中國科學教科書

高中物理學

上冊

嚴濟慈編著

中國科學圖書儀器公司

印行

中國科學教科書

高中物理學

上冊

嚴濟慈編著

中國科學圖書儀器公司

印行

編 輯 大 意

讀了一章書或一本書，覺得所說的沒有什麼，那你已能夠消化，留得腦中常空，可作進一步的學習或研究．書是要敎的，不是"塡"的；學問是要做的，不是"吃"的．

讀了物理，不但添加知識，更要增長技能，庶於日常生活，有所裨益．

本書對於物理開始作有系統之敍述，但多從讀者實際經驗，日常所見事實，聯貫說明，懇切平易，俾能引起研習科學的興趣，養成應用能力．

本書分上下兩册，分章特多，標題因而特別明顯確切．普通可於一小時內敎完一章，間有二，三小時方能敎完一章，或一小時可敎完二章者，極爲少數．

本書每章之末，附有習題，其中數字，亦都根據事實，沒有"一個人，九尺高，十斤重——"那類荒謬的情形．

編者愧無敎學經驗，但自信本書錯誤或許較少，至於合用與否，尙希 海內明達批評指敎．

嚴濟慈寫於北京

一九四八年五月四日

目　　次

第一章

量度

§1. 量與單位. 凡有大小多寡可得而計量者,曰**量**(quantity). 如一〔丈〕之繩與一〔丈〕之布,其長等也;又如一〔斤〕之鐵與一〔斤〕之肉,其重等也. 長與重,皆爲量. 又如體積,密度等,爲關於物性之物理量;速度,力等,爲關於物理現象之物理量.

欲論一量,必須取同類之某一量,以爲量度之標準. 此被採爲標準之量,謂之**單位**(unit). 量長用〔尺〕,論重用〔斤〕;〔尺〕與〔斤〕各爲長度與重量之一種單位.

某量如爲單位之 n 倍,則 n 卽爲此量之**數値**(numerical value). 量之**大小**(magnitude)與其數値,不可混同;大小本一定,而數値則視所用之單位以爲轉移. 如布一疋,長 42〔市尺〕,若以〔米〕表之,則爲 14〔米〕.

在日常應用,爲免除數値之數字位數太多起見,恆採單位之倍數或其分數,以爲**輔助單位**,如〔尺〕之上有〔丈〕,有〔里〕,〔尺〕之下有〔寸〕,有〔分〕是.

學術上所用之單位,概依法國之米制(metric system),亦

即我國現行之標準制，以十進位，甚爲便利。

§2. **長度之單位.** 最初規定以通過巴黎的子午線，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)，後用鉑 90 % 與銥 10 % 之合金造成一棒，妥爲保存於巴黎之國際度量衡局，是爲**國際米原器.** 此棒長約 1.02〔米〕，橫斷面作 X 形(圖 1)，在溝內距兩端約一〔厘米〕處，各刻標線三條. 此端中間之一條標線，與彼端中間之一條標線間之距離，在攝氏 0° 時，作爲 1〔米〕.

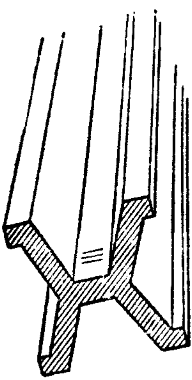


圖 1. 國際〔米〕原器.

以此原器所規定之〔米〕，爲長度之標準，現在測知由赤道至北極子午線之長爲 10,000,856〔米〕.

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).

§3. **角之單位.** 平面角之單位，常用者有二種：(1) 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**〕(mi ute)；1〔分〕之六十分之一，作 1〔**秒**〕(second)；是爲**六十分法**(sexagesimal system). (2) 以等於半徑之圓弧對於圓心所張之角，爲量角之單位，稱 1〔**弳**〕(radian)，是爲**弧度法**(circular system). 如命 D° 表任一角之〔度〕數，θ 表其

〔弳〕數，則二者之間，有

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

之關係．因 $\pi = 3.1416,$

故 $1〔弳〕 = 57^\circ 17' 45'',$

$1〔度〕 = 0.0175〔弳〕.$

若角度不大——通常以不超過 6° 為限——，則因此等小角之〔弳〕數，與其正弦或正切之值相差甚微，可作為彼此相等，卽 $\theta = \sin\theta = \tan\theta$．按弧度法計之，$6^\circ$ 為 0.1047〔弳〕，$\sin 6^\circ = 0.1045$，及 $\tan 6^\circ = 0.1051$． 故角度為 6° 時，因是而得之誤差，且小於 1%．

§4. 質量之單位． 表示一物體所含物質多寡之量，曰**質量**(mass)． 質量之單位，亦有標準原器，亦由鉑 90 % 與銥 10% 之合金製成，為一圓柱體，直徑與高相等（圖 2），保存於國際度量衡局，是為 1〔**仟克**〕(kilogram)，又名〔公斤〕．1〔仟克〕之千分之一，曰〔**克**〕(gram)．1〔克〕之千分之一，曰〔**毫克**〕(milligram)．

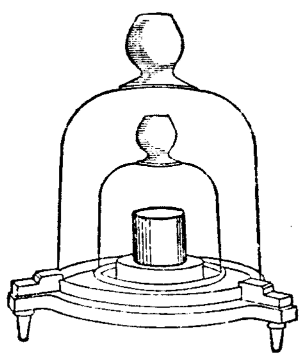


圖 2. 〔仟克〕原器．

溫度爲攝氏 4° 之水，即最大密度之水，每 1000〔立方厘米〕之質量，大致與 1〔仟克〕相等．嚴格言之，則爲 1/1.000027〔仟克〕．通常均視 1〔立方厘米〕之水之質量爲 1〔克〕．

§5. 時間之單位． 任何週期現象，皆可作爲量度時間之基礎；爲便利計，吾人採用地球之自轉．

因地球自轉，太陽每連續二次經過中天相隔之時間，是爲 1〔**太陽日**〕(solar day)．惟地球自轉之外，尚有公轉．地球公轉之速度，隨時略有不同，其軌道面又與赤道面不相一致，故〔太陽日〕之長短不能一律．就一年中之〔太陽日〕而平均之，曰 1〔**平均太陽日**〕(mean solar day)，簡稱 1〔**日**〕．1〔日〕分作 24〔**小時**〕(hour)，1〔小時〕分作 60〔**分**〕(minute)，1〔分〕又分作 60〔**秒**〕(second)．

通常量度時間之儀器，爲鐘與錶．

§6. 基本量與導出量． 量長度用尺，質量用天平，時間用鐘．長度，質量，與時間三者，均可與其所採定之單位直接比較而量得．此外之物理量，種類繁多，且隨人類知識之開展而增加．所幸各種物理量，無一一爲之獨立制定單位之必要．因既將長度，質量，與時間三種單位確定後，則其他單位，均可由此組合而成故也．例如規定長之單位爲〔米〕後，則導得面積之單位爲〔平方米〕，體積之單位爲〔立方米〕．又如物體之速度，可分別量其所行之路程與其所需之時間，計算而得，速度之單位爲〔里/小時〕或〔厘米/秒〕．

長度,質量,與時間之三量,既各自獨立,又爲其他之物理量所由導出,特稱爲**基本量**。其他之物理量,如體積,速度,熱量,電量等,稱爲**導出量**。 基本量所用之單位,曰**基本單位**(fundamental unit);由基本單位組合而成者,曰**導出單位**(derived unit),乃用以表導出量者也。

§7. 厘米·克·秒單位制. 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〕。如是聯合而成爲**厘米·克·秒單位制**(c.ntimeter-gram-second system),或簡稱 C.G.S. 制,係取其英文名稱之首一字母連綴而得。

故在厘米·克·秒制中,體積之單位爲〔立方厘米〕,速度之單位爲〔厘米/秒〕,其他仿此。

§8. 度量衡. 度量衡爲日常所需,各國對於度量衡,皆有定制。度指長度,量指容量,衡指質量。其中長度與質量,均屬基本量,其單位已如前述。 容量之單位,在米制,用〔升〕(liter),等於 1000〔立方厘米〕,故爲一種導出單位,亦即 1〔仟克〕攝氏 4° 之純水所占之容積也。

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〕之三分之一定爲 1〔市尺〕;1〔升〕定爲 1〔市升〕;1〔仟克〕之二分之一定爲 1〔市斤〕。

§9. 英制單位. 在英制中,表長度用〔呎〕(foot),表質量用〔磅〕(pound),表時間用〔秒〕,故聯合而成爲**呎·磅·秒單位制**(foot-pound-second system). 其進位過繁,不適於科學界使用,但在工商業上仍多沿用者. 英制之進位及與米制之關係見表 1.

表 1. 英制單位及其換算

1〔呎〕	= 12〔吋〕(inch)
1〔碼〕(yard)	= 3〔呎〕
1〔哩〕(mile)	= 5280〔呎〕
1〔加侖〕(gallon)	= 4〔夸脫〕(quart)
1〔磅〕	= 16〔唡〕(ounce)
1〔仟米〕	= 0.6214〔哩〕
1〔吋〕	= 2.54〔厘米〕
1〔米〕	= 39.37〔吋〕
1〔升〕	= 1.06〔夸脫〕
1〔仟克〕	= 2.204〔磅〕
1〔磅〕	= 453.6〔克〕

§10. 測量之誤差. 吾人於各種物理量,既定有單位以資比較,即可從事測量.

測量所得者爲一數目,然與數學問題中之數目不同. 測量所得者,爲一近似值,並非確定值. 例如用尺量長,圖 3 之矢號 m, 代表所欲量之長之一端. 由圖可見 m 之位置,介乎 26.5 與 26.6 之間,加以估

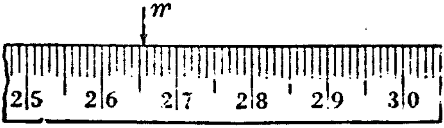


圖 3

計,可作爲 26.56. 是測得之數 26.56,其第三位數字 5 係確定,而第四位數字 6 則非可靠者. 倘若吾人可斷言矢號 m 必在 26.54 之右,並必在 26.58 之左,則其位置應作爲: 26.56±0.02. 得數之尾,附以 ± 0.02 者,表示其可能之誤差也.

測量不能得確定値之原因有二:一因所用之儀器,及其所根據之方法,未臻完善;二因所欲測之量,本身卽不確定,如欲測一片之厚,其兩面旣不平,又不互相平行也.

§11. 有效數字. 測量所得結果,恆有不可避免之誤差. 如量長得 15厘米.568 ± 0.03,則小數第二位已不可靠,第三位留之何用,宜記爲 15.57〔厘米〕. 故吾人記載數目,宜到開始不可靠之數字爲止. 個位開始不可靠,卽止於個位;十位開始不可靠,卽止於十位,如是記載數目所用之數字,個個皆有意義,稱爲**有效數字**(significant figure). 上舉例中之 15.57〔厘米〕,卽爲四位有效數字.

通常測量之所得,有效數字不過三位或四位,在應用上,已夠滿意.

物理學上所遇同一種類之量,大小懸殊,奚啻天壤,如地球之質量爲

5,940,000,000,000,000,000,000,000,000〔克〕;

而電子之質量爲

0.000,000,000,000,000,000,000,000,000,898〔克〕.

此等數目,宜各寫成

$$5.94 \times 10^{27}〔克〕,$$

及
$$8.98 \times 10^{-28}〔克〕;$$

不但可以省寫許多0，且亦明白表出其有效數字各為三位。

§12. 實測數據之演算. 吾人常從實測之數據，以計得所欲求之量，則演算時有不可不注意者。

【例】設有薄銅片，測得其長為26厘米.3 ± 0.1，闊為5厘米.6 ± 0.1，厚為0厘米.42 ± 0.02。其體積，依長闊高相乘，將為

$$V = 26.3 \times 5.6 \times 0.42 = 61.8576〔立方厘米〕.$$

但小數點下之數字，皆可靠否？恐個位之1，即不可靠。因銅片之眞正厚度，可能為0.40〔厘米〕，若以此與長闊相乘，得$V = 58.912$〔立方厘米〕，與上所得者，其中數字竟無一位相同。

實測之長為三位有效數字，闊與厚只有二位有效數字，則其乘得之體積，祇可保留二位有效數字（通常即實測數據中有效數字之最少位數）而為

$$V = 26.3〔厘米〕\times 5.6〔厘米〕\times 0.42〔厘米〕= 62〔立方厘米〕.$$

習題一

(1) 1〔立方米〕等於多少〔立方呎〕？1〔立方米〕之水之質量，等於多少〔磅〕？求每〔立方呎〕之水之質量。

(2) 甲乙兩村，相距5.4〔公里〕，問合若干〔哩〕？

(3) 有肉8.6〔磅〕，問合若干〔公斤〕？

(4) 由〔米〕之原來定義，求地球之半徑。

(5) 有一球，測得其半徑為1.4厘米 ± 0.1。求此球之體積（注意有效

數字之位數)。

(6) 試指出下列諸長度中，何者最大，何者最小?

1.8〔米〕；　63〔吋〕；　0.002〔哩〕。

(7) 一圓之半徑為2〔厘米〕，在圓周上取一段弧長3.14〔厘米〕，問其所張之圓心角為若干〔弳〕？　若干〔度〕？

第二章

質量 密度 比重

§13. 質量之量度. 物體所含物質多寡之量,曰**質量**. 欲測質量之大小,可用天平. 例如欲稱一塊鐵,將鐵塊置於天平之一端圓盤中,在另一端圓盤中置 250〔克〕之砝碼,而得平衡;於是吾人知此鐵塊之質量,等於 250〔克〕砝碼之質量. 至砝碼之質量,則直接或間接用天平與仟克原器比較而得.

§14. 天平. 圖 4 所示,為最普通之**天平**(balance). 其主要部分為金屬質之天平梁,梁之中央有一鋼質三稜體 C,名曰刀口. 此刀口為天平梁旋轉之軸. 梁之中央附一指針 P, 指針能因梁之傾轉,而在刻度板上指示其傾轉之大小. 當梁水平靜止時,指針適指 0 度.

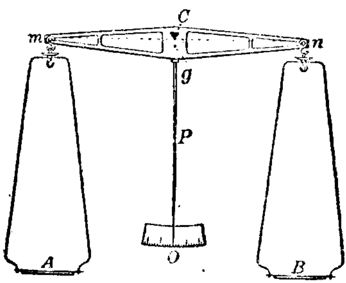


圖 4. 天平.

梁之兩端,各懸一盤;一盤承欲量度之物體,另一盤承砝碼. 普通所用之砝碼,或以鎳製,或以黃銅製;每個之質量為 1〔仟克〕,或 1〔仟克〕之倍數或分數. 在每個砝碼上,刻明其質量,精密之砝碼,〔克〕以下者,用鋁製或鉑製.

天平之準確性. 若以兩質量相等之物體,置於天平之兩端懸盤中,而不改變其平衡,則曰天平準確. 準確之天平,其兩梁臂 mC 與 Cn 之長度相等.

天平之靈敏度. 吾人定天平之靈敏度,乃視天平在平衡中,一端須加若干最低限度之質量,指針方有可覺察之轉動.

普通商用之天平(用以稱糖,果,魚肉之類者),其靈敏度僅至〔克〕;而實驗室用之天平,往往靈敏至〔毫克〕,或十分之一〔毫克〕;藥房中所用者,普通至〔厘克〕.

天平之用法. (1)**單稱法** 稱一物體,不必十分精確時,用單稱法可矣. 法以欲稱之物體,置於天平一端之懸盤中,於他端置砝碼,使天平回復平衡爲止. 用此法時,當然假設此天平有適當之準確程度.

(2) **複稱法** 以一靈敏之天平,稱一物體,欲得其正確之質量,則宜用複稱法. 第一步,以欲稱之物 M, 置天平懸盤 A 中,另以他物如鉛塊或砝碼,逐漸置於 B 盤中,至天平平衡爲止. 第二步,取去物體 M,代以砝碼,亦至天平平衡爲止. 於是 M 之質量,即等於後所加入於 A 盤中砝碼之質量. 此即抵衝稱象之法也. 用此法稱物,只須天平之靈敏度高,砝碼準,可不問天平之準確性如何.

15. 密度. 物體中物質密集之狀況,可用單位體積內所具有之質量表出之,是爲**密度**(density). 設 M 爲某物體之質量,V 爲此物體之體積,則其密度 d 爲

$$d = M/V.$$

【例】 50〔克〕之黃銅砝碼，其體積爲 5.95〔立方厘米〕，則得黃銅之密度爲 8.4〔克/厘米^3〕。

由是可知欲測一物體之密度，宜先定其質量與體積；前者可用天平以定之，後者則有各種不同之方法以求之。若物體之形狀爲有規則之幾何體，則吾人可用幾何方法以定其體積。如有一正立方物體，各邊長 2〔厘米〕，則其體積爲 $2 \times 2 \times 2 = 8$〔立方厘米〕。

§16. 比重. 物體之形狀極少爲有規則者，往往不易計得其體積。但吾人知 1〔立方厘米〕之水之質量，在溫度 0°C 與 10°C 之間，很近於 1〔克〕。故 V〔立方厘米〕體積之水之質量，即爲 V〔克〕；而

某物體體積之〔立方厘米〕數＝同體積水之質量之〔克〕數，

因之
$$\text{密度} = \frac{\text{物體之質量}}{\text{物體之體積}},$$

就數值言，亦即等於

$$\frac{\text{物體之質量}}{\text{同體積水之質量}}.$$

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)。在 C.G.S. 單位制中，各種物質之密度，其數值恆與比重相等。但比重爲純粹之數字，不因所用單位之不同而異；密度有一定之單位，在 C.G.S. 制爲〔克/厘米^3〕。兩者性質，迥不相同。在英制中，水之密度爲 62.4〔磅/呎^3〕。

重度. 一物體每單位體積之重量,曰重度(specific weight),即

$$重度=\frac{物體之重量}{物體之體積}.$$

不但其數值與密度相同,單位亦同爲〔克/厘米^3〕,此因質量與重量之單位同爲〔克〕, n〔克〕質量之物體,其重量亦爲 n〔克〕故也. 重量與質量之單位,雖同爲〔克〕,但質量與重量乃完全不同之兩種物理量,吾人以後將有加以區別之必要. 譬如一個人,一條命,五個人,五條命;但"人"與"命",究不能認爲完全相同之二字也.

【例】 有煤油空桶重 1.25 磅,裝滿煤油則重 36.25 磅,是煤油之淨重爲 35〔磅〕. 若桶之容積爲 5〔加侖〕,可知煤油之重度或密度爲 7〔磅/加侖〕. 但 1〔加侖〕= 4〔夸脫〕= 4/1.06〔升〕= 3.774〔升〕. 是以 1〔加侖〕之水之重量爲 3.774〔仟克〕= 3774/453.6〔磅〕= 8.32〔磅〕. 由此得煤油之比重爲 7/8.32 = 0.84.

§17. **比重瓶.** 固體與液體比重之測定,可用**比重瓶**(specific gravity bottle). 瓶頸長而細(圖 5),上有刻劃,以作標記. 瓶內盛液體,恆使液面升至頸上刻劃處爲止;如是瓶內液體成爲一定之容積;圖中所示者,在 20°C 時,爲 500〔立方厘米〕.

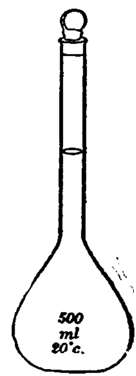


圖 5. 比重瓶.

液體比重之測定 命 w 表瓶重, W 表盛純粹之水後之重量,再將水傾出,以欲測定其比重之液體代之,命 W' 表瓶與液體之重量. 以 s 表液體

之比重，則

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

固體比重之測定. 金屬之細片以及不溶解於水之粉末如細砂等，可用比重瓶，求其比重. 命 W' 表比重瓶盛水時之重，W 表物體之重，W'' 表將物體放入瓶內使瓶內之水溢出一部分，水面仍在刻劃處時之重，則

$$W+W'=(\text{物重})+(\text{瓶重})+(\text{全瓶水重}),$$

$$W''=(\text{物重})+(\text{瓶重})+(\text{全瓶水重})-(\text{同容水重}).$$

故與物體同容積之水重，等於 $W+W'-W''$，以此除 W，即得比重，

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

表 2. 各種物質之比重

固 體

鉑(白金)	21.5	鋅	7.1
金	19.3	燧石玻璃	3 至 4
鉛	11.3	冕玻璃	2.5 至 2.7
銀	10.5	大理石	2.7
銅	8.8	鋁	2.7
鑄鐵	7.8	冰	0.91
錫	7.3	松木	0.5 至 0.7

液 體

汞(水銀)	13.6	石油	0.80
水	1	酒精	0.79
橄欖油	0.91		

於此有可附帶提及者,即容器容積之測定是也。以水或已知其密度之液體盛入容器中,而稱得所盛入液體之質量,因而推得容器之容積。　量杯,滴液管等之容積,皆以此法定之。

各種常見物質之比重,及其在 C.G.S. 制之密度數值,見表 2。

習　題　二

(1) 俗謂"石比木重",此"重"字應作何解釋?

(2) 有金屬一塊,長 5〔厘米〕,寬 4〔厘米〕,厚 3〔厘米〕,質量 528〔克〕。求其密度,問此金屬爲何物?

(3) 有橡皮一塊,壓縮其體積至原來之 14/15 時,問其質量與重度有何變化?

(4) 有重 50〔克〕之金鐲,投入盛水 820〔立方厘米〕之量筒中,水面升至 823〔立方厘米〕處,問此鐲是否爲純金? 若知其內羼銀,問金與銀各重若干?

(5) 比重瓶重 500〔克〕, 盛水後重 1500〔克〕, 盛某種液體後重 1300〔克〕。 求此液體之比重,並問此液體爲何物?

(6) 有空瓶重 200 克,滿盛以水則重 700〔克〕,盛金屬碎片若干,則重 1000〔克〕,再盛水使滿,則瓶與金屬片及水共重 1409〔克〕。求(a)瓶之容積;(b)金屬碎片之體積;(c)金屬片之重量及比重;(d)此金屬片爲何物?

(7) 有 5〔立方米〕之水,全結成冰,求其體積。

(8) 已知鐵之比重爲 7.8,求 1〔立方米〕之鐵之質量。

(9) 一本書,長 18〔厘米〕,寬 12.5〔厘米〕,厚 8〔厘米〕,共計 1400 頁,重 1140〔克〕。求紙之厚度及其密度。

第三章

物質之各種狀態

§18. 物質不滅原理. 自然界中所見之任何現象,從未有並無物質存在,而能自行演出者;故現象之生,恆須憑藉物質,且亦須由物質以顯示之. 有時見其變遷,如各種化學作用是;有時見其失蹤,如鹽之溶解,水之蒸發是. 在一切類此之情形中,吾人咸能證明此不過爲物質外形之變遷,以致逃出吾人五官直接之察覺,其實,物質之本身,並未消滅也. 積自古迄今人類之經驗,知物質之組織,僅能變化至某項程度,而其本身則永不消滅;同理,物質亦不能憑空創生;是爲**物質不滅原理** (Principle of Conservation of Matter).

§19. 眞空,氣體,液體,與固體. 就萬物之狀態而言,可分爲固體,液體,與氣體.

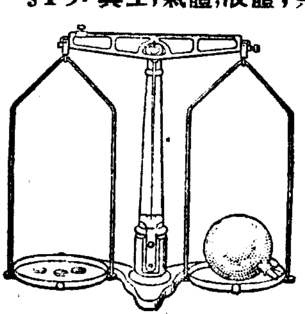


圖 6.

以抽氣機將帶有活塞之玻璃瓶中之空氣抽去,閉上活塞,於是瓶中空無一物,是爲**眞空**(vacuum). 將瓶置於天平一端之圓盤上,並置若干砝碼於天平另一端之圓盤中(圖 6),使之平衡. 此砝碼卽代表

玻璃瓶及活塞等之質量.

將活塞打開,空氣——氣體——即乘隙而入,同時天平掛玻璃瓶之一端乃向下傾斜.欲使天平回復平衡,則須添置若干砝碼於天平之另一端.若玻璃瓶之容量爲一〔升〕,則須添置之砝碼將爲 1.3〔克〕.於是吾人得曰,一〔升〕空氣之質量爲 1.3〔克〕.

將水——液體——注滿玻璃瓶中,則空氣被擠出,天平又失其平衡.吾人若欲重得其平衡,則須添置砝碼至 1000〔克〕而止.於是吾人得曰,一〔升〕水之質量爲 1000〔克〕.

最後,吾人將鉛粒滿置瓶中,且熔化之使無間隙;天平亦失其平衡.若欲重得其平衡,則須添置砝碼至 11,300〔克〕;於是吾人得曰,一〔升〕鉛之質量爲 11,300〔克〕.

由上述實驗,吾人得知:"凡物質皆可用天平稱之".

§20. 氣體. 空氣非爲宇宙間唯一之氣體.輕氣球上氣囊中之氫或氦,用以點燈之煤氣,動物呼出或物體燃燒所成之二氧化碳,以及煮水所得之水蒸氣,皆氣也.在化學上用各種方法,更可得無數之氣體.

大多數之氣體爲無色,但吾人亦可得有色之氣體.置一粒結晶之碘於試驗管中,熱之,則見管中有美麗之紫色氣體.

在上節之實驗中,將瓶中之空氣排去,而代之以其他各種不同之氣體.稱之,則得下列之結果:

1〔升〕之氫	0.09〔克〕，其密度為 0.00009〔克/厘米^3〕
1〔升〕之氮	1.25〔克〕，其密度為 0.00125〔克/厘米^3〕
1〔升〕之氧	1.43〔克〕，其密度為 0.00143〔克/厘米^3〕
1〔升〕之二氧化碳	1.98〔克〕，其密度為 0.00198〔克/厘米^3〕

由上表可見一〔升〕任何氣體之質量，與一〔升〕空氣之質量為同級，換言之，　　　相差不多，無過大，亦無過小。

§21. 氣體之性質. 就一般氣體公有之性質，而言其要者：

第一性質——凡氣體皆能充滿容器，或因壓力減少而膨脹。

一玻璃瓶 B_1（圖 7）內有重 1.3〔克〕之空氣，與一相同而內為真空之玻璃瓶 B_2 相連接，兩瓶之間有活塞以司啓閉。活塞開啓，則 B_1 中空氣之一部洩入 B_2。稱之，B_1 之重量失去 0.65〔克〕即 $\frac{1.3}{2}$〔克〕，而 B_2 之所增者適為此值。不論兩瓶之位置成鉛直或水平，實驗之結果皆同，又不問 B_1 中之氣體為何，或輕或重，其均分之情形莫不皆然。於是吾人得曰："凡氣體皆充塞於其所及之空間且成均勻狀態"

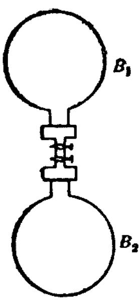


圖 7. 氣體之擴散.

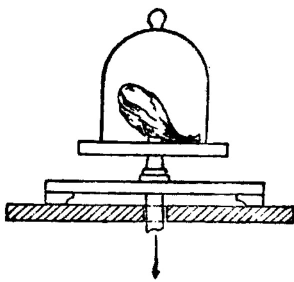


圖 8. 氣體因壓力減小而膨脹.

在抽氣機之玻璃鐘罩中，置一皮球袋（圖8）。皮袋中預儲少許空氣，以繩密縛其口。鐘罩中之空氣逐漸抽去時，皮袋漸行膨脹，終成球形。

第二性質——凡氣體皆有彈性。

在上一實驗中，以空氣洩入鐘罩中，則皮袋復縮小如原狀，一如皮袋中

之氣體爲彈簧，受袋外空氣之壓迫而縮小。

有一 U 形之玻璃管（圖 9），其右臂之端爲密閉者。水銀從左臂之開口處傾入，將空氣閉入右臂。初時兩臂中之水銀面爲等高，如 A 與 B；更傾入水銀，至兩臂中之水銀面達 A' 與 B' 之情狀。此時在 B' 以上右臂中之空氣，所占之體積較小於前。此即證明空氣可壓縮而使其體積減小。水銀面 A' 高於水銀面 B'，閉在右臂中之空氣，其彈性力即能支持 A', B' 兩水銀面相差高度之水銀柱的重量。

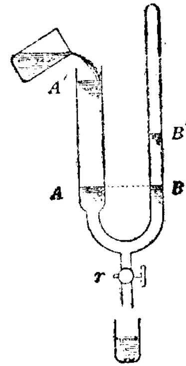


圖 9. 氣體之彈性.

若將活塞 r 開放，使水銀之一部分流出，重復使兩臂中之水銀面相平，則流出之水銀等於第二次加入之水銀；而右臂之空氣又回復至原來之體積矣。此足證明空氣爲完全彈性的。

上述之實驗，換以其他氣體，亦然。

第三性質——凡氣體皆能因加熱而膨脹。

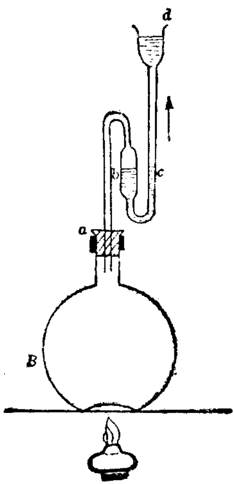


圖 10. 氣體受熱膨脹

B 瓶中滿儲空氣，在瓶塞 a 上裝一曲頸漏斗（圖 10）。從 d 口注水若干，使水面至 b 與 c。注意此時 b, c 兩水面相齊，而 bc 水柱實一可移動之瓶塞也。以火在瓶下熱之，則見水面 b 漸漸向下低降，而 c 上升，終至水盡至 c 之一面，此時瓶中空氣穿越漏斗中之水而逸出。若熄去瓶下之火，則瓶中空氣冷而收縮，將見水面上空氣又穿越漏斗中之水而洩入瓶中，漏斗中之兩水面亦漸漸恢復相齊之原狀。

此實驗明示空氣能因加熱而膨脹。嗣後,吾人將見凡為氣體皆有此種特性,且溫度每升高 1° C,所增加之體積,皆為原體積之 1/273。

總之,凡氣體皆能充塞於容器之中,有可壓縮性,而十分顯示彈性,又能因加熱而膨脹。

§22. **液體**. 水,酒精,醚,油,水銀等,皆液體也。各種液體之密度不同,已見於 § 17 之表 2. 水銀為液體中之特重者。

液體如氣體然,無一定之形狀,隨容器而變。水注入方器,則呈方形,注入圓器,則呈圓形;但其體積則有一定。

液體之面在靜止時,常成平面,且為水平。水在一容器中雖不充滿容器,靜止時在其上部恆成一水平之平面。在杯中之水如是,在池中之水亦如是。其他液體亦復如是。

凡液體皆不可壓縮。粗淺言之,液體之體積,不因壓力而變更。吾人不能將杯口溢出之水,壓入杯中;壓之過猛,杯必破碎。

由極精確之實驗,吾人知液體之體積,在高壓力之下,微有減小。但減小之量極微;實際上,液體可視為不可壓縮者。

凡液體皆能因熱而膨脹。將溫度計之水銀球握於掌中,則吾人可見其中之水銀柱升高,是水銀為能因熱而膨脹者。但其膨脹之程度,遠不如氣體之大。

總之,凡液體皆無定形,常隨容器之形而變;靜止時,表面上成一水平面。又液體皆不可壓縮,但能因熱而膨脹。

§23. **固體**. 木,石,冰,五金等皆固體也. 各種常用固體之密度,見§17之表2. 貴金屬如金與鉑,密度特大.

凡固體皆有恢復其原來形狀之彈性. 凡固體皆有一定之形狀;但加力於其上,能使之變形.

一鋼條或竹桿之一端固定於一處,他端懸一重物,則鋼條或竹桿下彎(圖11);待重物移去仍復原狀;此卽鋼條或竹桿有恢復其原來形狀之彈性. 車上與鐘錶上所用之彈簧,皆利用此種彈性.

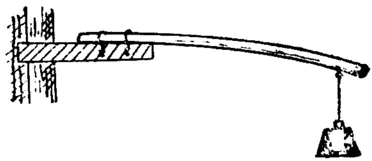


圖11. 固體之彈性.

凡固體皆不易壓縮. 固體之體積,在壓力下無顯著之變化. 以20〔仟克〕之力,壓一玻璃片,玻璃片之厚度不因之而稍減.

凡固體皆稍能因熱而膨脹. 固體之體積,隨溫度略有變化,通常熱脹冷縮. 1〔米〕長之鐵棒,自0°熱至100°C,將有1〔毫米〕之增長.

總之,凡固體皆有定形,且具彈性,固體體積隨壓力及溫度之變化皆甚微.

§24. **固體之彈性——虎克定律.** 再進而言固體彈性之數量關係,且以彈簧之伸縮為例.

試取鋼絲作成螺旋形之彈簧,將隨所加之重量,而逐漸伸長. 如(圖12)所示,彈簧之一端 A,固定於一處,他端 B 自由下垂. 若在 B 鈎上懸一重1〔仟克〕之砝碼,則彈簧伸長,卽 B 下達至

B_1. 其伸長之長度 BB_1, 可用尺量得. 砝碼逐次加多爲 2〔仟克〕, 3〔仟克〕, …, 量得其伸長之長度 $BB_2, BB_3, \cdots$, 各爲 BB_1 之 2 倍, 3 倍, …. 若量得

$BB_1 = 1$〔厘米〕, 則 $BB_2 = 2$〔厘米〕, $BB_3 = 3$〔厘米〕, …

由此觀之, 彈簧之伸長, 與所加之重量成正比. 若受壓而縮短, 情形亦復相同.

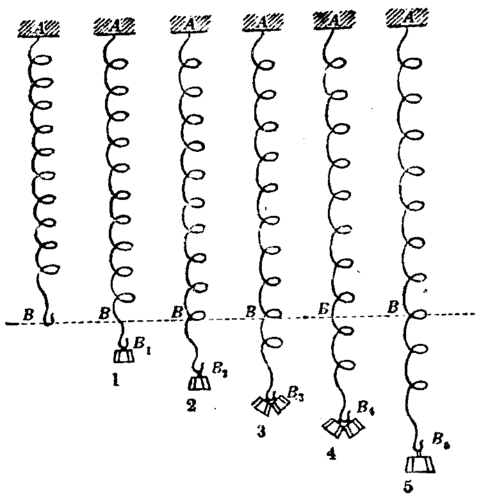


圖 12. 彈簧之伸長.

固體受力而變形, 其形變(如伸長或縮短)與所受之力成正比, 是爲虎克定律(Hooke's law).

虎克定律只能適用於彈性限度以內. 若彈簧伸縮過甚, 則雖撤去外力, 亦不恢復其原來之長度, 而得永久形變. 倘所加之外力甚大, 能使固體斷裂破碎.

§25. 物態之變化. 同一物質,可因溫度之變更,而經歷固體,液體,氣體三態。水在 0°C 下爲固體;在 0°C 與 100°C 之間爲液體;在 100° C 以上,則爲氣體.卽水銀,銅,鉛等物,在適當之溫度中,亦莫不如此.

大凡物體在低溫度時爲固體,溫度稍高爲液體,至高溫度時,則爲氣體。試驗管中置硫磺一小塊,在火燄上熱之,初熱時變爲液體;更熱之,則成爲美麗之紅褐色氣體。

習題三

(1) 氣球之容積爲 500〔立方米〕,內盛氫氣。求球內氫之質量。

(2) 有水,氧,及鐵,共重量同爲 10〔克〕,各求其體積。

(3) 甲拉彈簧,伸長 2.5〔厘米〕;乙拉之,則伸長 7.5〔厘米〕。求甲乙兩人手力大小之比。

(4) 彈簧下懸 4〔仟克〕之物體時,其長度爲 29〔厘米〕;如換以 7.5〔仟克〕之物體,則其長度爲 32.5〔厘米〕。求不懸物體時彈簧原來之長度。

第四章

力

§26. 力之存在及其定義. 吾人由日常觀察可知力之存在,特其面目,各有不同:

物重之力 物體在地面上,皆受地球之吸引,因是吾人舉物,感覺其重而費力,蓋須抵抗地球吸引之力也.地球對於物體吸引之力,稱爲重力,卽爲物體之重量;故重量與物體之質量成正比,而爲力之一種.一物體若不爲他物體所支持,必墮落於地.卽有他物體爲之支持,此物亦必受重力作用於其上.凡物體皆受重力,其爲固體,爲液體,甚至爲氣體不論也.

肌肉之力 以手持物,手腕之肌肉,卽發生力以支持物體之重. 若肌肉之力,勝過物重,則此物可隨手上升;否則,手力不支,重物下墮.

彈簧之彈性力 凡使銅片彎曲,使彈簧拉長或縮短,其中卽有力之表現,此卽所謂彈性力是也.此彈性力有使物體回復原狀之傾向.

在受壓縮之氣體中,亦恆有力之表現,以反抗外加之力,此力亦卽彈性力,或稱壓力.因此力亦有使氣體回復原有體積之傾向也.

汽力與風力 汽力能使火車前進;風力能轉動水車,能張帆

行駛.

力之表現,其例不勝枚舉. 考查上述各種力之公有特性,爲能生運動或改變運動之狀態. 故吾人得力之定義,曰:

力(force)者,所以使物體運動或改變運動狀態之原也.

§27. 力之方向. 線之一端 O 繫於壁上,以手拉其他一端 A (圖 13);壁上之鈎 O,即着一力. 若所用之力,足使鈎拔起,則鈎將沿 OA 之方向而脫離牆壁. 直線 OA 即定吾人所施之力之方向者也.

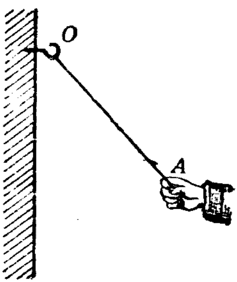


圖 13.

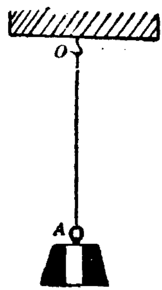


圖 14.

若以線 OA 懸一砝碼(圖 14). OA 之方向,即所謂鉛直之方向,亦即重力作用於此砝碼之方向. 倘割線使斷,則砝碼將沿鉛直方向而下墜.

故力之作用,有其一定之方向.

§28. 力之強度. 人之體力大小,可以其所能舉起之重而測

量之。如某人雙手能舉起 60〔仟克〕重之石塊，而不能舉起 65〔仟克〕者，則其手力大於 60〔仟克〕而小於 65〔仟克〕。此等重量已知之石塊，似可為測量體力之具矣。其弊在於難得確定之數值；因此法無連續性故也。

然則，有何更佳之測力方法？曰，利用固體之彈性，根據虎克定律(§ 24)以求之。量力之强度之器具，曰**測力計**(dynamometer)。

§29. 彈簧秤. 彈簧測力計又名彈簧秤，即利用上述原理而成者。秤之構造為一螺旋鋼絲彈簧 R 藏於圓筒 M 中(圖 15)。幹 T 之上端有環 A，所以承全秤之重量者；幹之下端有一小圓盤 D，彈簧即置於其上。若在秤之下端 C 鈎上掛一砝碼 P，則圓筒中之彈簧被壓縮若干，而同時幹 T 之一部露出於圓筒之上。幹 T 露出之部分，即表示彈簧被壓縮之長度也。

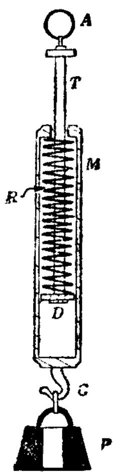


圖 15. 彈簧秤之構造.

圖 16 表示彈簧秤之刻度法。在秤之下端鈎上，逐次將重 1, 2, 3, 4, 5〔仟克〕之砝碼懸上，T 幹露出之部分，則逐漸增大，於是即在 T 幹與圓筒上口水平相齊之處，為之刻度，並於刻度旁標記所用砝碼之重量。

刻度完竣，此器即可量力之大小，不僅限於稱物體之重量矣。例如圖 17，以手拉之，至 T 幹露出圓筒至刻度為 3 之時，表示手中所用之力為 3〔仟克〕。

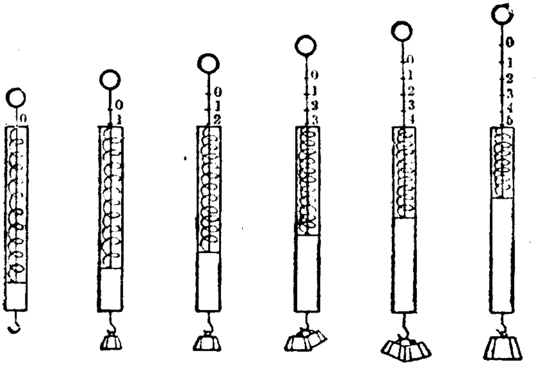


圖 16. 彈簧秤之刻度法。

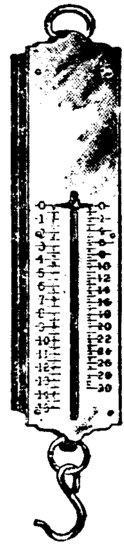


圖 18. 彈簧秤。

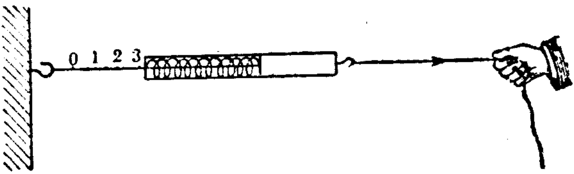


圖 17.

實際使用之彈簧秤，刻度即在外殼之前面，如圖 18. 有時懸物之鈎，改作盛物之盤，移至頂上；或將指針之上下移動，改作圓周轉動；例如一般商店所用之磅秤是也。

§30. 力之重力單位. 以上所述力之單位如〔仟克〕，在日常應用上頗稱便利. 此種以單位質量之物體所受之重力，用作量力之標準，謂之**力之重力單位**(gravitational unit of force)。

對於力之重力單位，不另立名稱，即於質量單位名稱之後，加一"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,而為力之單位,須特別注意。

§31. 用矢號以表力. 力於方向及強度外,尙須指明着力之點;故完全决定一力,條件有三,卽:(1)作用點,(2)方向,(3)強度,是。可以矢號表示之.

如圖 19,矢號 $\overrightarrow{AB}$,其 AB 直線表力之方向;AB 之長表力之強度;矢號之端 A,表力之作用點.

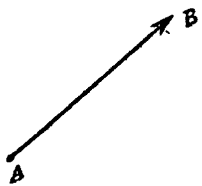


圖19. 用矢號以表力.

物理量如力等,須用矢號,非一數字與單位所能完全表示者,稱為**向量**(vector quantity),以別於**純量**(scaler quantity)。純量如 3〔小時〕,5〔卡路里〕等是。

§32. 壓力. 一物體置於水平桌面上,則此物以其本身之重量,在鉛直方向作用於支持面.支持面受物體之重量後,多少有向下之陷落.支持面向下陷落之變形,不僅因受物體重量之多寡而定,亦視接觸面面積之大小為斷也.

圖 20. 雪犂.

