.5° C. (22) −86.5° C. (23) 119.8 立方厘米. (24) 88.3 立方厘米. (25) 298.5 升. (26) 0.094. (27) 0.55. (28)0.0705. (29) 6.7. (30)溫度 0°C. 之冰 310 克及水 4,690 克. (31)0° C. 之冰 25 克及水 125 克. (32) 0.067.

問題第十三(216 頁—218 頁)

(16) 80 卡. (17) 80 卡. (18) 8° C. (19) 8.8° C. (20) 14000 卡 (21) 538 克. (22) 194 克. (23) 15600 卡. (24) 7215 卡. (25) 32.1° C. (26) 99.67 克. (27) 52.5 %.

問題第十四(227 頁)

(5) 252 卡. (6) 786 英尺磅. (7) 4.68 卡. (8) 0.7° C. (9) 436 米. (10) 3.42 仟米.

問題第十五(242頁—243頁)

(2) 300每秒厘米。 (3) 40次。 (4) 1.36米，170次。 (5) $\frac{1}{75}$秒，75次。 (6) 0.68米。

問題第十六(255頁—256頁)

(5) 1700米。 (6) 10200米。 (7) 884米。 (8) 907米。 (9) 1023米。 (10) 0.8米。 (11) 300米。 (12) 132，或128。 (13) 243或237。

問題第十七(273頁—274頁)

(9) 265.6次。 (10) 340×(1,2,4,6)。 (11) 170(1,3,5,7,)。 (12) 340每秒米。 (13) 1332.8每秒米。

本書於二十六年四月經
國民政府教育部審定
領到中字第八號執照

中華民國二十六年六月審定本第一版
中華民國三十六年一月審定本第五五版

(57024·1A)

高級中學用
復興教科書 物理學 二冊
上冊定價國幣捌角
印刷地點外另加運費

編著者 周昌壽
主編者 王雲五
發行人 朱經農 上海河南中路
印刷所 商務印書館印刷廠
發行所 商務印書館 各地

(本書校對者朱仁寶)