例如一人履雪地之上,則見足深陷於雪中;若此人穿雪犂而立於雪上,則雪面僅呈微凹而已(圖 20).在雪面上所加之重量,前後相等;

所異者一則支持面爲不滿 1 平方尺之足底，而一則爲面積甚大之雪靴底耳．

由是觀之，支持面所生之影響，一，關係於所受物體之重量，二，關係於支持面之面積，於是壓力之義尙焉．

在面積 S 上支持重量 W，則吾人稱此面之每單位面積所受之力 W/S 爲**壓力**(pressure)． 以式表之：

$$壓力\ p = \frac{重量\ W}{支承重量之面積\ S}$$

【例】 有長方形之石板一塊，長 120〔厘米〕，闊 50〔厘米〕，厚 15〔厘米〕，重 225〔仟克〕，置於地上，求地面所受之壓力．

平置時地面所受之壓力爲 $\dfrac{225}{120 \times 50} = 0.0375$〔仟克/厘米²〕

側置時地面所受之壓力爲 $\dfrac{225}{120 \times 15} = 0.125$〔仟克/厘米²〕

豎置時地面所受之壓力爲 $\dfrac{225}{50 \times 15} = 0.3$〔仟克/厘米²〕

建築家在建築之先，宜估計地基所能受之壓力． 普通之地土，能受每〔平方厘米〕1〔仟克〕之壓力，而勿凹陷．

§33. 固體對於力之傳遞． 固體能將力整個的傳遞，而往往改變其壓力．

在木竿 AB 之一端 A，用力 F 壓之(圖 21)，則 B 端亦以力 F 壓向牆上． 何以知之? 以兩相似之彈簧，一置於木竿 B 端與牆壁間，一置於木竿 A 端與用力之手掌間，當手用力 F 時，則見兩彈簧有相等之縮短． 於是，吾人知固體 AB 能傳遞力，且

圖 21. 固體之傳力。

能整個的傳過去。

至於從壓力言之，設 AB 爲一圓錐體. A 端面積爲 1〔厘米^2〕, B 端面積爲 10〔厘米^2〕. 若所用之力 F 爲 20〔仟克〕，則吾人得

$$A\text{ 端之壓力} = \frac{\text{力 }F}{\text{面積 }A} = \frac{20}{1} = 20\text{〔仟克/厘米}^2\text{〕},$$

$$B\text{ 端之壓力} = \frac{\text{力 }F}{\text{面積 }B} = \frac{20}{10} = 2\text{〔仟克/厘米}^2\text{〕}.$$

於是吾人知壓力，經固體傳遞後，未必仍爲原值也。

由上之結果，吾人可藉固體之傳遞，使微小之力，而生强大之壓力。如以削尖之鉛筆頂於桌面上，在筆尾用若干〔克〕之力，而筆尖即施出每〔厘米^2〕數〔仟克〕之壓力，筆尖竟入於木中。

針，錐子，小刀，鑿子，捻子等之作用，均屬此理。

【例】 針尖之直徑爲 0.5〔毫米〕，加 10〔克〕之力於針尾，則針尖之壓力爲

$$\frac{10}{\pi\left(\frac{0.05}{2}\right)^2} = 5{,}093\text{〔克/厘米}^2\text{〕};$$

相當於 50〔仟克〕之重，加於一手指之上也。 手指之面積，約爲 10〔厘米^2〕。 宜其一針見血。

習題四

(1) 力字之意義甚多,試就下列諸名詞中,指出何者爲物理學上之所謂"力":人力;物力;財力;魔力;電力;脚力;水力;勢力;記憶力;創造力。

(2) 有長 5〔厘米〕之彈簧,懸重 10〔克〕時,伸長 1〔厘米〕。今有相同之彈簧,長 10〔厘米〕,懸重 10〔克〕,問伸長多少? 若所懸之重爲 30〔克〕,則伸長多少?

(3) 以 2〔仟克〕之力壓彈簧,縮短 1〔厘米〕;用力拉之,則伸長 0.85〔厘米〕。求拉力之强度。

(4) 方桌重 20〔仟克〕,上置重物 30〔仟克〕,桌有四腿,腿底之面積各爲 25〔厘米^2〕。求腿底之壓力。

(5) 圖畫釘之尾部直徑爲 0.8〔厘米〕,釘尖之直徑爲 0.4〔毫米〕。加 500〔克〕之力於其尾部,求釘尖及尾部所受之壓力。

(6) 一人在泥中,因欲拔起一足,轉致他足陷入愈深,何故?

(7) 一女子重 55〔仟克〕,穿雪鞋踐雪,每隻鞋底之面積爲 140〔平方厘米。(a)在雪上每〔平方厘米〕受壓力若干? (b)若穿高跟鞋,每隻鞋底與地接觸之面積爲 35〔平方厘米〕,則地面每〔平方厘米〕受壓力若干? (c)又僅以 6〔平方厘米〕之鞋跟着地,則壓力爲何?

(8) 一紀念碑重 100〔噸〕,立於基石之上,基石高 1〔米〕,其比重爲 2。若欲地面所受之壓力,不超過每〔平方厘米〕0.7〔仟克〕,則基石之底面須大幾何? 於此,可見基石之用處。

(9) 截面均勻之棒,被拉或壓,單位面積所受之力,與其每單位長之伸或縮之比,稱爲楊氏模數 (Young's modulus)。今有鐵絲,半徑爲 0.6〔毫米〕,長 250〔厘米〕,上端固定,下端懸一砝碼,重 2〔仟克〕,問鐵絲伸長多少? 鐵之楊氏模數爲 1.8×10^9〔克/厘米^2〕。

第五章

共點力之平衡

§34. 二力之平衡. 二力有一公共之作用點，而方向相反，强度相等，則得平衡. 此語爲二力平衡之條件，而平衡亦爲評判二力是否相等之準則. 若一力 F_1 以某方向作用於一物體，同時另一力 F_2 以相反方向亦作用於此物體，而物體能保持其平衡，則曰兩力 F_1 與 F_2 之强度相等.

圖 22 中，二人各持繩之一端，向相反之方向用力拉之；若兩人各保持其原來之地位而不動，則曰兩人之力相等. 圖中矢號 F_1，F_2 等長，乃表示力之强度相等，方向相反.

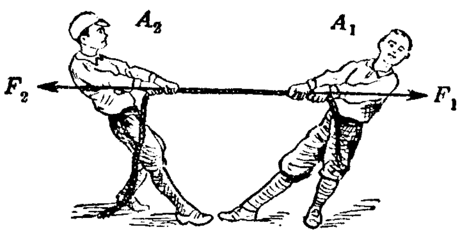


圖 22. 二力之平衡.

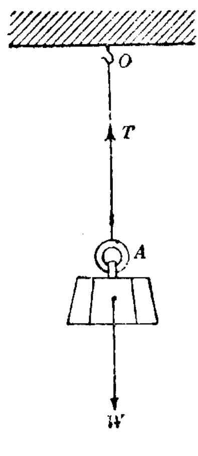


圖 23.

又如圖 23 中之線 OA，上端固定，下端懸一砝碼. 受鉛直向下之重力 W，同時受線向上之張力 T. 砝碼因得平衡. 以其

平衡靜止，可知線之張力 T 與砝碼之重量 W，兩者大小相等。若 W 增大，則 T 亦隨之增大；但 W 增至某一程度而 T 不復能增大時，則線斷而砝碼墜（失卻平衡）。

§35. 會聚於一點之三力之平衡——力之平行四邊形法則。 兩力或兩力以上，同時作用於一點者，稱爲**共點力**(concurrent forces)。 共點之三力之平衡，合於下述**力之平行四邊形法則**(Principle of Parallelogram of Forces)：

如圖 24，OF_1，OF_2 爲兩共點力，以 OF_1,OF_2 爲邊，作平行四邊形。設 OR 爲其對角線。另作一 OF_3 與 OR 等長度而反方向；則 OF_1, OF_2, OF_3 三力必成平衡。

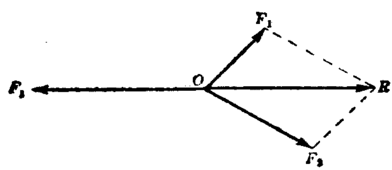


圖 24. 三力之平衡。

吾人稱 F_1 與 F_2 爲**分力**(component forces)；又稱對角線所代表之力 R，爲 F_1 與 F_2 之**合力**(resultant force)。 此單獨之合力所發生之作用，與諸分力所共同發生之作用相等。

上述之法則，可用一簡單之儀器，作實驗以證明之。

實驗證明之一： 以二彈簧秤 A,B 掛於黑板上緣之二釘上，二秤之下鈎以繩連之；於繩之一點 O 懸一砝碼，其重量 W 爲已知者，而成平衡（圖 25）。 此時連於 A, B 秤兩段繩之張力 X 及 Y，可由秤上讀出；而在 O 點有共點之力三，即 X,Y, 與 W 是也。依此三力之方向（即三段繩之方向），在黑板上作三直線，其長短與 X,Y, 及 W 之強度成比例。如是則

任以兩線爲平行四邊形之兩邊，作平行四邊形，其對角線之一，必與第三線等長而方向相反。

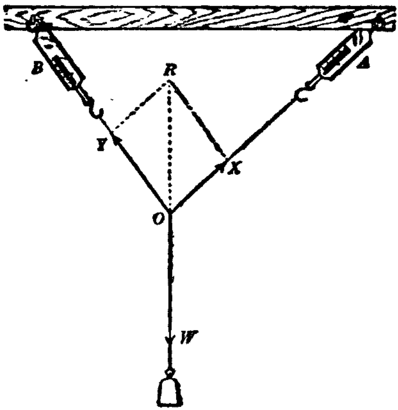


圖 25.

即任何二力之合力，必與第三力大小相等，方向相反；亦即共點而平衡之三力，其合力爲零。

實驗證明之二： OB 線之上端 O 固定，下端懸一砝碼 P（圖 26）。又在線上近下端之點 A 繫一彈簧秤，以手拉之，使 OA 與鉛直方向成角 AOA'，此時讀得彈簧秤上之力爲 Q。

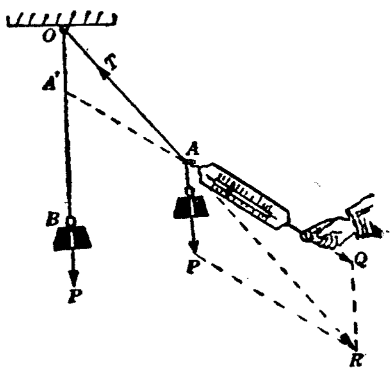


圖 26.

此處作用於 A 點之力有三：(1)砝碼向下之重力 P；(2)人手之拉力 Q；(3)在 OA 方向線上之張力 T。三者之中，T 爲

未知，但吾人可知其與 P，Q 之合力 R 大小相等，方向相反。

從 $AA'O$ 與 AQR 兩相似三角形中，得

$$\frac{Q}{P}=\frac{AA'}{OA'}.$$

上式中之諸量皆能量得。若將 OA 置於各種不同地位，而能每次證明上式者，則平行四邊形之法則成立矣。

§36. 力之合成. 合力之意義，巳如上節所述。 設有 P，Q 兩力同時作用於 A 點，如圖 27，引 AB 及 AE 表之，再引直線 BC 及 EC，完成平行四邊形 $ABCE$。從點 A 引平行四邊形之對角線 AC。 此 AC 卽代表合力 R 之大小與方向。

又因 BC 與 AE，平行且相等，故又可用 BC 表 Q。 如此則兩分力 P，Q 與其合力 R，恰好完成三角形 ABC。

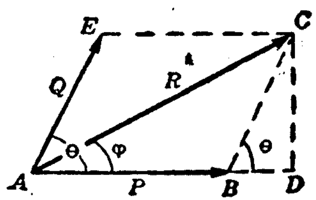


圖 27. 力之合成。

命 θ 表兩力 P,Q 之方向間之角度，則有

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

又引 CD 垂直於 AB，命 φ 表 R 對於 $\overline{AB}$ 所作之角度，則有

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

卽

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

上列二式之 R 與 φ，決定合力之大小及其方向。

合力之大小,可較二分力中任一力爲大或小,完全視二力間所成之角而定。 如圖 28 所示,在(a),P,Q 二力同向,合力 R 卽等於二者之值相加,爲最大;由(b),而(c),而(d),P,Q 二者間之角度增加,合力 R 逐漸減小;在(e)中,P, Q 二力異向,合力 R 等於二者之值相減,爲最小。

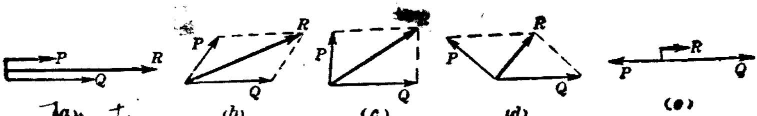


圖 28.

【例】 有物重 100〔磅〕,懸於 A 繩之下端(圖 29),某孩用手執 B 繩而水平拉之,問 A 繩與鉛直線成 30° 角時,某孩所用之力及 A 繩之張力爲何? 若某孩之手力,不能超過 100〔磅〕,令其竭力而拉,求繩 A 與鉛直線所成之最大角。

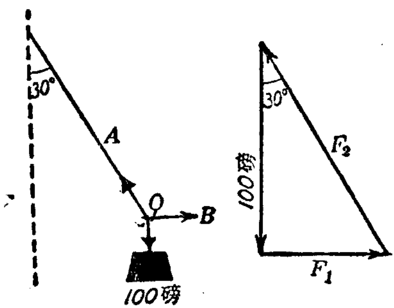


圖 29.

會聚於 O 點之力有三,計爲鉛直向下之重力 100〔磅〕,水平向右之手力 F_1,與繩之張力 F_2;代表此三力之矢號,構成一直角三角形。

由此三角形,得

$$\frac{F_1}{100\text{〔磅〕}} = \tan 30^\circ = 0.577;$$

卽 $$F_1 = 0.577 \times 100\text{〔磅〕} = 57.7\text{〔磅〕},$$

及 $$\frac{100\text{〔磅〕}}{F_2} = \cos 30^\circ = 0.866,$$

即 $F_2 = \dfrac{100}{0.866}$〔磅〕$= 116$〔磅〕.(較鉛直下掛時之張力為大.)

若某孩竭力而拉，則 $F_1 = 100$〔磅〕,此時 A 繩與鉛直所成之最大角 θ，為

$$\tan\theta = \frac{100}{100} = 1,$$

即 $$\theta = 45°.$$

§37. **共點諸力之平衡.** 若有三個以上之共點力，則先求任意兩力之合力，再求此合力與第三力之合力，如是蟬聯而進，求得之合力，與最後一力，為等量而反向者，則諸力平衡.

如圖 30 所示，先求得 F_1 與 F_2 合力為 F，再求 F_3 與 F 之合力為 R，R 即為此 F_1,F_2,F_3 三力之合力. 故欲平衡此三力，必須有與 R 等量而反向之力 F_4，同作用於點 O. F_4 稱為 F_1, F_2, F_3 三者之**平衡力**(equilibrant). 就 F_1, F_2, F_3, F_4 四力全體而言，乃互相平衡，其總合力(即 R 與 F_4 之合力)為零.

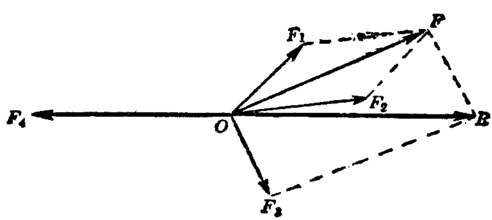


圖 30.

由上述合力之求法，可知諸力平衡時，以代表諸力之矢號作邊，必成一閉合之多角形，如圖 31 (a) 所示；否則，諸力不能互相

平衡，如圖中之(b)。

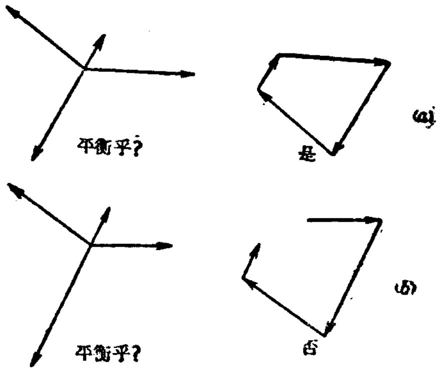


圖 31.

§38. **力之分解.** 任何一力 F，必要時，可視為在任意二方向上二力之合力；換言之，卽可在任意二方向上分解成二分力。其法以此二方向為二邊，F 為對角線，作平行四邊形；則平行四邊形二邊之長，卽代表二分力之大小。

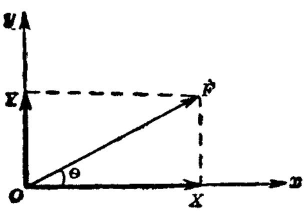


圖 32.　力之分解.

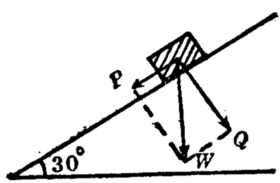


圖 33.

若此二方向互相正交，如圖 32 所示，則得 F 之分力 X 及 Y 為：

$$X = F\cos\theta,$$

$$Y = F\sin\theta.$$

一力何以要分解成二力，豈非多事？ 此因吾人有時所注意者，爲此力在某方向之有效部分耳。 例如置重 20〔仟克〕之物於一傾斜 30° 之平面上(圖 33)，所受之重力 W，乃鉛直向下。可將其分解成沿斜面及垂直於斜面之二分力 P 及 Q，而得

$$P = 20\sin 30° = 10〔仟克〕,$$

及 $$Q = 20\cos 30° = 10\sqrt{3}〔仟克〕.$$

此 $P = 10$〔仟克〕之分力，將使物體沿斜面而下滑；欲使其不墜，須沿斜面，用相等而相反(卽向上)之力以支持之。 至 $Q = 10\sqrt{3}$〔仟克〕，乃物體所施於斜面之正直壓力。

又因數力同時作用於一點，欲求其合力時，用平行四邊形法則，遞次推求，每嫌周折。則先就兩正交坐標軸，將各力分解，同一軸上之諸分力，可以代數方法相加，而得合力在此軸上之分力。再將合力在兩軸上之二分力合成，卽得所求之合力。

【例】 兩馬拉船，船向前直進時，甲馬之繩與船身成 30° 之角，乙馬之繩與船身成 45° 之角。已知甲馬之力爲 600〔仟克〕，求乙馬之力及船所受之力。

設 OA 及 OB 代表甲乙兩馬之力 F_1 及 F_2(圖 34)，OC 代表船前進之方向及其所受之力 F。F 卽爲 F_1 與 F_2 之合力。 由三角形 OAC，得

$$\frac{F_1}{\sin 45°} = \frac{F_2}{\sin 30°} = \frac{F}{\sin 105°},$$

卽 $$F_2 = \frac{\sin 30°}{\sin 45°}F_1 = \frac{0.5\times 600}{0.707}〔仟克〕= 424〔仟克〕,$$

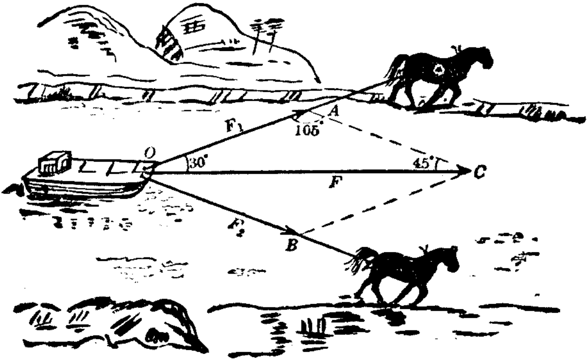


圖 34.

$$F=\frac{\sin 105^\circ}{\sin 45^\circ}F_1=\frac{0.966\times 600}{0.707}\text{〔仟克〕}=820\text{〔仟克〕}.$$

爲說明起見，另作解答如次：先將二馬之拉力 F_1 及 F_2 沿河身（X 軸）及垂直河身（Y 軸）之方向分解（圖 35），得

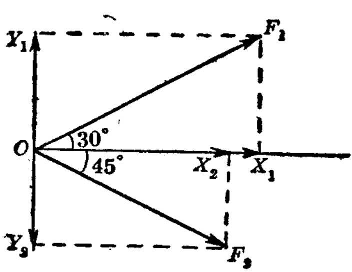


圖 35.

$$X_1=F_1\cos 30^\circ,$$
$$Y_1=F_1\sin 30^\circ;$$

及

$$X_2=F_2\cos 45^\circ,$$
$$Y_2=F_2\sin 45^\circ.$$

因船向前（X 軸）直進，Y_1 必與 Y_2 相等而反向，即

$$F_1\sin 30^\circ=F_2\sin 45^\circ,$$

或

$$F_2=\frac{\sin 30^\circ}{\sin 45^\circ}F_1=424\text{〔仟克〕}.$$

於是，有

$$F = X_1 + X_2 = F_1 \cos 30^\circ + F_2 \cos 45^\circ$$

$$= F_1 \cos 30^\circ + F_1 \frac{\sin 30^\circ}{\sin 45^\circ} \times \cos 45^\circ$$

$$= 600\,(0.866 + 0.5)\,〔仟克〕 = 820\,〔仟克〕.$$

39. 帆船所受之力. 帆船乘風可以航行之理,由分力說明之,至爲清晰. 如圖 36, 船首斜向上方,風從右方吹來,達帆

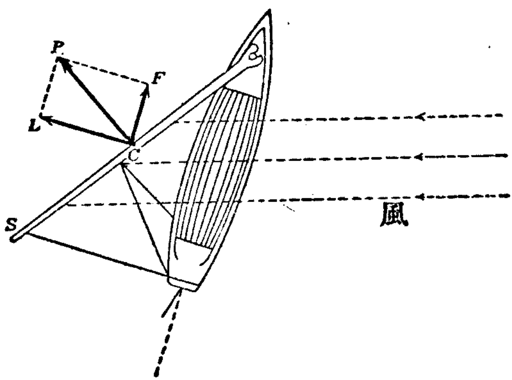


圖 36. 帆船所受之力.

CS 上,一部分作用於帆,其他一部分掠帆而過,不生作用. 前者爲垂直於帆之分力,即圖中 CP 表示之一部分.後者因不生作用,即未繪出. 帆上實際受到之作用,即此項垂直分力 CP,其所生之效應,又可分兩項說明. 換言之,此 CP 之力,又可分作 CF 及 CL 兩分力. 其中之 CF 與船體平行,正向前方,故其效應在使船體前進,CL 之方向,適與船體垂直,且向左方,故其效應在使船體傾向一方. 加深船底,即所以減少船體之傾斜.

習 題 五

(1) 設有向北 3〔仟克〕之力，與向西 4〔仟克〕之力，同時作用於一點上，求其合力之大小及方向。

(2) 二力各為 50〔仟克〕，互成 120° 角，求其合力。

(3) 一重 20〔仟克〕之物體，置於光滑斜面上。設斜面之高為 10〔厘米〕，長 200〔厘米〕。求斜面上所受之正直壓力與使物體下滑之力。

(4) 兩力相交成 60°，其合力為 $2\sqrt{3}$。已知一力為 2，求他一力。

(5) 兩力間之角為 90° 時，合力等於 $\sqrt{10}$；如為 60° 時，合力等於 $\sqrt{13}$。求此兩力。

(6) 一小孩重 15〔仟克〕，坐於鞦韆板上，為 5〔仟克〕之水平力推向一邊(圖 37)。求繩與鉛直線所成之角。問繩之張力較鉛直時增加多少?

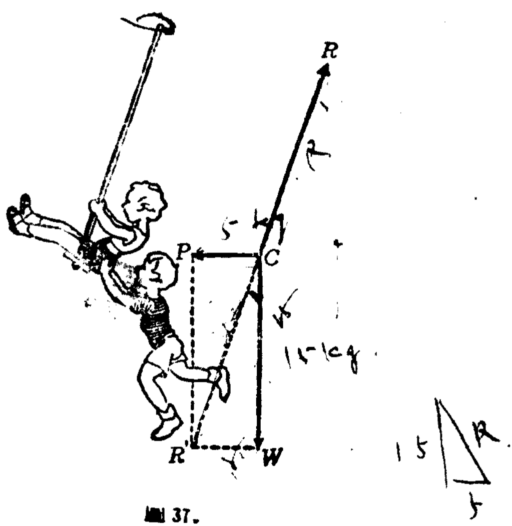


圖 37.

(7) 將一力分解成兩分力，使其一分力與原來之力正交，而大小相等。求他一分力。

(8) 一點受 5〔克〕，12〔克〕，與 15〔克〕之三力作用，恰成平衡。求此三力間所成之角。

(9) 以繩繫於烟囱之頂，曳之倒地，繩宜長抑宜短？ 作圖以說明之。

(10) 10〔呎〕長之橫鋼梁，一端支在牆上，另一端用鏈鍵支持之 (圖 38)，若橫梁之重為每〔呎〕40〔磅〕，每端支持一半之力，而鏈釘在牆上之點，離橫梁之支點為 10〔呎〕，求鏈之張力。

(11) 風力等於 15〔仟克〕，以 30° 之傾斜角度吹向帆面，帆面與船前進之方向又成 60° 之角。求船所受前進之力。

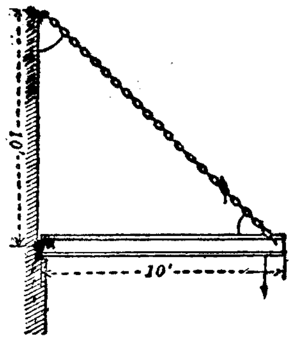


圖 38.

(12) 六力在一平面上作用於一點，每兩力相交成 60°，其強度順次為 1,2,3,4,5,6。求其合力。

$\frac{5}{15}=\sin\theta=\frac{1}{3}$

$\sin\theta = \frac{5}{15}=\frac{1}{3}$　30°

第六章

平行力

§40. 兩同向平行力. 設 F_1 與 F_2 爲兩平行力,方向相同,作用於一物體之兩點 A_1 及 A_2(圖 39). 另設 F_3 爲與 F_1, F_2 平衡之力, R 爲 F_1 與 F_2 之合力,則 F_3 與 R 等量而反向. R 若已知, F_3 亦即決定.

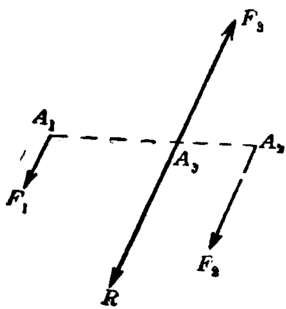


圖 39. 兩同向平行力之合力.

決定 R 之法則如下:

兩同向平行力 F_1, F_2 之合力 R 之强度,等於 F_1, F_2 二者之和,卽:

(1) $\quad R = F_1 + F_2;$

三作用點 A_1, A_2, A_3 同在一直線上, A_3 在 A_1 與 A_2 之間,而各力之强度,與其他二力之作用點間之距離成比例,卽:

$$(2) \qquad \frac{R}{A_1A_2} = \frac{F_1}{A_2A_3} = \frac{F_2}{A_1A_3},$$

或

$$(2') \qquad F_1 \times A_1A_3 = F_2 \times A_2A_3.$$

換言之,第一個分力之大小乘以其作用點至合力作用點間之距離,等於第二個分力乘以其作用點至合力作用點之距離.

實驗證明 以1〔米〕長之木尺一支，平，置於刀口之上(圖 40)。在木尺上刀口之兩邊，分置不同重量之砝碼，例如 50〔克〕與 100〔克〕，調整其地位，使其合力恰正通過刀口，此即使木尺保持平衡，不致向左或向右傾側。

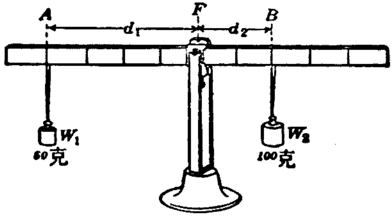


圖 40.

量得自砝碼至刀口之距離，吾人可知兩砝碼之重量，與其各離刀口距離之乘積為相等。圖中 50〔克〕之砝碼離刀口為 40〔厘米〕，而 100〔克〕之砝碼離刀口則為 20〔厘米〕，於是

$$50 \times 40 = 100 \times 20 = 2000$$

此實驗只證明兩砝碼之重力之合力，確係經過中間刀口之處，但未能定其強度。

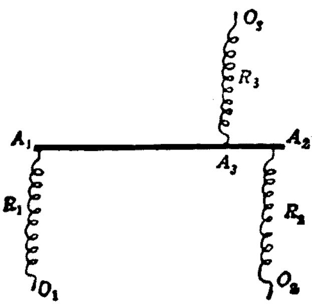


圖 41.

下一實驗，乃所以定合力之強度者。以三彈簧秤 R_1, R_2, R_3 繫於一竿之三點，如 A_1, A_2, A_3 (圖 41)。以 R_3 之他端 O_3 固定於一處。在 R_1, R_2 之他端 O_1, O_2 上各懸適當之砝碼，使竿平衡。讀得三彈簧秤所表示之力，即可證明公式 (1) 之關係。又量得 A_1A_2, A_2A_3, A_3A_1 之距離，可證明公式(2)之關係。例如實驗所得為：

$$F_1 = 100\,〔克〕, \qquad F_2 = 200\,〔克〕, \qquad F_3 = 300\,〔克〕;$$

$$A_2A_3 = 20\,〔厘米〕, \quad A_3A_1 = 40\,〔厘米〕, \quad A_1A_2 = 60\,〔厘米〕.$$

即可證明

(1) $$300 = 100 + 200,$$

(2) $$\frac{100}{20} = \frac{200}{40} = \frac{300}{60}.$$

§41. 兩異向平行力. 兩力平行而方向相反者，其合力依下述法則決定之：

有兩異向平行力 F_1 與 F_2，其合力 R 亦與 F_1, F_2 平行，而與兩力中之較强者爲同向，其强度等於兩力之差，即：

(1) $$R = F_2 - F_1 \qquad (設\ F_2 > F_1);$$

三力之作用點 A_1, A_2, A_3 在同一直線上，且有

(2) $$\frac{R}{A_1A_2} = \frac{F_1}{A_2A_3} = \frac{F_2}{A_1A_3};$$

R 之作用點 A_3 必在線段 A_1A_2 之延長線上，且與較大之力 F_2 之作用點 A_2 相距較近（圖 42）。

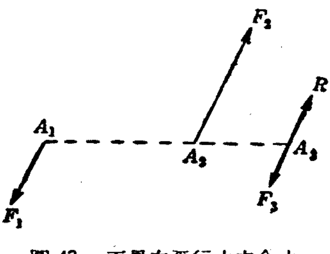


圖 42. 兩異向平行力之合力。

從(2)式，吾人可得

$$F_1 \times A_1A_3 = F_2 \times A_2A_3;$$

換言之，兩力之强度各與其自己之作用點至合力作用點之距離之乘積，爲相等。與合力 R 相等而相反之力 F_3，爲 F_1 及 F_2 之平衡力。

實驗證明 木尺一支，一端擱於固定之刀口上，他端繫於天平之一圓盤 B 下（圖 43） 在天平之他端圓盤 A 中，置入砝碼若干，使天平平衡。在尺上離刀口 40〔厘米〕之處，置一 200〔克〕之砝碼，天平立失其平衡。但在圓盤 A 中添入砝碼 100〔克〕，則又恢復天平之平衡。 A 盤加入之

100〔克〕砝碼之重力,即使 B 盤對於木尺有 100〔克〕之力向上作用。如是木尺離刀口 80〔厘米〕之處有 100〔克〕之力向上作用,而在離刀口 40

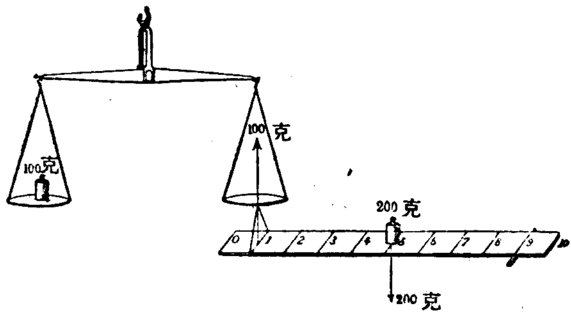


圖 43.

〔厘米〕之處有 200〔克〕之力向下作用,適能保持木尺之平衡。於是吾人得證明兩力各與其自作用點至刀口距離之乘積爲相等也。

§42. 諸平行力之合力. 諸平行力中,有爲同向者,有爲異向者。欲求諸平行力之合力,可先求其中任意兩平行力之合力,再求此合力與第三平行力之合力,如是遞演,至最後則得諸平行力之合力。

吾人於此可補述一言:合力作用點之位置,與分力之方向無關。若將分力全部,整個轉向(仍互相平行,但方向則各與前相異),則合力仍經過原來之點,此定點名曰**諸平行力之中心**(center of parallel forces)。

§43. 力偶. 相等而相反之兩力,同時作用於一物體上。若

兩力在同一作用線上，則相消而不顯作用，如圖 44(*a*)；若不在一直線上，如圖 44(*b*)，則物體將呈旋轉之現象.

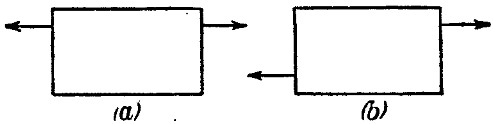


圖 44.

作用於一物體之兩平行力，等量而異向，則成**力偶**(couple). 圖 45 之桿 AA'，爲受偶力 F 與 F' 之作用者. F 欲使 A 端向左，F' 則欲使 A' 端向右，而中心點 O 不生運動，一若爲固定之軸者. 物體受力偶之作用，能生旋轉之運動.

§44. **力矩.** 若一物體能繞其中一定點而旋轉，則可用一單獨之力使之旋轉，與用一力偶使之旋轉之效果相同. 圖 46 中，

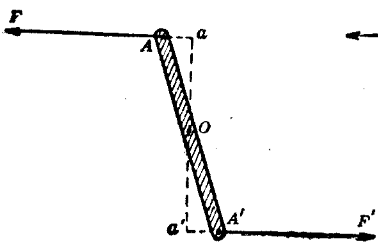


圖 45. 力偶.

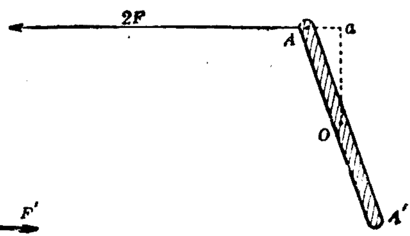


圖 46.

在 A 處作用 $2F$ 力，使 AA' 繞固定之 O 軸而旋轉，其作用與圖 45 中用力偶者同. 蓋在此兩事件中，其力矩爲相等也.

一力 F 關於某點 O 之**力矩**(moment of force)，爲 F 與自點 O 至 F 之垂直距離之相乘積也.

在圖 45 及圖 46 中，有

$$\underbrace{F \times oa + F' \times oa'}_{\text{偶力之力矩}} = \underbrace{2F \times oa}_{2F\text{ 之力矩}}.$$

又若易 $2F$ 爲 F，而增 oa 爲 $2oa$，力矩仍相等．故力偶之力矩，等於力 F 與其間垂直距離 aa' 之相乘積． aa' 稱爲力偶之臂 (arm of the couple)．

由此可知使物體繞軸轉動，所關者爲力矩，非僅繫乎作用力之大小．力矩因此亦稱轉矩(torque)．是故量力偶，不以〔克〕而以〔克·厘米〕，不以〔磅〕而以〔磅·呎〕．

如圖 47(a)，F 之作用點 A 離軸遠，則使輪轉動之效大；若 F 之作用線經過軸 O (圖 47, b)，則輪不轉，以其轉矩爲零故也．

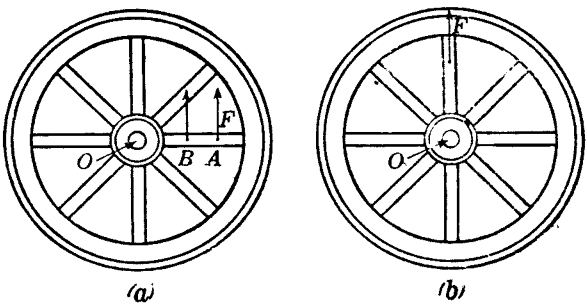


圖 47.

物體受力矩之作用而轉動，或順時針，或反時針，因之力矩亦應作正負之區分．通常使物體作反時針之轉動者爲正，順時針者爲負．

吾人可證明，諸分力(無論爲共點力或平行力)之力矩之和，

等於其合力之力矩。

習題六

(1) 尺之一端，置於水平之刀口下，其中點即 5〔寸〕處懸於彈簧秤之下。設以 1〔仟克〕之重物，先後置於 6〔寸〕或 8〔寸〕處，求彈簧秤所指示之重量。尺之地位，始終保持水平。

(2) 一人挑行李，行李重 40〔斤〕，掛在擔之一端，擔長 5〔尺〕，在擔之他端掛一石塊，重 10〔斤〕。求扁擔羞於肩上之點與石塊之一端之距離。

(3) A,B 兩人用一扁擔抬物，物重 120〔公斤〕，擔長 6〔市尺〕，物體與 A 之距離爲 2〔市尺〕。求此兩人分擔之重量。

(4) 設有兩異向平行力，同爲 5〔仟克〕，其間相距 16〔厘米〕。求此力偶之矩。

(5) 物體受一力偶作用，力之强度等於 8〔克〕，力偶之臂爲 12〔厘米〕，將使物體順時針而旋轉。若用 5〔克〕之力所成之力偶，在反時針向加於物體，以阻止其轉動，則其臂應爲若干？

(6) 有一物體可繞水平之軸而轉動，今於軸之左方相距 12〔厘米〕處，加一鉛直向下之力 3〔仟克〕，問應於何處另加 4.5〔仟克〕鉛直向下之力，物體方不轉動？此時軸上受力多少？

第七章

重力　鉛直線　重心

§45. 重力之方向——垂直線. 一重物(如鉛球)從高處靜止而自由墮下,所受者只有重力,則其軌道爲一直線(圖 48 a),此直線名曰**垂直線**(vertical line)。故垂直線者,物體在空中由靜止而自由墮下所畫之直線也.

又將鉛球以線懸於空中而平衡靜止時(圖 48 b),所受者爲重力與線之張力,則懸線爲垂直線;故得垂直線之另一定義曰:垂直線者懸掛鉛球之線靜止時之方向也,因又稱**鉛直線**.

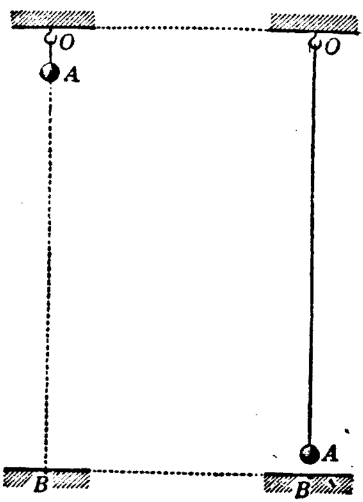


圖 48. 鉛直線.

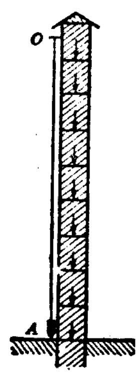


圖 49.

鉛直線之用途甚廣。築牆宜直，匠人用此法以視牆之直否。法以鉛球線自頂懸至牆底(圖 49)。 若牆爲鉛直，則牆與鉛球線之距離上下相等；若牆頂向左傾，則牆與懸於牆左之鉛球線之距離，上小而下大。牆向右傾，結果相反。

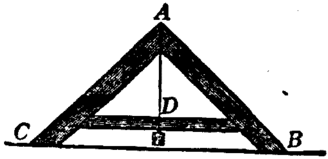


圖 50.

屋梁宜平，匠人用鉛直線以作水準器之用。 法以鉛直線懸於二等邊三角形之頂點(圖 50)；在底邊之中點，刻一記號。以底邊置於屋梁之上。若屋梁已水平，則鉛球線經過底邊之刻號處。若屋梁不爲水平，則鉛球線偏於底邊刻號之左或右(圖 51)。

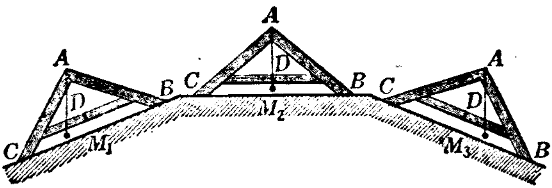


圖 51.

凡鉛直線皆向地心。懸一鉛球線在水盆之上，使鉛球及線之下部浸入水中，如圖 52。用一直角三角板 BCD，可證明鉛球線 OA 垂直於靜止之水面。

地球之面近似圓球，海洋之靜止水面，即成此形。 今鉛球線垂直於水面，即垂直於地球之面，亦即通過地球之中心也。 地球之直徑甚大(約 12,870〔仟米〕)，在地球上之小區域內，例如

一城市內之區域，可視爲一平面，而垂直於此小區域內地面之鉛直線，可視爲平行。但相距過遠之兩地，不能作如是觀。南京之鉛直線，與在赤道上同一子午線之點之鉛直線成角 32°，而與北極之鉛直線成角 58°。

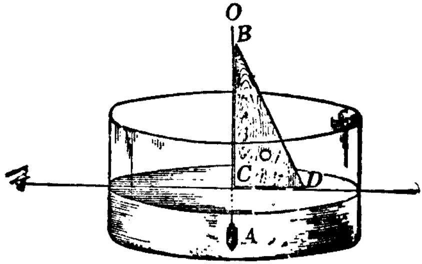


圖 52.

§46. 重力之强度——物體之重量. 地球作用於一物體之重力之强度，稱爲此物體之**重量**(weight)。重量一如普通之力，可用彈簧秤測量。因此，力之單位可與重量之單位，同爲〔克〕或〔仟克〕。

§47. 重力之作用點——重心. 一物體所受之重力，其强度與方向，已如上兩節所述。至於其作用點，稱爲此物體之**重心**(center of gravity)，可依下法求之：

例如三角板 ABC，依次以其三頂點 A,B,C 懸於鉛球線 OP 上之一點(圖 53)。沿鉛球線之方向畫直線 AA',BB'，及 CC'，此三直線即表物體(三角板)在三個不同位置時，所受重力作用之方向。由實驗結果，知三直線交於一點 G。若懸此三角板於其他諸點，亦必得此同一之點 G，此點 G 即所欲求之重心也。以指端支三角板於其重心 G，可得平衡。

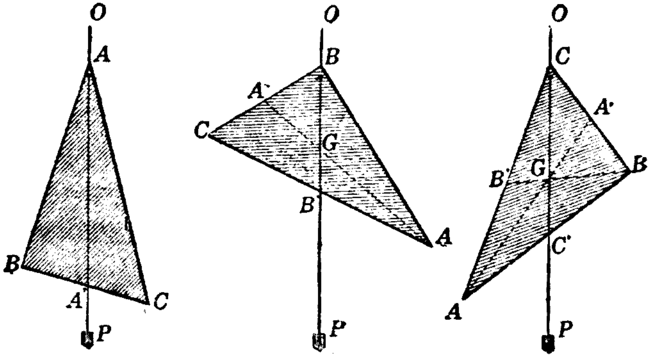


圖 53. 重心.

均勻直線形物體之重心. 均勻的直線形之物體 AA'(例如鐵棒)，則其中點即爲重心. 因前述平行力之合力，知不論直線之位置若何，在此直線兩對稱相等部分，如 BC 與 $B'C'$，所受重力之合力，必經過此直線之中點 G 故也(圖 54). 又如均勻之鐵環，鐵環之幾何形心即爲重心. 一物體之重心，不必一定在其體內.

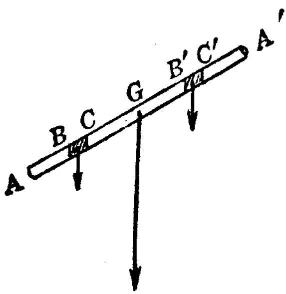


圖 54.

從上種種，可知不論物體之位置若何，其重心之地位一定.

習 題 七

(1) 自地球面上兩點，各作鉛直線，交於地球中心得角 1 分者，此兩點之距離，稱爲 1〔海里〕. 依〔米〕之定義，知地球中心角 90° 所張地面之

距離爲一千萬〔米〕,問1〔海浬〕等於多少〔米〕?

(2) 求一三角形周之重心;又求三角形全面積之重心。

(3) 一金屬圓柱長100〔厘米〕,半徑1〔厘米〕。另一同樣金屬之圓柱與之相連,不知其長,但知其半徑爲2〔厘米〕。若此連合體之重心在連接處,求第二圓柱之長。

(4) 一農夫欲衡牛之重,其臺秤可稱牛之重,但不能容牛之身。彼乃使牛之兩前脚與兩後脚先後立於臺秤上稱之,問二次重量之和,是否爲牛之全重? 試述其理由。

(5) 舉起重240〔磅〕均勻之棒之一端,需力若干?

(6) 兩孩坐於長18〔呎〕木板之兩端,在離中點1〔呎〕之處支持平衡,較小之孩重90〔磅〕,坐於離端1〔呎〕處;大孩則坐於離端2〔呎〕處,木板之重爲60〔磅〕,問大孩重若干?

(7) 木柱長5.5〔米〕,横臥地上,用力20〔仟克〕可將細端舉起,用力35〔仟克〕可將粗端舉起。求木柱之重量及其重心所在。

(8) 長120〔呎〕之鐵橋重500〔噸〕,重心在離東端70〔呎〕之處。一機車停在橋上,則東西兩支柱各受255〔噸〕與325〔噸〕之力,問機車重若干,停在何處?

第八章

物體在重力下之平衡

§48. 物體在平面上之平衡. 物體所受之重力,恆爲鉛直向下,且重力作用線必經過物體之重心,故物體之重力,有曳此物體使其重心更行向下之傾向. 物體之置於一處,不爲重力所動者,蓋重力不能再使其重心更向下耳.

器具之穩定. 日常所用器具,如椅,如桌,如櫥,如鋼琴等,皆有展開之四足,其下部往往較重,使器具之重心之位置低下.若此種器具,吾人易知其平衡之穩定程度甚大也.

圖 55 中 $ABCD$ 代表一件器具(圖中僅見其二足),其重心 G 離底 AD 甚近. 倘欲將此器具繞 A 邊向左推倒,在此運動中,物體之重心 G 漸漸向上,依矢號之方向而移動. 但物體之重

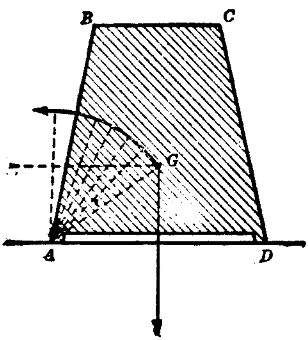


圖 55.

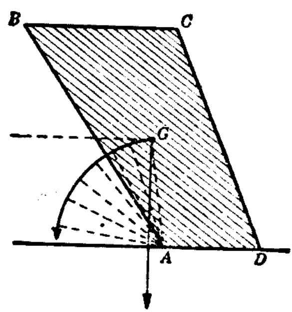


圖 56.

鈸,反抗此向上之移動. 推倒所需之力,因物體愈重,重心愈低,及底面愈寬而愈大.

當然吾人亦能製造器具,卽使置於一平面上,亦不能保持其平衡. 如圖56所示爲一器具 $ABCD$,若以其 AD 而置於桌上,卽不能保持平衡. 此物體將繞 A 邊向左傾倒,毫無反抗,因其重心 G 可沿矢號之方向,而逐漸降低也.

液體之自由面. 液體盛於容器中而靜止時,其與空氣接觸之自由面,必成一水平面. 否則,設某部分 A 高於他一部分 B (圖 57),則 A 必流向 B 處,終至 AB 成一平面,且爲水平,此時全部液體之重心,居於最低之地位.

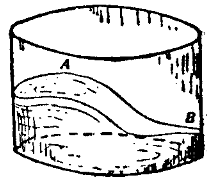


圖 57. 液體之自由面

物體在傾斜面上之穩定. 物體置於傾斜面上,因物體與傾斜面間之摩擦力,能阻止物體下滑而得平衡. 至於其平衡之穩定情形,仍須視其重心之位置而定,與摩擦阻力無關也. 設傾斜

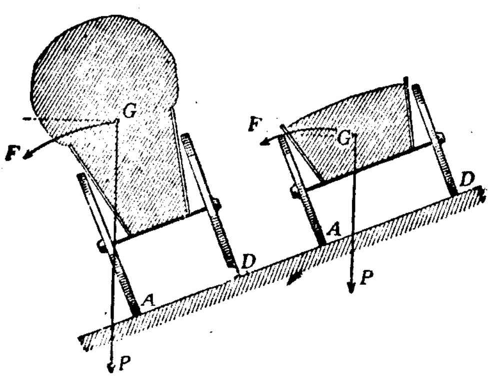


圖 58. 物體在傾斜面上之穩定.

面上有一重貨車,車之兩輪間有相當之距離,則全車之重心地位低,而從此點所引之鉛直線,不出車底之外,車不傾覆(圖58)。

另有一車,兩輪相距甚近,所裝貨物又堆積甚高,上重而下輕,如是全車之重心,高高在上,若從重心所引之鉛直線出於車輪底面之外,則必招致傾覆之禍。

§49. 懸於一定點之物體之平衡. 吾人在壁上掛一幅或一衣,屠夫在鈎上懸一猪腿(圖 59),靜止時皆呈穩定之象。物體之重心 G,在自懸點所引之鉛直線上,且在懸點之下,居最低之地位。

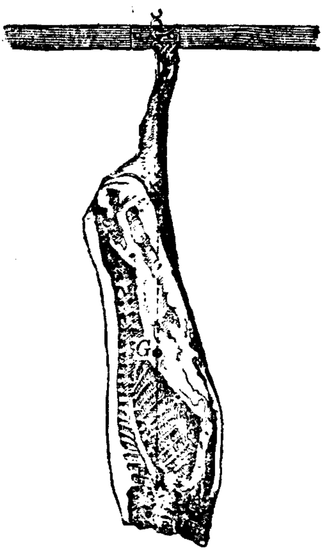


圖 59. 穩定平衡.

穩定平衡. 將上述懸掛之物體,向左或右掀開,則物體之重心,繞懸點畫一圓弧,而向上移動。但一放手,則物體爲受重力之故,終必回復鉛直。吾人稱此等物體爲在**穩定平衡**(stable equilibrium)中。蓋如此懸掛之物體,雖受一時擾動,離開平衡狀態,但待外力既去,物體即能自行回復其原來位置也。

應用此理,構成一巧妙之玩具。木偶人腰間左右各懸重物 m, m'(圖 60),使木偶之重心移至足下,再立木偶於柱上,無論

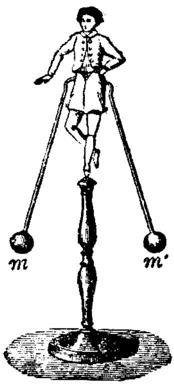


圖 60.

如何搖動，不致傾倒。

不穩定平衡。立一鷄蛋於桌上，或豎一椅於指上(圖 61)，稍一不愼，即離其平衡位置，愈去愈遠，而有顚覆之虞。吾人言此情形，為**不穩定平衡**(unstable equilibrium)。蓋在此種情形中，物體之重心，在支持點之上，而支持點之面積甚小，自重心所引之鉛直線，偶出支持點之外，物即傾覆。

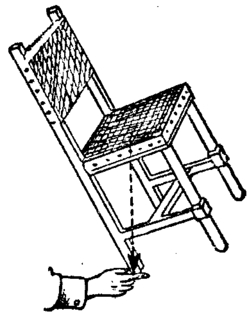


圖 61. 不穩定平衡.

§50. 可繞一定軸旋轉之物體之平衡. 物體之重心在旋轉軸之鉛直面中，且在旋轉軸之下者，為穩定平衡。反之，重心在旋轉軸之上者，為不穩定平衡。若物體之重心適在旋轉軸中

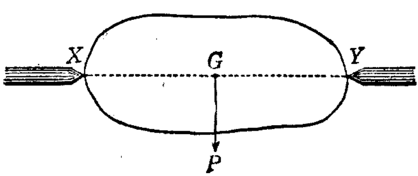


圖 62. 隨遇平衡.

者，則為**隨遇平衡**(neutral equilibrium)，以其被擾動時，既不恢復原來位置，亦無愈去愈遠之傾向，隨處皆可靜止也。機器

之重心，恆設法使其居於旋轉軸內，以得隨遇平衡.

物體平衡之穩定性，乃隨其平衡位置而異. 如圖 63 中之圓

(a)　(b)　(c)

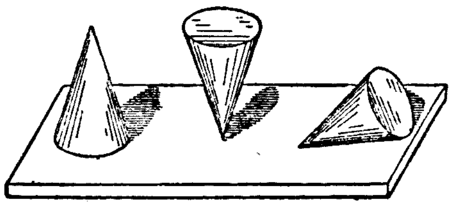


圖 63.

錐體，(a)直立，為穩定平衡；(b)倒立，為不穩定平衡；(c)橫臥，則為隨遇平衡.

習　題　八

(1) 賣技之走繩索者，用何法以保持其在懸索上之平衡？若感有向左傾倒之危險，彼將如何以挽回之？

(2) 試研究將半球體置於水平面上之平衡穩定狀態.

(3) 有四方柱直立於臺上，於其側面依水平方向推之，則着力點愈高時，愈易推倒. 試說明其理由.

(4) 公共汽車之製造標準，須傾側至 30° 之角時，尚不致倒下. 若兩車輪間之距離為 60〔吋〕，問車身之重心高出車輪之軸，應不超過多少？

(5) 在正四面體之四角頂上各附裝同樣之鉛球一個，問固定何點可使此四面體為隨遇平衡？

(6) 試述步行時兩足的動作，軀體的姿勢和重心的位置. 奔跑時又各如何？

第九章

功

§51. 功. 吾人於日常生活中,隨處可見作功之現象. 例如馬挽車行於道,是馬作功也. 蒸汽機拖火車一列馳於鐵軌上,是蒸汽機作功也. 時鐘中卷緊之簧條使鐘擺往來擺動,是卷緊之簧條在作功也. 曳物上樓,曳物之人作功也.

考上述作功之現象,其同具之特性有二:

(1) 要用力. 卽馬之力,蒸汽機之力,及人力等是也.

(2) 受力作用之物體,有移動,卽有**位移**(displacement).

§52. 功之定義. 一人攜 10〔仟克〕之物上樓,則此人作功. 若此人所攜之物二倍於前,卽 20〔仟克〕,而上同一之樓,則所作之功倍於前. 又若此人所攜之物爲 30, 40, 50,…〔仟克〕,則所作之功亦爲 3, 4, 5…倍於第一次. 是故吾人皆認功者比例於所用之力者也.

由他方面觀之,此人攜同一物體上樓一層,二層,三層…,則其所作之功之量亦卽成1,2,3…之比. 於是吾人得謂功又與移動之距離(位移)成比例. 故吾人得曰:功者,等於人所攜物之重與升高之距離之相乘積. 設 W 爲功, P 爲所攜之物重,亦卽此人所用之力, h 爲所升高之距離,則有:

$$W = P \times h.$$

又,同一重量之物體,從同一點出發,移至同一點而止,則不問其移動經過之道路若何,其所成之功,吾人恆認爲相等. 或垂直吊上(圖 64),或循樓梯拾級而上,或沿一斜板推此物而上,三者所成之功皆等. 於此吾人有不能不辨明者,第一法中,力與位移,同在鉛直線之方向;第二,第三法中物體之位移,非與力之作用線相合是也. 如是,用力之方向與移動之方位不同時,則以位移在力之方向上之正射影,用作移動距離,以計算功.

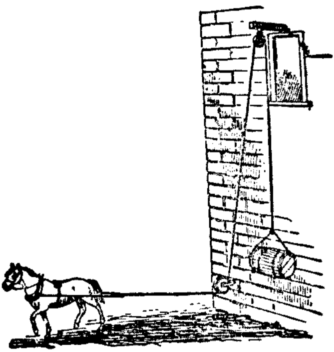


圖 64.

故在普徧情形下,功或工作(work)之定義如次:

設一物體受力 F 之作用,移動 AB,θ 爲 AB 與 F 間所成之角(圖 65),AB' 爲 AB 在力 F 方向之正射影,則其所作之功爲:

$$W = F \times \overline{AB'} = F \cdot \overline{AB} \cdot \cos\theta;$$

以言語表之,卽一力所作之功,等於力之強度,與力之作用點之位移在此力之方向上之正射影之相乘積也.

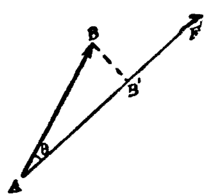


圖 65.

又 $F\cos\theta$ 爲力 F 在 AB 方向上之正射影 F',則

$$W = l \cdot \overline{AB} \cdot \cos\theta = F' \times \overline{AB};$$

於是吾人又得功之定義,曰:

功者等於力之作用點之位移,與力在此位移方向上之正射影之乘積. 力在位移方向上之正射影,實爲其作功之有效分力.

由上述功之定義,可知一物體在水平方向移動,此物體重力所作之功爲零. 然事實上,物體在水平方向移動,其重力所成之功雖爲零,而使此物體移動之動力所作之功,未必爲零. 蓋恆需動力,以制勝物體與其接觸面間之摩擦阻力故也,但若此摩擦阻力愈小,則需要之動力與所費之功均因之而減少.

§53. 功之單位. 功之單位,隨力與長度之單位而定,故爲導出單位. 日常所用者,以〔仟克〕爲力之單位,〔米〕爲長度之單位,則功之單位爲〔仟克・米〕(kilogram-meter),即1〔仟克〕之力,其作用點在力之方向移動1〔米〕,所成之功也.

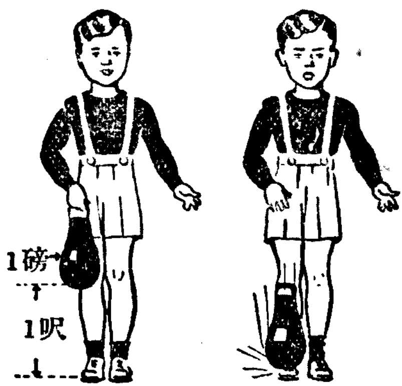


圖 66.

在英制中,力用〔磅〕,長用〔呎〕,故功之單位爲〔呎・磅〕(foot-pound),即將1〔磅〕之物,舉高1〔呎〕,所成之功也(圖 66).

§54. 動力之功與抗力之功. 一人攜一物上樓,與一人負一物下樓,兩功之性質,顯有不同. 前者,人所用之力向上,而其移動亦向上(卽 § 52 中之 $\theta=0$),名其所成之功曰**動力之功**,或稱**正功**,在功之數值之前,可加(+)號. 例如一人攜 200〔仟克〕之物升高 3〔米〕,則此人所成之功爲 +600〔仟克·米〕.

後者,人所用之力仍向上,而其位移則向下(卽 $\theta=180°$),是力與位移雖同在一直線上,而實異向. 吾人名其所成之功,曰**抗力之功**,或稱**負功**,在功之數值之前,可加(−)號. 例如,一人負 200〔仟克〕之物,下降 3〔米〕,則此人所成之功爲 −600〔仟克·米〕.

簡言之:力與位移爲同向,則功正;反向則功負. 於是一人提同一之物,上樓下樓各一次,其所成之功之絕對值相等,而其代數值之和爲零.

樓上之物,可由空中拋落;吾人負之而下,所作之功,在物理學上言,或屬枉費;但稱爲負功,未免過甚. 然此亦有至理存焉. 若裝一固定滑車,將此物繫於繩之一端而下墜,則在繩之他端,可將需運之物提上樓去,是有可成之功,未加利用也.

§55. 功率. 有力卽可做工,苟不限定時間,每個人可與起重機完成同樣多之功,譬如 600,000〔仟克·米〕;不過起重機做之,只要一〔小時〕,人需數天而已. 所以欲表示人或機器之做工本領,莫善於計算其在單位時間內所作之功,稱爲**功率**(power). 以 p 表之,卽

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

【例 1】 一馬用45〔仟克〕之力,拖一貨車,在半〔小時〕內行3〔仟米〕,則其功率爲

$$p = \frac{45 \times 3000}{30 \times 60} = 75\,[\text{仟克·米/秒}].$$

【例 2】 一火車頭用6000〔仟克〕之力拖車而行,其速度爲每小時60〔仟米〕,則

$$p = \frac{6{,}000 \times 60{,}000}{60 \times 60} = 100{,}000\,[\text{仟克·米/秒}].$$

顯然,功率愈大則愈佳. 若一火車頭之功率,僅及他一火車頭者之 $\frac{1}{10}$,則在同一時間內,前者所成之功僅及後者之 $\frac{1}{10}$;若挽同重之車,前者之速度爲後者之 $\frac{1}{10}$,將與人徒步無異矣.

§56. 功率之單位. 功率之單位,因功之單位而不同,所用時間之單位則皆爲〔秒〕. 故有〔仟克·米/秒〕及〔呎·磅/秒〕等.

在工程上,常用**馬力**(horsepower)爲功率之單位.

1〔馬力〕= 550〔呎·磅/秒〕,或約75〔仟克·米/秒〕.

玆將人,獸,及幾種機器,功率之數值等級列後:

人	0.1〔馬力〕
馬或牛	1〔馬力〕
火車頭	1,500〔馬力〕
船用蒸汽機	50,000〔馬力〕

由上表觀之,倘令我四萬萬五千萬全體同胞徒手工作,將僅等於數百個之蒸汽機耳,可不速謀工業化乎?

【例】 有抽水機每〔小時〕內能抽出 10,000〔加侖〕之水，送達於 50〔呎〕高之蓄水池中。問此抽水機有多少〔馬力〕?

每〔加侖〕之水，計重 8.34〔磅〕;故 10,000〔加侖〕水之重量，爲 83,400〔磅〕。舉高此重量 50〔呎〕所需之功，爲 $83,400 \times 50 = 4,170,000$〔呎•磅〕;抽水機於 1〔小時〕內完成之，則其功率爲 $\dfrac{4,170,000}{60 \times 60 \times 550} = 2.1$〔馬力〕。

習 題 九

(1) 某人體重 65〔仟克〕，循一樓梯，步上大廈，升高 20〔米〕。求其所做之功。若費時 3〔分〕鐘，則其表現之功率爲何?

(2) 1〔仟克•米〕等於多少〔克•厘米〕? 等於多少〔呎•磅〕?

(3) 馬拉車用力 100〔仟克〕，與水平方向成 30° 之角，行 2〔仟米〕，求其所作之功。

(4) 設水車上下高度之差爲 20〔呎〕，每〔小時〕車上之水量爲 300〔立方呎〕，求水車之功率。

(5) 有火車頭能以每〔小時〕30〔哩〕之速度，牽引重 200〔噸〕之列車。作用於列車之阻力爲每〔噸〕15〔磅〕，問火車頭有多少〔馬力〕?

第十章

簡單機械

§57. 功之不滅原理. 簡單機械如滑輪,槓桿,輪軸,與斜面等,皆吾人日常用以爲作功之助者也. 應用此等機械,可以小力勝大力. 例如一人僅有 50〔仟克〕之力,藉一槓桿之助,能扳動 500〔仟克〕之重物.

但用此等機械後,是否能以少許之功,換得多量之功? 此問題之解答如下:

設用在此機械上發動方面之力 F_1,如人力等,名曰**原動力**;其所移動之距離 d_1 曰**原位移**,兩者之積 W_1 曰原功. 又設經過此機械之作用,所得之力 F_2,曰**機械力**;其所移動之距離 d_2,曰**副位移**;兩者之積 W_2,曰**機械功**.

原功與機械功之間,有何關係,可得而知乎? 曰,有之,即**功之不滅原理**是也. 換言之,原功等於機械功,或稱發動方面之力所作之功,等於經過機械作用後,所成之功. 以式表之,爲:

$$W_1 = W_2,$$

或
$$F_1 \times d_1 = F_2 \times d_2.$$

是故機械不能以少許之功,換得多量之功. 然則,吾人應用機械,利益何在?

§58. 機械利益. 機械力 F_2 對於原動力 F_1 之比，即 $\frac{F_2}{F_1}$，曰**機械利益**(mechanical advantage)，以 A 表之，則有

$$A = \frac{F_2}{F_1} = \frac{d_1}{d_2}.$$

大多數之機械，利益均較 1 爲大，使用之，可以小力得大力。但由上式，可知副位移，當較原位移爲小。換言之，用小力得大力，實以大位移變小位移換來；卽力與位移二者之間，有一得必有一失，不可得而兼也。

功之不滅原理，如物質不滅原理然，非爲數學之推演，而爲實驗之結果，卽從多數實驗證實無誤，爲吾人所公認者。

吾人不能產生一功，而不消費等量之功。天下之功，不可倖致。既有之功，亦不能使其徒然消失，而不產生等量之功；此等量之功，有益有害，是另一問題。吾人所能爲力者，僅在改變功之面目而已。

世有欲求"永久之運動"而不耗功者，蓋徒然也。何哉？違反功之不滅原理耳。

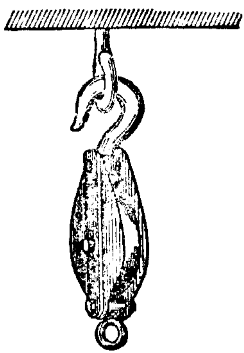


圖 67. 定滑輪.

§59. 滑輪. **滑輪**(pulley)爲一圓形之盤，中心有軸，軸固定不移者，曰**定滑輪**(圖67)；盤能繞軸而轉動。圓盤之側面邊緣上有溝槽，可置索其中，索之一端 A 用人力 F_1

曳之(圖 68),經索之傳遞,索之他端 B 有力 F_2, 可支持重物不墜. 由實驗,知在 A 端之曳力 F_1 等於 B 端之物重 F_2, 例如物重為 50〔仟克〕,人之用力亦為 50〔仟克〕. 又若吾人用力將 B 端之物上升 2〔米〕,則 A 端之力之作用點亦有 2〔米〕之位移,即

$$F_1 = 50\text{〔仟克〕}, \qquad d_1 = 2\text{〔米〕};$$

$$F_2 = 50\text{〔仟克〕}, \qquad d_2 = 2\text{〔米〕}.$$

而原功與機械功,皆為

$$50 \times 2 = 100\text{〔仟克·米〕}.$$

各種機械中,以此固定之單滑輪為最簡單,此中之力,位移,與功,經傳遞後均無變更.

定滑輪之用處,在變更用力之方向. 在圖 68 中,若不用定滑輪,則人須自下向上用力,方能舉物上升;而今則用力之方向為

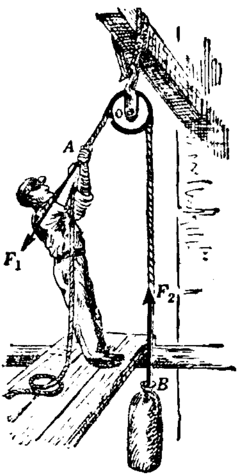


圖 68.

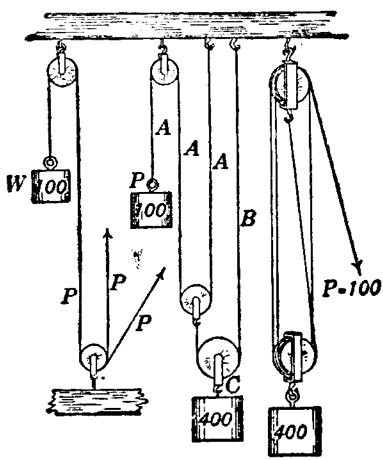


圖 69. 滑輪組

自上向下；在某種情形之下，後者較便於前者也。

滑輪組. 滑輪之非固定而可以移動者，曰**動滑輪**(movable pulley)；聯合若干定滑輪與動滑輪而使用時，則成滑輪組，如圖 69 所示之幾種聯合法，爲吾人所常見者。

在第一第三兩種聯法中，僅用一繩貫穿全體滑輪，繩中各部分之張力相同。在第一聯法，爲兩定滑輪之組合，所用之力 P，不論方向如何，恆與所舉之重相等。第三聯法中，動滑輪爲繩之 4 部上懸，可舉之重等於繩之張力，亦即吾人所用之力，之 4 倍。

在第二種聯法中，用繩二條分懸；繩 A 之張力，等於 P 之重量。B 繩連接於一動滑輪，爲兩部分 A 繩所上拉者，故其張力等於 $2P$。因是，動滑輪 C 下懸掛之重，等於 B 繩張力之 2 倍，亦即爲 P 之 4 倍。

§60. 槓桿. **槓桿**(lever)爲一堅實之棒 AOB，能繞固定點 O 而轉動(圖 70)。在棒之一端 A 點向下作用一原動力 F_1，則 A 端下沈 AA'，而他端 B 生一機械力 F_2，因此，B 端上升 BB'。欲此桿保持平衡，則須在點 B 作用一抵抗之力 F_2'，强度與 F_2 相等而方向相反。固定之點 O，曰**支點**(fulcrum)，A

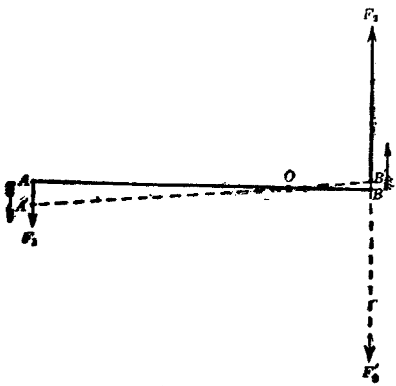


圖 70.　槓桿

曰**施力點**(point of application)而 B 則曰**抗力點,或稱重點**(point of exertion)。OA,OB 之長,謂之**槓桿之臂**(arm of lever)。

欲使槓桿平衡,則 F_1 與 F_2' 兩力,關於支點之力矩,必須相等而相反(§ 40),卽

$$F_1 \times OA = F_2' \times OB,$$

或
$$\frac{F_2'(\text{或} F_2)}{F_1} = \frac{OA}{OB}.$$

換言之,槓桿平衡之條件,爲力與槓桿之臂成反比;而其機械利益,卽等於兩臂之比。

但據相似三角形 OAA' 與 OBB',知 $OA/OB = AA'/BB'$,

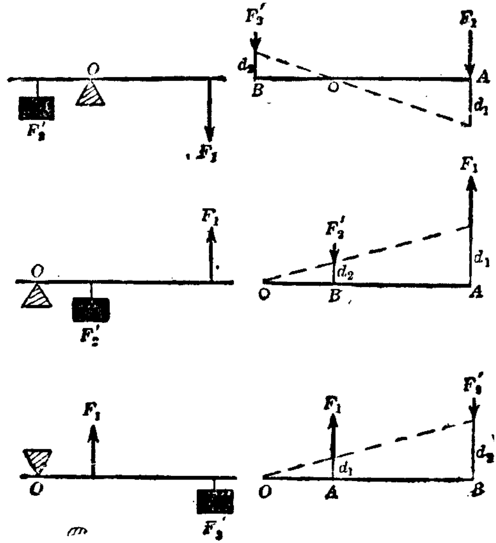


圖 71.

又 $F_2' = F_2$，得

$$F_1 \times AA' = F_2 \times BB',$$

此輸入之功，等於輸出之機械功之證明也。

槓桿之實例. 因支點，施力點，及重點三者相互位置之不同，可將槓桿分為三種(圖 71)。

第一種。支點 O 在施力點 A 與重點 B 之間者，例如桿秤(圖 72)。設 a 及 b 為秤錘與秤鈕間及秤鈎與秤鈕間之距離，w 及 P 各為秤鈎與秤錘之重，W 為所稱重物之重量，而可不計秤桿之重量時，則有：

$$(W + w)b = Pa;$$

又設秤鈎不懸重物，秤桿平衡時，秤錘之位置為 a_0，即零點，則有

$$wb = Pa_0.$$

由上二式，得

$$W = \frac{P}{b}(a - a_0) = \text{常數} \times (a - a_0),$$

即桿秤上刻度自 0 至 1，與 1 至 2，…等，長度皆為相等。

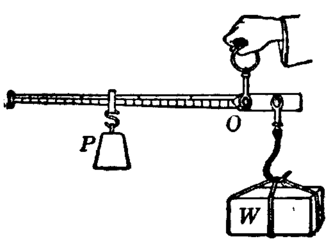


圖 72. 桿秤。

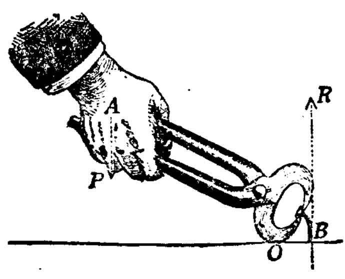


圖 73. 拔釘鉗子。

剪子及拔釘鉗子(圖 73)皆屬此類.

第二種. 重點 B 在支點 O 與施力點 A 之間者. 在此情形中,原動力與抵抗力為異向. 起重直桿(圖 74),獨輪手車(圖 75),與破果鉗(圖 76),皆屬此類.

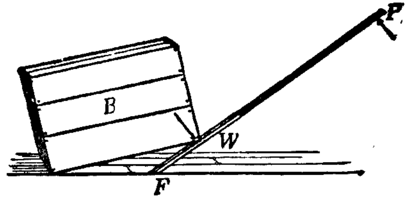


圖 74. 起重直桿.

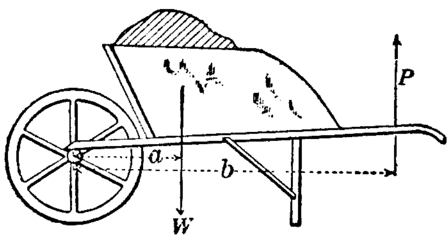


圖 75. 獨輪手車.

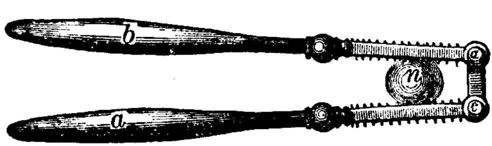


圖 76. 破果鉗.

第三種. 施力點 A 在重點 B 與支點 O 之間者. 其機械利

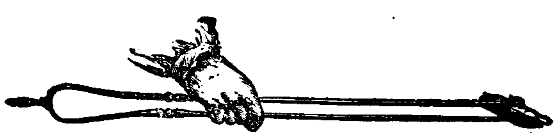


圖 77. 捻子.

益恆小於1,如捻子(圖77)等是。

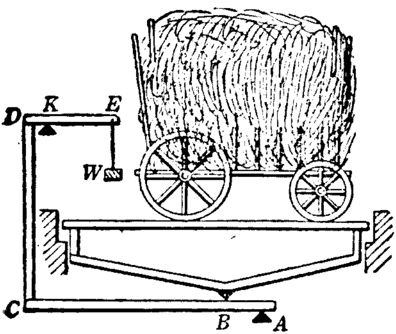


圖 78. 臺秤.

槓桿之組合. 數個槓桿有時組合應用,臺秤(圖78)卽其一例. 命 W' 爲所稱物體之重,則有

$$W' = \frac{AC}{AB} \cdot \frac{KE}{DK} W,$$

其機械利益爲槓桿 ABC 與 DKE 兩者之利益之相乘積.

§61. 輪軸. 輪軸(wheel and axle)之構造,爲以半徑不同之二圓柱(圖79)固着於一旋轉軸上而成. 假使在卷於小圓柱上之繩之一端懸重物 W,而於大圓柱上所卷繩之一端,施力 E 時,則以小力 E 可舉重物 W. 設大小二圓柱之半徑各爲 R, r,則

$$E \cdot R = W \cdot r,$$

卽
$$W = \frac{R}{r} E,$$

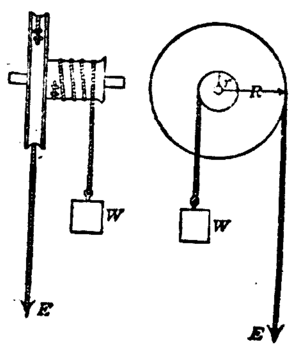


圖79. 輪軸.

R/r 爲輪軸之機械利益,亦卽 E 與 W 移動之距離之比.

井上汲水之轆轤(圖 80),與船上之絞盤(圖 81),皆屬輪軸.

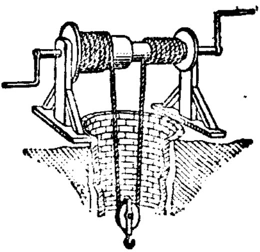


圖 80. 轆轤.

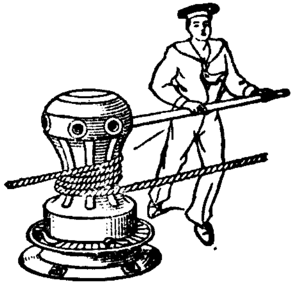


圖 81. 絞盤.

齒輪(圖 82),在機械上應用尤廣. 互相嚙合之兩齒輪,齒之大小相同,則兩輪周上之齒數,與其半徑成比例;而兩齒輪轉動次數之比,等於其半徑之反比.

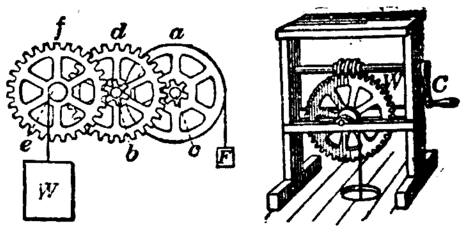


圖 82. 齒輪

§62. **斜面.** 與水平成傾斜角之平面,稱為**斜面**(inclined plane). 斜面亦為一種簡單機械.

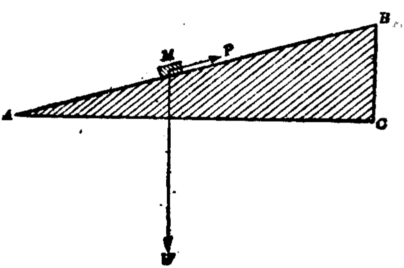


圖 83. 斜面.

今將重為 W 之物體 M, 沿斜面 AB 上推 (圖 83). 倘不計物體與斜面間之摩擦力,則由功之不滅原理,可求上推所需之力 P. 當物體 M,自 A 移動至 B 所施之功為 P

$\times AB$，而所成之功爲 $W \times CB$，蓋因 W 重之物，升高 CB 也．於是

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

即
$$\frac{W}{P} = \frac{AB}{CB}$$

故 AB/CB 爲斜面之機械利益．

【例】 若 $CB = \frac{5}{100} AB$， 則 $P = \frac{5}{100} W$．

可知馬之能駝運 200〔仟克〕者，在此斜面上可拉載重 4000〔仟克〕之車而上矣(圖 84)．

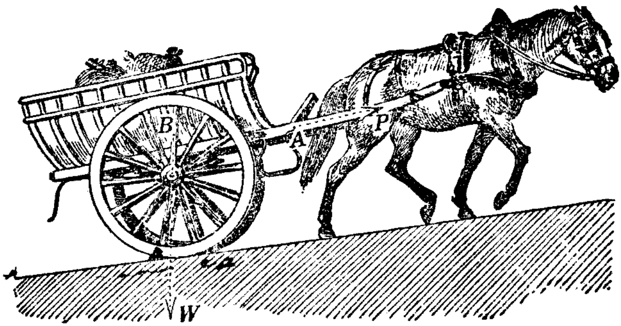


圖 84.

故公路之坡度不宜太陡；高山峻嶺之中，往往不惜盤旋紆曲而上，蓋如是方可使斜面之角度減小，而用力省也，但所行之路，亦因是而增長．

§63. 劈． 劈(wedge)之截面作 V 形，通常皆以金屬做成，用以劈開物體者；爲斜面之一種應用． 破柴之斧，即其一例．

叉刀劍亦係劈之一種，不過其稜角特小耳。

如圖 85，施力 F 於劈 ABC 之背上時，則劈嵌入木中。劈之兩面對於木材所施之力 P,Q，各與劈面垂直，而爲 F 之分力。又因 ABC 爲二等邊三角形，由對稱知 $P=Q$；於是得

$P : Q$

$$F=2P\sin\tfrac{1}{2}A.$$

劈之頂角 A 愈小，則其機械利益愈大。通常磨刀，卽將刀口之角度變小，因成銳利。

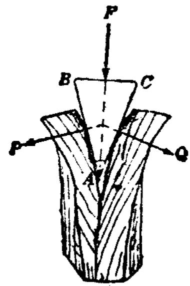


圖 85.　劈.

§64. **螺旋**.　**螺旋**(screw)可視爲斜面之變形。如圖 86 所示，將紙剪成直角三角形 ABC，使其邊 BC 與柱軸平行，而卷於圓柱時，則斜邊 AB 在圓柱上形成之曲線，卽爲螺紋(screw thread)。

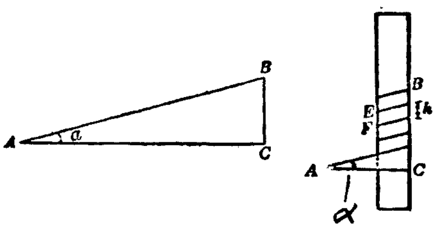


圖 86.　螺旋.

自一螺紋上某點，至次一螺紋上之對應點間，沿軸向量計之距離，如 EF，曰螺距(pitch)。如命 r 表圓柱半徑，a 表斜面之傾斜角，h 表螺距，則其間之關係爲

$$\frac{h}{2\pi r}=\tan a.$$

沿螺紋在圓柱之周圍刻成突起之形狀者,稱曰雄螺旋(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,互相嚙合,其一固定,則他一可隨轉動而進退,合稱之則逕曰螺旋,應用極廣.

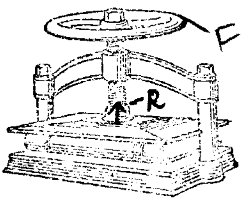


圖 87. 螺旋壓榨器.

螺旋壓榨器爲利用螺旋而旋壓力,藉以壓榨物體之器械. 其構造如圖 87 所示,由螺旋與輪軸組合而成. 設作用於輪緣而使其轉動之力爲 F,螺旋下端所遇之抵抗力爲 R,當輪轉一週時,螺旋前進 h.據功之不滅原理,有

$$F \times 2\pi a = R \times h,$$

即

$$\boxed{R = \frac{2\pi a}{h} F.}$$

h 爲螺距,a 爲輪之半徑. 通常 a/h 之值甚大,故 R 比 F 大許多倍.

老虎鉗(圖 88)與螺旋起重機(圖 89),原理與此完全相同,觀圖自明.

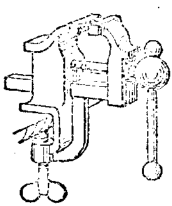


圖 88. 老虎鉗.

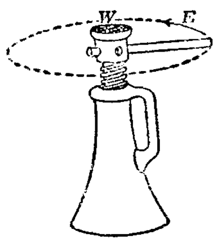


圖 89. 螺旋起重機.

§65. 機械效率。 挽車在斜面上行動之力，既如§62所述。但照此計算方法，則推車在水平面上行動，無需用力矣。其實不然，當知尚有未計及者在。事實上，輪與軸間之摩擦阻力，須制勝之；車輪與地面之間的摩擦抵抗，須制勝之；又因物體之移動而與空氣間所生之阻力抵抗，亦須制勝之。如是則行車之功，其計算方法，不復能如上述之簡單矣。在斜面上如斯，推之各種機械動作，莫不皆然。此等寄生之力，往往阻撓運動，遂使輸入之原功 W_1 中，有一部分 W' 變爲無用，而輸出有效之機械功僅爲 W_e 矣。於是

$$W_1 = W_2 = W_e + W',$$

而　　为机械效率 $e = \dfrac{W_e}{W_1} = \dfrac{W_e}{W_e + W'}$

$e = \dfrac{\text{有效功}}{\text{总功(输入功)}} = \dfrac{\text{有效功}}{\text{有效功+无用功}}$

稱爲機械之效率(efficiency)，其値恆小於1。

機械經種種之改良，可使摩擦阻力等儘量減小，以至於輸出之功，漸近於輸入之功之情形。是故前文所述功之不滅原理也者，實爲理想之極限境界耳。

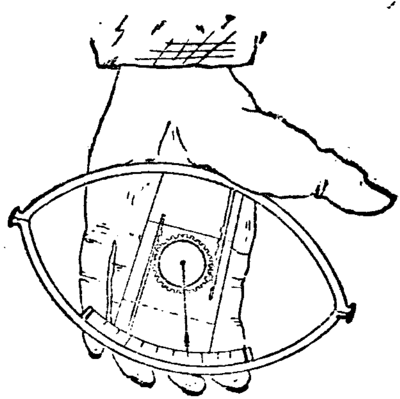


圖 90. 握力計。

§66. 簡單機械之反面應用。 機械原在增强力

之效用，其利益由大的原位移，換成小的副位移而得。 反一面看，吾人亦可利用簡單機械，作為放大移動之具；放大倍數即等於機械利益之倒數。 如各種儀器表上之指針（圖 90），與測微計螺旋頭上之刻度（圖 91）等皆是。

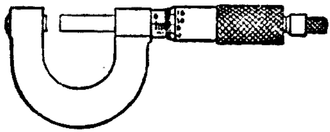


圖 91. 螺旋測微計。

習題十

(1) 背負重物，何以比攜於手中為易？

(2) 上山坡時，如向左右屈折而行，較之直進省力，何故？

(3) 成衣舖裁縫所用之剪刀，柄短而刀長；鐵工廠工匠所用者，則刀短而柄長，其故何在？

(4) 天平之兩臂，長度微有差別，其一為 20〔厘米〕。今以此天平稱物，每 1〔仟克〕中要差誤 5〔克〕，且知此差誤，全由兩臂之有長短而來，問兩臂長度相差多少？

(5) 中國舊式桿稱，桿重 10〔兩〕，載物之盤重 20〔兩〕，錘重 50〔兩〕，稱紐與懸盤相距 4〔寸〕，桿之重心與懸盤相距 7〔寸〕。 問桿上刻度，應從何處開始？又 200〔兩〕之刻度，應在何處？

(6) 起重直桿長 2〔米〕，於距起重之端 20〔厘米〕處支住，在他端用力 30〔仟克〕，恰將重物舉起。 求所舉起物體之重，及此起重直桿之機械利益。

(7) 有 15〔仟克〕之重物，用一單動滑輪而舉上。 (*a*) 如兩方之繩平行，應施力多少？ (*b*) 如兩方之繩各與鉛直線成傾角 50°，應施力多少？

(8) 試用圖說明一滑輪組，可以 100〔仟克〕之力，舉起 500〔仟克〕之重。

(9) 桿長 5〔尺〕,重 8〔斤〕,一端固定不動,在距支點 1〔尺〕遠處懸物重 3〔斤〕. 問在另一端須用何力以支持之,方得平衡? 並求支點所受之力.

(10) 試求如圖 92 所示之滑輪組之機械利益.

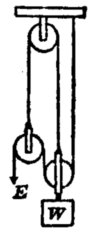


圖 92.

(11) 設將滑輪組之繩端拉下 10〔厘米〕,則 80〔仟克〕之重物上升 2.5〔厘米〕,求所用之力,並繪出此滑輪組之構造兩種.

(12) 設輪軸之軸與輪之直徑之比爲 1:15 時,問須施力若干於輪上,方能將軸上所懸重 25〔仟克〕之物體舉起? 若物體舉高 5〔米〕,所成之功多少?

(13) 有壓榨器,設其螺旋之螺距爲 3〔毫米〕,柄長 60〔厘米〕,用於柄兩端之力爲 9〔仟克〕時,求其壓榨之力.

(14) 有互相嚙合之兩齒輪,其直徑一爲 4〔吋〕,一爲 10〔吋〕,設將 P 力作用於甲輪, Q 力作用於乙輪,而兩輪恰相平衡時;求 $P:Q$ 之值. 問甲輪轉動 5〔轉〕時,乙輪轉動多少?

(15) 有相同之兩輪軸,直徑同爲 10〔吋〕及 4〔吋〕. 甲之軸與乙之輪皆爲齒輪,且相嚙合. 今有 P 力作用於甲輪, Q 力作用於乙軸. 求 P 與 Q 平衡時之比值.

(16) 水夫四人,用絞盤拔錨,軸之直徑 20〔厘米〕,絞盤之臂各長 120〔厘米〕,如每人用力 80〔仟克〕,方可拔起,則錨重若干?

(17) 用一已生銹之轆轤,由深 40〔呎〕之井中,舉起 50〔磅〕之水. 轉動曲柄之全長爲 480〔呎〕,所施之力爲 7〔磅〕. 求(a)輸出之功;(b)輸入之功;及(c)轆轤之效率.

(18) 一 150〔磅〕重之人,坐在懸椅上,用一動滑輪與二定滑輪之組合,拉動自身. (a)其臂須用力若干? (b)若一人在地上拉之,需力若干?

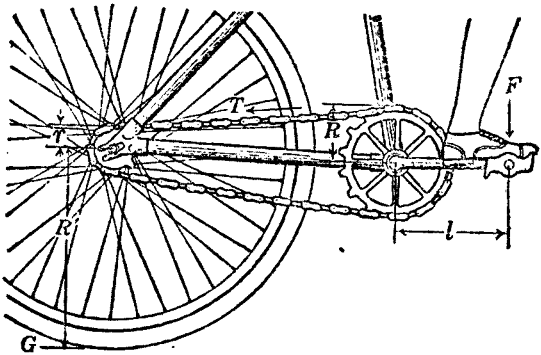


圖 93.

(19) 一人藉一組滑輪之助，在 96〔秒〕內拉一 200〔磅〕重之粉桶升高 12〔呎〕。若此滑輪組之效率爲 60%，問此人有多少〔馬力〕？

(20) 試舉出農家所用簡單機械五種，而分析之。

(21) 兩手執一帚掃地，試分析其動作。

(22) 脚踏車(圖 93)之踏板成水平時加力 100〔磅〕，曲柄長 $l=6$〔吋〕，齒輪之直徑 $2R=8$〔吋〕，求鏈上之張力或拉力。 後輪上齒輪之直徑 $2r=2.5$〔吋〕，後輪之直徑 $2R'=28$〔吋〕，問踏板轉一全周，車行多少距離？

第十一章

液 體 之 壓 力

液體雖難壓縮，而其各部分極易滑動．受重力作用而生流向下方之傾向，故必盛於容器內而平衡靜止時，方有一定之形狀．

施力於液體，不能施於其中或其上之一點；而必作用於一面，故每單位面積上所受之力，卽壓力，在討論液體時，其意義更爲明顯而必要．

§67. 液體對容器壁上之壓力． 一容器之上下左右四壁上，各安置活塞 P_1, P_2, P_3, P_4 (圖 94)． 以水注入容器中，則活塞皆向外推移．若在諸活塞之端，設法各繫一彈簧秤，以阻止活塞之向外移動，並表明其所受之力各爲 F_1, F_2, F_3, F_4．命 A_1, A_2, A_3, A_4 爲各活塞之面積，則

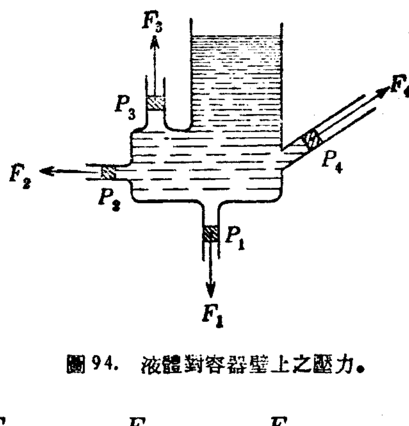


圖 94. 液體對容器壁上之壓力．

$$p_1 = \frac{F_1}{A_1}, \quad p_2 = \frac{F_2}{A_2}, \quad p_3 = \frac{F_3}{A_3}, \quad p_4 = \frac{F_4}{A_4}$$

爲諸活塞上單位面積所受之壓力,即**壓力强度**,通常略稱之曰**壓力**。至於活塞全面積上所受之壓力,如 F_1, F_2, F_3, F_4, 則曰**總壓力**,以示區別。

液體之壓力恒正交於其接觸之面。若在容器之側面壁上,鑿有一孔,則見器內液體自孔中射出,與器壁成正交。

圖 95 之兩實驗,卽證明此語者。瓶 V 中滿儲以水,側面有一小孔,當瓶鉛直置於桌上,則水從小孔中向水平方向射出;若瓶

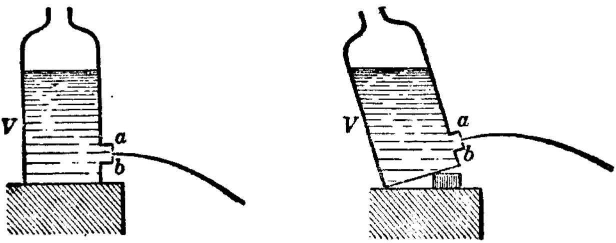


圖 95.

底傾斜,則小孔中水流出之方向亦必變更,仍與瓶壁成正交。

試想若瓶壁無此小孔,則吾人由上述實驗之結果,可知瓶中水壓力之方向爲正交於瓶壁者。是故:

容器內所盛之液體之壓力,恒正交於容器之壁,而爲正直壓力。

§68. 靜止液體之壓力由其所受之重力而來。液體盛在容器中,對於器壁之各部分均施正直壓力,已如上述。對於容器全部器壁,此等壓力之合力(圖 96),爲鉛直向下,而等於液體之總重量。

何以見之？以一〔升〕之水，傾入各式之容器中，用天平稱之，則見所增之重量皆為1〔仟克〕。

故液體之壓力，由於其所受之重力而來。

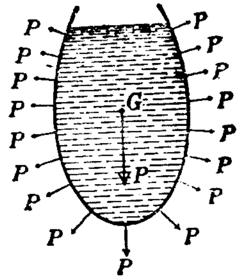


圖 96.

§69. **液體中之壓力**. 物體在水中，其四周界面皆受液體之壓力．同理，設分液體為若干層，則各層間，皆有壓力，互相作用．

欲表示液體中之壓力，可將一薄玻璃片投入水中，以觀其所受之壓力． 惟因對此玻璃片兩面之壓力相等，結果相消，玻璃片因其自身之重量而下沈．欲去此困難，宜將一面之液體壓力設法除去，只剩他一面之壓力，於是液體壓力之現象乃顯．

玻璃片 AB(圖 97)可適合於圓筒 M 之下口，而使之密閉．

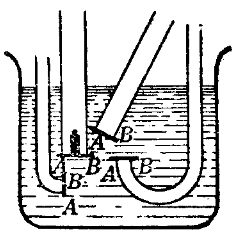


圖 97. 液體中之壓力．

一手持筒，一手持玻璃片緊按於筒口上浸入水中，至相當深度後，持玻璃片之手放去，則見玻璃片仍緊貼於筒上，即在筒口之平面內，亦無滑動．倘玻璃筒左右傾斜，或以筒口向上，其現象亦如之．此即表示水中不論在何方向，均有壓力，且恆與玻璃片正交． 筒口按置在水中某處，無論其為向上，或向下，向左或向右，注水入筒內至與筒外水面相平時，則玻璃片開始可能移動，是可見在液體中一處——甚至言一點——之壓力

對於任何方向，皆爲相等。

當壓力向上時，吾人欲知其壓力之數量，可在筒中逐漸加入砝碼，至玻璃片 AB 脫離筒口下降爲止。又有可注意者，即用此法可證明筒口入水愈深，壓力愈大是也。

§70. 壓力隨液體之深度而增加。 由上數節所述，吾人知：在液體中或容器壁上深度相等處之兩面，受相等之壓力。兩面在不相等之深度處，所受之壓力亦不相等，在較深處壓力大，較淺處壓力小。此兩處壓力之差，等於以單位面積爲圓柱之底，以其深度之差爲圓柱之高，所作成之圓柱體所能容納之液體之重量。

是爲流體（包括液體與氣體）靜止現象中之基本原理，可從實驗證明，亦可由理論推得。

設想在液體中有一部分 X 爲面 S 所包圍，其形一定，密度亦一定（圖 98）。當此部分液體靜止時，所受之力，爲其本身之重量 W 與四周液體 Y 對彼之壓力 P；兩者互相平衡。

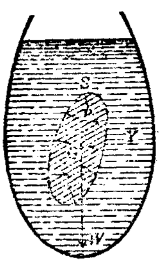


圖 98.

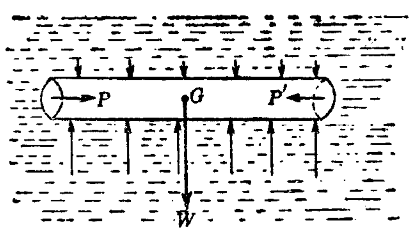


圖 99.

先設此部分液體之形為橫置之圓柱體(圖 99),則其所受之液體壓力,在水平方向者惟 p 與 p'. 因為這部分液體在平衡狀態中,故必須 $p = p'$,此即證明在液體中,同一深度之面,受相等之壓力也.

其次設此部分之液體,為直立之圓柱體,上下底面為單位面積(圖 100). 如上所述,水平方向之壓力,一一互相抵消. 而鉛直方向之力,則有:液體在 AB 面之壓力 P,此部分圓柱體內液體之重量 W,及液體在 $A'B'$ 面之壓力 P'. 前二者為向下,後者為向上.

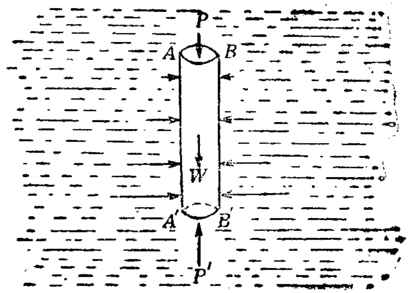


圖 100.

因該部分的液體在平衡狀態中,故有

$$P' = P + W = P + hw,$$

h 表圓柱體之高, w 為單位體積之液體之重;即

$$P' - P = hw.$$

此為吾人所欲證明者.

入水 10〔米〕,則是處物體面上所受之壓力,等於以 1〔平方厘米〕為底, 10〔米〕為高,所成圓柱體內之水之重量. 換言之,即每〔平方厘米〕有 1〔仟克〕也. 故有物入水,每增 10〔米〕之深度,所受之壓力輒增加 1〔仟克/厘米^2〕之多. 入海深 1000〔米〕,壓力將為 100〔仟克/厘米^2〕. 潛水艇與潛海物等,恆不能入水如

是之深者，實不能勝偌大之壓力耳。

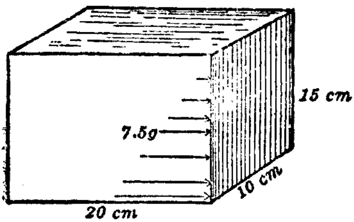


圖 101.

【例】 有水槽長 20〔厘米〕，闊 10〔厘米〕，高 15〔厘米〕，滿盛以水，求左右兩端面所受之總壓力。

端面所受之壓力，皆係水平(圖 101)，上弱而下强，其中點之壓力爲 7.5〔克/厘米^2〕，即代表端面之平均壓力，因是端面所受之總壓力，爲

$$7.5 \times 10 \times 15 = 1125 \text{〔克〕}.$$

§71. 容器底所受之總壓力. 應用流體靜力學之基本原理，以計算液體對容器壁上之壓力，已如上節所舉之例。茲再討論器底之總壓力。

設容器之底爲一水平圓面，則底面所受之總壓力，等於以容器之底爲圓柱之底，以液體之高爲圓柱之高，所作成之圓柱之液體重量。 由此觀之，只要器底之面積相等，水之高度亦相等，則容器之形狀無論如何，或上下齊大，或上大下小，或上小下大(圖 102)，器底所受之總壓力，皆相等也。

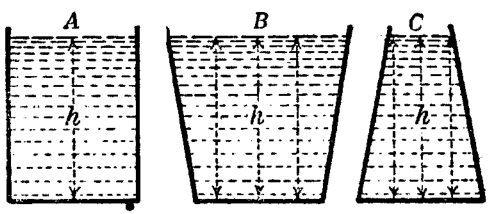


圖 102.

此種結果,在古代認爲怪事,吾人略加思索,毫不足異。蓋因自器底至液面之高度,三者既屬相等,則其所受之壓力强度相同;又器底之面積相等,故三者器底所受之總壓力相同,同等於圓柱形容器(圖 102A)所容之水之重量。吾人不難以實驗證明之。

如圖 103,無底之容器三個 A,B,C,形式各異,惟底口之直徑相等。設法將此容器固定在一木架 S 上,另有薄圓片 m 一塊,能密切適合於容器之底口,圓片中心繫一線,線之另一端懸於天平之圓盤下。加砝碼若干於天平之他端圓盤內;繼在容器中逐漸加水至高度 l,薄片 m 始與圓柱底口脫離。將三容器逐一試驗,則知皆至同一高度 l,薄片 m 方與圓柱底口脫離。此表示在三容器中等高之液體,以相等之總壓力加於其底上,而與容器容積之大小無關。

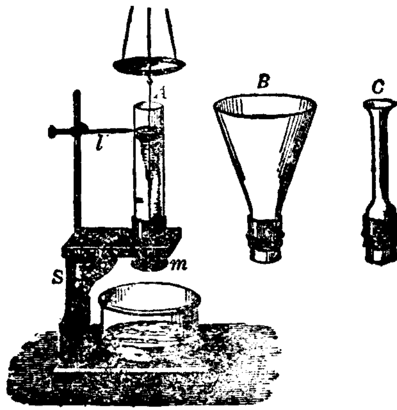


圖 103.

容器器底所受之總壓力,在 A,等於容器內液體之重量,故容器側壁所受壓力之合力爲零;在 B,小於容器內液體之重量,故容器側壁所受壓力之合力向下;在 C,大於容器內液體之重量,故容器側壁所受壓力之合力向上。此等側壁所受之壓力,最後由木架 S 承擔,而側壁與器底全部壓力之合力,則無不等於

液體之重量也(§ 68)。

普通容器之底與其側面，聯成一體，不能分離，如茶杯者，置於桌上，則茶杯與桌面之接觸面（不一定是整個杯底），所受之總壓力，自然等於茶及杯之重量之和。蓋茶杯側壁所受之壓力，亦藉固體傳力之作用，而同歸於杯底之接觸面上矣。

習 題 十 一

(1) 一長方形之水箱長 60〔厘米〕，闊 50〔厘米〕，深 40〔厘米〕，滿貯以水，求底上之壓力與總壓力。

(2) 一圓柱形之水塔(圖 104)，高 8〔米〕，塔之底離地 22〔米〕，滿貯水時，在(a)地面上，(b)塔底，及(c)塔頂之水壓力各爲若干?

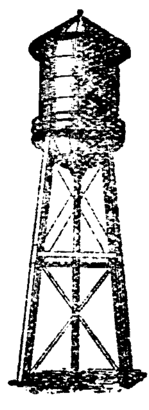


圖 104.

(3) 在(a)深 1〔呎〕之水，(b)深 20〔呎〕之水，每〔平方吋〕上各有壓力若干〔磅〕?

(4) 欲得每〔平方吋〕上有 1〔磅〕之壓力，其"水頭"(即水柱之高)應爲若干?

(5) 不計空氣之阻力，求一有 50〔磅/吋^2〕之壓力之救火機，能將水送至多少高?

(6) 高 76〔厘米〕之水銀柱底，有壓力若干? 欲得相等之壓力，水柱之高，須爲若干?

(7) 一容器之底，爲可上下移動之活塞，其面積爲 1〔平方米〕，器高 1.5〔米〕，器中滿儲以水。當活塞漸漸上升，水從邊緣外溢，直至水盡爲止。試作曲線以表示水之高度與活塞上受到壓力之變化，並求活塞所作之功。

(8) 某游泳池長 20〔米〕,闊 10〔米〕,一端深 1.2〔米〕,他端深 3〔米〕,底面爲平面。求池底之總壓力。

(9) 圓桶之半徑 16〔厘米〕，高 50〔厘米〕，滿盛以水，由蓋中插入高 180〔厘米〕之管,使恰與桶內之水相接,加水至管頂爲止,每有因此使桶崩裂之虞。 求(a)桶蓋,(b)桶底，及(c)桶之側壁之總壓力。

第十二章

液體之自由　面與連通管

§72. 液體之自由　面.　靜止時液體之面，與空氣接觸者，謂之**液體之自由　面**(free surface of a liquid).

靜止液體之自由　面，恆為一平面，且與鉛直線(§ 45)正交，即所謂**水平面**是也.　兩種不相混合之液體，裝在一容器內，其分界處為一水平面.　重者在下，輕者在上.

氣泡水準(spirit level)，為檢查平面是否成水平之器具，係液體自由　面之應用，其構造如圖 105 所示，由密封酒精或醚於彎曲成弧形之玻璃管內，留一小氣泡而成.　管下裝一平板臺.　放平板臺於被檢查物體之面上，若面成水平，則氣泡居於管之中央最高位置；若其面略有傾斜，則氣泡偏移於管之一端；故可以辨別面之為水平與否.

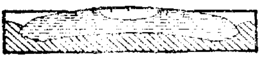


圖 105.　氣泡水準.

§73. 連通器.　設有數容器，盛相同之液體而以管連通之(圖 106)，則見各器中之液體自由　面，在同一水平面上.　其實，吾人可將連通

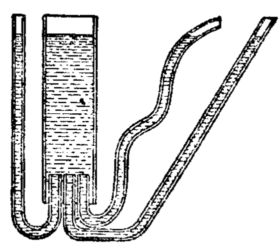


圖 106.　連通器.

器視爲一形式奇特之容器,而連通器各器中之液體自由　面,可視作一容器中液體自由　面之各部,則如上所述一容器中液體之自由　面應成一水平面者,**連通器**(communicating vessel)之現象,不解自明矣.

74. 連通器之應用. **汽鍋**(圖 107)內之水面,吾人不得而見之,則於鍋側裝一厚壁之玻璃管,下端與水相連,上端與汽相接,玻璃管內之水面,即示鍋中之水高.

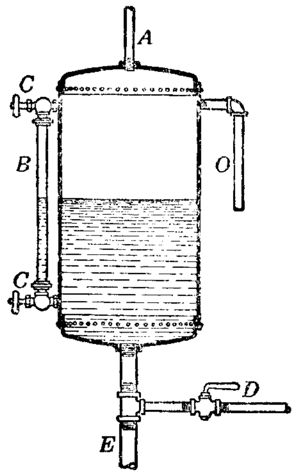


圖 107. 汽鍋.

最早之水平儀,用以測兩地高度之差者,實一連通器耳(圖 108).甲乙二人,欲測 C,D 兩地高度之差(圖 109),可在 C,D 兩處各植一標竿,竿上刻尺度,以便測算,各有可以上下移動之標誌 M 與 m,以便觀察.置水平儀 AB 於 C,D 兩竿之間.甲先以目置 A 處,沿 A, B

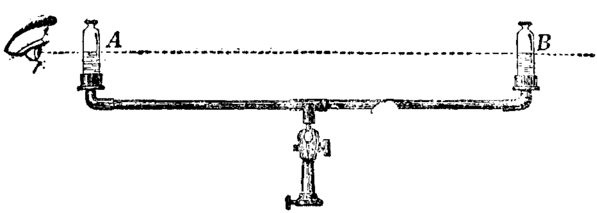


圖 108. 水平儀.

兩水平面而前視，乙則上下移動 M，使甲之視線延長適遇 C 之標竿於 M；換言之，即 A,B,M 三點在同一水平線上。同法，甲以目置 B 處窺 A，延長視線遇 D 之標竿於 m。 設 h 為 C,D

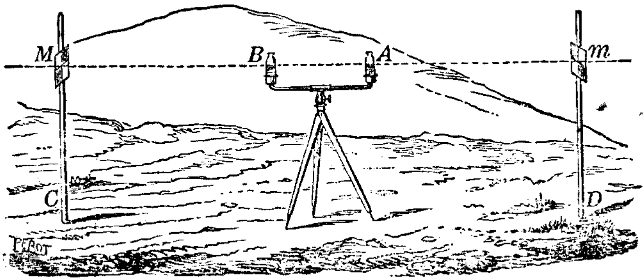


圖 109. 水平儀之使用情形.

兩地相差之高度，則 $h = mD - MC$。例如 $mD = 1.60$〔米〕，$MC = 1.40$〔米〕，則 $h = 1.60 - 1.40 = 0.20$〔米〕。

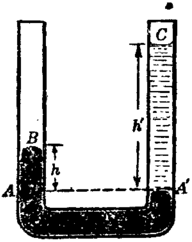


圖110. 用U形連通管以測比重.

又如盛兩種不同之液體於一 U 形之連通管中（圖 110），則左右兩支管上之自由面，自不在同一之水平面上。自兩液體之分界處 A'，至兩液體之自由面 B 及 C，其高度各為 h 及 h'。但 A 與 A' 在同一液體中之同一水平面上，所受之壓力必相等；A 之所受者為 hw，而 A' 之所受者為 $h'w'$，而 w 及 w' 為兩液體每單位體積之重量即重度；因得

$$hw = h'w',$$

或

$$\frac{h'}{h} = \frac{w}{w'}$$

卽兩液之分界面至兩液面之高度，與兩液體之重度或密度成反比例．故利用 U 形連通管,可以比較兩種不相混合之液體之密度．

若其中之一爲水，則兩者高度之比，卽爲液體之比重．

習 題 十 二

(1) 用氣泡水準檢查桌面是否水平，須就互相正交之兩邊，各加以檢查，其理由安在?

(2) 於 U 形連通器之一管注入水銀，而他管注入某種液體．靜止後，兩液境界面至水銀面及液體面之高各爲 0.8〔厘米〕及 11.6〔厘米〕．求此液體之比重(已知水銀之比重爲 13.6)．

(3) 欲用連通器測定能互相溶解之兩種液體密度之比時，其步驟應若何?

第十三章

液體之傳遞壓力

關於液體內部之壓力,已如第十一章所述;如從外部另加壓力於液體之某一部分時,其結果如何? 如盛水之瓶(圖 111),於其橡皮活塞上加壓力, 此一問題得據巴斯噶原理解答之.

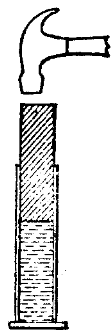


圖 111.

§75. **巴斯噶原理.** 由 § 70,知在同一液體內兩點壓力之差,與兩點之深度差,成正比例. 如有一點之壓力,不論因何原因,增加若干,其他各點對於此點之深度差,一仍其舊,則為維持平衡計,勢必增加同大之壓力. 換言之,增加液體內某部分之壓力,勢必令凡有液體連通之各處,均增同大之壓力,是為**巴斯噶原理**(Pascal's principle). 因所加之壓力,傳達及於各部,故液體可作為**壓力之傳遞**(transmission of pressure)的工具.

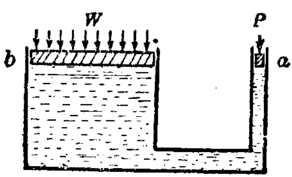


圖 112. 液體之傳遞壓力.

利用此理,加力 P 於任意面積 a 上,則其壓力強度 $p = P/a$,可以傳至其他任何部分. 假定如圖 112,大小兩面積間有液體連

通,大者之面積爲 b,小者之面積爲 a. 如於小者之上加 P〔克〕之力,則大者之上所受到之壓力强度,當然,亦爲每〔平方厘米〕P/a〔克〕,故其總壓力 W 爲

$$W = P \times \frac{b}{a},$$

加於小者上之力 P 較小,而大者上所得之力 W 甚大. 是亦一可利用之機械也.

由是觀之,液體之傳遞壓力乃整個的,而於力之强弱則有變更,與固體之傳力情形(§33)相反.

§76. 水壓機. 水壓機(hydraulic press)即爲應用巴斯噶原理,而製成之壓榨器械. 其構造,如圖113所示,由一管連通具有活塞之大小二圓筒而成. 以槓桿 ADE 舉起小活塞 p 時,則活門 v 閉而 d 開,使水吸入於小圓筒內. 再壓活塞 p 向下移時,則 d 閉而 v 開,送水入於大圓筒中,發生大力,使大活塞 P 上升,置於活塞臺上之物體,即被壓榨.

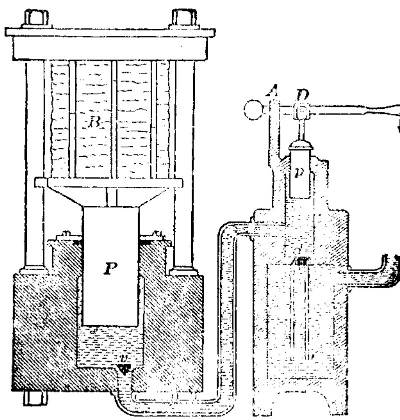


圖113. 水壓機.

設作用於槓桿 E 端之力為 40〔仟克〕，槓桿兩臂之長之比為 1 與 10，則小活塞上所受之力，為 400〔仟克〕；又設大活塞之直徑十倍於小活塞，卽前者之面積百倍於後者，於是大活塞上所受之力，為 40,000〔仟克〕。

水壓機與槓桿相似，可以數〔仟克〕之力，產生若干〔噸〕巨大之力；但吾人當注意輸出與輸入之功則恆相等，蓋上圖中小活塞下降 1〔厘米〕，而大活塞僅上升 $\frac{1}{100}$〔厘米〕也。

水壓機在工業上之用途甚廣，如棉花之打包，菜子之榨油，以及金屬之展成薄片等皆用之。 水壓機所用之液體，不限於水，用油更好。

習 題 十 三

(1) 水壓機大小活塞之截面積，各為 40〔厘米^2〕及 4〔厘米^2〕，若小活塞上加力 2〔仟克〕，則大活塞上能舉重多少？

(2) 一水壓機之兩活塞之直徑為 3〔厘米〕及 15〔厘米〕，桿之短臂為 20〔厘米〕。欲得 150 倍之力，全桿之長，須為若干？ 若將大活塞上之物壓縮 0.6〔厘米〕，桿之長臂端，應下降多少？

(3) 在加油站之汽車起重機，實為一水壓機。壓縮之空氣，將油推向大活塞之下，乃將車舉起，若壓縮空氣之壓力為每〔平方吋〕50〔磅〕，活塞之直徑為 10.5〔吋〕，問車重若干？

(4) 某人體重 130〔磅〕，立於水力風箱之上(圖 114)，箱板之面積為 2〔平方呎〕。 管口注水，則箱板上升，但管中水面與箱板高度之差，乃有一定，求此高度。

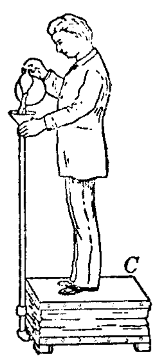


圖 114.

第十四章

液體之浮力

§77. 浮力. 試於靜止液體內,任取一部分而論(圖 115),其周圍之液體,均有壓力作用於此一部分. 至各點所受之壓力,並不相同,視其深度如何而定. 但全體所受壓力之合力,則與此一部分之重量相等,否則不能平衡. 故任何部分所受之總壓力,恆與其重量相等,方向則相反. 即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**,在與此物體同一形狀之液體之重心,是曰**浮力中心**(center of buoyancy).

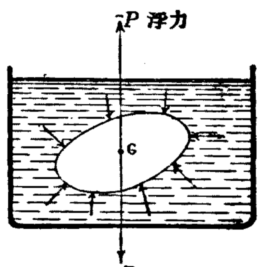


圖 115. 浮力.

§78. 阿基米得原理. 浸在液體中之物體,因受浮力作用,宛如重量減輕,所減輕者等於被排開的液體之重,是爲**阿基米得原理**(Archimedes' principle).

阿基米得原理可用下列實驗,證明之.

實驗一. 以體積爲1〔立方分米〕之物體 C, 懸於天平之一端圓盤 A 下(圖116);在他端圓盤 B 中,置砝碼使之平衡. 以一盛水之器置於圓盤 A 之下,將固體 C 浸入水中,於是因水有推固體 C 向上之浮力,天平乃向 B 端傾斜.

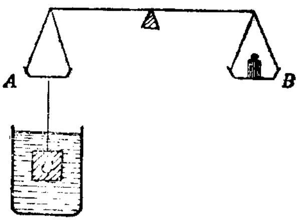


圖 116.

欲重得平衡,須去 B 中之砝碼若干. 在此實驗中,應減去之砝碼適爲1〔仟克〕,於是知水之浮力亦爲1〔仟克〕;換言之,即爲1〔立方分米〕容積之水之重量也.

實驗二. 兩金屬圓柱 C_1 與 C_2,一爲空心,一爲實心,實者適能容於空者之中. 茲將二者上下懸於天平之一端圓盤下(圖117,甲),在他端圓盤中,置砝碼若干,使天平平衡.

若以 C_2 浸入水中,則天平傾斜如圖117,乙.此因 C_2 受水之向上浮力故也.

以水漸漸注入 C_1 至滿,則天平重得平衡(圖117,丙).

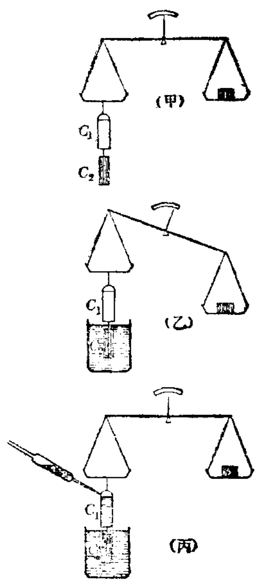


圖 117.

§79. 阿基米得原理之反面觀. 固體浸入一容器內之液體中,而不下沉至器底時,則容器所受之總壓力增加,所增加者等於爲此固體所排擠之液體

重量。

如圖 118 所示，當一懸掛之固體A浸入液體中時，容器內液體增高之量，等於固體A之體積，換言之，無異於加入等於固體A之體積之液體也。液體之深度既增，容器側壁及其底所受之壓力隨之俱增。其增加向下之總壓力，即等於所增液體之重也。

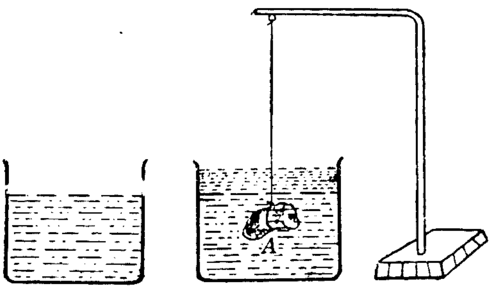


圖 118.

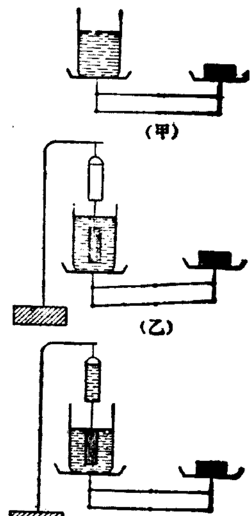


圖 119.

由此觀之，一物體浸於液體中，液體對浸入之物體，有一向上之浮力P，而同時物體有等量反向之壓力$-P$，作用於器底。作用力與反作用力，等量反向之謂也。

實驗。 在天平之一端，置水一杯，在他端置砝碼若干，使天平平衡（圖 119，甲）。

以物體懸入水內，則見天平傾斜，表示杯水之重量增加（圖 119，乙）。

以吸水管從水杯中取出與浸入固體容積相等之水，則天平重復平衡（圖 119，丙）。

習題十四

(1) 每邊 1〔米〕之立方體花岡石，沈入水中，使其頂面離水面 1〔米〕。求(*a*)作用於頂面上之總壓力，(*b*)作用於底面上之總壓力，(*c*)所失之重量，及(*d*)花岡石排開之水重。若將花岡石放手，則浮起抑沈下？ 何故？

(2) 下列物體在空氣及水中稱之，何者失去重量較多：(*a*) 1〔立方米〕鐵或 1〔立方米〕鉛？ (*b*)一〔磅〕鐵或 1〔磅〕鉛？

(3) 物體在液體中減輕之重量，與其本身之重量，有無關係？ 試言其故。

(4) 某物體於空氣及水中稱之，各重 578〔克〕及 424〔克〕。問此物體之體積為若干？

(5) 若將銀幣放入半滿之水銀杯中，則銀幣浮起；若將銀幣用力壓至杯之底部而放手，則銀幣將不再浮起。 試解釋之。

(6) 除銀外，何種金屬亦能在水銀內浮起？

(7) 用一適量之鉛錘，將一木塊使與水面相平，(*a*)鉛錘須繫於木下或木上？ (*b*)兩者所得之結果是否相同？

(8) 投玻璃片入水中，立即下沈；若作成杯形，則將浮起 試解釋之。

第十五章

阿基米得原理之應用

§80. 物體之浮沈. 浸在液體中之物體，在鉛直方向，受有兩種之力：一為物體本身之重量 W，方向向下，有使物體下沈之傾向；一為液體對於物體之浮力 P，方向向上，有使物體上浮之傾向。故物體所受之合力，為 $W-P$。

設物體之體積為 V，物體及液體之重度分别為 w_1 與 w_2，則 $W=Vw_1$, $P=Vw_2$，而物體在液體中之重量 W'，為

$$W'=W-P=V(w_1-w_2).$$

觀上式，可知物體在液體中之浮沈，當依下列情形而定：

I. 物體之重量較液體之浮力為大，即 $W>P$ 或 $w_1>w_2$ 時，則物體沈於器底.

II. 物體之重量等於液體之浮力，即 $W=P$ 或 $w_1=w_2$ 時，則物體可於此液體中任何處靜止.

III. 若物體之重量小於液體之浮力，即 $W<P$ 或 $w_1<w_2$ 時，則物體即行浮出液面，至此物體位於液內部分所排去之液重(即浮力)，與物體之全部重量相等時而靜止.

船舶之浮於水面，其全體重量與其所排除之水重相等，故得以較水為重之鋼鐵等建造船身者，以其體積龐大，船艙中空也.通常船舶之載重量，皆以〔噸〕表之.此〔噸〕數即為其所能排除

之水重. 又冰之密度較水爲小,亦常浮於水面.

雞卵雖沈於淡水中($w_2 < w_1$),然若加適量之食鹽於水中時,則亦可浮游於水中($w_2 = w_1$). 若再加過量之食鹽時,則一部竟可浮出於水面($w_2 > w_1$).

又游泳時充分吸入空氣而使胸部膨大,則身浮起;吐出空氣時,則身體下沈,爲吾人日常所經驗之事實. 蓋由身體體積之增減,與身體同體積之水重(卽浮力),亦隨之增減;而因呼吸所起之體重變化,極爲微小之故.

浮沈子　爲表明此理之有趣的實驗裝置,其構造如圖120所示,在玻璃小瓶內,盛適量之空氣而倒浮於圓形玻璃筒之水中,用橡皮薄膜密蒙筒口. 以指按膜時,玻璃瓶即行下沈,去指則復上升. 此因指之壓力傳達於水中各點後,瓶內之空氣即被壓縮,而與物體同體積之水重,即浮力,隨之減少,故爾下沈;去指,則瓶內之空氣復行膨脹,浮力增加,因而上浮.

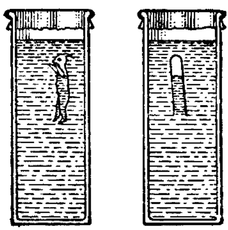


圖120.　浮沈子.

魚　魚腹中之鰾,爲司魚身浮沈之器. 鰾中滿儲空氣;鰾側肌肉之緊張或鬆弛,可變更鰾之體積. 魚鰾受壓時,魚身縮小,水對魚身之浮力亦小,於是魚身下沈,反之,魚則上浮.

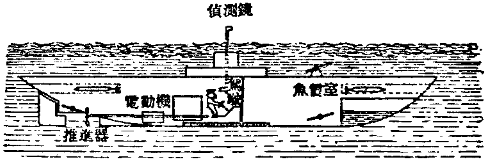


圖121.　潛水艇.

潛水艇 潛水艇(圖 121)爲一能浮於水面,而又能潛入海底之船,其原理與浮沈子同。 艇中有一氣室,此氣室中滿儲以水,則艇身之重,大於水對其全身之浮力,艇遂下沈。利用艇中之抽水機或壓縮空氣(compressed air),將室中之水排出時,艇又上浮水面。

船塢 船塢之設備,亦爲阿基米得原理之應用。 灌水於浮船渠之 T 室內時(圖 122),則船渠下沈至 LL 線,船舶得以駛入,安置於適當之位置後,用唧筒再將 T 室內之水排出,則船渠復行浮起而至 WW 線,船身全在空中,工匠得以修繕船底破損之處。

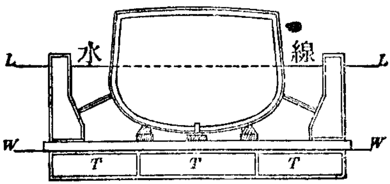


圖 122. 船塢.

§81. 浮體之平衡. 當一物體浮於液體面上,物體之重量 W,等於此物體浸入部分所排出液體之重量,即浮力 P 也。 命 V' 爲物體浸入部分之體積,w 爲液體之重度,則

$$W = P = V'w,$$

即
$$V' = \frac{W}{w}$$

若吾人以手將此物體推入水中,則待手放去,物體又復上浮如前,蓋此物深入水中後,被其排出之液體量必較其浮於液體面時爲多,換言之,即此時液體對物體之浮力 P',必大於 P 矣。故物體受得由下向上之力 $P' - W = P' - P$,而物體浮起,直至 $P' = P = W$ 爲止。

反之,若以手將此物體從液面微微提起,此時物體所排液體

之量較少,即液體對此物體之浮力 P' 較小於 P;於是待手放去物體受有由上向下之力 $W-P'=P-P'$ 而下降,直至 $P'=P$ 爲止。

【例】 有一正長方體之木塊,其密度爲 0.8,以此木塊投入水中,則木塊之入水部分之體積爲全體積之五分之四;即排出之水重量,與木塊之重量相等也。

船艇平衡之穩定. 一船排水之重量,必等於其全身之重量.設有船重 10,000〔噸〕,則其所排出之水爲 10,000〔立方米〕,因 10,000〔立方米〕之水適重 10,000〔公噸〕也。

此種平衡必須穩定無疑,蓋船艇恆遇前後左右之顛盪,而無傾覆之虞也。當船稍傾側,船之重量 W 仍於一定點 G 向下作用.此點 G 卽船之重心,有一定不易之位置。 惟此時水之向上浮力 P',則作用於另一點 C。點 C 爲浮力中心,乃水之被排出部分之重心,其地位隨船之前後左右傾斜之位置而變易(圖 123)。 如此則船受一力偶而旋轉,可使船身恢復原來位置,卽 C 與 G 同在一鉛直線上而後止.

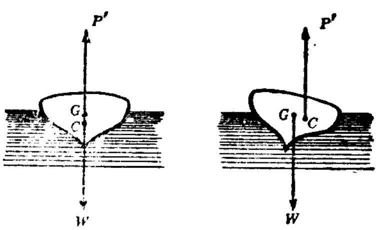


圖 123.

§82. **比重計. 比重計**(hydrometer)爲一細長之玻璃管,下部粗大,底內盛水銀或鉛粒,俾得直立於液體中(圖 124),視其浮沈之高下,以測液體之密度者也,實爲一浮體耳。 比重計沈

入液體中愈下，表示液體之密度愈小；比重計上浮愈高，則液體之密度愈大。

比重計上之刻度，種類甚多．最普通者，即預先在管壁上照比重計沈於種種已知比重液中之液面所示處，刻成度數．如水為1，硫酸為1.84等是．則由此類刻度，即可測定其他種種液體之比重．

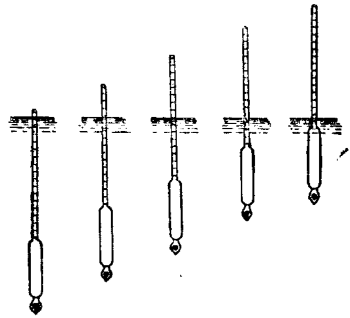


圖124．比重計．

又有測量輕於水之溶液之比重計，如酒精之密度本為0.79，若羼入水後，則密度變大．今有一種比重計，其上之刻度得直接讀出酒精中含水之百分比，此種比重計名曰百分酒精比重計(centesimal alcoholometer)．例如以百分酒精比重計投入某種酒精中，視其液體表面浮至N度，則此種酒精溶液每百分中含有N分之水．此種比重計之刻度，不復為等距離，愈近零度，每度間之距離愈小．

牛乳中約有87%為水，所含其他物質如蛋白質，糖及鹽類，較水為重，脂肪則較水為輕．視其成分之不同，牛乳之比重在1.027與1.035之間；但其最後二位小數，事關重要，故專為檢定牛乳用之牛乳比重計(lactometer)，刻度為自20至40，意即比重為自1.020至1.040也．

§83．比重之測定． 由阿基米得原理，易知與物體等體積之水之重量，因可測定物體之比重．視物體之為固體或液體，測定之步驟，有如下述數種：

I．先測定物體在空氣中之重量，然後沈之於水中，而測定其

在水中之重量，則由此二數值，即可求得此物體之比重．設物體在空氣中之重量爲 W，在水中之重量爲 W'，則與此物體同體積之水重爲 $W-W'$，而物體之比重爲

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

此法只能適用於較水爲重，而不溶解於水之物體．

II．設物體較水爲輕時，可附錘於其下，而行上法之測定（圖125）．設物體在空氣中之重量爲 W，附錘與物體一同沈入於水中之重量爲 W'，物體在水上面而錘單獨在水中之重量爲 W'' 時，則此物體在水中減少之重量爲 $W''-W'$，即與物體同體積之水重也．設比重爲 s，則

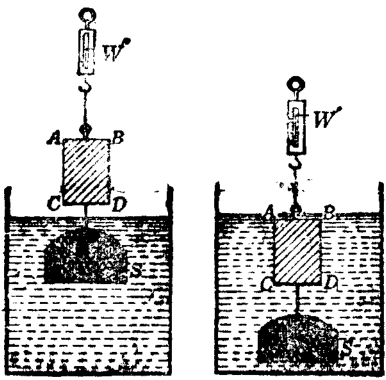


圖 125

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

此法亦僅能行之於不溶解於水中之固體．若欲求液體之比重，則採用下法：

III．以杯盛液體，沈錘於其中而測定其重量；次再沈錘於水中，而測定其重量．設錘在空氣中之重量爲 W，在液體中之重量爲 W'，在水中之重量爲 W''；則與錘同體積之液體重量爲 $W-W'$，與錘同體積之水重爲 $W-W''$，設液體之比重爲 s，則

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

IV. 若欲測定能溶解於水中之固體之比重時，則可先選擇一不能溶解此固體之液體，由 (I) 法求得此固體對於此液體之比重，次由(III)法求得此液體之比重，而將二比重之數值相乘，即得此固體之比重。 設固體之重量為 W_1，而與此同體積之液體及水之重量各為 W_2, W_3，則固體之比重 s 為

$$s = \frac{W_1}{W_3} = \frac{W_1}{W_2} \times \frac{W_2}{W_3},$$

即固體之比重，等於固體對於某液體之比重 W_1/W_2 與此液體之比重 W_2/W_3 之相乘積。

習題十五

(1) 一杯中滿貯水，其上浮一大塊之冰，高出杯外。 冰熔解以至完盡時，杯中之水將溢出否？ 試述其理。

(2) 船泊海中，放下扶梯，以便旅客上下，其底部，在水面上 50〔厘米〕。海潮漲高 1〔米〕時，扶梯之底浸入水中多深？

(3) 通常謂為冰山撞沈海中之輪船，並不沈至海底，而停在離海底數百〔呎〕之處。此種信念，具何理由？

(4) 一孩右手攜一桶水，重 40〔磅〕，左手攜一尾魚，重 2〔磅〕，其比重為 1。 將魚放入水桶中，問此時右手提重若干？

(5) 一石塊在空氣中舉起，需力 120 公斤，石之比重為 2.5。問在水中舉起此石，需力多少？

(6) 一長 40〔厘米〕，闊 15〔厘米〕之鐵皮盒，頂上開口，浮於水面。若

以 1〔仟克〕之物體置入盒中，則水線在離底 4.5〔厘米〕之處。求盒之重量。

(7) 一金屬，在空氣中重 80〔克〕，在水中重 70〔克〕，在石油中重 72〔克〕。求金屬及石油之比重。

(8) 一圓柱形之棒長 40〔厘米〕，直立水中，在水中之部爲 32〔厘米〕，求棒之比重。

(9) 一錘重 440〔克〕，繫在重 100〔克〕之栓木下，當兩者均沒入水中時，共重 70〔克〕。錘單獨在水中時，則重 370〔克〕。求錘及栓木之比重。

(10) 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 38〔克〕。求鐵之比重。

(11) 一重 50〔克〕之空瓶，滿貯水後重 200〔克〕。若裝入乾沙，則重 320〔克〕。若再加水，則共重 370〔克〕。求 (*a*) 瓶之容積，(*b*) 沙之體積，及 (*c*) 沙之比重。

(12) 有鋅，銅合金一塊，於空氣及水中稱之，各重 40.7〔克〕及 35.7〔克〕。問所含鋅，銅之量各爲若干（鋅及銅之比重各爲 7.1 及 8.8）？

(13) 有比重 0.9 之液體 5〔升〕與比重 1.2 之液體 3〔升〕，互相混合，求混合液體之比重。

(14) 設知純良牛乳之比重爲 1.03。今置細長之圓筒於某牛乳中，計沈入 12〔厘米〕；若改置入水中，則沈入 12.2〔厘米〕。試附計算之理由，而鑑定此牛乳之良否。

第十六章

氣體之壓力與浮力

§84. 氣體之體積隨容器而定. 不受拘束之氣體,不但無一定之形狀,且無一定之體積. 盛氣於容器內,不問氣體之多寡與容器之大小,恆瀰漫於容器中,故氣體之體積,隨容器而定.

§85. 氣體壓力之存在及其由來. 一切物質皆由分子組成,氣體之分子與分子間之空隙,遠較液體或固體者爲大,比之分子本身之大小,平均言之,約爲二十倍. 此等分子海闊天空,四處竄跑,無時或已,因之氣體之體積,無不盡可能的擴展,以充滿於容器之中.

盛氣體於一圓筒內,而以活塞蓋之,並於活塞之上加重量(圖126),則氣體壓縮,而減小其體積;但活塞下降,到某一程度,卽行停止,終難壓縮氣體之體積,以至於零也. 此時活塞及其外加之重量,爲氣體對於活塞所施向上之壓力所平衡,是爲氣體亦有壓力之明證. 此種氣體之壓力,由其分子之運動,不斷的,無數的,與器壁碰撞而來.

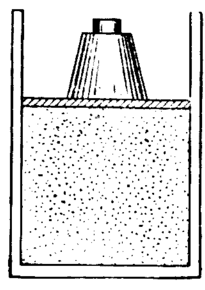


圖 126. 氣體之壓力.

§86. 氣體之壓力. 氣體與液體同屬流體，故前第十一章所述關於液體流動性之壓力的諸定律，在氣體俱可適用. 即：

I. 靜止氣體之壓力，常垂直作用於物體之表面.

II. 作用於氣體內一點之壓力强度，於任何方向，皆屬相等.

III. 加壓力於被密閉氣體之一部分，則此壓力能不變更其强度，而傳遞於各方(巴斯噶原理).

IV. 受重力作用而靜止之氣體內，同一水平面上各點所受壓力之强度相等. 其二任意不同點，所受壓力强度之差，等於以此二點之鉛直距離爲高，單位面積爲底之氣柱之重. 但氣體之重度，遠較液體者爲小，如空氣每〔升〕之重僅爲 1.293〔克〕，即其重度爲 0.001293〔克/厘米^3〕；是在高度相差 1〔米〕之兩處，空氣壓力相差，不過 0.1293〔克/厘米^2〕耳. 故在普通之容器內，氣體各點之壓力，可認爲一律相等.

§87. 氣體之浮力. 在氣體中之物體，亦受氣體之浮力作用，一如在液體中然. 按阿基米得原理，此浮力即等於與物體同體積之氣體重量.

試取一空心銅球，懸於天平一端，他端懸砝碼，使成平衡，全體放在抽氣機之玻璃鐘罩內，如圖 127，抽去空氣，即見銅球一端下沈. 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，銅球之實在重量，較砝碼之實在重量爲大，但在空氣中因受有較大之浮力作用，就表面而論，兩者之重量恰相等. 今在真空中，兩者之實在重量，

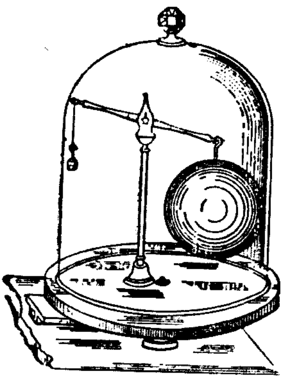


圖 127.　空氣之浮力.

既不相等，當然不能平衡。

設銅球與砝碼體積之差爲 $\frac{1}{2}$〔升〕，則空氣對兩者浮力之差爲 $\frac{1}{2}\times 1.3$〔克〕$=0.65$〔克〕；用普通之天平，作此實驗，即可顯出其差別矣。

故用天平在空氣中稱物，物體之體積較砝碼爲小者，稱得之重量，較之實在重量爲小；反之，則較實在重量爲大。但相差甚微，除體積龐大而密度又小如氣球等物體外，通常可略而不計。

§88. **氣球.** 用塗有橡膠之布數層，製成龐大之球(圖 128)，囊內盛氫，質料既輕，又不漏氣，即可藉空氣之浮力而上升。球下懸筐，以備搭載貨物乘客。

空氣之重度爲 0.001293〔克/厘米^3〕，氫之重度爲 0.0000899〔克/厘米^3〕，相差約爲 0.0012〔克/厘米^3〕，即每 1〔立方米〕之浮力，約有 1.2〔仟克〕之多。若氣球之容積，爲 1000〔立方米〕，囊布，繩索，筐以及貨客等之總重量，爲 1000〔仟克〕，則使此氣球實際上升之力，爲 200〔仟克〕。

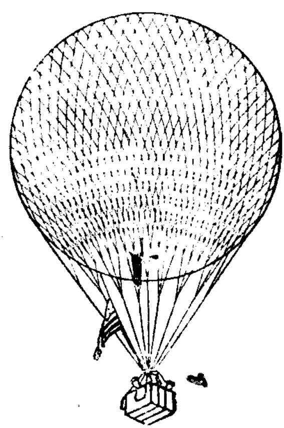


圖 128.　氣球.

氣球上升時,因高層空氣氣壓減小之故,囊中之氫卽有膨脹之勢,吾人須從氣囊下部,隨時放出些許之氫,以保持氣囊內外壓力相差不致過大,而免氣囊有破裂之虞. 是故氣囊之容積不變,而高層空氣之重度減小,因之氣球愈向上升,而使其上升之力愈減,終至某一高度,氣球不復上升.

此時若再欲繼續上升,則宜將預置於筐中之沙包擲下,以減小氣球之重量.

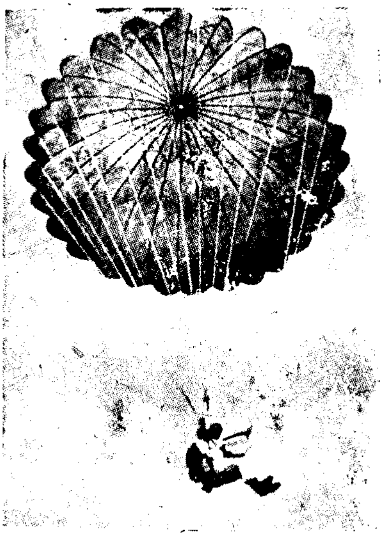


圖 129. 降落傘.

若欲下降,則啓球頂上之活門. 司此活門之啓閉者,爲一由上垂下之繩索,氫自活門逸出後空氣卽行塡入.

如遇意外,則用圖 129 所示之降落傘,傘頂有孔,空氣得由此出,以保直立狀況,不致傾斜. 此乃利用空氣之阻力,使傘降落極緩,因得安全到達地面.

氣象臺爲探測高空氣象而發氣球,其容量約爲 100〔立方米〕,上騰雲霄,可達 20〔仟米〕,帶有自動紀錄儀器如氣壓計,溫度計,及濕度計等. 經過數小時之航行,氣球卽自行墜地,而由氣壓計之紀錄,可推知氣球所曾達到之最高的高度.

通常氣球只能升高,隨風飄蕩,莫能自主. 除非氣球至某一

高度時，在此高度中，空氣流動之方向，與氣球欲行之方向爲一致，然此可遇而不可求也。

飛艇(airship)爲氣球之裝有推進機者，得以隨意作定向之航行。通常飛艇之形狀，如一龐大之雪茄煙，首尾兩端尖銳，所以減少空氣之阻力，及便利轉換方向者也。氣囊中儲以氫，其容量可超過10,000〔立方米〕。

飛艇之危險，莫如火災，故近來多用氦代氫，以保安全。氦之重度雖較氫者略大，然仍遠在空氣之下，故其浮力依然不小。

§89. **飛機**。自飛艇出，航空問題，得一解决；而**飛機**(airplane)之發明，乃爲更大之進步。飛機與飛艇之功效相同，而其構造原理迥異；此雖與阿基米得原理無關，吾人於此一併敍述。

氣球爲輕於空氣之物；其所以能上升者，全恃空氣之浮力，大於其本身之重量；其所以能航行者，則恃空氣之流動，如無槳之船，隨波逐流而已。氣艇之能轉向自如者，則恃其舵，可比魚之在水。

惟飛機則重於空氣。其在空中，一如飛鳥，鳥展兩翼，則浮於空中而不墮，兩翼拍動，則翺翔往回自如。是鳥之兩翼既支持鳥身於空中，而復司推進之機能也。飛機亦然；有翼板支持機身於空中而勿墮，有推進機使機身運行於空中。

設有平板 AB，略與水平傾斜，風自右向左吹來，遇平板之阻礙，此流動之空氣在其附近成爲極複雜之狀態，有如圖130所示，因而有力 F 正交作用於平板而向上，遂使平板勢欲上升。

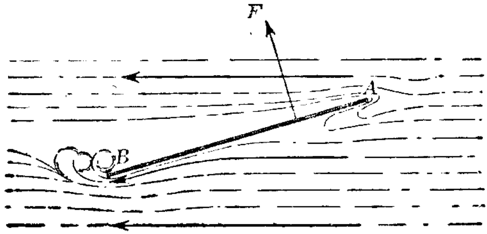


圖 130.

若空氣不動，平板自左向右前進，情形完全相同. 此飛機得以上升之理，而機翼之功用，與此平板同.

機翼所受之力 F，可分解成二力（圖 131），一沿鉛直線向上，一沿水平向後. 前者擧起機重，使之上升，稱爲**上擧力** (lift)；

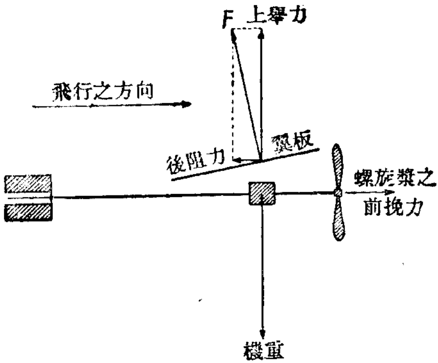


圖 131.

後者阻礙機之前進，稱爲**後阻力**(drag). 故欲飛機之繼續前進也，非有前挽之力，以制勝後阻力不可；發動機螺旋槳，卽所以供給此前挽之力者也.

當發動機轉動推進器時,機卽滑走於跑道上,其作用於兩翼下

面之風壓與速度同時增加，待速度達於一定程度後，其向上之分力至能支持機重時，機卽離地面向空中飛揚。

機尾有鉛直，水平兩舵(圖 132)。舵 GP 能繞水平之軸而旋轉，當其高舉，則機上升，反之則下降。鉛直之舵 GD 爲司轉向之用。

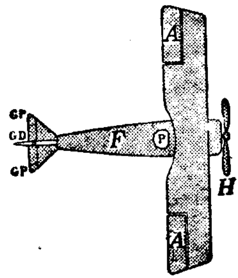


圖 132.

習 題 十 六

(1) 一段縛在水底之木塊，解鬆後即能浮到水面，何故？ 氣球起錨之後，亦將升起，何故？

(2) 氣球升至極高後，空氣之密度與氣球之浮力，有何變化？

(3) 二個氣球，全不漏氣，重量相等，並裝同質量同體積之氫氣。一爲不能膨脹之質料所造成，一爲有無限制伸縮性之材料所製成。問那個能飛得更高？

(4) 一測高氣球，直徑 10〔米〕，中盛氫氣。 氣球外殼每〔平方米〕重 100〔克〕。問此氣球所帶器物之重量，最多若干？

(5) 氫氣球外殼之重爲每〔平方米〕500〔克〕，適能浮於空氣中，求其半徑。

(6) 一鋁質(密度爲 2.5〔克/厘米^3〕)氣球，中盛氫氣，球殼厚 1〔毫米〕。問此種氣球直徑至少若干，方能升起？

(7) 一長方形之橡皮囊，上方之面積爲 150〔平方厘米〕，有重物掩壓其上。囊口與打氣筒相連，打氣入囊，使囊內達 3〔仟克/厘米^2〕之壓力時，重物方行上舉。求其重量。

第十七章

大　氣　壓　力

地球周圍空氣之全部，曰大氣(atmosphere)；由其重量而生之壓力，曰**大氣壓力**(atmospheric pressure).

§90. 大氣壓力之存在. 吾人生活於地面上，與一切物體，同在大氣氣海之底，無時不受大氣壓力之作用，而每不感覺者，則以物體之兩對面，恆受相等而相反之壓力耳. 欲表現其作用，須將一面之空氣除去. 下列實驗，卽所以表明大氣壓力之存在.

倒覆水杯之實驗. 一玻璃杯，滿盛以水，杯口覆以厚紙或玻璃片，手持杯底而倒握之(圖 133)，則大氣壓力由下向上抵住此覆口之厚紙或玻璃片，使杯中之水不致下墜. 此足見厚紙或玻璃片上所受大氣壓力，尙大於此一杯水之重量也.

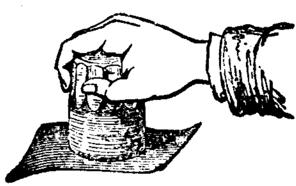


圖 133.

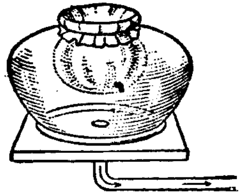


圖 134

裂膜實驗. 以一薄膜(如橡皮或膀胱等),密張於一圓筒之口,置此筒之他口於一抽氣機之臺上(圖 134),將圓筒中之空氣抽去,則見薄膜漸向內凹,終至破裂,因只有其上面受大氣之壓力故也.

若無抽氣機,可用下法以試驗之. 以一玻璃瓶盛水不滿,沸之,則瓶中空氣爲蒸氣所逐出,急以薄膜密封其口,待瓶水漸涼,蒸氣凝結爲水,則瓶中一部分爲半眞空,瓶口之薄膜因是中部下陷.

馬德堡半球(Magdeburg's hemispheres)**實驗.** 取兩金屬半球,合之而抽去其中空氣,則因球之外部受大氣壓力作用,不易將其拉開,如再放入空氣,則仍甚易分離. 此一實驗初於 1650 年行於馬德堡市德皇之前(圖 135),因名馬德堡半球,其內徑爲 22〔吋〕,用十六匹馬始行拉開,可見大氣壓力之大.

圖 135. 馬德堡半球實驗

§91. 托里坼利實驗. 大氣壓力既如此其大,物體單位面積上所受此種壓力之强度,爲值幾何? 當爲吾人所急欲知之者. 托里坼利氏(Torricelli)爲解決此問題起見,曾創一有名之實驗.

取長約一〔米〕之玻璃管,閉其一端,滿盛水銀,以手指按管口,倒立此管於水銀槽中(圖 136). 取去手指,則見管中水銀降下少許,此時管中之空隙部分乃爲眞空. 量得自槽中水銀面,至管中水銀面之鉛直距離,乃有一定,約爲 76〔厘米〕. 無論管爲直立或斜置,莫不皆然. 又與

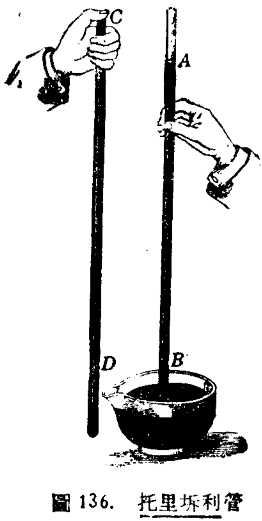


圖 136. 托里坼利管

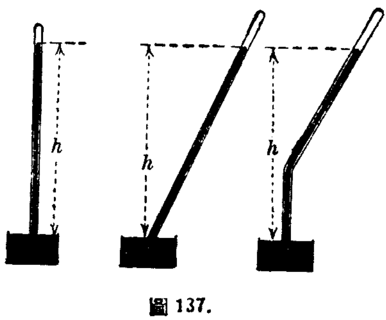


圖 137.

管之形式無關,或曲或直,或粗或細,結果均同(圖 137).

§92. 大氣壓力之數值. 上述托里坼利實驗,可視爲兩種不同之流體,置於一連通器中者(參閱 §74,圖 110). 連通器之一爲槽上之空氣部分,空氣卽爲此器中之一種流體,另一部分爲玻璃管,管中水銀爲他種流體. 平衡時,在分界之水平面上,此兩

種流體之壓力，當相等也.

由此觀之，作用於管外水銀面之大氣壓力 P，與管內水銀柱底部同一水平面上之壓力相等. 後者之壓力，爲底面積 1〔平方厘米〕，高 76〔厘米〕之水銀柱之重量，得

$$1 \times 76 \times 13.6 = 1033\text{〔克〕}\text{（水銀之重度爲 } 13.6\text{〔克/厘米}^3\text{〕）}$$

故 $$P = 1033\text{〔克/厘米}^2\text{〕},$$

即大氣壓力約爲每〔平方厘米〕1〔仟克〕，或每〔平方吋〕15〔磅〕也.

在托里拆利實驗中，以水代水銀，則玻璃管中水之高度將若何？因水銀較水重 13.6 倍，故玻璃管中水之高度，應爲水銀高度之 13.6 倍，即

$$\text{水之高度 } h = 76 \times 13.6 = 1033\text{〔厘米〕},$$

約爲 10〔米〕或 34〔呎〕也. 此實驗需管甚長，巴斯噶曾實地測之，結果無誤.

§93. 液體比重之測定. 如上節所述，吾人可以水銀柱、水柱，或任何液柱之高度，表示大氣壓力之强度；反之，即可利用大氣壓力，以測定各種液體之比重. 此對於液體之易與水混合，而不能同裝在一 U 形管內者，更爲適宜.

用一三支連通管，令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 138，中央支管連一橡皮管，管上有活鋏；開放活鋏，從管口吸氣，即見兩容器內液體

上升管中，俟升達相當高度，再將活鋏夾緊，管內液面卽停止不動。命 w_1 與 w_2 表兩容器內液體之重度，h_1 與 h_2 表兩管內液面與 A 及 B 自由面之距離，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 h_1 及 h_2 兩液柱所生之壓力，必須同為 $P-Q$，卽

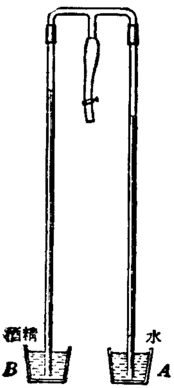


圖 138.
液體比重之測定.

$$h_1 w_1 = h_2 w_2,$$

或
$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{h_1}{h_2}.$$

如有一液體為水，則 $w_1 = 1$，他一液體之比重為

$$s = \frac{h_1}{h_2},$$

卽所求液體之比重，等於以液柱之高除水柱之高所得之商。

【例】 在本實驗中，測得水柱與酒精柱之高度，各為 25.4〔厘米〕及 32.2〔厘米〕，則酒精之比重為 $\frac{25.4}{32.2} = 0.79$.

§94. 大氣壓力因高度而不同. 巴斯噶氏又以托里拆利管中之水銀柱，既係由管外大氣之壓力所支持，則在離地面較高之處，壓力必較低，故如將管帶至高山上重作實驗，其中水銀柱之高應行降低，此預料之結果，經其友人代作實驗，亦得證實。

在同一處，因高度不同，大氣壓力之變化如次：

高度	大氣壓力(水銀柱高)
0〔米〕(海面)	760〔毫米〕
500	714
1,000	671
2,000	592
4,000	461

是大氣壓力之減小,並不與高度恰成比例,蓋空氣密度亦愈高而愈稀,故高空飛行,每感呼吸困難,須攜備氧氣。 約略言之,每升高 100〔米〕,氣壓減低 9〔毫米〕水銀柱高。

§95. **壓力之量度.** 壓力之常用單位,依定義,為〔克/厘米²〕或〔磅/吋²〕. 但於討論流體時,為便利計,吾人卽以水銀柱或水柱之高度表示壓力之大小,1〔厘米〕水銀柱高,意卽 13.6〔克/厘米²〕之壓力也;1〔厘米〕水柱高,意卽 1〔克/厘米²〕之壓力也。

【例】 壓力 500〔克/厘米²〕$= \dfrac{500}{13.6}$〔厘米〕水銀柱高

$= 36.8$〔厘米〕水銀柱高

壓力 5〔克/厘米²〕$= 5$〔厘米〕水柱高。

吾人又常取大氣壓力,作為壓力之單位. 以在緯度 45° 之海面上,溫度為 0°C, 水銀柱之高適等於 76〔厘米〕時之大氣壓力作為標準,特稱之曰 1〔大氣壓〕(atmosphere),故

$$1〔大氣壓〕= 1033〔克/厘米^2〕$$

【例】 壓力 6000〔克/厘米²〕$= \dfrac{6000}{1033}$〔大氣壓〕

$= 5.8$〔大氣壓〕

§96. 氣壓計. 大氣中恆不風平浪靜,其壓力隨地隨時而變.用以測定大氣壓力之儀器,謂之**氣壓計**(barometer),種類甚多;福廷氣壓計(Fortin's barometer)即爲其中最普通之一式(圖139), 原理與托里坼利管相同,不過形式稍爲變更,便於使用而已.

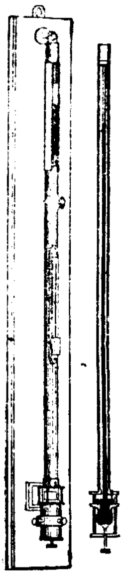


圖 139.
福廷氣壓計.

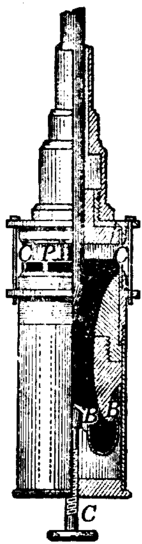


圖 140.
氣壓計之下部.

將一端封閉,充滿水銀之玻璃管倒立於底部附有鞣皮袋 B 之水銀槽中(圖 140),因水銀柱隨氣壓之變化而升降,故槽內之水銀面亦隨之有高低. 但測定水銀柱之高度時,當以槽中之水銀面爲基準. 因此於水銀槽中固定一象牙針 P,即以其尖端爲水銀面之標準. 故讀氣壓計時,先旋轉螺旋 C 使袋 B 之底上升或下降,俾其水銀面恰與針尖接觸. 管外套有圓筒,筒上附有以針尖爲起點之尺度,藉便測定水銀柱之高度. 故依上述方法,將氣壓計調整後,由其上所附之游標尺,讀取水銀柱之高度,即可得知當時之大氣壓力.

氣壓之大小,因天氣之不同而異. 概言之,晴天之氣壓高,雨天之氣壓低. 故由氣壓之增高或減低,可推知天時之轉晴或將雨,此氣壓計之所以復有晴雨計之稱也.

爲便於攜帶,而又無須十分精確時,可用**無液氣壓計**(aneroid barometer). 其主要部分爲一金屬圓盒(圖 141),盒面有凹凸溝紋,內容稀薄空氣,如是則大氣壓力略有變化,盒面即能起伸縮作用. 此些微伸縮經數個槓桿將其放大,可使指針在一圓標尺上迴轉,而自圓標尺之刻度上,即可讀出大氣之壓力.

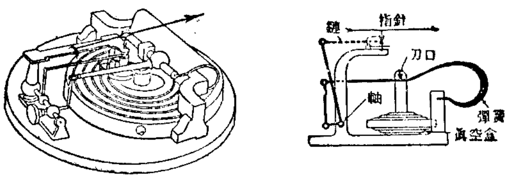


圖 141.　無液氣壓計

大氣壓力既隨高度而異,每高 11〔米〕而下降 1〔毫米〕,或每高 90〔呎〕而下降 0.1〔吋〕;故攜帶無液氣壓計登山,可由氣壓之減低而知山之高度. 無液氣壓計,又常稱**高度計**.

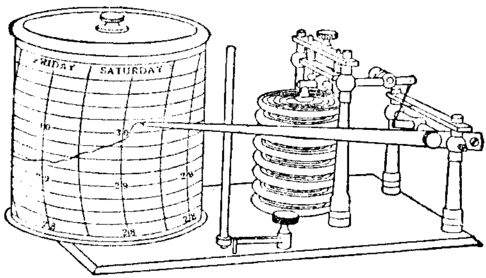


圖 142.　氣壓記錄器.

若將一處之氣壓,隨時記錄,則用**氣壓記錄器**(barograph),或稱**自記無液氣壓計**(self-recording aneroid),如圖 142. 其主要部分爲由數個溝紋金屬盒重疊而成之箱,如是因氣壓變化而得箱面之伸縮,將形倍增. 經槓桿等放大,由其末端之筆

尖在圓筒之紙上畫出各時刻之大氣壓力曲線;筒中置有鐘錶設備,使筒徐徐轉動,每一星期,適轉一周。

習題十七

(1) 在空氣中等重之木塊與鉛塊,何者質量較多?

(2) 吾人生活於大氣氣海之底,何以不覺空氣之重?

(3) 倘謂吾人生活於大氣氣海之底,(*a*)假設上下空氣之密度為均勻的,氣海之深若干? (*b*)大氣海與水海之區別若何? (*c*)阿基米得原理可同應用於此兩種海否?

(4) 一木屋寬 4〔米〕,厚 3〔米〕,高 35〔米〕. 大氣對屋頂及前牆之全壓力各為若干? 為何木屋不致倒下?

(5) 懸掛氣壓計時,應否注意其是否鉛直? 何故?

(6) 作氣壓計時,應否特別注意管之粗細均勻? 何故?

(7) 馬德堡半球直徑為 22〔吋〕,用十六匹馬拉開(§ 90). 問平均每馬之力多少?

(8) 池面上為大氣壓力,求水中深 2〔米〕處之壓力.

(9) 求壓力等於 $\frac{1}{2}$〔大氣壓〕之鐵柱之高.

(10) 某人攜無液氣壓計登山,在上山時讀數為 758〔毫米〕,在山頂為 674〔毫米〕,下山後為 764〔毫米〕. 問此山約高多少?

(11) 海底深 50〔米〕處之壓力,等於多少〔大氣壓〕? (海水之比重為 1.03.)

第十八章

大氣壓力之應用——唧筒

§97. **吸水.** 以麥桿管浸入玻璃杯中,管內水平面與管外者相齊. 從管口吸氣(圖 143),則管內氣壓減低,管外水面上之大氣壓力,壓迫水面,使水由管內上升,以達於口.

圖 143. 吸水.

§98. **虹吸.** **虹吸**(siphon)為利用大氣壓力,無需傾倒容器,可使其中液體,移至低處之設備. 法用橡皮管一條,兩端各接玻璃管一小段,全部盛液令滿,然後將其兩端之玻璃管,插入高低不同之兩容器中(圖 144),或將上端之管插入高處之容器,於他端下口吸氣,則水升入管內,由下口流出.

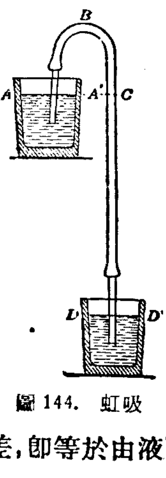


圖 144. 虹吸

試就圖中點 B 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,卽等於由液面 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，或兩容器中之液面達到同一水平面時，始行停止。如是，虹吸一經發動，川流不息，毫不費功，此乃順水性而就下，重力在做功也。

間歇虹吸 如圖 145 所示，於漏斗內插入虹吸，此虹吸之短脚管口接近漏斗之下部，長脚則貫穿漏斗下部所嵌木栓而出至漏斗之外。注水於漏斗內，初則水位在管之內外齊高；迨水面達到虹吸之最高點 S 時，水即由長脚管 B 口流出。如漏斗內之水，源源添注，而其添注量較流出量為少，則漏斗內水位減低，達於短脚管口 A 時，虹吸之作用，暫行停止。繼續添注之水，仍積漏斗之內，待其水面又達於虹吸最高點時，則復行上述作用，故漏斗內之水，成斷續的流出。

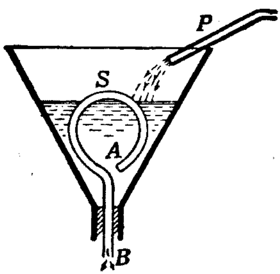


圖 145. 間歇虹吸.

間歇泉(圖 146)之成因，即係此理。地下水 S 積至水面高達 ACB 道之最高點時，泉始湧出，低至 A 點時，則又停止。

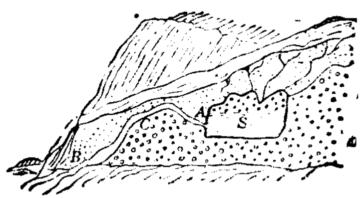


圖 146. 間歇泉.

§99. **抽水唧筒**. 欲將低處之水，升至高處，吾人不能不費功。除提與挑外，可用**抽水唧筒**(water pump)，亦大氣壓力之應用也。可分為吸取唧筒與壓迫唧筒兩類。

吸取唧筒(lift pump)略如圖147所示．圓筒中有活塞，活塞以槓桿作用而上下．圓筒之底部與活塞上，各有僅能向上開動之活門．當活塞開始向上移動時，活塞上之活門被活塞外空氣所阻止而關閉；在活塞下，空氣壓力減小，水即由大氣壓力作用挺開筒底之活門而上升筒中．當活塞向下移動時，筒底之活門，被水壓迫而關閉，筒內之水，則挺開活塞上之活門，而升至活塞之上．待活塞再向上移動時，即攜其上之水，使自筒側管口流出．如是活塞於圓筒中升降不已，水即源源被其吸上．吸取唧筒所能吸上之水，在理論上，其高度可達10.33〔米〕，即大氣壓力之水柱高；但在實際上，則遠在此值之下．

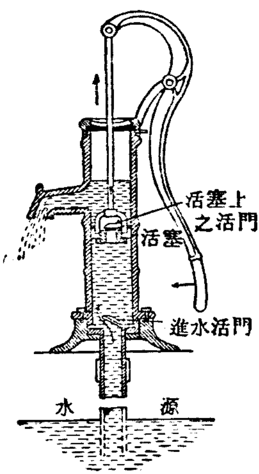


圖147．吸取唧筒．

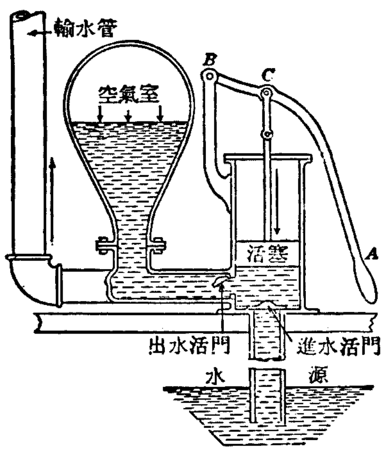


圖148．壓迫唧筒．

壓迫唧筒(force pump)亦稱喞筒，與吸取唧筒構造不同之點，在出口之活門不設於活塞上，而設於筒旁(圖148)．活塞向

上移動時,出口關閉而入口開放,水乃流入筒內;活塞向下移動時,入口閉而出口被推開向外,水被壓入輸送管中而流出. 爲求水流之連續,恆於輸送管上裝一氣室,藉室內壓縮空氣之壓力,可使活塞上移時,水仍由輸送管中繼續流出,不致間斷.

消防唧筒即俗所謂救火機,常由二個壓迫唧筒並聯而成,效用更宏.

§100. 空氣唧筒. **空氣唧筒**(air pump)亦可分爲二種:排出密閉於容器內之空氣,使成眞空者,爲抽氣筒或抽氣機;反之,壓縮多量之空氣使進入於容器內者,則爲壓氣筒.

抽氣筒(exhaust pump)之簡單者亦用活塞. 其原理如圖149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 內之氣推使 A 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.

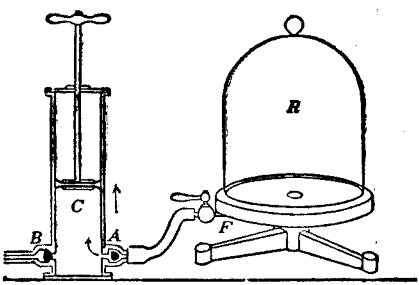


圖 149. 抽氣筒.

反之,如活門之開閉方向,恰與上述相反,則成**壓氣筒**(compression pump),如脚踏車輪與足球等所用之打氣筒是. 鐵匠所用之風箱,亦爲壓氣筒之一種.

抽氣機之應用,在本書屢見不鮮,而壓縮空氣在工業上應用尤

廣．如潛水艇內之排水(§ 80)，水雷之發射，穿孔機之轉動等，其著者也．潛水作業，尤不可少．潛水者著不透氣之兜與橡皮服(圖 150)，或居潛水罩內(圖 151)，沈於水底，以從事珍珠之採

圖 150．潛水者．

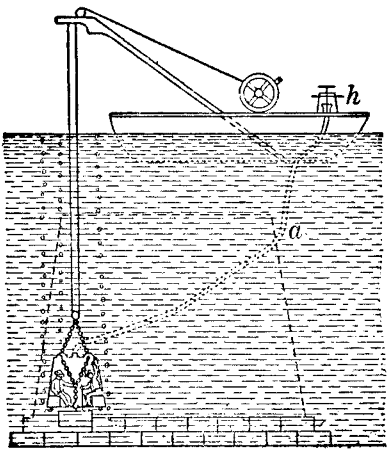


圖 151．潛水罩．

取，船舶之打撈，與橋墩之建築等；其所需之新鮮空氣，則在船上用壓氣筒 h 由橡皮管或金屬管 a 輸送下去．

§101．自來水． 城市中之自來水(圖 152)，乃將河或湖 a

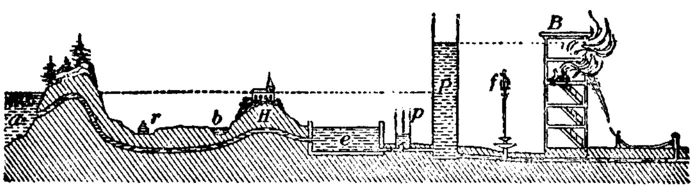


圖 152．自來水．

中之水導入水池 e，經過濾與消毒之後，用喞筒 p 壓入水塔 P，再由自來水管分送至全市各處，以供應用。

題 題 十 八

(1) 常有此不正確之敍述："在海平面上，不能使水壓至 34〔呎〕以上"。其眞相若何？城市中高樓大廈，亦可有自來水，如何得來？

(2) 抽氣筒能否將一容器內之空氣，完全抽盡？何故？

(3) 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？能否用同法吸取一浮在水面之船艙底部之水。

(4) 虹吸之短臂與長臂，長短有無限制？ 若一正在工作之虹吸，將長臂改成較短臂爲短，得何結果？

(5) 有腐蝕性之液體，常用虹吸吸取之。若吸取硫酸，虹吸之曲折處，離液面至高不得超過多少？硫酸之比重爲 1.84。

(6) 試詳述鐵匠所用風箱之構造。

(7) 在水中潛水衣內之氣，何以須用壓縮空氣？

第十九章

氣 體 之 壓 縮

§102. 氣體壓力與其體積之關係. 本章所述氣體之壓縮，乃指一定質量之氣體，封閉於一容器內者而言. 非如用壓氣筒將外部多量之氣體，源源壓入容器內；亦非如用抽氣筒，將容器內之氣體，不斷抽至外方也.

氣體被壓時，體積即隨之而減小；如其體積愈減小，則氣體作用於器壁之壓力亦愈大；此種現象為吾人日常所經驗者. 茲進而研究其數量的關係.

取一截面均勻之曲玻璃管，長端開口，短端封閉. 將水銀逐漸注入管中，長短兩管支內之水銀面，D 與 C，在同一水平面時(圖 153 左)，閉管內空氣所受之壓力，適為 1〔大氣壓〕.

繼續將水銀注入，短管支內水銀面 C 繼續上升，不若長管支內 D 上升之多，如圖 153 右所示. 此時封閉於短管支內之空氣，體積縮小，所受之壓力為$(1+h/76)$〔大氣壓〕，h 表長短兩管支內水銀面高度之差(以〔厘米〕計). 隨時記錄 C 及 D 兩水銀面之位置，即知短管支內空氣之體積及其所受之壓力.

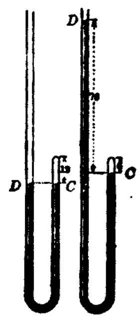


圖 153.

當其體積縮小至 $\frac{4}{5}, \frac{3}{4}, \frac{2}{3}$ 等倍時，則其壓力各增加成 $\frac{5}{4}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}$ 等倍.

欲使封閉之空氣所受之壓力,亦可小於 1〔大氣壓〕,則有如圖 154 所示之裝置。上下移動 D 瓶,可使水銀面 D 高於 C 或低於 C。若 D 面低於 C 面 h〔厘米〕,則 AB 管內封閉之空氣,所受之壓力,為 $(1-h/76)$〔大氣壓〕。

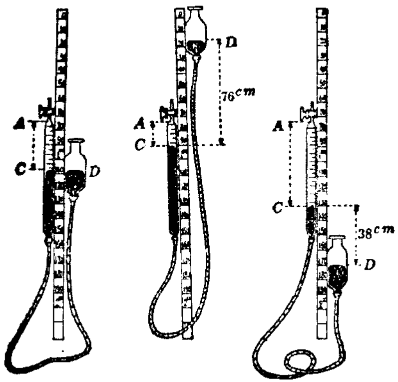


圖 154. 波義耳實驗

本實驗之進行,乃在溫度不變之狀況下,空氣之壓力 p 與其體積 v,恆合下式之關係:

$$pv = \text{常數}.$$

不用空氣,而用其他氣體,亦然。即一定量之氣體,在溫度不變時,其壓力與體積成為反比例,是為**波義耳定律**(Boyle's law),亦稱**馬略特定律**(Mariotte's law)。

氣體之質量不變時,密度乃與體積成反比者,由此可知氣體之密度,在溫度不變之下,與其所受之壓力成正比。

§103. 壓力計. 測定密閉於容器內氣體壓力之器具,稱為**壓力計**(manometer)。由一 U 形玻璃管,內盛液體(水銀或水)而成。

如圖 155,兩端開放者,曰**開管壓力計**(open manometer)以其一端連於所欲測定壓力之氣體容器上,他端開向大氣。命

p表所欲測之壓力，h 表兩管支液面高度之差，w 表所用液體之重度，則由

$$p = wh + (\text{大氣壓力})$$

卽可求出 p.

開管壓力計宜於測量 1〔大氣壓〕上下之壓力． 若欲測之壓力與 1〔大氣壓〕相差甚微時，則用水作液體，以其重度較水銀者為小，因而更為靈敏；若欲測之壓力近於 2〔大氣壓〕時，則非用水銀不可，以免需要甚長之玻璃管．

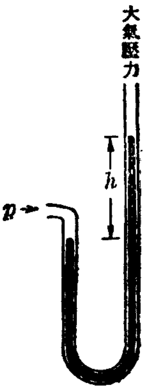


圖 155. 開管壓力計．

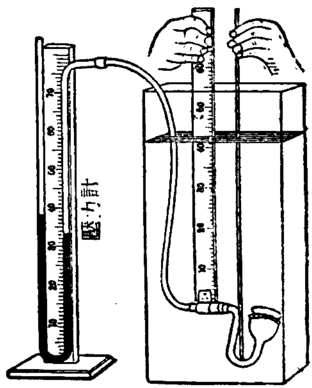


圖 156. 用開管壓力計以測定液體各點之壓力．

圖 156 表示用開管壓力計，以測定液體中各點壓力之情形．壓力計與一喇叭管相連，管口有膀胱薄膜緊閉，將其浸沒液中，卽可證實 §70 所述在液體中各點之壓力之分布情形．

欲測之壓力若超過 2〔大氣壓〕時，雖用水銀之開管壓力計，亦不方便，則有閉管壓力計． **閉管壓力計**(closed manometer)

實卽波義耳實驗中所用之曲管耳．如圖 157，以其開端連於所欲測定其壓力之氣體容器上．閉管支內所封閉空氣之體積，隨其所受之壓力而變，觀其體積，卽可知其所受壓力之大小．由此壓力，加上兩管支中水銀面高度之差，卽得所求氣體之壓力．

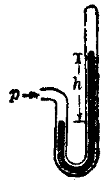


圖 157.
閉管壓力計

若測壓力之低於大氣壓力者，則閉管支內，不必留有空氣，將此壓力計之開端連於正在抽氣中之容器上，容器中之壓力減低至某程度時，閉管之水銀柱脫離管端而開始下降，若達眞空，則壓力計兩管之水銀面相平．

在工業上每須量極大之壓力，如蒸汽機之蒸汽壓力等，上述各種壓力計自不適用，則有**金屬壓力計**(圖 158)．其主要部分爲一彎成環形之中空銅管，截面爲橢圓形．一端開口，固定盒上，以便與欲量壓力之流體連接；他端封口，並得自由移動．銅管內壓力加大時，其截面變形漸成圓形，因而環之直徑加大，管之閉端移動，藉鏈之助，此小移動使指針在標尺上迴轉，卽可直接讀出壓力．

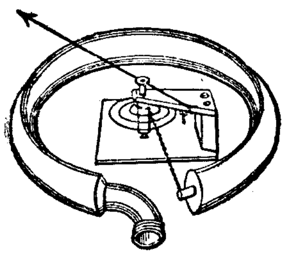


圖 158.　金屬壓力計．

§104. 壓力之數量等級．　蒸汽機，空氣壓縮機，能給 5,10,15,20,25，等〔大氣壓〕，但亦有能給更大之壓力者．在工業上，給 500〔大氣壓〕，並非難事，而在實驗室中能產生 3000〔大氣

壓〕之巨． 砲彈爆炸時之壓力，往往高達數千〔大氣壓〕．

另一方面，電燈泡內剩餘之空氣，其壓力不過 0.001〔毫米〕水銀柱高．現在能達之高度眞空，較此還低得多．

習題十九

(1) 用開管壓力計測量容器內氣體之壓力，開向大氣之支管之內水銀面，低於他支管內者 12〔厘米〕． 問容器內氣體之壓力爲若干〔克/厘米^2〕?

(2) 在標準大氣壓力下之氫氣 2〔升〕，須加多大之壓力，始能將其壓縮至 1.5〔升〕．

(3) 在托里坼利管內導入少許之醚，則醚蒸發成氣，水銀面降下，至高出管外者僅 25〔厘米〕．求管內醚之蒸氣壓．

(4) 閉管壓力計連於煤氣管上，則閉管內之水銀面與閉端相距 20〔厘米〕，而他管內之水銀面又在其下 10〔厘米〕． 將壓力計從煤氣管上取下，則左右兩水銀面恰在同一高度．求煤氣管中之氣壓．

(5) 普通金屬壓力計，在一〔大氣壓〕(非在眞空)時 器上之指標爲零，故指出之數值爲壓力與大氣壓之差，即所謂計示壓力(gauge pressure)也． 如計示壓力爲 100〔磅/吋^2〕，則其眞正壓力爲多少?

(6) 一汽車胎有 1.2〔立方呎〕之空氣，計示壓力爲每〔平方吋〕50〔磅〕; 若胎洩氣，則洩出之體積，應爲多少?

(7) 一潛水罩之鉛直邊爲 2〔米〕，沈至河底，水升入罩內 4〔厘米〕． 問河深若干?

第二十章

匀速運動　慣性原理

§105. 靜止與運動. 欲定一物體之爲靜止或運動,必先選擇一標誌物,然後時時測量此物體與標誌物間之距離,而觀其有無變化. 若此距離無變化,則物體爲靜止;若此距離刻刻在變化,則物體在運動.

靜止與運動之意義,皆爲相對的,視所選之標誌物而定. 例如,乘客坐火車中,火車在軌道上駛行,乘客對車廂之四壁爲靜止,而對道旁之樹木爲在運動.

研究地面上物體之運動,其相對之標誌物,最自然者,當選地面上之靜物. 如吾人言車在行,意即車對路標之距離有變動;鐘在擺動,意即鐘擺對室之四壁有運動. 嗣後所言者,雖未明指標誌爲何,皆類此也.

§106. 匀速直線運動. 物體沿一直線運動,而在相等時間中,行相等之距離者,稱爲**匀速直線運動**(uniform rectilinear motion).

一騎自行車者,在直線道上進行,不疾不徐,於同一時間內,行相等之距離. 例如,在一〔小時〕內,行 18〔仟米〕,即每〔分〕鐘內,行 $\frac{18,000}{60}=300$〔米〕,亦即每〔秒〕鐘內,行 $\frac{300}{60}=5$〔米〕.

則吾人言此騎車者在作勻速直線運動。

勻速直線運動，為最簡單而最自然之運動。 輪船火車，在穩行時，皆為勻速直線運動，當無顛簸之苦。

§107. **速度.** 物體在單位時間內所行之距離，稱為**速度**(velocity)。 速度為向量. 速度之單位，視所用長度及時間之單位而定。常用者為〔仟米/小時〕與〔米/秒〕；在 C.G.S. 制中，則為〔厘米/秒〕. 茲將各種常見速度，表列約值如次：

步兵進行	3〔哩/小時〕 即	1.3〔米/秒〕
長距離賽跑	14	6.3
郵船	27	12
特別快車	50	22
颶風	110	49
飛機	200	90
聲波	750	335
槍彈	1360	610

【例】 河闊 200〔米〕，水流速度 $v_1=2$〔仟米/小時〕，有船自 A 點正向對岸 B 點橫渡(圖 159 甲)，船之速度為 $v_2=4$〔仟米/小時〕. 則船在水中之實在速度為 v_1 與 v_2 之合成向量，即 $v=\sqrt{v_1^2+v_2^2}$，沿 AC 之方向。將於 $t=\frac{\overline{AC}}{v}=\frac{\overline{AB}}{v_2}=\frac{200}{4000}=\frac{1}{20}$〔小時〕$=3$

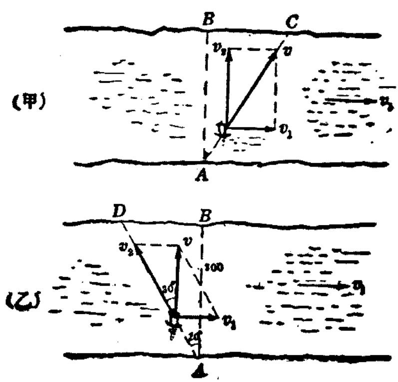


圖 159.

〔分〕鐘後，到達彼岸之 C 點。若欲直達對岸之 B 點，則船應取之方向為 AD（圖 159 乙），與 AB 成 Θ 角，而 $\sin\Theta = \frac{v_1}{v_2} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$，即 $\Theta = 30°$。於是渡河所需之時間，為 $t = \frac{\overline{AB}}{v} = \frac{\overline{AB}}{v_2\cos\Theta} = \frac{200}{4000\cos 30°} = 0.058$〔小時〕$= 3.5$〔分〕。

§108. 勻速運動之公式． 由定義，速度 v 等於以時間 t 除物體在此時間內所行之距離 s，寫成公式為：

$$v = \frac{s}{t}$$

或

$$s = vt$$

即運動所經之距離，與其時間成正比。

§109. 在勻速直線運動中，物體所受外力為零． 一球置平地上，其本身重量與地面對球之向上壓力，互相平衡，倘不另受外界任何之力，球必靜止不動。

將此球一撥，球即開始運動，且繼續在一直線上運動。事實上，開始運動後，球受種種之阻擾，不久停止前進。所謂種種之阻擾者，地面之高低不平，空氣之碰撞無已，凡此皆能發生摩擦阻力，阻止球之運動。

若置球於平直之桌面而試之，球之　直線運動，較能持久。置球於大理石桌上或玻璃面上，摩擦力更形減少，而球之　直線運動，必更歷久而後停止。

倘能充分去盡摩擦阻力，則球在其運動方向，將不受任何外力，自能在一直線上，作勻速之運動而勿止。

由上之觀察，吾人知運動之物體，若不受任何外界之力，或所受外力之合力爲零，則將繼續在一直線上，作勻速運動。

然則，運動之火車，何以須有機車爲之不斷推動，方能繼續進行，機車停止，則火車亦隨之而停？ 答曰：火車之運動，受有種種之摩擦阻力，阻止其前進，如輪與鐵軌間之摩阻，及空氣之抵抗等皆是。 機車發生之原動力，適所以抵消此等之摩擦阻力，故火車前進，所受之合力爲零，因是其速度亦一定不變。 若置火車於真空中，一切機械之摩擦阻力，皆能設法取消，則車一經發動，以後雖斷絕其原動力，將仍能繼續作勻速直線運動，永不停止。此在事實上雖不易實現，然於理固說得通也。

§110. **牛頓之第一運動定律**. 一物之爲靜止者，則永恆勿動；欲使其運動，必須加外力於其上。既運動之物體，將繼續在此直線方向，以勻速度向前進行，永無停止。 吾人欲其速度增加，則必須加力以助之，欲其速度減小，亦必須加力以阻之。欲其更換運動之方向，必以另一方向之力導之。

總之，凡物體不受外力，或所受外力之合力爲零時，則靜止者恆靜止，運動者將繼續在一直線方向作勻速運動，此爲**慣性原理**(principle of inertia)，亦即**牛頓之第一運動定律**(Newton's first law of motion)也。

習　題　二　十

(1) 一人向西北步行 10〔米〕,再折向西南步行 20〔米〕,求終點與出發點間之距離。

(2) 京滬鐵路長 310〔公里〕,特別快車行 5〔小時〕3〔刻〕,求其平均速度。

(3) 甲乙兩人同向行於一直道上,甲在乙之前,速度同爲 100〔米/分〕。問甲乙間之距離有無變更? 甲對於乙之速度爲何?

(4) 若上題中,甲乙兩人相向而行,則甲對於乙之速度爲何?

(5) A, B 兩物體,同時同地同向出發,作勻速直線運動。A 之速度爲 5〔米/秒〕,B 之速度爲 2〔米/秒〕,問 10〔秒〕後兩者相距若干? 1〔分〕鐘後,兩者相距若干?

(6) 雨中疾行,傘向前撐,何故?

(7) 在駛行之火車中,見雨滴向後斜打窗上玻璃,是否雨滴非鉛直下降之故? 設雨滴下降之速度爲 4〔米/秒〕,火車進行之速度爲 60〔公里/小時〕,求雨滴對於火車之速度。

(8) 地球於自轉之外,還有公轉。我們這些地球上的居民,跟着地球,在星空中,日裏還是夜裏跑得快呢?

(9) 靜止的物體,一定沒有受到任何之力嗎? 你能舉出一個沒有受到任何之力的物體嗎?

第二十一章

勻加速直線運動　墮體運動

§111. 墮體運動.　空中物體皆向地面下落；自靜止而下落之物體，必沿鉛直方向；此乃幾千年來有目共睹之事實．但一塊甎與一塊鉛，下落是否一樣快慢？　此一問題，在十六世紀之末，尚且議論紛紜，莫衷一是．意人伽利略 (Galileo, 1564 — 1642) 曰："不要空談幻想，讓我們去實驗來解決"(圖 160)，乃攜

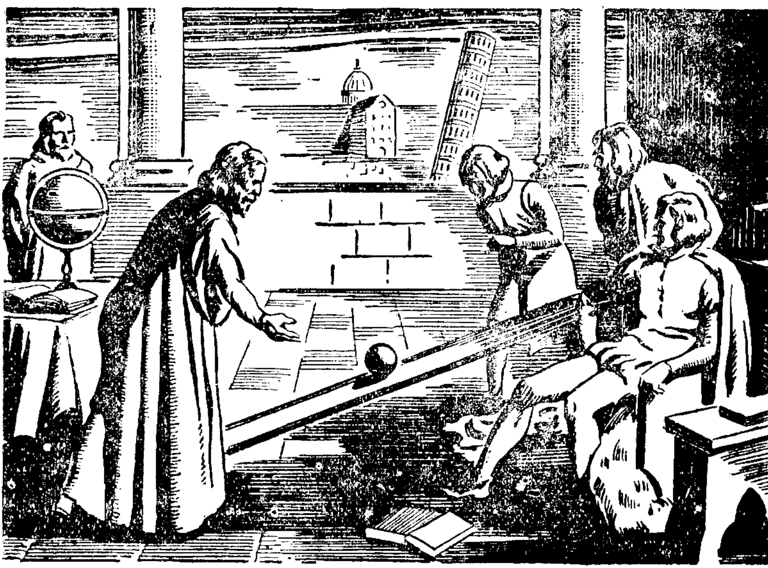


圖 160.　伽利略氏之墮體實驗．

數個不同之金屬球與一個象牙球，直上比薩斜塔(The Leaning Tower at Pisa)塔頂。實驗結果，此數個不同物質之球，居然同時落到地面。

比薩斜塔因此成為世界上最早之物理實驗室，而伽利略被推為現代科學之鼻祖。此在我國明神宗萬曆年間事，距吾人實頗近也！

一片羽毛，空中下落，吾人每覺其特別遲緩者，以其受空氣浮力影響特大之故；否則，與甎頭，鉛球下落一樣快慢。此點於若干年後，由英國人牛頓(Newton,(1642–1727)實驗以證明之。將一枚銅圓與一片羽毛(圖 161)，同置於長而封閉之玻璃管中，抽去管中空氣，驟然倒立此管，則見羽毛與銅圓同時落到管底。吾人須知抽氣機之發明，乃在伽利略死後三四十年也。

故一切物體，無論其形狀大小及屬何種物質，若無空氣影響，在同一處由靜止自由落下，快慢均同。


圖 161.

§112. 匀加速直線運動. 物體自空中下墮，愈來愈快，顯然非為匀速運動。究為何種運動？吾人當作實驗以探求之。

自由墮體 有一物體，由高處自靜止狀態開始下墮，吾人在每〔秒〕鐘之末，觀測其落下之距離，得表如下(圖 162)：

下墮之時間	落下之距離
1〔秒〕	$OM_1 = \ \ 5 = 5 \times 1^2$〔米〕
2	$OM_2 = 20 = 5 \times 2^2$
3	$OM_3 = 45 = 5 \times 3^2$
4	$OM_4 = 80 = 5 \times 4^2$
•	• • • • • • • • •

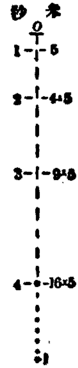


圖 162. 自由墜體運動.

觀上表可知下墮之時間增加 2, 3, 4, … 倍，落下之距離卽增加 4, 9, 16, … 倍。 普徧言之，落下之距離與時間之平方成正比。

斜面墮體 研究墮體運動之困難，在其下墮過速，不易精確觀測。 例如從五〔丈〕高之七層塔頂下落，不到 2〔秒〕鐘卽可着地；而在伽利略當年計時之具，尙是銅壺滴漏。伽利略因此又用物體順斜面下滑，來做研究。

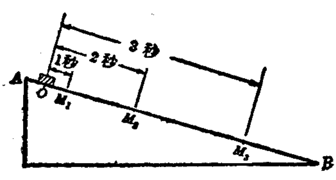


圖 163. 斜面墮體運動.

設 AB 爲一極光滑之斜面(圖 163)，將物體輕置於其上，任其自點 O 之靜止狀態開始下滑。 試於每〔秒〕鐘之末，觀測其滑下之距離，得表如下：

經過之時間	落下之距離
1〔秒〕	$OM_1 = \ \ 5 = 5 \times 1^2$〔厘米〕
2	$OM_2 = 20 = 5 \times 2^2$
3	$OM_3 = 45 = 5 \times 3^2$
4	$OM_4 = 80 = 5 \times 4^2$
•	• • • • • • • • •

由上表，知此運動經過之距離，亦與運動時間之平方成正比。

此等運動,名曰**匀加速運動**(uniformly accelerated motion).

注意: 由此定律,可以計算任何時之末,運動所經過之距離.例如在自由墮體實驗中,在 $\frac{1}{10}$〔秒〕之末,下落之距離,當較在 1〔秒〕之末所墮落者小 100 倍.普徧言之:

$$t\text{〔秒〕內所經過之距離} = \text{第 1〔秒〕內所經過之距離} \times t^2$$

§113. 匀加速運動中之速度. 於上節自由墮體之實驗中,試注意其每〔秒〕末之速度.在第 1〔秒〕之末,墮體自 O 落至 M_1(圖 164),$OM_1 = s_1 = 5$〔米〕,此後歷極短時間,例如千分之一〔秒〕後,亦即墮體下落 1.001〔秒〕後,墮體之位置將在 M_1',而 OM_1' 之距離,可由上節所得定律計算,得

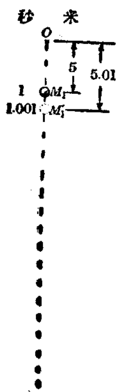


圖 164.

$$\begin{aligned} OM_1' &= 5\text{〔米〕} \times (1.001)^2 \\ &= 5\text{〔米〕} \times 1.002 \\ &= 5.01\text{〔米〕} \end{aligned}$$

於是 M_1M_1' 等於 1〔厘米〕,而其所費之時間爲 0.001〔秒〕.假設墮體在此極短時間內之運動爲匀速,則得其在 M_1 之速度爲

$$v_1 = \frac{1\text{〔厘米〕}}{0.001\text{〔秒〕}} = 10\text{〔米/秒〕}$$

由是,吾人得速度之定義曰:在 t 時刻之速度,等於以此時後之一極短時間,除在此極短時間內所經過之距離,所得之商.

同理可計算得在第二秒,第三秒之末之速度各爲 v_2, v_3:

$$\bar{v}_2 = 20\text{〔米/秒〕} = 2v_1,$$

$$v_3 = 30\text{〔米/秒〕} = 3v_1;$$

故在勻加速運動中，速度之增加，與所歷之時間，成正比。

§114. 加速度. 在每單位時間內所增加之速度，稱爲**加速度**(acceleration)。速度之單位爲〔每秒厘米〕，故加速度之單位爲〔每秒每秒厘米〕(centimeter per second per second)。每〔秒〕每〔秒〕1〔厘米〕之加速度云者，每〔秒〕內所增加之速度，爲每〔秒〕1〔厘米〕也。又如加速度每〔分〕每〔分〕180〔米〕，即每〔分〕內增加之速度爲每〔分〕180〔米〕，亦即每〔分〕內增加之速度爲每〔秒〕3〔米〕，亦即每〔秒〕內增加之速度爲每〔秒〕5〔厘米〕也。故180〔米/分/分〕$= \dfrac{180}{60 \times 60}$〔米/秒/秒〕= 5〔厘米/秒/秒〕。在上述自由墮體之實驗中，加速度爲每〔秒〕每〔秒〕1000〔厘米〕。

§115. 勻加速運動之公式. 上所述者，皆爲勻加速運動，即每〔秒〕內所增加之速度相等。一個運動之物體，在某瞬刻吾人測得其速度爲 v_0，經過時間 t 後，又測得其速度爲 v；則每單位時間內所增加之速度當爲$\dfrac{v - v_0}{t}$，是即加速度 a，故得

$$v = v_0 + at.$$

作勻加速運動之物體，其 a 之值，一定不變。在運動開始時之初速度爲 v_0，經過 t 時間後，末了之終速度爲 $v = v_0 + at$，

故在 t 時間內之平均速度，爲 $\frac{1}{2}(v_0+v)=v_0+\frac{1}{2}at$,乘以時間 t，卽得運動之路程，爲

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

又從上兩式中，消去時間 t，得

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

表示物體在其路程中相距 s 之二點間，速度之關係也。

若物體由靜止狀態，而開始運動，則初速度 v_0 等於 0，上得三式，成爲

$$v=at,$$

$$s=\tfrac{1}{2}at,$$

$$v^2=2as.$$

第一式表示速度與時間成正比，第二式表示距離與時間之平方成正比，而第 1〔秒〕內所經過之距離，適爲加速度之半數也。

§116. 勻加速運動係物體受一經常之力之作用.　自由墮體之所以作勻加速運動者，以其本身有重量故也。此重量可以彈簧秤量之，在地面上一小區域內，其強度不變，方向不改。

同理，斜面上物體之運動，亦以其有一經常之力曳之使下也，此經常之力,卽其重量沿斜面之分力,故其運動亦爲一勻加速運動。

普徧言之，經常施一定力於物體，則得勻加速運動。

§117. 自由墮體之加速度.　一切物體，自由下墮，皆作勻

加速運動；其加速度，又皆相等．命此公共之勻加速度為 g，則有

$$v = gt,$$

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

及

$$v^2 = 2gs.$$

由 § 112 之自由墮體實驗，知 $g = 1000$〔厘米/秒²〕；但此為近似之值．經精確之測定，在北京得 $g = 980.12$〔厘米/秒²〕．

吾人名 g 為物體之**重力加速度**(acceleration of gravity)．地面上各處，重力加速度之值，略有差異． 我國各重要城市的重力加速度，經前國立北平研究院物理學研究所之測定，有如表 3 所列．

表 3. 我國各地之重力加速度

北京	980.12	漢口	979.36〔厘米/秒²〕
南京	979.44〔厘米/秒²〕	重慶	979.15
上海	979.43	廣州	978.83

在英制中，重力加速度之值約為 32〔呎/秒²〕．

習題二十一

(1) 汽車行駛後，以每秒 4〔哩/小時〕之勻速增加，須若干〔秒〕可得每〔小時〕40〔哩〕之速度？

(2) 一球於斜板上滑下，每〔秒〕加快每〔秒〕2〔米〕，問第 5〔秒〕末之速度若干？

(3) 一火車由靜止而開行，其加速度為 0.3〔米/秒²〕．問須開行若干距離後，方達每〔小時〕60〔公里〕之速度？

(4) 飛機升空前，須在地上行 500〔米〕；若其時之速度為每〔小時〕60

〔仟米〕，求(a)速度之增加率爲若干？(b)經幾〔秒〕鐘？

(5) 由橋上墮石於水中，石離手後經 2〔秒〕鐘達於水面，求橋之高度及石達水面時之速度。

(6) 投石於深 15〔米〕之井中，0.8〔秒〕後即達水面。求石之初速度。

(7) 有物體自高 20〔米〕處，以 2〔米/秒〕之初速度拋下，求其着地時之速度。

第二十二章

力 與 運 動

§118. 運動之開始與停止. 依前章所述慣性原理,一切物體,恆欲維持其靜止或沿一直線作勻速運動之狀態.非受外力強迫,其態不變,卽保持其加速度之爲零也. 當物體開始運動時,速度漸增,是爲加速運動,必須有力以促成之. 又將停止運動時,速度遞減,是爲減速運動(減速度卽加速度之値爲負者也),亦必須有力以阻擾之. 故物體之開始或停止運動也,必臨時受有外加之力,卽其所受諸力之合力,必不爲零.

例如馬車在水平直道勻速前進,若馬之曳力爲 200〔仟克〕,則路之摩擦阻力,亦卽等於 200〔仟克〕. 惟車初動時,馬之曳力,必須較此爲大,故常見駕車者於斯時加鞭. 若欲其急速停止,則駕車者又恆下車用力以阻攔之.

又如機車升火,有一定之曳力,火車因而開動,且逐漸增加其速度;惟火車所受空氣之阻力,亦隨其速度而加大,待空氣之阻力與鐵軌之摩擦力之總和,等於機車之曳力時,火車之速度卽不復能增加,而成勻速運動. 欲停車時,司機關閉汽門,以撤去原動曳力,且恆利用韌(煞車)之設備,以加速車之停止.

§119. 力與質量及加速度之關係——牛頓第二定律. 有

力 F 作用於質量為 m 之物體上,使此物體於力之作用方向得有加速度 a, 則 F, m, a 三者之間,關係如何?

據實際經驗,知加速度 a,與作用力 F 成正比,而與受力之物體之質量 m 成反比,即

$$a \propto \frac{F}{m} \quad \text{即} \quad F \propto ma;$$

上述關係為牛頓所首先明白說出,稱為**牛頓之第二運動定律** (Newton's second law of motion).

命 k 為上述比例式之比例常數,則成 $F = kma$. 式中 k 之值,由力,質量,加速度三者之單位而定. 質量之單位為〔克〕,加速度之單位為〔厘米/秒^2〕. 迄今為止,吾人所知量力之單位為〔克重〕,即以單位質量之物體所受之重力,用作量力之標準,所謂力之重力單位是也.

由墮體運動實驗,質量為 1〔克〕之物體,受重力 1〔克重〕之作用,而自由下墮,在南京,得加速度 $g = 979.44$〔厘米/秒^2〕. 以此等數值,代入 $F = kma$,即得 $k = \frac{1}{g} = \frac{1}{979.44}$;於是

$$F = \frac{1}{g} ma = \frac{1}{979.44} \times ma \text{〔克重〕}.$$

此式不但繁雜,且僅適用於南京,因 g 之值,隨地而異,在兩極為 983〔厘米/秒^2〕,在赤道為 978〔厘米/秒^2〕,此力之重力單位之未盡善處也. 但選用此項單位時,多係工業應用或日常生活,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. 吾人用 $g = 980$〔厘米/秒^2〕,作為地球上各處之重力

加速度，因而有

$$F〔克重〕=\frac{1}{980}\times m〔克〕\times a〔厘米/秒^2〕$$

【例】 使 200〔克〕之物體，得加速度 30〔厘米/秒²〕，須加多少克重之力？

$$F=\frac{1}{980}\times 200\times 30=6.1〔克重〕.$$

§120. **力之絕對單位.** 力之重力單位，既不適宜於科學上之應用，另取單位，事更簡單. 假使命作用於單位質量之物體上，發生單位加速度之力，為力之單位，則 k 等於 1，而有

$$F=ma,$$

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

在 C.S.G. 制，質量之單位用〔克〕，加速度之單位用〔厘米/秒²〕，故作用於質量 1〔克〕之物體上發生 1〔厘米/秒²〕之加速度之力(圖 165)，為力之絕對單位，特名之曰〔**達因**〕(dyne).

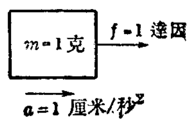


圖 165.

於是 $$F〔達因〕=m〔克〕\times a〔厘米/秒^2〕\quad F=ma$$

為動力學中之基本公式.

例如以某力作用於 5〔克〕之物體上，測得其加速度為 82〔厘米/秒²〕，則知此力之强度為 5 × 82 = 410〔達因〕. 如是可不用彈簧秤而作力之量度矣，是為**動測力法**.

力之兩種單位——重力單位與絕對單位——間之關係如下：

$$1〔克重〕=980〔達因〕,\qquad 1〔達因〕=\frac{1}{980}〔克重〕.$$

可見〔達因〕之單位甚小，約合 1〔毫克〕之重量.

§121. 物體重量之達因數. 一物體質量爲 m〔克〕，從高處自由下墜，此時經常作用於此物體之力，即爲本身之重量 W〔達因〕，測得其加速度爲 g〔厘米/秒^2〕. 應用公式，$F = ma$，得

$$W = mg \text{〔達因〕}.$$

故欲計算一物體重量之〔達因〕數，以其質量之〔克〕數（由天平量得之），乘當地之重力加速度，即得.

在同一地點，g 之値爲常數，物體之重量與其質量，成爲一定不變之比例，故重量相等者，質量亦相等. 但在不同之地點，g 之値略有差別，因而同一物體之重量，亦因地而稍異.

量度質量之儀器爲天平，標準即砝碼. 砝碼之質量，由製造廠家運至使用處所，不因遷移而有絲毫改變，故用同一天平，同一砝碼，量度同一物體之質量，則在任何處所，結果相同. 彈簧秤爲量力之一種器械，其伸長完全由重力之牽引而定，由此量度而得者，爲物體之重量，而非質量. 用同一之彈簧秤，測同一物體，其結果將因所在之地點不同，而有差別. 此吾人所以取質量，爲物理學上基本量之一，而不取重量也.

§122. 動測質量法. 由公式 $F = ma$，得

$$m = \frac{F}{a}$$

可見一物體之質量 m，爲以此物體運動之加速度 a，除作用於

物體使其有加速度 a 之力 F，所得之商。

設以相等之力，作用於質量不同之兩物體上，物體甲所得之加速度，大於物體乙所得者爲 2 倍，或 3 倍，或 4 倍，則物體甲之質量，必小於物體乙之質量 2 倍，或 3 倍，或 4 倍。若巳知物體甲之質量爲 1〔克〕，則物體乙之質量，當爲 2〔克〕，或 3〔克〕，或 4〔克〕。

用此法以求物體之質量，可不求助於天平，是爲**動測質量法**。

有若干物體不便用天平以求其質量者，如天體中之星球等，則皆用此法，以求諸星球之質量之比。

§123. 厘米·克·秒絕對制之力學單位。 於厘米·克·秒制中，力之單位爲〔達因〕，不用重力單位之〔克〕，因是而成之單位制，稱爲**〔厘米·克·秒〕絕對單位制**。

在絕對制中，力之單位爲〔達因〕，則功之單位爲**爾格**（erg），即以 1〔達因〕之力，施於物體，使其在力之作用方向，移動 1〔厘米〕時，所成之功也。於是有

$$W\text{〔爾格〕} = F\text{〔達因〕} \times s\text{〔厘米〕},$$

而

$$1\text{〔爾格〕} = \frac{1}{980}\text{〔克·厘米〕}$$

壓力單位，在 C.G.S. 制，爲〔達因/厘米^2〕，即以 1〔達因〕之力，施於 1〔平方厘米〕面積上之壓力也。惟此單位甚小，常以百萬倍爲壓力之單位，稱爲〔巴〕(bar)。於是有

$$P\text{〔巴〕} = 10^{-6} F\text{〔達因〕}/S\text{〔厘米}^2\text{〕};$$

實際上，多以〔克/厘米^2〕或〔磅/呎^2〕表壓力，因此

$$1\,〔克/厘米^2〕= 980\,〔達因/厘米^2〕= 980 \times 10^{-6}\,〔巴〕$$

約卽 $^1/_{1000}$〔巴〕也。

§124. 功與功率之實用單位. 〔爾格〕之單位甚小，在實用上取〔爾格〕之一千萬倍(10^7)為功之單位，稱為〔**焦耳**〕(joule)，以每〔秒〕作一〔焦耳〕之功，為功率之單位，曰〔**瓦特**〕(watt)，其千倍曰〔**仟瓦特**〕(kilowatt)。 故 1〔馬力〕= 746〔瓦特〕，約為 $\frac{3}{4}$〔仟瓦特〕也；而 1〔仟瓦特〕= 102〔仟克·米/秒〕。

§125. 動量. 用同一之力，使靜止之車開動，或使進行之車停止，所需之時間，與車之速度及其質量，均有關係，此為吾人日常所經驗者。可由牛頓第二定律，求得其數量關係。

以力 F 繼續作用於質量為 m，速度為 v_0 之物體上，歷 t〔秒〕後，測得此物體之速度為 v。 命 a 為物體在此時間內之加速度，則

$$v - v_0 = at;$$

又從 $F = ma$，有

$$a = \frac{F}{m};$$

以之代入上式，得

$$v - v_0 = \frac{Ft}{m}.$$

可見在一定時間之後，欲得一定之速度增量，物體之質量愈大，用力亦須愈猛；否則，質量加大而用力不增，則必須加長力之作用時間，方可得相等之速度增量。

物體之質量與其速度之相乘積，稱為**動量** (momentum)，則上式可寫成：

$$mv - mv_0 = Ft,$$

上式之左邊卽表示物體受力 F 作用，歷 t〔秒〕後，所得動量之變化也．

【例 1】 質量 2〔仟克〕之物體，以每秒 12〔厘米〕之速度前進，求其動量． 於其前進之相反方向，以 600〔達因〕之力阻之，問經若干〔秒〕後方可停止?

物體之動量 $= mv = 2{,}000$〔克〕$\times 12$〔厘米/秒〕$= 24{,}000$〔克·厘米/秒〕．

使物體停止運動所需之時間 $t = \dfrac{mv}{F} = \dfrac{2000 \times 12}{600} = 40$〔秒〕．

【例 2】 有一物體，質量爲 500〔仟克〕，欲其於 8〔秒〕鐘內速度從 1〔米/秒〕增加至 3〔米/秒〕，問須用力多少〔仟克〕?

$$F = \frac{m(v - v_0)}{t} = \frac{500 \times 10^3 \times (3-1) \times 10^2}{8} = 125 \times 10^5 \text{〔達因〕}$$

$$= \frac{125 \times 10^5}{980 \times 10^3} \text{〔仟克〕} = 12.8 \text{〔仟克〕}.$$

§126. 衝量． 力之作用於一物體也，其效果與作用之時間爲比例． 每有作用之時間甚短，如打，如踢，如撞是，亦能生顯著之效果，則其作用之力必甚大．甚大之力，與極短之時間，皆非吾人所易分開量度者．此種强度甚大而作用時間極短之力，曰衝力(impulsive force)，其與作用時間之相乘積 Ft，曰衝量(impulse)．

衝量之大小，可以其所生之效果量之．效果爲何? 由上節

$$Ft = mv - mv_0,$$

知卽物體受衝後，所生動量之變化也． 故衝力使物體得一速度，經常之力使物體得加速度．

【例】 裝貨卡車,總計質量 3000〔仟克〕,以每小時 30〔仟米〕之速度衝上街道,於 0.01〔秒〕內遽爾停止,則其衝力爲

$$F=\frac{3000\times10^3\times30\times10^5}{60\times60\times0.01}〔達因〕=2.5\times10^{11}〔達因〕$$

$$=\frac{2.5\times10^{11}}{980\times10^3}〔仟克〕=2.55\times10^5〔仟克〕=255〔噸〕!$$

宜其壓死行人,撞倒房屋。

吾人由高處跳下,每以足趾先行着地,則着地時間延長,可免巨大之衝力,不致震動受傷。茶杯落於石上,因衝力甚大,故立即破碎;若落於地毯上面,則因力之作用時間較長,不易破碎。包裝瓷器或玻璃器皿時,常用稻草紙屑等類填入,以減少碰撞時因衝力而招致損壞。

習題二十二

(1) 質量 1〔克〕之物體,其重爲多少〔克〕? 多少〔達因〕?

(2) 使 20〔克〕之物體,得 12〔厘米/秒^2〕之加速度之力爲若干?

(3) 500〔克〕之力,作用於 75〔克〕重之物體,求其加速度。

(4) 物體受力之作用,於 10〔秒〕間移動 240〔米〕之遠,求作用之力與物體重量之比,及其最後所得之速度。

(5) 若 80〔克〕之力,能使一物體有 640〔厘米/秒^2〕之加速度,問欲得 1920〔厘米/秒^2〕之加速度,須力若干?

(6) 在南京 1〔噸〕之力與在北平 1〔噸〕之力,相差多少?

(7) 1〔仟克〕之力,能使一物體有 980〔厘米/秒^2〕之加速度,問此物體重若干?

(8) 一汽車在水平路上有每時 30〔仟米〕之速度,引擎停止後 22〔秒〕,因摩擦而使之停止。若此車重 2100〔仟克〕,則摩擦力爲若干? 求在停

止運動中之減速度。

(9) 氣球重 12〔仟克〕,以 3〔米/秒^2〕之加速度上升空中,求其所受之浮力。

(10) 鎗彈重 20〔克〕,以每〔秒〕100〔米〕之速度射出,在鎗身中共歷時 $^1/_{10}$〔秒〕,始出鎗口,求火藥之炸力。

(11) 一打靶用來復鎗,管長 120〔厘米〕,子彈離鎗口時之速度為 600〔米/秒〕,其加速度為若干? 子彈抵達靶時,速度已減至 540〔米/秒〕,彈入靶中 10〔厘米〕而停止,問在靶中子彈之減速度為若干? 子彈重 10〔克〕,求鎗中火藥之炸力及靶之平均阻力。

(12) 物體重 3〔仟克〕,以 50〔米/秒〕之速度落到地面,經 0.04〔秒〕後,以 35〔米/秒〕之速度反躍,求其動量之變化,及所受地面之衝力。

(13) 跳遠時必須由遠處疾馳而來,何故?

(14) 以卵擊石,喻其必碎也;但卵若落於棉絮之中,則可不碎,試言其何以碎,何以不碎之故。

(15) 問 1〔焦耳〕等於多少〔仟克·米〕? 等於多少〔呎·磅〕?

(16) 1〔大氣壓)等於若干〔巴〕?

(17) 若取〔米〕為長度之單位,〔仟克〕為質量之單位,〔秒〕為時間之單位,如是而成之〔米·仟克·秒〕制中,力之絕對單位,假設稱為〔牛頓〕(newton),問 1〔牛頓〕等於多少〔達因〕? 由此導出功與功率之單位為何? 是否將較現行之〔厘米·克·秒〕制,更為簡單,而切實用?

(18) 願用全力踢足球,但不願踢一袋同形及同大小之水泥,何故?

(19) 何故飛機上所用之着地氣胎,較輭於汽車上所用者?

(20) 一人重 70〔仟克〕,立在電梯內,(*a*) 電梯不動,(*b*) 電梯以 1.2〔米/秒^2〕之加速度上升,(*c*)用同加速度下降,在此三情形中,此人對於電梯地板上之力各為若干?

(21) 墨子云"力者物之所由奮也",奮字應作何解釋?

(22) 迫不得已時,於行動之電車下車,宜向前跳,何故?

第二十三章

作用與反作用

§127. **力之存在藉物質而表顯.** 力之效用,或使物體平衡靜止,或使物體變形甚至破碎,或使物體得加速度而改變其運動情狀,要皆靠物體始能表顯. 故力之存在,乃在物質世界. 苟無物質,雖有力焉,吾不得而知之矣.

§128. **受力者與施力者.** 談力,則必須先有一物體存在,卽受力者. 物體受力後所起之運動,悉依牛頓第二運動定律之規定;第二定律,實卽力之定義耳. 一力之存在,除受力者外,必有一施力者;受力者與施力者不能同爲一體,卽自己之力不能施於自己之本身,故雖有大力,不能自舉其身. 若以手搥胸,手與胸雖爲人身之二部分,在此一動作上,就物理論,實爲二不同之物體也. 故一力之出現,必有二物體之存在. 例如重力,爲地球對於地面上物體之吸力,地球爲施力者,物體爲受力者.

§129. **作用與反作用——牛頓第三定律.** 據經驗結果,一物體以一力作用於第二物體時,則此第二物體卽有一等量反向之力,施於第一物體. 前者稱爲**作用**(action),後者稱爲**反作用**(reaction). 作用與反作用,自然爲對待的名詞.

作用與反作用,不特同時發生,缺一不能,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,曰牛頓之第三運動定律(Newton's third law of motion). 故力恆成對而出現.

如圖 166,有 A,B 兩物體,A 體施一作用於 B,此作用可以力 F 表之,則 B 體必同時以反作用施諸 A,此反作用可以力 F' 表之,F 與 F' 大小相同而方向相反. 是 F 由 A 加於 B 之身上,F' 由 B 加於 A 之身上,明乎此,當不致發生"作用與反作用既相等而相反,何以物體尚能運動?"之疑問. B 受力 F 而變動,A 受力 F' 亦起變動,B 之變動或顯而易見,A 之變動或微而難測,要視 A,B 兩體之質量……等情形而定,雖可大相懸殊,然吾人不能即認為反作用 F' 為不存在也. 如 A 為地球,B 為蘋果,蘋果受地球之吸引而下墮,地球亦同時受蘋果之吸引,但地球不因蘋果之吸引而起吾人所可覺察之絲毫運動者,則因地球與蘋果兩者之質量,大小有天壤之別也.

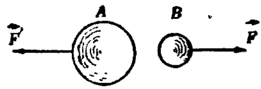


圖 166. 作用與反作用.

例如置書桌上,則桌受書之重量作用,同時書受桌之抵抗得一向上之壓力:此兩力之大小相等,方向相反,恰成作用與反作用之關係. 就書而言,此時所受之力有二,一為地球所施之向下重力,一為桌面所施向上之壓力,兩者相等而相反,書因得靜止而不墮.

又如用繩掛球,則球將繩拉直之力,與繩將球掛起之力,為作用與反作用. 至於球所受之重力,與繩將球引上之力,關係完

全不同，大小不必相等；惟球被繩掛起，鉛直不動時，兩者方爲相等而相反。

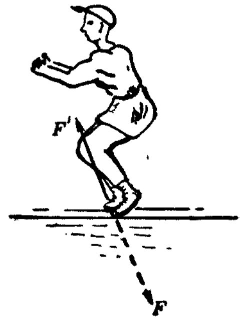


圖 167.

§130. 反作用力之應用. 物體之力，不能施於其本身，有時又無外界援引，不能不自力行動，是以，至少要有踏脚點，以作跳板，方能高升。例如跳遠，脚尖一蹬，施力於地（圖 167），地卽以反作用加諸人身，因而跳起。又如划船，用槳向後對水施力（圖 168），水卽以其反作用加諸槳，而使船前進。凡此皆反作用力之應用也。

圖 168.

§131. 動量不滅原理. 設有兩物體 A 與 B 互相作用，依據牛頓第三定律，A 施於 B 之作用力，必與 B 施於 A 之反作用

力，相等而相反；此二力同時開始作用,亦同時停止作用,故其衝量相等而相反。因此 A 與 B 之動量變化，亦必相等而相反，卽

$$m_1(v_1'-v_1) = -m_2(v_2'-v_2),$$

卽

$$m_1v_1+m_2v_2 = m_1v_1'+m_2v_2';$$

上式左邊代表互相作用前兩物體之動量和；右邊代表互相作用後，兩物體之動量和。 所謂互相作用，譬如兩球相撞，卽是一例.

故一羣物體，若自成一系統，不受系統外之外力作用，而僅有系統內諸物體間之互相作用時，則此羣物體之動量之和爲一定不變，是爲**動量不滅原理**(Principle of Conservation of Momentum)。

若此系統內僅有一物體，則動量不滅定理，卽爲慣性原理。

如放砲純爲內力作用,卽炸藥爆發時所生巨量氣體之壓力,使砲彈以速度 v_1 前進，砲身則以速度 v_2 後退，所謂**反坐**是也。此兩速度之比，等於彈與砲兩者質量之反比，故砲彈所行甚遠，而砲身反坐不大。 又火箭(rocket)者，卽賴箭中燃燒之氣體，猛烈衝出之反坐作用而前進者也.

習題二十三

(1) 人於車上推車，則車不動；而於車上推輪，則車前進；何故?

(2) 刀柄鬆脫時，執柄向下方敲擊，刀自嵌入柄內，何故?

(3) 砲重 20〔噸〕，彈重 1000〔磅〕，彈以每〔秒〕2000〔呎〕之速度放出，求砲之反坐速度.

(4) 物體重 25〔克〕繫於定滑輪之一端，以 140〔厘米/秒^2〕之加速度上升，求繩之張力。是否等於物體重量？

(5) 兩物體之質量，各爲 50〔克〕及 80〔克〕，繫於跨過定滑輪之繩之兩端，重者下降，輕者上升，求其加速度。

(6) 用繩牽着的物體，是不自由的。當它在空中從高處下墮的時候，加速度是否等於 980 厘米/秒^2？

(7) 力學建立者伽里略遠在十七世紀的時候，就寫道："在我們肩上的重物，只有努力不使它下墮的時候，我們纔感覺到它的重量。如果我向下去，和我肩背上重物同樣的速度落下去，那我還有什麼負担呢？同理，譬如我要把標槍投射那在我前面跑的人，而這個人跑的速度和我的標槍前進的速度相同，這又有什麼用處呢"試讀這段文章，並用牛頓運動定律，加以解釋。

第二十四章

抛射與滑動

§132. 拋體之運動. 地面上物體，恆受重力作用. 吾人以手拋物，用力雖猛，爲時甚暫（放砲亦然，圖 169），以此衝量（§

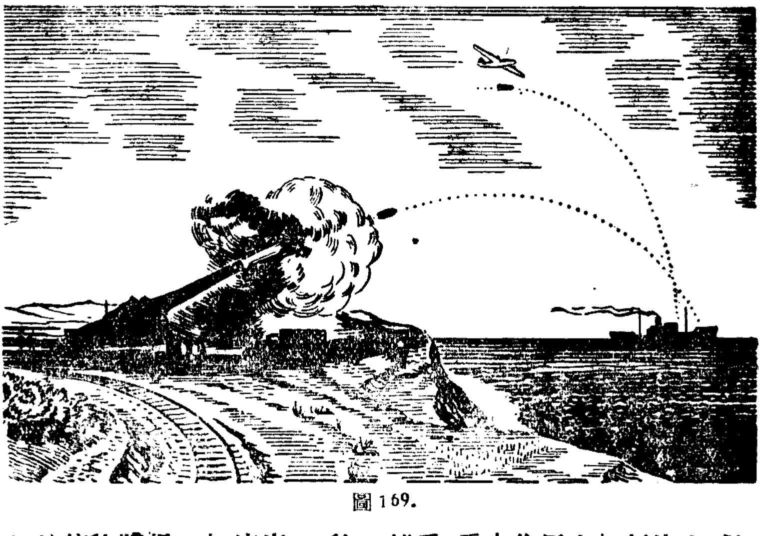


圖 169.

126）使物體得一初速度. 物一離手，手之作用力卽行停止，只有地心吸力，始終作用於物體上. 故此物體除依初速度方向作勻速運動之外，同時亦以重力加速度而向地面鉛直下落.

初速度之方向不同，則其運動情形亦異，玆分作三種情況述之.

(1) **下拋運動。** 初速度 v_0 之方向，鉛直向下，因與重力加速度 g 之方向相同，故由勻加速運動之公式(§115)，有

$$v = v_0 + gt,$$

$$h = v_0 t + \tfrac{1}{2}gt^2,$$

$$v^2 = {v_0}^2 + 2gh,$$

h 爲下行之距離。

(2) **上拋運動。** 初速度 v_0 之方向，鉛直向上，因與重力加速度 g 之方向相反，若以初速度之方向爲正，則 g 之方向爲負，應於其前附加負號，始可適用前式，故得

$$v = v_0 - gt,$$

$$h = v_0 t - \tfrac{1}{2}gt^2,$$

$$v^2 = {v_0}^2 - 2gh,$$

h 爲上行之高度。

當 $t = \dfrac{v_0}{g}$ 時，$v = 0$，物體不能再向上升，由開始運動至此時爲止，所進行之路程，即其所能達到之高度爲 $h = \dfrac{{v_0}^2}{2g}$。自此以後，物體折而下墮，重返地面，即 $h = 0$，當在 $t = 2\dfrac{v_0}{g}$ 之時也。故由運動開始至再達地面爲止之時間，恰等於由地面達最高點之時間之二倍。換言之，由地面至最高點，及由最高點降至地面，需時彼此相等。

(3) **斜拋運動。** 初速度 v_0 之方向，與水平成 α 角，如圖 170，AB 表初速度之方向，假使不受重力作用，物體當沿 AB 往前直

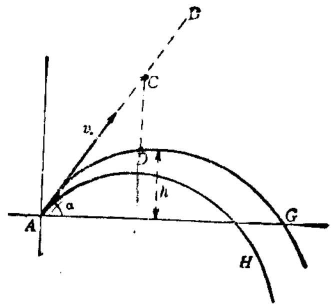


圖 170. 拋物線軌道.

進,速度永不變更. 實際上,當物體初離點 A 時,即因重力作用,開始其落下運動,應行落下之距離,與自由墮體同. 故若 $AC = v_0t$, 自 C 應行落下之距離為 $CD = \frac{1}{2}gt^2$,而 D 即為在 t 時拋體實際之位置. 是以拋體運行之軌道,將為曲線 ADG,即通常之**拋物線**(parabola)也.

拋體以拋射故,而有鉛直上升之速度 $v_0 \sin\alpha$, 同時由重力而得與時遞增之下落速度 gt, 兩者相等時, 即 $t = \dfrac{v_0\sin\alpha}{g}$, 拋體不復上升矣, 故拋體所能達到之高度, 為

$$h = v_0\sin\alpha \times \frac{v_0\sin\alpha}{g} - \frac{1}{2}g\left(\frac{v_0\sin\alpha}{g}\right)^2$$

$$= \frac{v_0^2\sin^2\alpha}{2g}.$$

再經 $t = \dfrac{v_0\sin\alpha}{g}$ 時, 拋體將由最高點而復達於地面 G. G 與點 A 之距離, 稱為**射程**(range), 以拋體之水平速度 $v_0\cos\alpha$ 乘所經歷之時間 $\dfrac{2v_0\sin\alpha}{g}$ 即得, 故有

$$AG = \frac{2v_0^2\sin\alpha\cos\alpha}{g} = \frac{v_0^2\sin 2\alpha}{g}$$

可見拋體所能達之高度與其射程, 皆與拋射之方向 α 有關.

拋體在空氣中之運動,又受空氣之阻力作用,拋體能達之高度

及射程，均因是而稍減，其實際軌道在下降之一側，爲勢略峻，成爲圖中曲線 AH 之形狀。

看了上面所講以後，就可明瞭，一個炮手得到指令，炮轟一個預定的目的物，任務並不容易，他必須計算炮彈的速度，目的物所在的距離，以及風的速度等等。

§133. **物體在斜面上之滑動.** 置質量爲 m〔克〕之物體，於成傾角 θ 之平滑斜面 AB 上(圖 171)，而研究其運動。吾人先將物體之重量 $W\ (=mg)$ 分解爲與斜面垂直之分力 P 及沿斜面之分力 F，則有

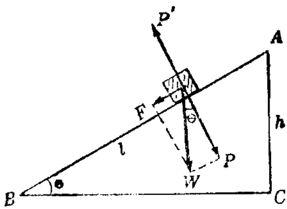


圖 171.　物體在斜面上之滑動.

$$P = mg\cos\theta,$$

$$F = mg\sin\theta.$$

分力 P 與斜面對於物體之反抗力 P' 相平衡，而分力 F 則使物體沿斜面而下滑。

設 a 爲物體沿斜面下滑之加速度，則由牛頓之第二運動定律

$$F = ma = mg\sin\theta,$$

得
$$a = g\sin\theta,$$

即物體在斜面上之滑動，爲加速度 $g\sin\theta$ 之勻加速運動。斜面傾角 θ 愈小時，$\sin\theta$ 之值愈小，則加速度 $g\sin\theta$ 亦愈小，故其運動遲緩，便於實測。　在 §112 所述之斜面墮體實驗中，$a=2.5$〔厘米/秒^2〕，可知斜面之傾角 θ，約等於 $\sin\theta=\dfrac{a}{g}=\dfrac{2.5}{980}$ 即 0.0025〔弳〕也。

命 l 表斜面之長 AB，h 表其高 AC，則物體由點 A 以初速度

v_0,依加速度 $g\sin\theta$ 下滑,而達於點 B 時,所得之速度 v,由

$$v^2 = v_0^2 + 2gl\sin\theta$$

決定之.但 $h = l\sin\theta$,故有

$$v^2 = v_0^2 + 2gh,$$

適與拋體鉛直下墮 h 後之速度相等,而與傾角 θ 無關.

故物體沿任何斜度之光滑平面或光滑曲線(曲線可視為由無數斜度不同之短斜線,組合而成)下滑,所得之速度,皆與自由墮體下落同樣高度者相等.如圖 172,物體自 A 沿曲線至 B,或沿斜面至 C,或自由鉛直下墮至 D,所得之速度皆相同,但下降所需之時間則各異.

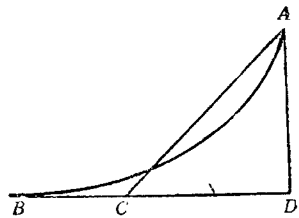


圖 172.

習題二十四

(1) 在高 456〔米〕之懸崖上,石由此崖頂落到谷底,須時若干? 求其着地時之速度.

(2) 若有人從上題之崖頂,將石鉛直投下,則 9〔秒〕鐘後即可到地,求石之初速度.

(3) 一人拋球向上,在 6〔秒〕後,復接得之.擲時速度若干? 球所會達之高度若干?

(4) 於每〔小時〕30〔公里〕速度之火車,從高 1.2〔米〕處,落一銀幣,問落在車中地板上何處? 若客人置手火車窗外,無意中將此銀幣落下,將在地面何處?

(5) 一轟炸機以每〔小時〕200〔公里〕之水平速度，欲在1200〔米〕之高空，炸一軍火庫。炸彈應在飛過軍火庫前若干〔秒〕時投下？着彈起火時，飛機已飛過若干距離？

(6) 一砲彈之出口速度爲60〔米/秒〕，與地面成60°之仰角，所得之水平射程爲290〔米〕。求因空氣阻力而減少之射程。

(7) 一物體以每〔秒〕20〔米〕之速度，自地面與水平成30°之角，向上斜射。(*a*)求達最高點之時間及高度。(*b*)問經多少時，離多少遠，再達地面？

(8) 有物體沿光滑斜面下落，加速度爲185〔厘米/秒²〕。求斜面之傾角。

(9) 一斜面之長爲20〔米〕，高爲2〔米〕，如將一物體自其底面沿斜面向上投射，恰能達其頂部。求投射之速度。又此球出發後再回至原處，所需之時間多少？

(10) 一鳥翺翔空中，重2〔仟克〕，離地面18〔米〕處，方以每〔秒〕6〔米〕之水平速度飛行，忽爲40〔克〕之槍彈所擊中，彈之速度爲每〔秒〕280〔米〕，亦沿水平方向射來，且與鳥之前進同向，彈在鳥之腹中，即不射出。問此鳥經若干時間而落地，又着地之點與被擊之地兩者間之水平距離若干？

(11) 一光滑之斜面長6〔米〕，高50〔厘米〕，置於平滑之地面上，有物體從斜面之頂端，由靜止而下滑，問經2〔秒〕後，物體在距斜面底端多遠之處？

第二十五章

功　與　能

§134. 功能定理——動能.　設有一物體，其質量爲 m，初速度爲 v_0，因受力 F 之作用，得加速度 a，則

$$F = ma.$$

歷時間 t 後，速度成爲 v，於是物體之動量變化爲 $mv - mv_0$，有

$$Ft = mv - mv_0$$

之關係．在此 t 時間內物體之位移，爲

$$s = \frac{v + v_0}{2} \cdot t,$$

即平均速度與時間之相乘積．

將以上二式之兩邊相乘，得

$$Fs = \tfrac{1}{2}mv^2 - \tfrac{1}{2}mv_0^2,$$

左邊所代表者，爲力 F 對於物體所作之功；而右邊所代表者則爲形式相同的兩項之差．　爲方便起見，此種形式之項，稱爲**動能**(kinetic enery)．故物體之動能云者，即其質量與速度平方相乘積之半也．　$\frac{1}{2}mv_0^2$ 爲物體在 t 初時之動能，$\frac{1}{2}mv^2$ 爲物體在 t 末時之動能．

由此觀之，物體受力作用而運動時，**力對物體所作之功，即等於物體動能之增量**，是爲**功能定理**．

動能 $\frac{1}{2}mv^2$，內含速度之平方，由動而來，斯誠然矣。 但何以稱做'能'，所能何事？ 曰，能做功。一顆鎗彈，極小之物也，以其速度甚大之故，能貫穿鐵板，即抵抗板之阻力而做功。

§135. 停止運動所需之時間與距離. 一物體以速度 v 而運動也，其動量爲 mv，動能爲 $\frac{1}{2}mv^2$，今欲停止其運動，非立刻立地所能停止，須經相當之時間，且將繼續前行相當之距離。

命阻止運動之力爲 $-F$，所以加負號者，表示力 F 與運動之方向相反。 此或爲撤去原動力後，所表現之摩擦阻力；或爲摩擦阻力與煞車時外加之阻力之和。 則停止運動所需之時間 t，由動量變化與衝量之關係，得

$$t=\frac{0-mv}{-F}=\frac{mv}{F};$$

而在停止之先，繼續前進之距離 s，則由功能定理，得

$$s=\frac{0-\frac{1}{2}mv^2}{-F}=\frac{mv^2}{2F},$$

速度愈大，則 t 愈久而 s 愈長。開車太快，停車不及，以致市虎傷人，此所以街道公路均有速度限制也。

【例】 釘入木中，須勝過木之抵抗力，此抵抗之力，有一定之强度也。以錘擊之，若 $1/_{10}$ 秒而不能入，則須更速擊之。 能否釘入，繫乎錘之動量，至於釘入多少，則視錘之動能而定。有錘重 2〔仟克〕，以每秒 4〔米〕之速度衝擊釘頭，因而釘入木中 3〔厘米〕之深。 此時消耗錘的動能，釘在對木做功。 木對於釘之抵抗力，平均言之，爲 $\frac{\frac{1}{2}\times 2000(400)^2}{3}=5.3\times 10^7$〔達因，〕約 54〔仟克〕也。

§136. 位能. 將靜止之物體，從高度爲 h_1 之處，提到高度爲 h_2 之處，而安置之，吾人所做之功爲

$$W = mg(h_2 - h_1) = mgh_2 - mgh_1.$$

物體之初、終速度均爲零，其動能並未增加。此功何處去矣？曰，在增加物體之**位能**(potential energy)。 mgh_1 爲物體在初位置 h_1 處之位能，mgh_2 爲物體在終位置 h_2 處之位能。

位高則能大。在高處之物體，若將其繫於定滑輪之繩之一端而下降，則可將他端之重物上引；若任其自由下墜，碰到人，可能打破頭。

高山瀑布，能衝動水車以做功；旋緊鐘錶之發條，能維持齒輪之轉動而做功；開張弓弦，能射矢而做功；凡此皆位能之表現也。

位能與動能，皆由工作而來，亦均可做功，統稱爲**能**(energy)，以其在力學上討論之故，亦特稱**機械能**(mechanical energy)，以別於熱能，電能，化學能，等。

能之大小，即以其可作之功量之，故能之單位，完全與功之單位相同。在 S.G.C. 制中，亦爲〔爾格〕。

§137. 能之不滅原理. 物體在空中或沿斜面，受重力之作用而運動時，地位愈低，則速度愈大；換言之，位能減少，動能增多。 其由 h_1 降至 h_2 時，速度由 v_1 增至 v_2，依上章所述，其間有

$$v_2^2 = v_1^2 + 2g(h_1 - h_2)$$

之關係，亦可寫成

$$mg(h_1-h_2)=\tfrac{1}{2}m(v_2^2-v_1^2),$$

故　　位能的減量 = 動能的增量.

如將物體向上拋射時,則由同理,得類似之結果,即

位能的增量 = 動能的減量.

如是一物體之能量,可具不同之形式,如位能與動能是. 而位能與動能之間,可以互相變換,是爲能之變換(transformation of energy),一如化學中所述物質之變化然.

若將上式移項,即得

$$mgh_1+\tfrac{1}{2}mv_1^2=mgh_2+\tfrac{1}{2}mv_2^2.$$

由此可知運動之物體,在各位置時,能量之總和,常爲定值. 位能減,則動能增;動能減,則位能增;增減之量,且必相等(圖 173). 是爲能之不滅原理(Principle of Conservation of Energy).

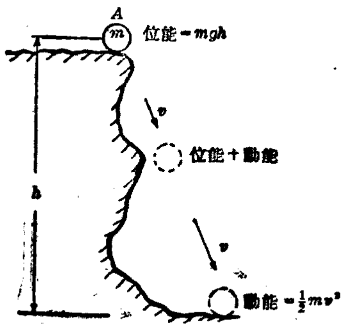


圖 173.

上述能之不滅原理,可以包括功之不滅原理(§ 57)在內,雖在力學中求得,吾人將見其可推廣而適用於整個之物理學範圍,實爲自然界之一大定律.

一切之機械,必須由外界供給相當之能,始克作功. 能之供給一旦斷絕,機械即停止運轉. 古人欲造一器,不必供給以能,亦可自轉不息,繼續作功,如是之運動,曰永久運動. 由能之不滅原理,可知其爲妄想,事實上絕不可能.

§138. 天然水能之利用. 河水或瀑布之水頭高於地面者 h，每〔秒〕之流量(質量)為 m，則有功率 mgh 之天然富源在焉，吾人可利用而發生能以做工作。如我國各地鄉鎮磨坊所用之水車(圖 184)，以及新式水電廠之水輪機(water turbine)，皆由高處落下之水，衝擊翼板，使輪旋轉而成原動機械。一經建置，維持費用甚省。

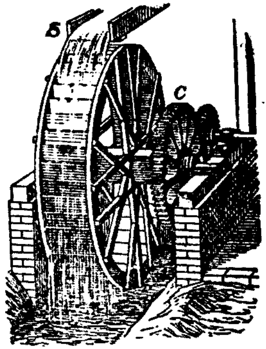


圖 174. 水車.

習題二十五

(1) 有水 5〔升〕，在離地面 4〔米〕處，其位能若干？落到地上，得何速度？求其動能。

(2) 有自由墜體，在某處之速度為 50〔米/秒〕。(*a*)若從此上升 10〔米〕，其速度為何？(*b*)又若從此下降 10〔米〕，則其速度為何？

(3) 造句四句，其中應用"力"，"功"，"能"，"功率"四名詞，每詞之下用線標出之，每句所劃出之詞，必須不能以他詞代之。

(4) 錘重 130〔仟克〕，從 4〔米〕之高度落下擊於木樁上，木樁打入土中 5〔厘米〕。打擊樁之力，能否大於錘之重量？求其强度。

(5) 子彈重 20〔克〕，速度為 620〔米/秒〕，穿過 3〔厘米〕厚之木板後，速度成為 240〔米/秒〕。求其動能之變化，及木板之平均阻力。

(6) 一小河中之閘上，每〔分〕鐘有 50〔立方米〕之水，由 5〔米〕高之處落下。(*a*)水在閘底每〔分〕鐘之動能為若干？(*b*)計算瀑布之〔馬力〕？

第二十六章

摩　擦

§139. 摩擦力. 以物體置於桌上,卽依水平方向推之,用力非達到一定限度,物體決不移動者:蓋因物體與桌面相接觸處,凹凸不平(圖 175),有妨礙運動之力存焉. 此種妨礙運動之力,稱爲摩擦力(frictional force).

圖 175.

設置於桌上之物體之重量爲 P (圖 176),以線拉之,線之他端跨過固定滑車,下懸砝碼 F,物體靜止如故. 此時物體所受之

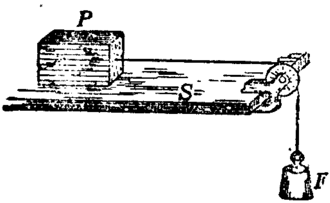


圖 176.

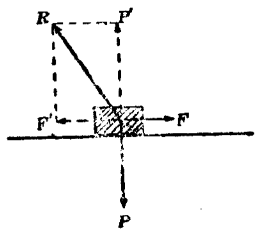


圖 177.

力有三:一爲物體之重量 P,鉛直向下;一爲線之拉力 F,水平向右;一爲桌面對於物體之作用力 R (圖 177). 以物體在靜止平衡中,R 爲 P 與 F 之平衡力,卽等於 P 與 F 之合力而方向相反.

可見粗糙桌面對於物體之作用力 R,非正交於其接觸面者,其方向,其大小,皆隨當時所施之拉力 F 之大小而定. R 之鉛直

分力 P'，與 P 相等而反向，即用以抵消物體所受之重力而使其不下墮；R 之水平分力 F'，與 F 相等而反向，即用以抵消物體所受之拉力，而使其不向右移動。此阻止物體向右移動之力 F'，即桌面對於物體之摩擦力也。P 為物體對於桌面所施之正直壓力(normal pressure)，此處即為物體之重量。但正直壓力並不限於重力之一種；如物體之上，以手用力按之向下，則此時桌面所受之正直壓力，為物體之重量與手所用之力之和。

§140. **摩擦定律.** 圖 176 中，若所加砝碼為 50〔克〕，而物體不動，此時物體所受之摩擦力，亦為 50〔克〕。若砝碼增為100〔克〕，而物體仍不動，此時物體所受之摩擦力，亦增為 100〔克〕。故在靜止中，物體所受摩擦力之值，為非確定者，可隨其需要而增大，但有不可超越之限度，蓋吾人逐漸增加砝碼之拉力，物體終將開始移動也。物體開始運動時，所受之最大摩擦力(maximum friction)，其值乃有一定。通常所謂摩擦力，即指此最大摩擦力而言。

由實驗結果，吾人知(圖 177)：

摩擦力 F' 與二物體接觸面之大小無關，而與其間之正直壓力 P 成正比。以式表之，為

$$F' = \mu P;$$

μ 為比例常數，隨二物體之種類及其表面性質而異，稱為摩擦係數(coefficient of friction)。

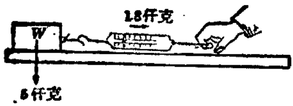


圖 178.

例如木塊 W，重 5〔仟克〕置於水平之桌面上(圖 178)。沿桌面拉之，當彈簧秤表示 1.8〔公斤〕之力時，木塊開始滑動，則木塊與桌面間之摩擦係數爲 $\frac{1.8}{5}=0.36$。

玆將數種物體之摩擦係數，表列於下：

表 4.　摩擦係數

木與木(乾的)	0.25 至 0.5
木與木(濕的)	0.05 至 0.2
皮與木	0.3 至 0.4
木與金屬	0.3 至 0.6
金屬與金屬(乾的)	0.15 至 0.2
金屬與金屬(濕的)	0.3
皮與金屬(乾的)	0.56
皮與金屬(上油的)	0.15
鐵與石	0.03 至 0.036

§141. 休止角.　物體之得棲止於斜面上而不下墮者，卽以其有摩擦力故．命 α 表斜面之傾角，W 表物體之重量，則物體對於斜面之正直壓力(圖 179)爲 $P = W\cos\alpha$ 而使物體沿斜

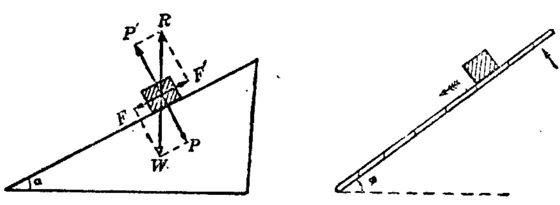


圖 179.　休止角.

而有下滑之傾向者爲 $F = W \sin\alpha$. 當 F 小於摩擦力之最大值 $F' = \mu P = \mu W \cos\alpha$ 時，物體恆能在斜面上保持靜止，而不滑動；小與不小，則視斜面之傾角 α 之值而定.

將斜面之上端逐漸豎起，力 F 則隨 α 之值而增加. 至斜面與水平線成某一傾角 ϕ 時，F 之值等於最大摩擦力，物體開始向下滑動. 此極限角 ϕ，稱爲**休止角**(angle of repose)；因若斜面之傾角超過此值時，物體將不復能在其上保持靜止矣.

由 $F = F'$，卽 $W \sin\phi = \mu W \cos\phi$ 之關係，得

$$\mu = \tan\phi;$$

故可利用休止角，以測定各種物質間之摩擦係數，而無須求助於一套砝碼(圖 176)或一架彈簧秤(圖 178)矣.

吾人有須注意者，無論傾角 α 之值爲何，物體在斜面上運動時所受之摩擦力，恆爲 $\mu P = \mu W \cos\alpha$，其方向與運動之方向相反.

【例】 有重 $W = 50$〔克〕之物體，置於傾角 $\alpha = 10°$ 之斜面上，其摩擦係數爲 $\mu = 0.51$.

物體在此斜面上之休止角 $\phi = \tan^{-1} 0.51 = 27°$，而 $\alpha = 10° < 27°$，故物體得在此斜面上靜止. 欲其上移或下滑，均須施力. 設所施之力平行於斜面者，則爲

上移時　$\mu W \cos\alpha + W \sin\alpha = 50(0.51 \cos 10° + \sin 10°) = 34$〔克〕

下滑時　$\mu W \cos\alpha - W \sin\alpha = 50(0.51 \cos 10° - \sin 10°) = 16$〔克〕

§142. 摩擦與運動. 擦摩力阻礙物體之運動，既如上述.

於車行道上，須有水平方向之力繼續不斷推動之．若推動之力 F，恰僅等於摩擦力 F'，則物體所受之合力為零，依慣性原理，將作勻速直線運動． 若推動之力 F 大於摩擦力 F'，則物體在運動方向所受之合力為 $F-F'$，因而依牛頓之第二運動定律，得加速度 $a=(F-F')/m$，此 m 表物體之質量．

日常所見，非經常受有外力作用之物體，不久停止其運動者，卽以其遇有摩擦力之故．

【例】 有重 2〔公噸〕之汽車，以每〔小時〕30〔公里〕之速度，行於摩擦係數為 0.7 之路面上．問撤去原動力後，經多久，行多遠，車方停止？

車所受之摩擦力為

$$0.7\times 2{,}000\times 10^3\times 980=1.37\times 10^9\text{〔達因〕}.$$

撤去原動力後，摩擦力即使車成減速運動，其勻減速度為

$$a=\frac{1.37\times 10^9}{2{,}000\times 10^3}=685\text{〔厘米/秒}^2\text{〕}.$$

由 $v=at$，得車經

$$t=\frac{30\times 10^5}{685\times 60\times 60}=1.2\text{〔秒〕}$$

後而停止．車停止前所走之距離，則由 $2as=v^2$，得

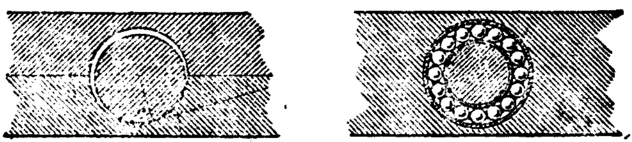
$$s=\frac{\left(\frac{30\times 10^5}{60\times 60}\right)^2}{2\times 685}=507\text{〔厘米〕}.$$

§143. 減小摩擦之方法． 摩擦足以阻礙物體之運動，如其係數甚大，則所用之力大部分等於虛耗，極不經濟．欲減小摩擦，第一在使接觸面務成光滑，其次則於接觸面之間塗以滑劑，

機械之動接部分,常塗滑劑者,卽此之故。

以桶或圓柱等物體立於地上,而依水平方向推之滑動,所需之力頗大;若使其橫臥於地上而滾動之,則所費之推力減小;此爲吾人日常所經驗者。可知滾動摩擦(rolling friction),較之滑動摩擦(sliding friction)爲小。故利用滾動以代滑動,亦爲減少摩擦之一法。例如移動重物所用之滾子(roller),爲一圓柱形之木桿,插入物體與地面之間,可使物體沿地面之滑動,一變而成滾子在地面上之滾動,可以省力不少。車輪之應用,亦卽以此,爲人類最重要發明之一。

在現代機器中,旋轉軸之裝置,多採球軸承(ball bearing),係在車軸及其軸承之間,夾入若干小鋼球(圖 180 乙),滾動摩擦甚小,較之普通軸承爲優;因在普通軸承中,軸之接觸處 C,仍帶滑動也(圖 180 甲)。



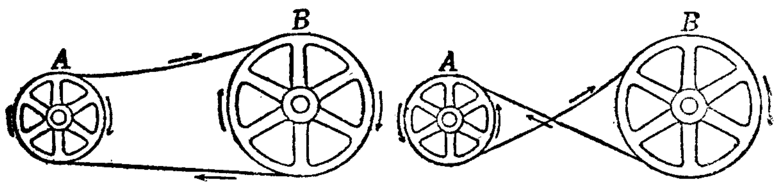
(甲) (乙)

圖 180. 軸承.

§144. **摩擦力之應用.** 摩擦力旣不可免,有時亦爲不可缺少者,日常所見,其例甚夥。如人之走路,全靠鞋底與路面間摩擦力之助。藉地面之反作用,人得以自己之力,間接而達於其本身上,苟無摩擦將只能跳高,不能前行。冰上舉步艱難,易於

滑倒，即以其摩擦係數過小之故。在冰天雪地中或濕潤之平坦路上，車輪帶鍊，用以增加其摩擦係數，而免危險。

又如藉皮帶之作用(圖 181)，轉動之 A 輪，得使 B 輪轉動，而傳遞動力，苟無摩擦，亦不濟事也。



(甲) 同向轉動.　　(乙) 異向轉動.

圖 181. 皮帶傳遞動力之裝置.

習 題 二 十 六

(1) 摩擦有何用處，有何害處？試各舉三例說明之。

(2) 在地板上拖一袋重 100〔磅〕之麥，需力 18〔磅〕。求其摩擦係數。

(3) 在上題中，假設所用之力係沿地板。若力之方向與地板成 30° 之角，問需力若干？

(4) 以手握物而舉起之，物愈重則握愈緊。有鐵桿一條重 10〔仟克〕，用手鉛直握起 設手掌與鐵桿之摩擦係數爲 1.2，問手需用力若干？

(5) 以手握起 1〔公斤〕重之鱔魚一條，摩擦係數爲 0.2，求手掌所用之力。

(6) 沿 5〔米〕長之斜板，用 60〔仟克〕之力，方可拖起 100〔仟克〕之乾草一捆。板上頂端離地面高 1.2〔米〕。求摩擦力及摩擦係數。問此捆乾草能安置而靜止於斜板上否？將斜板上端再提高多少，此捆乾草將自動下滑？

(7) 有物體在一斜面上下滑，斜面之傾角為 30°，摩擦係數為 0.24，求物體之加速度。 設由靜止從斜面頂端開始下滑，求到達地面時之速度，斜面之高為 3〔米〕。 問與自由墮體由靜止下降 3〔米〕者，速度相差多少？ 在有摩擦阻力之問題中，功能定理，是否可以應用？

(8) 用 6〔馬力〕之引擎推動一蒸汽錘，在一〔小時〕內將 200〔噸〕重之砂石，舉高 15〔呎〕。克服摩擦阻力所費之功若干？

(9) 一小孩先在冰上跑，使之得有每〔秒〕16〔呎〕之速度，然後滑溜，至摩擦力使其停止為止。 若冰與其鞋之摩擦係數為 0.15，則滑溜多少時？多少遠？

第二十七章

圓 周 運 動

§145. 勻速圓周運動. 於繩之一端繫一物體 M,如石子或鉛球等,人手執繩之他端而旋轉之,則 M 沿一圓周軌道而運動(圖 182). M 之運動,稱爲**圓周運動**(circular motion).

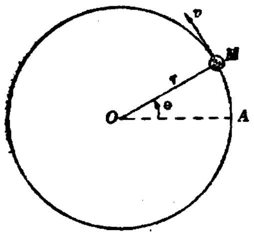


圖 182. 圓周運動.

若 M 在圓周上,於相等之時間內,經過相等之距離,則此運動稱爲**勻速圓周運動**(uniform circular motion).

當 t 時,M 在圓周上之位置,可以 AM 弧長表之,A 爲其運動之起點;亦可以半徑 OM 與定半徑 OA 所成之角 θ 表之.設M 作勻速運動,每〔秒〕內所運動之距離爲 v,又設圓周半徑爲 r,則 OM 在 1〔秒〕內所掃過之角度,當爲

$$\omega=\frac{\theta}{t}=\frac{v}{r}〔弳〕;$$

ω 亦可代表 M 運動之速度,爲別於平常之線速度 v,乃稱 ω 爲**角速度**(angular velocity).

以線速度 v 而論,M 在圓周上繞行一週所需之時間,爲

$$T=\frac{2\pi r}{v};$$

而每秒內 M 環繞圓周之次數為

$$N=\frac{v}{2\pi r}.$$

T 稱為圓周運動之週期 (period)，N 為圓周運動之頻率(frequency)．

由上兩式，知

$$TN=1 \quad \text{或} \quad T=\frac{1}{N}$$

以角速度而論，則有

$$T=\frac{2\pi}{\omega},\qquad N=\frac{\omega}{2\pi}.$$

此種物體之位置及其運動狀況，經歷一定之時間後，完全回復其原狀，如是週而復始之運動，曰週期運動(periodic motion)．

§146. 向心力． 物體之作勻速圓周運動也，雖速度之大小為一定，而其方向則不斷變更，可知必不斷的受有外力作用．在上節所舉例中，石子或鉛球 M 所受之力，為繩之張力，亦即人手牽住之力，由 M 向 O，乃向心的，因名曰向心力(centripetal force)．若繩斷而力滅，則 M 將沿切線之方向，依慣性定理，作勻速直線運動矣(圖 183)．故向心力

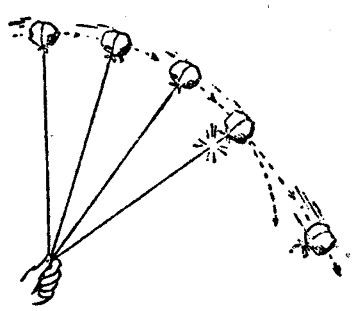


圖 183.

爲使物體作圓周或曲線運動，所不可少者。

向心力 F 之大小，與圓周運動中諸量間之關係，爲

$$F = m\frac{v^2}{r} \quad \text{或} \quad F = m\omega^2 r,$$

式中物體質量 m 之單位爲〔克〕，r 之單位爲〔厘米〕，v 之單位爲〔厘米/秒〕，ω 之單位爲〔弳/秒〕，力 F 之單位爲〔達因〕。

由上式，吾人知物體之質量愈大，轉動之線速度愈快，而軌道之半徑愈小（或轉動之角速度愈快而軌道半徑愈大），則向心力愈强，此不難於下述實驗中證明之。

穿過管中繩之兩端，各繫小球，其質量爲 m_1 及 m_2（圖 184）。鉛直執管而搖轉之，則 m_1 作勻速圓周運動，而 m_2 鉛直靜止。

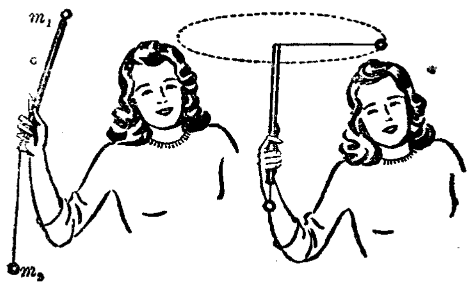


圖 184.

此時 m_1 所受之向心力爲線之張力，亦卽等於 m_2 之重量 m_2g。數計 m_1 每〔秒〕轉動之次數 N，並量其圓周軌道之半徑 r，二者恆合下式之關係：

$$m_1(2\pi N)^2 r = m_2 g$$

卽

$$N^2 r = \frac{g}{4\pi^2}\cdot\frac{m_2}{m_1}$$

若轉動加快，卽 N 增大，則 m_2 下墮些許，以減小圓周半徑 r；反之，轉動變緩，則 r 增大，m_2 上升些許，大 r。此因在本實驗中，可用作向心力者，其值爲 m_2g 有一定之故也。若向心力之供給，可隨需要而增加，情形當不若是。

§147. 離心力。 如上節所述，石子或鉛球作圓周運動時，在石子或鉛球固受有向心力之作用，同時在手亦感覺一種向外牽引之力，此引手外向之力，謂之**離心力**（centrifugal force）。離心力爲石子施於手上之力，向心力爲手施於石子之力，兩者相等而方向相反，成作用與反作用之關係。

飛輪急速旋轉，其各部分皆對於軸而施甚大之離心力，故飛輪之軸與其軸承，必須異常堅固。

泥土附着輪緣，賴其間之附着力；附着力有一定之強度。泥土附輪而旋轉，其作圓周運動所需之向心力，卽取給於附着力。此附着力視爲輪緣施於泥土，則爲向心力；視爲泥土施於輪緣，則爲離心力。當輪急轉，以至附着力之強度，不敷泥土所需之向心力 $m\frac{v^2}{r}$ 時，泥土卽脫離輪緣而飛去。

§148. 向心力之例及其應用。 日常所見之運動，轉動或多於移動，而移動亦非常循直線者，故向心力之出現，極爲普通。茲言數例並及其應用。

旋轉分離器 裝水於桶，繫繩而旋轉之，如圖 185。水作圓周運動所需之向心力，卽爲桶底對水所施之壓力；同時，水對桶

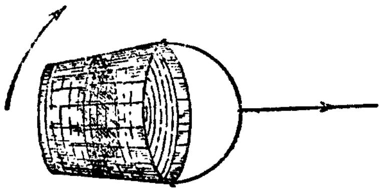


圖 185.

底施離心力而向外緊壓，故水不流溢桶外。

桶底對接觸之一層水施壓力，此一層水又對其鄰接之一層水施壓力，如是各層之水所受之壓力，適等於其所需之向心力，各作圓周運動，層與層間，不相往來。但若桶內所裝者為密度不勻之液體，則某層內密度較小之部分，所受之壓力大於其所需之向心力，因而向內（向桶口方向）移動；密度較大之部分，所受之壓力小於其所需之向心力，因而向外（向桶底方向）移動。二者逐漸分開，此**旋轉分離器**(centrifuge)之原理也。

旋轉分離器之用途頗廣，如化學實驗室由母液分離晶體，製糖廠由糖蜜分離糖之晶體，養蜂場由蜂房提取蜂蜜，牛乳房由牛乳提取乳酪等皆用之。如圖 186，即為一種實驗室內常用之旋轉

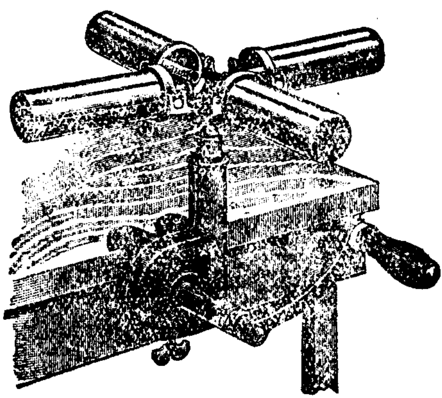


圖 186. 旋轉分離管

分離管使用時之情形。

彎曲路面之偏側. 騎脚踏車行於彎曲路上，若僅將前輪轉向，每不足使車身依曲線前進，此時尙須加一向心力，其值視軌道之曲率半徑 r，轉向時之速度 v，以及集中於車身及人體全組物體重心之總質量 m 三者而定，向心力之大小等於 mv^2/r。吾人可將人體與車身全組物體向內傾斜，使其重心移向軌道曲率中心之一方，於是向心力卽取給於路面之反作用力。如圖 187，AB 代表人體及車身之全組物體，G 為其重心，$W = mg$ 為全組物體之重量，R 為路面對於此組物體之反作用。R 與 W 之合力 F，係沿水平方向，卽為所需之向心力，由圖可見車身之傾斜角 ϕ，為

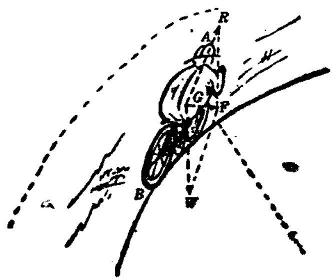


圖 187. 騎車轉彎之斜側.

$$mg\tan\phi = \frac{mv^2}{r}, \text{ 卽 } \tan\phi = \frac{v^2}{rg}$$

故若速度 v 愈大，而曲率半徑愈小，卽傾斜角 ϕ 必須愈大。駕駛脚踏車之技術，乃在控制前輪，恆使其傾角合於軌道之曲率。

在車輪着地點 B 處，有力 R' 斜向作用於地面，與 R 相等而相反。此力可分解為二分力，F' 與地面平行，W' 與地面垂直。後者之力，卽等於人體與車身之重量；而前者之力，其值為 mv^2/r，若不過大——卽傾角 ϕ 不大——則與地面之摩擦力維持平衡。但若傾角頗大，則摩擦力不足與之維持平衡，尤以速度 v 大及曲

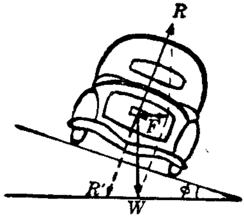


圖 188.

率半徑 r 小時爲然,車輒傾倒。此於冰凍或濕潤之柏油路上,急劇轉灣,每易遇見。爲求安全計,最好使路面與 R' 成正交。在跑道,公路(圖 188),及鐵道之彎曲處,路面恆鋪成偏側,即此故也。

習題二十七

(1) 地球之半徑約爲 6400〔仟米〕。求(a)在赤道上及(b)在緯度 45° 處之物體,因地球自轉而得之速度。

(2) 欲除去傘上之雨水時,持傘柄而旋轉之,則水即行四散飛去,何故?

(3) 滑冰之人,如何轉灣?

(4) 汽車之左前胎損壞時,可使車向左抑向右溜動? 爲安全起見,應在前輪抑在後輪用較佳之胎,何故?

(5) 一比重計插入一桶水中,若用繩將桶提起旋轉,比重計將否入水更深,何故?

(6) 於長 2〔米〕之線之一端,繫重 50〔克〕之物體,持其他端而迴轉之。設此物體之速度增至每〔分〕鐘 80〔轉〕時,線斷物拋,求此線所能耐之張力。

(7) 跑道之曲率半徑爲 30〔米〕,賽跑者之速度爲 6.8〔米/秒〕,問其身體與鉛直線成何角度?

(8) 傳說夸父追日,假設他所在地的緯度是40°,問他每小時行多少公里,方能實現他的志願?

第二十八章

萬　有　引　力

§149. 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;行星繞日作橢圓運動,其向心力由太陽之引力而來。宇宙間,一切物體相互之間,皆有此種吸引之力存在,其定律如下:

兩質量 m 與 m' 間,恆有互相吸引之力,作用於其連接線之方位上,此引力之大小與兩質量之積成正比,而與其間距離之平方成反比。

設以 F 表此引力,則有

$$F = G\frac{mm'}{r^2},$$

式中 G 爲比例常數,名曰**萬有引力常數**(constant of universal gravitation). m,m' 之單位爲〔克〕, r 之單位爲〔厘米〕, F 之單位爲〔達因〕時, G 之值,由實驗測定爲

$$G = 6.66 \times 10^{-8}.$$

故以通常物體之質量,及其間之距離,相互作用之引力,極爲微小,吾人無由感覺之。但地球與太陽之質量甚巨,雖相距 1.495×10^8〔仟米〕之遙,而其間引力仍有 3.65×10^{18}〔噸〕之大。

§150. 地球之質量. 1〔克〕之物質，在地面上所受地球吸引之力，為 $g = 980$〔達因〕，則於萬有引力定律

$$F = 6.66 \times 10^{-8} \cdot \frac{mM}{r^2}$$

中，代入 $m = 1$〔克〕，$F = 980$〔達因〕，及地球之半徑 $r = 6.367 \times 10^8$〔厘米〕，即得地球之質量為

$$M = 6.0 \times 10^{27}〔克〕.$$

由此可計得地球之平均密度為 5.5〔克/厘米^3〕.

地殼巖石之密度，常小於 3，因可斷言地球內部必含有較重之物質，其密度大於 5.5。此為極自然而合理之結果，蓋地球全部初為液體，則較重之物質，自必沈於地球之中部也。

§151. 月球之運動. 月球繞地運行之週期可由理論推求。月球之軌道頗近似圓周，其與地球之平均距離為 384，400〔仟米〕(圖 189)。 命 m 及 M 各為月球與地球之質量，則地球對於月球之引力，為

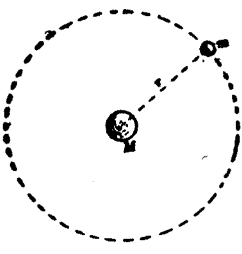


圖 189. 月球之運動.

$$F = G\frac{mM}{r^2}$$

此即月球作圓周運動，所需之向心力 $mr\omega^2$ 也。因有

$$G\frac{mM}{r^2} = mr\omega^2$$

得
$$\omega^2 = \frac{GM}{r^3}$$

卽
$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

是爲月球繞地球運行之週期。以 $G = 6.66 \times 10^{-8}$, $M = 6 \times 10^{27}$〔克〕,及 $r = 3.844 \times 10^{10}$〔厘米〕代入,卽得

$$T = 27.4\text{〔日〕}$$

與實測月球繞地球運行一周之時間,爲 27〔日〕8〔小時〕,甚相接近,由此足見萬有引力說之眞確。

習題二十八

(1) 人體在赤道上之重量,較在南北極時爲輕,有二理由,試說明之。

(2) 在地球與月球之間有一點,無論何物,皆無重量。 試解釋之。

(3) 地球自轉之速度等於現在之幾倍時,赤道上之物體將無重量?

(4) 太陽之質量爲地球之 333,432 倍;其與地球之平均距離爲地球赤道半徑之 23,439 倍。 求太陽與地球間之吸力。

第二十九章

擺 與 鐘 錶

§152. 單擺. 設有不伸縮之細線一條,其重量又可略去不計者,將其一端固定,他端懸一小球,令其左右擺動,是為**單擺** (simple pendulum). 固定之點,如圖 190 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).

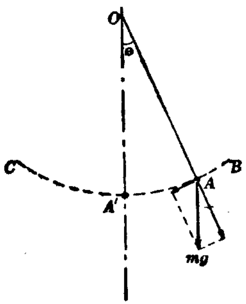


圖 190. 單擺.

擺在平衡靜止時,擺錘必在經過 O 點之鉛直線上之點 A', 而居於最低之位置. 擺錘在任何時刻之位置,可由 OA 與 OA' 所成之角 θ 表之. 將錘挪至 B 點而放去之,由重力作用,錘卽沿圓弧而下降. 擺錘所受之重力為 mg, 其在正交於 OA 線之方向之分力 $mg\sin\theta$, 使錘沿圓弧 BC 運動. 錘由 B 向點 A' 運動時,愈落愈低,位能減小,而速度則逐漸增加,至 A' 點時動能最大;由慣性作用,復沿圓弧 $A'C$ 而上升. 但重力常具使錘歸至點 A' 之作用,故錘之速度復漸次減少,終至與 B 齊高之點 C 而止;其後再行下降,經 A' 而又上達於 B;如斯往復擺動不已.

由是可知擺作週期運動. 弧長 $A'B$ 或 $A'C$ 曰**振幅** (amplitude),示擺動之大小,亦可以幅角 $A'OB$ 或 $A'OC$ 表之. 由 B 點起,經過 A' 點,至 C 點,再折回至 B 點爲止,擺完成一全振動所歷之時間,稱爲**週期**(period).

命 l 表擺長,T 表週期.當幅角不甚大時,據理論及實驗,知擺之週期爲

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

卽週期由擺長而定,與振幅無關. 在同一地點,g 之值一定不變,故等長之擺,其週期恆相等,是爲擺之**等時性**(isochronism).

又測定擺之週期與擺長,則由上式,可算出當地之重力加速度 g 之值. 較之直接從墮體運動實驗測 g,既爲容易,亦更精確.

【例】 有擺,長 102〔厘米〕,測得擺動 160 次所歷之時間共 324.5〔秒〕.求擺所在地之重力加速度.

擺之週期爲 $$T = \frac{324.5}{160} = 2.208\text{〔秒〕}.$$

由 $$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

得 $$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} = \frac{4(3.1416)^2 \times 102}{(2.208)^2}$$

$$= 979\text{〔厘米/秒}^2\text{〕}.$$

§153. 簡諧運動. 圖 191,如沿橫軸取時間,沿縱軸取各時刻之擺線與其平衡位置所成之角 θ,由 A' 向右爲正,向左爲負.將各時刻擺錘之位置,用此法表出,連接之,得一連續之**餘弦曲**

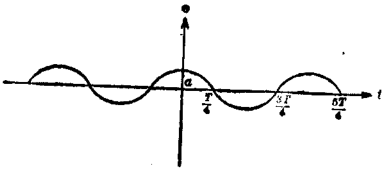


圖 191. 餘弦曲線.

線(cosine curve). 曲線上之一點 A, 表示在 t 之瞬刻, 錘之位移為 θ. θ 與 t 之間, 其關係為

$$\theta = a \cos 2\pi \frac{t}{T},$$

a 即代表幅角. 橫軸上相隔 T 之兩點, 其 θ 之值相等, T 即代表擺動之週期.

與擺動相類似,而可用同樣之曲線與公式表出之運動,稱為簡諧運動(simple harmonic motion).

彈簧之上端固定,下端繫一鉛球(圖 192). 當其平衡靜止時,手持鉛球,向下拉之,則彈簧伸長而鉛球下移;待手放去,則鉛球因彈性力之作用,往返振動於其平衡位置之上下,斯即為簡諧運動之一例也. 鉛球在其平衡位置之下時,彈簧伸長,彈性力 F 向上;鉛球在其平衡位置之上時,彈簧壓縮,彈性力 F 向下.

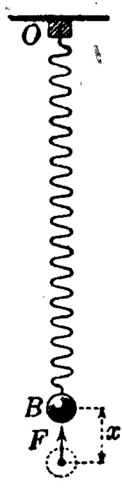


圖 192.

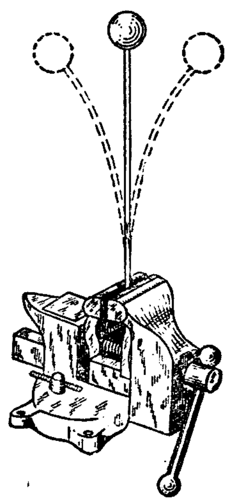


圖 193.

又將鋼條之下端箝緊,彎其上端而放之 (圖 193),則

鋼條因彈性力之作用,在其平衡位置之左右往返振動,成爲簡諧運動之又一例. 鋼條之上端向右彎時,彈性力向左,向左彎時,彈性力向右.

彈性力恆欲使物體回復其原來之狀態或位置,其強度,依虎克定律,與形變成正比. 故簡諧運動之形成,必須有力焉,其強度與物體之位移成正比,而其方向則恆指向平衡之位置.

§154. **共振.** 一個單擺,一條彈簧,與一根鋼條,各依其本身固有之週期而振動. 鞦韆亦復如是(圖 194). 當鞦韆每次要蕩向前時,有人向前推之,則振幅加大,不至停止. 是鞦韆於其擺動之中,又遇外加週期之力. 若力之週期與物體自由振動之週期相同,施力又復合拍,則由此引起之振動,振幅特別加大,稱爲**共振**(resonance).

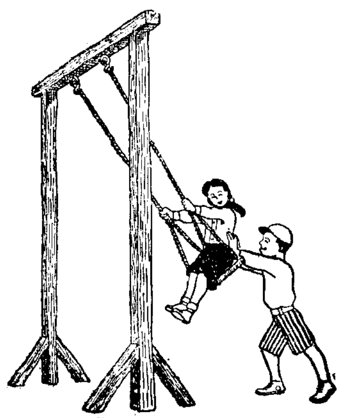


圖 194.

共振現象,極爲普通,細心觀察,其例甚夥. 人行木橋上,橋即振動,且有其一定之週期;若此週期與步伐相同,則成共振,而橋板之跳動甚烈. 故步隊過橋,宜亂步伐,以免橋有折斷之虞.

§155. **鐘.** 通常計時之鐘,即利用單擺之等時性而成. 時

間之單位爲〔秒〕,故鐘擺之半週期,卽每連續經過其平衡位置之時間,最好爲 1〔秒〕。如是之擺,稱爲秒擺。

欲擺成爲計時之具,必須其擺動能歷久而不停,且其擺動之次數須能自行記錄。欲達此雙重目的,端賴巧妙之擒縱裝置(圖195)。

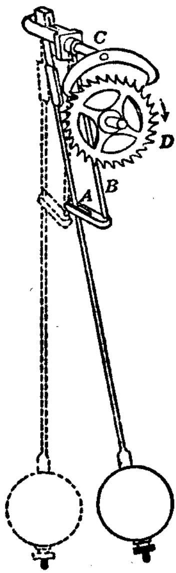


圖 195. 鐘擺之擒縱裝置.

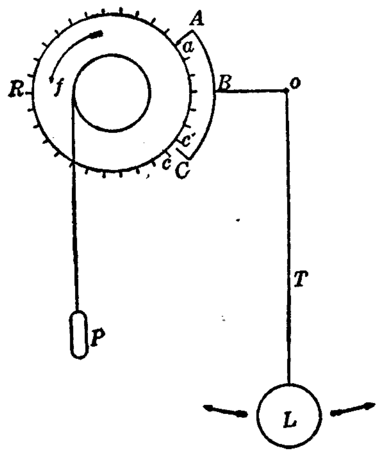


圖 196. 擒縱裝置之原理.

擒縱裝置(escapement)之原理,如圖 196 所示。擺 OL 牽連錨 ABC 而擺動。齒輪 R 以懸重 P 之下降,可依矢號 f 之方向而旋轉。擺在鉛直之位置時,錨之一支 A,與 a 齒相接觸,他支 C 在 c 及 c' 兩齒之間。當其向左而擺動也,A支與 a 齒脫離,齒輪得以轉過半齒之間隔,c 齒與 C 支相接觸。及擺回至

鉛直位置而向右也，C 支脫離 c 齒，而 A 支將與 a 下之一齒相接觸。如是擺每連續經過鉛直位置二次時，卽每一〔秒〕鐘，R 輪轉過其二齒間隔之半，若輪邊共有30齒，則將轉過一周之$1/60$，此卽秒針之齒輪也。

又 A 支或 C 支脫離 a 齒或 c 齒之時，a 齒或 c 齒卽予擺以一向左或向右之擒縱；此一擒縱，適足以補償擺因摩擦阻力等所消耗之能，而使其振幅不減，擺不停止。

是擺之偶或停止也，必因其齒輪 R 停止旋轉。齒輪之所以停止旋轉，則必因重物 P 已着地，不能再降。故每隔若干時日，須行上鐘一次，卽將懸重之繩，繞於齒輪之軸，而將重物舉高。是鐘得擺動不息之原動力，乃為重物之下降也。

此種以重力下降為原動力之鐘，宜於裝在大廈之鐘樓上。普通家庭所用之鐘，皆以發條為原動力。發條之內端(圖 197)，固

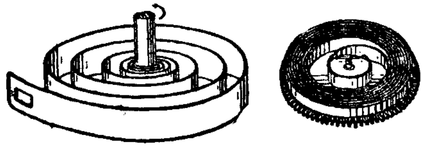


圖 197. 鐘之發條。

定於一軸上，外端連接於齒輪之內緣。旋轉此軸以上緊發條；上緊後之發條，其外端恆欲自行放鬆，以使齒輪依一定之方向迴轉。

§156. 錶。 單擺之擺動，須在一鉛直面中，其不適宜於錶

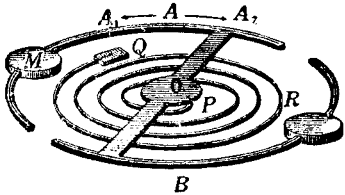


圖 198. 錶之擺輪.

內之用明甚. 手錶內改用彈性擺(圖 198), 爲一擺輪 AB 可繞其軸 O 而轉動, 中有游絲 PRQ, 其一端 Q 固定於錶身, 他端 P 固定於擺輪上. 以游絲之彈性作用, 擺輪左右擺動於 A_1A_2 之間, 有一定之週期, 通常爲 $\frac{1}{5}$ 秒. 其擒縱裝置, 有如圖 199 所示.

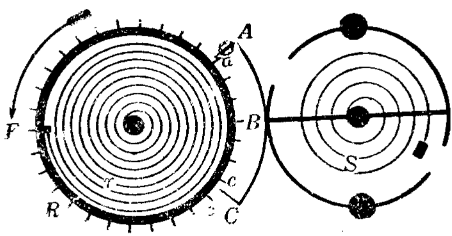


圖 199. 擺輪之擒縱裝置原理.

習題二十九

(1) 何種運動, 係速度之大小一定, 而方向變化? 何種運動, 係方向一定而速度之大小有變化? 何種運動, 其速度之大小及方向, 兩者共同變化? 何種運動, 其速度之大小與方向, 俱係不變? 各舉例以明之.

(2) 甲擺振動 5 次時, 乙擺振動 4 次, 求兩擺擺長之比.

(3) 置長 99.2 [厘米] 之擺於某地而使之擺動, 若測得其週期爲 1.997 [秒]. 求當地之重力加速度?

(4) 在南京準確之鐘, 移至北平, 每日將快多少或慢多少? 錶是否因地域而改變快慢?

第三十章

分子現象與分子力

§157. 物質之組成. 從物體受壓,體積縮小之現象,可知物質之組織,並非為連續的,中間有空隙之存在。一枝粉筆,可以繼續分割,而成極小之微粒,其各種特性,固未失亦未變也。由化學現象,知物質分割到一定限度後,再加分割,即成為性質全異之物質。此種極限之最小微粒,仍未失原物質之性質者,稱為**分子**(molecule),故一切物質,皆由分子聚合而成。分子再受分割,則成**原子**(atom)。各種元素之不同,即因其原子之有別。近代物理進步,且可確定原子內部之結構。

§158. 分子. 各種物質之分子,大小不等,決非目力所能窺見。但由種種之現象,可推知在 0° C 與壓力 760〔毫米〕水銀柱高之標準狀況之下,1〔立方厘米〕之氣體內,約含有 2.7×10^{19} 個分子。將一千個分子,排成一直線,方能於最優良之顯微鏡下窺見其痕跡,四萬萬個分子列成一直線,其長度亦不過 2.5〔厘米〕耳;但四萬萬個人,排成一直線,將可圍繞地球五匝。分子之微小,可以想見。

分子之直徑,約為 2×10^{-8}〔厘米〕;分子間距離之平均數值,約為 7.6×10^{-6}〔厘米〕。可見分子間之空隙遠較分子本身為

大。 分子在物體中非靜止者，常作不規則之運動。 依分子間空隙之大小，與其運動之速度，亦可區別固、液、氣三種物態；卽分子之間隙與速度，以固體 爲最小，液體 較大，氣體 則更大。

§159. **分子力**。 一分子對於周圍之其他分子，有互相吸引之作用，稱爲**分子力**(molecular force)。 因各分子之質量極小，故其間之分子力，除距離極近者外，可以略而不計；但在距離甚近時，則其作用至爲顯著。 例如要將固體截成兩段，常需很大之外力，以勝過分子力；截斷後，又非通常之壓力，所能使其重行結合者。 可知分子力之作用，有一定之範圍，卽每分子之周圍，各有其作用圈(sphere of action)。作用圈內之分子，皆對此分子施作用；而此分子之作用，亦僅及於圈內之其他分子。通常分子作用之範圍，約在 8×10^{-6}〔毫米〕以內。 鍛銲金屬時，先將其斷面燒熱，再用鎚打擊，使分子之接近程度增加，兩段方能接合。又加高大壓力於放在管中之碳粉，常可壓成碳條，其理相同。

同類分子間互引之力，稱爲**內聚力**(cohesive force)；異類分子間之引力，稱爲**附着力**(adhesive force)。一切物體之成立與存在，皆由其內聚力之故。 粉筆之成條，卽由粉與粉間之內聚力。粉筆可在黑板上寫字，則由於粉與板間之附着力。漿糊之黏貼紙片，亦是附着力作用。又將玻璃棒插入水中而抽出棒上附有水層，此乃因玻璃與水之附着力，較大於水之內聚力

故也. 若將玻璃棒插入水銀中而取出時,則並無水銀附着,此乃因水銀之內聚力,較大於水銀與玻璃間之附着力故也.

§160. 分子運動. 固體分子之間隙既小,其分子力頗大,常能維持各分子在物體內之位置,故分子祇能在其平衡位置之鄰近振動. 液體之分子力較小,其各分子間之距離雖不易變更,但可任其自由滑動,故液體雖無反抗變形之力,而體積之改變頗難.

至於氣體之分子,則因距離甚遠,運動自由,故其分子力,除碰撞時外,可視爲極小. 氣體分子,以極高之速度,向各方向運動;此等運動常依直線進行,惟分子若互相碰撞,卽折向他方而去,此氣體之所以常能充滿容器也. 同理,亦可解釋氣體之壓力(§86),因氣體分子之衝撞器壁,有繼續將壁向外推動之力. 若氣體體積壓縮至一半,壓力亦卽加倍者(§102),因每〔秒〕鐘衝撞器壁之次數加倍所致. 故由氣體壓力,而計算分子運動之速度,亦屬可能. 在通常狀况下,氣體分子之速度約爲每〔秒〕1.5至10〔仟米〕(大砲彈之速度,無超過每〔秒〕1〔仟米〕者). 增加溫度,卽增加分子運動之速度,冷卻則減低其速度;故氣體之壓力,在一定之容積下,隨溫度之升降而增減(見後§186).

下述若干現象,可使吾人確信分子運動,永無寧息.

§161. 擴散. 一滴香水之蒸發,可使全室芬芳. 在室之一隅放出氨(ammonia)或他種富有刺激嗅覺之氣體,不久全室充

滿臭味．盛水之玻璃瓶中，滴入藍墨水，雖不攪動，久之全杯之水成淺藍色．又如一杯茶中，放糖沈至底部，待其溶解稍久，卽不將液體攪和，而茶之全部亦覺有甜味．凡兩種不同之氣體或液體相接觸時，經過相當時間後，能互相侵入而完全混合，此種現象，稱爲**擴散**(diffusion)，由於內聚力甚小而分子運動甚烈之故也．

§162. 滲透． 有多種薄膜，雖無可見之細孔，亦可任液體擴散無阻．例如張膀胱膜於玻璃管之下口（圖 200），在管外杯中盛水，而在管內盛糖溶液．初時令管之內外液面相齊，經歷若干時間後，將見水在管中上升可達相當高度，而糖之濃度減小．此種穿過薄膜之擴散現象，稱爲**滲透**(osmosis)．

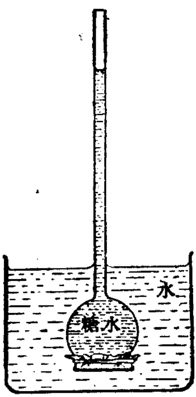


圖 200. 滲透.

滲透之實例甚多． 例如鹽蛋，醃菜等，皆爲利用滲透之作用是． 加鹽於蔬菜上時，因滲透作用，其組織內部之水，滲出之量較之外部鹽水滲入之量爲多，故細胞縮小，菜身變軟． 反之，如以含有鹽分之物件，例如烏賊，魷魚等物浸於淡水中，則因滲入之淡水量較滲出之鹽水量爲多，故烏賊，魷魚等卽行膨脹．

§163. 吸收． 在燒杯中徐徐將冷水加熱，則見有細小之氣

泡,集於杯之壁上,而升至液面. 初視之,似爲水之蒸氣泡,但有理由知其不然. 因此等氣泡生成於水未達沸點之前;且至上層冷水中,不致凝結. 故非水之蒸氣泡,而爲水中之空氣泡.

由此簡單之觀察,可知尋常之水中,恆含有溶解之空氣,支持魚類之生命者,卽賴溶解於水中之氧. 液體中吸收氣體之量,依液面上之壓力而定. 如汽水,爲藉壓力使水中吸收大量之二氧化碳而成;瓶栓一開,壓力移去,二氧化碳卽成氣泡而逸散,遂成發泡現象.

水吸收氣體之量,與氣體之性質大有關係. 在 0°C 與壓力爲 76〔厘米〕水銀柱高時, 1〔立方厘米〕之水,能吸收 0.049〔立方厘米〕之氧, 1.71〔立方厘米〕之二氧化碳,或 1300〔立方厘米〕之氨. 普通市售之氨水,卽爲氨之水溶液.

多孔固體如木炭,海泡石,及絲,皆有吸收多量氣體之能力. 此種吸收作用,似爲固體表面或內部細孔間氣層之附着力所致. 例如木炭可吸收 90 倍體積之氨, 35 倍體積之二氧化碳等. 此卽應用於防毒面罩內,作爲吸收劑之故.

固體及液體吸收氣體之例,爲將牛乳及乳酪,與洋葱,魚等其他食物,同置於冰箱之格中,則牛乳及乳酪必沾得魚腥及葱臭. 例如,洋葱放出之少量氣體,可由其臭氣或令人流淚而知之;若此臭爲牛乳或乳酪所吸收,卽將變味.

§164. 表面張力. 分子力在物體之分子羣中,互相抵消,故必於分子羣之周界處,始得表現. 液體之自由面,似由薄層之

表皮而成．以脂肪塗於針上，使不沾水，而載之浮於水面之吸墨紙上，則暫時間紙雖下沈，而針仍能浮於水面(圖 201)．若細察其浮起之原因，則水面恰似張有一層橡皮薄膜，此膜有自行收縮之傾向，故針得以不致下沈．此種現象，經研究之結果，不僅惟水為然．凡所有液體，均多少具有此種之性質，謂之**表面張力**(surface tension)．吾人日常所見水蟲之能匍匐於水面，及蚊類可棲止於水上者，皆藉此表面張力之故．

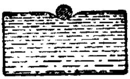


圖 201.

表面張力為液體分子之內聚力之表現．分子之在液體中者，為其他分子所圍繞，各方所受之力，平均相等，而彼此相消；但分子之在液面者則不然(圖 202)．在液面 A 處之分子，其下半部受液內分子之吸引，但在其上半部則無此種引力，故在 A 處之分子，所受其他分子之作用，有一合力 R，垂直於表面而向液內，此卽使液體表面有縮小之傾向之原因也．

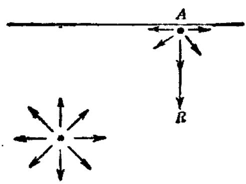


圖 202.

液體因表面張力之故，有使其表面收縮成最小之性質．球為體積一定之各種立體中表面積之最小者，故落下之雨滴，皆成球形．又以玻璃棒之一端，插入火燄中燒之，亦凝縮成球形．其他如草上之露珠，荷上之水珠，桌上之水銀珠等，皆成球形者，亦因表面張力之故也．鉛彈之製造，卽係利用表面張力，將熔解之鉛，篩落於水中而成．

如在一金屬環上，繫一潔靜之線環，浸之於肥皂液中而取出，

然後以燒熱(使其潔淨)之針端,衝破線圈內之肥皂膜,則膜之表面張力向外牽引,而使線環呈圓形(圖 203)。蓋因圓爲周圍一定之各種平面形中,面積之最大者,線圈外之肥皂膜,因表面張力之故,欲收縮至最小,遂不得不使線圈之面積,擴張至最大故也。

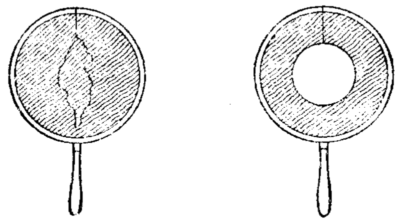


圖 203.

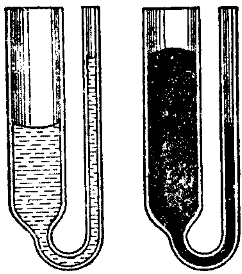
表面張力之強弱,因液體種類之不同而異。就中以水銀爲最大,水,油,酒精,醚等以次遞減。又水溶液之表面張力,較純水者爲小;濃度愈大,表面張力愈小。如以油滴於水面,則因油面之收縮力較弱,水面因收縮而牽引油之周圍,故油即行散布於水之全面。

因煤油之表面張力較小於水者,故蚊類能靜立於水面上,而不能駐留於煤油面上。因之,於溝渠等處,徧灑煤油少許,使水面爲煤油所掩時,則蚊類誤停於其上,一如人之赴水,立遭溺斃。故可利用之殺死蚊類而除蚊害。

投樟腦之小片於水面,即起激烈運動者,因樟腦片之形狀爲不規則,其四周溶解於水者有遲速之差異,而溶有樟腦之水,其表面張力較弱於純水者,故樟腦周圍各部所受之張力,各不相同,因而起運動現象。

§165. 毛細現象。 設有U形管二(圖 204),其兩支管一粗

一細，細者之直徑約爲 1〔毫米〕。將水(爲便於觀察，可加數滴藍墨水)傾入第一管內，水銀傾入第二管中。兩支管雖連通，其中液面皆不相平。



(甲)水　　(乙)水銀

圖 204。　毛細現象。

水能濕潤玻璃，而爲玻管管壁吸引上升，管中水面成凹形(圖 204 甲)；換言之，其附着力大。水銀不能濕潤玻璃，其內聚力大，而附着力小，因之水銀與玻管管壁似相排斥，管中水銀面成凸形(圖 204 乙)。細管中之水面高於粗管中者；細管中之水銀面，則低於粗管中者。管愈細如毛髮，此種現象，愈爲顯著，謂之**毛細現象**(capillarity)。

毛細現象，實例甚多。如燈芯之吸油，毛筆之濡墨，以及吸墨紙，毛巾及海綿之吸水等皆是。

大雨之後，園中或犂過之田中，泥土濕至相等之深度。當太陽照耀之時，地面上之水先行蒸發；較深處之水，由土壤中之小管，因毛細現象而吸至地面，繼續蒸發。若近地面之泥土已掘鬆或耕起，則上層泥土中之孔隙變大，影響毛細現象，而地面之蒸發作用大爲減小；但下層泥土中之毛細現象，仍在繼續進行，而將水吸至植物之根部；如是，可將土中水分保存而善用之，此即"乾耕"之原理。

§166. 黏滯性。 液體內某部分對於他部分作運動時，當有一種妨礙其運動之力存在，謂之**液體內部摩擦力**。液體表現此

內部摩擦力之性質,謂之**黏滯性**(viscosity).

將液體攪拌而放置之,則其運動經若干時間後,即行停止者,蓋由於液體黏滯性之作用. 吾人由攪拌液體後至其靜止時間之長短,略可推知其黏滯性之大小. 因凡液體皆多少具有黏滯性,故如欲使其不絕運動時,必須常加以外力. 液體中如糖漿,甘油等,黏滯性極大,為人所共知,即水與水銀,亦不能免.

液體在管中流動時,其與管壁相接之液層,因附着力而固着於管壁,速度極小;以管之中心處,流動之速度為最大;其間各層,則由黏滯性之內部摩擦力,愈近管壁,速度愈減. 河流之速度,其中流較兩岸及河床為大者,即此之故.

習題三十

(1) 已知氫之密度為 0.00009 〔克/厘米^3〕,求氫分子之質量.

(2) 大氣上下各部分之密度雖異,但無顯明之層次,且氧與氮之混合比例,各處相同,其故安在?

(3) 破鏡不能重圓,其故安在? 如欲其重圓,有何方法辦到?

(4) 飯碗打破,如何訂法?

(5) 貼郵票時,如不濡濕,則黏不着;貼後待乾,即行附着,何故?

(6) 養魚缸內之水,逾久不換,則魚死去,何故?

(7) 保安薙刀,輕輕平放水面,可以不沈,是否與輪船浮在水面同理?

(8) 一滴水與一滴水銀,放在桌面上,有何不同?

(9) 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?

(10) 複寫紙上不能用毛筆書寫,但可用鉛筆,何故?

(11) 衣上之洋燭污漬，可置吸墨紙於其上，而以熱熨斗熨之，即得除去，何故？

(12) 花園中之泥土常常掘鬆，則不須時時加水，何故？

(13) 取火柴二枝浮於水上，使其相距約一〔吋〕，然後以灼熱之鐵絲插入於火柴間之水中，此二火柴即自相離開。此現象所表示表面張力與溫度之關係若何？

(14) 衣服上何以能帶灰塵？輕揮不去，重拍即飛，此輕與重，以何爲標準？

(15) 已知下列各種氣體之分子式：

氯化氫 HCl； 二氧化硫 SO_2； 一氧化碳 CO；

又知各原子量爲

$H = 1$, $Cl = 35.5$, $S = 32$, $O = 16$, $C = 12$, $N = 14$；

試據此推算此等氣體(a)對於空氣及(b)對於氫氣之比重。

第三十一章

温　　度

§167. 温度之原始觀念. 吾人對於冷熱之觀念，係由觸覺而來. 以手觸各種物體，而起冷，溫，熱等之感覺. 可知物體之冷熱，有種種程度. 此種物體冷熱之程度，謂之**温度**(temperature).

雖然，吾人之觸覺，非可言正確也. 例如，同一溫水，若以纔從冷水中取出之手觸之，則覺其熱；而以纔從熱水中取出之手觸之，則又覺其冷. 且吾人觸覺之範圍，亦頗不廣. 凡炙手之熱，更上，吾人無法以辨之矣；凡裂膚之寒，更下，吾人亦計無可施矣.

由此觀之，吾人以觸覺而得溫度之觀念，甚為粗淺. 欲作科學之探討，對於冷熱之測定，須有客觀之標準. 凡因溫度之增高，使物體有若干可測量之變化者，皆可為測量溫度之用. 熱脹冷縮，為吾人所熟知之現象，即其一例也. 因是而有**温度計**(thermometer)之出現.

§168. 水銀温度計. 溫度計之最普通者，為利用水銀之膨脹而製成之水銀溫度計. 其構造(圖 205)，為將玻璃細管之一端擴成柱形或球形，注入水銀後，加熱以排除管內之空氣，然後

密封管口而成。如以此計接觸於溫暖之物體，則水銀柱膨脹而上升，接觸於寒冷之物體，則水銀柱收縮而下降。故由水銀柱之長短，得比較各種物體溫度之高低。

圖 205. 水銀溫度計.

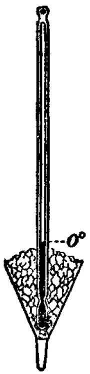


圖 206. 冰點之測定.

溫度計之刻度. 欲使溫度計能作數量的表示，尙須爲之刻度。 刻度之先，宜定標點，通常以水之**冰點**(ice point)與**沸點**(boiling point)爲標準。

冰點之定法. 插溫度計於正在熔解之冰屑中(圖 206)，則見水銀面逐漸下降，至某一處而停止，乃於此處刻一劃，卽爲冰點。

沸點之定法. 鍋爐中煮水，以溫度計插入其蒸氣流通處(圖 207)，水面上之氣壓，常使其爲 760〔毫米〕水銀柱之高，則見溫度計管中之水銀面逐漸上升，待水沸時至某一處而停止，卽於此處刻一劃，是爲**沸點**。

既定冰點與沸點兩標點後，其間之分度，有攝氏與華氏兩種之不同(圖 208)。 攝氏溫度計(Celsius or centigrade thermometer)，係以冰點爲零〔度〕，沸點爲百〔度〕，在零〔度〕與百〔度〕之間，等分爲 100 分，每分稱爲 1〔度〕，科學上多用之。華氏溫度計(Fahrenheit thermometer)係以冰點爲 32〔度〕，沸點爲 212〔度〕，其間分爲 180 等分。

表示攝氏〔度〕數用 °C，表示華氏〔度〕數用 °F，兩者之關係

圖 207.
沸點之測定.

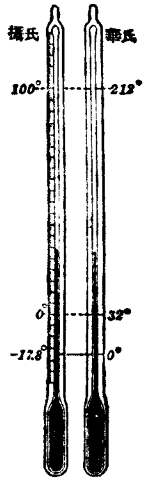


圖 208.
攝氏與華氏溫度計.

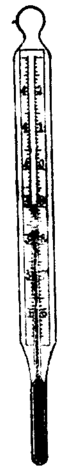


圖 209.
體溫計.

如下：

$$C = \tfrac{5}{9}(F - 32),\quad F = \tfrac{9}{5}C + 32$$

例如人之體溫爲 37°C,亦即 98.6°F.

以酒精代水銀製成之溫度計,常爲家庭所採用,以定室內之溫度. 往往將酒精着成紅色,以便管中之酒精面易於認讀. 酒精溫度計不能用以測量高於 78° C 之溫度,因酒精到此溫度已將沸騰化爲蒸氣矣.

體温計(linical thermometer)爲水銀溫度計之一種,用以測量人體之溫度,而檢查疾病者也. 其盛水銀之玻璃泡上端(圖 209),設有一狹隙,較管道其餘部分爲狹；意欲使水銀經過此狹隙時,遇較大之阻力. 當應用時,水銀直上管道,止於應止之處,初不爲此狹隙而減低. 此溫度計從人體中取出,驟遇冷

空氣.因狹隙之阻力,管道中之水銀未及下降,而管道與玻璃泡間之水銀柱已告中斷.管道中之水銀面,因得停留於最高點而不下降,於是醫生得有充分之時間,以讀其溫度.

常人體溫概在 37°C 上下,故醫用體溫計上之刻度,限於體溫相近之範圍內,即由 35°C 至 42°C 之間,過此均無用處.

§169. 最高及最低溫度計. 一日之內,氣溫變化頗大,欲知其最高與最低溫度,除隨時觀測與記錄外,可由**最高及最低溫度計**(maximum and minimum thermometer)直接讀出,故為各地氣象臺所採用.

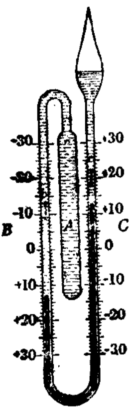


圖 210. 最高及最低溫度計.

最高及最低溫度計(圖 210),管內中部之液體為水銀,兩端為酒精或石炭酸. A 管滿儲酒精,容積既大,酒精之膨脹係數又較水銀者為大,故其作用一如普通溫度計之玻璃泡儲蓄器;C 管之頂端擴大,中有若干空隙為真空.在 B,C 兩管之酒精中,各有鋼針指標一枚為 b 與 c. 鋼針之粗細,適與管壁相摩擦而可移動,但不致自行墜落.在應用之前,先以磁鐵將兩指標引下,各與水銀面相接觸.

溫度升高時,A 管中之酒精膨脹,推動水銀在 C 管中上升,至某一高度而停止,指標 c 即止於是處. 嗣後雖因溫度減小,C 管之水銀面下降,而指標 c 則因其與管壁間之摩擦阻力,不致隨之而下.

溫度下降時，A 管中之酒精收縮，C 管之水銀面下降，而 B 管中之水銀面推動指標 b 以俱升。待 B 管之水銀又因溫度之增加而下降，指標 b 將留居原位而不動。

故鋼針 c 指示所達之最高溫度，b 指示所達之最低溫度。例如圖中所示，最高溫度爲 18°C，最低溫度爲 −8°C，而現時之溫度爲 13°C。

習題三十一

(1) 用過之醫用體溫計，用何法使其水銀柱回復原狀？何以須在冷酒精中而不可在熱水中洗淨？

(2) 問 212°F，100°F，及 −58°F，各合攝氏溫標何〔度〕？

(3) 問 1000°C，357°C，39°C，及 −10°C 各合華氏溫標何度？

(4) 問華氏計與攝氏計，在何溫度時，兩者所指示之〔度〕數相等？

第三十二章

熱　　量

§170. 熱量. 吾人均知一杯之沸水,較一壺之熱水為熱.若將一杯之沸水,倒於一盆之冷水中,混合之後,其溫度則未必較高於將一壺之熱水,倒入同盆之冷水中所得者.故知溫度所代表者,僅為冷熱之程度,並未涉及物體所含熱量之多寡.一杯沸水溫度雖高,然其所含之熱量,則未必較諸一壺熱水所含之熱量為多.

以溫度較高之物體 A,與溫度較低之物體 B 相接觸時,則 A 之溫度下降,B 之溫度上升,終至二物體之溫度相等而後止.故熱由高溫度物體移於低溫度物體,其情形恰與以管連通水位不同之二容器時,水由水位較高之容器,流入於水位較低之容器相似.在流水之例中,水流停止後,二容器之水位雖相等,而其所容之水量,不必相等;同理,因接觸而成為溫度相同之二物體,其所含熱量之多寡,亦不必相等.又如連通之二容器,水能由水量雖少而水位較高之容器,流向水量雖多,水位較低之容器;故二物體接觸時,熱亦可由熱量雖少,而溫度較高之物體,移於熱量雖多,溫度較低之物體.要之,熱之移動,全由溫度之高低而定,與熱量之多寡無關.

如上所述,溫度及熱量,恰與水位及水量相似.但有一應行

注意之點，即水爲物質，而熱則非物質是。此事徵之於物體重量，不因其溫度高低而異，至爲明顯。

§171. **熱量之單位.** 量熱之法，可從煮水入手。有冷水一鍋於此，置爐火上煮之，插溫度計於水中，以觀其溫度之變化。例如：

1〔分〕鐘後，1000〔克〕之水，升高 10°C；

1〔分〕鐘後，2000〔克〕之水，升高 5°C；

1〔分〕鐘後，500〔克〕之水，升高 20°C。

此三次爐火所給予水之熱量，顯然相等。當水之質量加倍，則溫度之增高減半，而溫度之變化與水之質量之相乘積不變。

即在此實驗中，吾人更煮 1000〔克〕之水，2〔分〕鐘之後，則水升高 20°C；換言之，熱量加倍，則溫度變化與質量之相乘積亦加倍。又若以油易水而煮之，將見其溫度之增加更速。

由上所述，可知物體所含熱量之多寡，不但視其溫度之高低，且隨物體質量之多寡，及其種類而異。同一物質，在同一溫度時，質量愈大之物體，所含之熱量亦愈多。故採用一標準熱量以作單位時，須規定三事：(1)所用之物質；(2)此物質之質量；(3)使此物質增加之溫度。

科學界公認使 1〔克〕質量之水，從 15°C 增加溫度 1〔度〕時，所需之熱量爲單位熱量，曰〔**卡路里**〕(calorie)，簡稱爲〔**卡**〕。1000〔卡〕稱爲〔**大卡**〕。

實際上，常用所謂**平均卡路里**者，爲熱量之單位。1〔平均卡

路里〕之值，係等於 1〔克〕水之溫度自 0°C 增至 100°C 時，所需之熱量之$\frac{1}{100}$。〔平均卡路里〕與〔15°C 之卡路里〕，相差甚微，故非作極精確之計算時，可不加以區別。

【例】 煮 100〔克〕之水，使之升高 5°C，所需之熱量爲

$$100\times 5=500〔卡〕.$$

§172. 量熱器. 溫度不同之兩物體，互相接觸或混合後，熱體之溫度漸降，而冷體之溫度漸升，終至兩者相等，以達平衡。此時，熱體放出或所失之熱量，等於冷體吸入或所得之熱量。

若兩物體中之一爲水，其質量爲 M〔克〕。混合前後，水之溫度變化爲 $t_2°-t_1°$。 則水所得之熱量，亦即他一物體所失之熱量，同爲

$$H=M(t_2-t_1)〔卡〕,$$

是爲**混合量熱法**(method of mixture)。

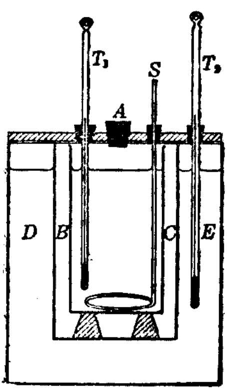


圖 211. 量熱器.

量熱器(calorimeter)之構造，至爲簡單。如圖 211 所示，內筒盛水，自 A 處納入物體，可與水混合，是爲熱量交換之所。 筒中有溫度計 T_1 及攪桿 S，將攪桿攪動，以使筒內水之溫度均勻，再由 T_1 讀出。

爲避免熱量逸散或潛入起見，內筒之外，圍以外筒。 內外筒之間，如 B 與 C，則以絕熱物質隔離之，空氣與木塞，皆爲

良好之絕熱體. 外筒雙壁,壁間如 D 與 E,滿貯大量之水,以使其溫度不變,此可由溫度計 T_2 證明屬實. 如是則器外之寒熱,不致影響器中內筒之溫度.

量熱器之內筒,及其附件如溫度計與攪桿等,於混合之前後,將隨其中之水,起同樣之溫度變化. 設 m 為內筒及其附件之熱容量,即使其溫度升高 1°C 所需之熱量;則在混合中,內筒及附件所吸入之熱量為 $m(t_2-t)$. 於是量熱器實得之熱量為

$$(M+m)(t_2-t_1)〔卡〕.$$

上式之表示,似乎量熱器中之水非為 M〔克〕而為 $(M+m)$〔克〕,故吾人有知 m 之必要. m 稱為量熱器之**水當量**(water equivalent of calorimeter),其值可由下述實驗定之.

量熱器中初有水 M〔克〕,溫度為 t_1°C;再傾入 t'°C 之熱水 M' 克,攪勻後溫度成為 t_2°C. 於是

$$M'(t'-t_2)=(M+m)(t_2-t_1),$$

從此式中即可求得 m 之值.

173. 燃燒熱. 日常所需之熱量,除直接來自太陽外,多由柴,煤,及油等燃料燃燒而得. 每單位質量之燃料,完全燃燒後

表 5. 燃燒熱(〔卡/克〕)

木	1,600 至 3,500
炭	8,050
煤	6,000 至 8,000
酒精	7,100
煤油	11,000 至 13,000

所供給之熱量,稱爲燃燒熱(heat of combustion),可用量熱器測定之。

習題三十二

(1) 試設計一量熱器,以測量炭之燃燒熱。

(2) 在英制中,熱量之單位爲平均英熱單位(mean British thermal unit),簡稱 B.T.U.,係等於使 1〔磅〕之水,其溫度自 32°F 升至 212°F 時,所需之熱量之$\frac{1}{180}$。 問 1 英熱單位等於多少〔卡〕?

(3) 何謂"冷"? 何謂"熱"? 冷熱之分,以何爲標準? 吾人與何種溫度之物體相接觸,因而得熱;與何種溫度之物體相接觸,反而失熱?

(4) 用炭爐煮水,將 4〔升〕15°C 之水煮沸,費炭 340〔克〕。 求炭爐之效率。

(5) 有量熱器內盛 16° C 之水 2450〔克〕,再傾入 125〔克〕之沸水,攪匀後之溫度爲 20°C。求量熱器之當量。

第三十三章

比　　熱

§174. 比熱. 使1〔克〕物體之溫度升高1°C，所需之熱量，稱爲**比熱**(specific heat)．比熱隨物質而異．

從此定義，吾人知一物體之質量爲 M〔克〕，比熱爲 c，則其溫度升高 t°C時，吸收之熱量爲 Mct〔卡〕；反之，此物體之溫度降下 t°C 時，放出之熱量，亦爲 Mct〔卡〕． 至物體之質量與其比熱之相乘積 Mc，則稱爲物體之**熱容量**(heat capacity)，即使此物體升高1°C 所需之熱量也．

§175. 固體與液體比熱之測定 欲求一固體或液體 A 之比熱 c，先稱其質量 M'，加熱至 t'°C.，再以之投入量熱器內筒 D 之水中(圖212)．命 M 爲量熱器內筒中之水之質量，t_1°C 爲其原來之溫度，m 爲量熱器之水當量．以攪桿攪水，待其溫度均勻，量之得 t_2°C．則物體之溫度下降 $(t'-t_2)$度，水之溫度升高(t_2-t_1)度． 物體放出之

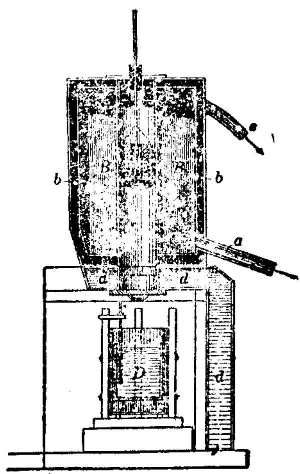


圖212. 固體比熱之測定.

熱量爲 $M'c\ (t'-t_2)$，等於量熱器及水吸入之熱量 $(M+m)\times(t_2-t_1)$，即

$$M'c(t'-t_2)=(M+m)(t_2-t_1),$$

因得

$$c=\frac{(M+m)(t_2-t_1)}{M'(t'-t_2)}.$$

據實測結果，各種常見物質之比熱如下：

表 6. 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
乾土	0.20	水銀	0 033
鐵	0.11	鉛	0.031

§176. 水之比熱. 由上表 6 觀之，無論固體與液體，其比熱常小於 1，而水之比熱則等於 1.

比熱之大如水者，可稱爲稀有之物. 水之熱也，吸收熱量較他物爲多；而其涼也，所費之時間及放出之熱量，亦較他物爲多. 因水有此特性，吾人以之爲暖水袋，爲熱水管等.

對於自然界中之現象，水之特性，有極大之影響. 晝中海洋之水，較大陸不易升高溫度；而至晚上，前者之溫度，亦不如後者之易於降落. 其結果，濱海各地，晝夜溫度相差，非若大陸之甚. 海洋氣候，所以冬溫夏涼者，亦即此故.

習題三十三

(1) 將 56〔克〕之銀塊，熱至 105°C，而投入含有 85〔克〕水之量熱器中，水之溫度即自 11.7°C 升至 14.8°C. 已知量熱器之水當量爲 6.5〔克〕，求銀之比熱。

(2) 欲測火爐之溫度，用重 200〔克〕之鐵球放在爐中最熱部分，數〔分〕鐘後，取出，投入 730〔克〕10°C 之水中，水之溫度升至 40°C. 問爐火之溫度若干？（鐵之比熱爲 0.11〔卡/克〕）。

(3) 若有沸水（212°F）及 45°F 之冷水，欲得 20 加侖 100°F 之浴水，兩種水各需若干？

(4) 將 75〔克〕之銅塊，熱至 85°C 而投入於溫度 18.5°C，質量 456〔克〕之油中，設其混合後之溫度爲 21.5°C，求油之比熱。（已知銅之比熱爲 0.093。）

第三十四章

固 體 之 膨 脹

§177. 固體之長度膨脹. 通常物體熱脹冷縮,間亦有例外者. 脹縮之多寡,各種物質大有不同.

取一棒狀固體而熱之,其溫度升高,同時長度加大. 命 l_0 及 l 各為物體在 $0°$ 及 $t°$ C 時之長,則 $l - l_0$ 之差,為全棒於溫度增高 $t°$ 時之伸長,以原長 l_0 除之,則為每單位長度之膨脹. 單位長度之膨脹,與所升高之溫度成正比,而與長度之本身無關,即

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \alpha t,$$

或

$$l = l_0(1 + \alpha t),$$

式中比例常數 α, 稱為**線脹係數**(coefficient of linear expansion),即每增高 1°C, 每單位長度之伸長也.

【例】 有銅桿在 4°C 長 6〔米〕. 溫度升高至 122°C 時,長度增加 1.2〔厘米〕. 求銅之線脹係數,及此銅桿在 0°C 時之長度.

銅之線脹係數 $\alpha = \dfrac{1.2}{600(122 - 4)} = \dfrac{1.2}{600 \times 118} = 0.000017,$

在 0°C 時銅桿之長 $l_0 = \dfrac{600}{1 + 0.000017 \times 4} = \dfrac{600}{1.000068}$

$= 599.96$〔厘米〕.

茲將數種常見固體之線脹係數列表於下：

表 7. 固體線脹係數

鋁	0.000022	鉑	0.0000089
黃銅	0.000019	鎢	0.000 043
銅	0.000017	耐熱玻璃	0.0000036
鐵	0.000012	瓷	0.0000028
普通玻璃	0.0000095	因鋼(invar)	0.0000009

黃銅之線脹係數爲常用金屬中最大者之一。含鎳之因鋼，其線脹係數僅及黃銅者之 1/20，爲金屬之線脹係數中最小者。

銅，鐵，與玻璃之線脹係數，相差頗大，不能熔接；而鉑與普通玻璃，鎢與耐熱玻璃，甚相接近，故可熔接。

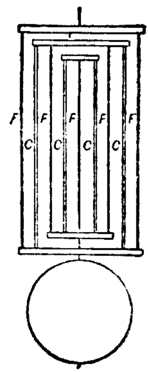


圖 213. 補償擺。

補償擺 各種金屬線脹係數不同，每可互相配合，以作各種應用。例如擺鐘之補償擺，係用兩種不同之金屬棒，如鋼與黃銅，合製而成(圖 213)。鋼棒 F 因溫度增高而伸長，使擺錘下降，但同時黃銅棒 C 伸長，使錘上升。製造時選擇各棒之適當長度，使其升降互消，擺之週期，遂可不隨溫度而變。

§178. 固體之體積膨脹. 物體之溫度升高時，其體積隨之而增大，一如其長度之膨脹然，且兩者之間有一定之關係。每溫度上升 1°C，所增加之體積，與其原體積之比，稱爲**容脹係數**(coefficient of cubical expansion)。

命 β 爲物質之容脹係數，α 爲其線脹係數，零度時之體積爲 v_0，則溫度增加 1 度後之體積爲

$$v_0(1+\beta)=v_0(1+\alpha)^3=v_0(1+3\alpha+3\alpha^2+\alpha^3)$$

吾人須知 α 之值甚微（約爲十萬分之一或二），則 α^2 與 α^3 微之又微，可以略去不計，因得

$$\beta=3\alpha,$$

即物質之容脹係數爲其線脹係數之 3 倍。

一中空之物體，其中空部分容積之膨脹，一如此物體之體積膨脹。例如一玻璃杯，在室溫 15°C 時，容積爲 250〔厘米^3〕．滿注沸水，則其容積爲

$$250[1+3\times0.0000095(100-15)]=250.61\text{〔厘米}^3\text{〕}.$$

物體受熱，體積膨脹，然其質量，始終不變，故其密度與比重，均由溫度之增高而減小。

§179. 阻止熱脹或冷縮所遇之力． 1〔米〕長之鐵棒，自 100° 冷至 0°C，則縮短 1.2〔毫米〕．若將鐵棒之兩端穿孔，裝上螺栓，而螺栓分別固定於一處，則可阻止其收縮．而兩螺栓處將受甚大之收縮力，此即不加熱而將鐵棒拉長 1.2〔毫米〕所需之力也，其大可想而知．此力比例於棒之橫截面之面積，每〔平方厘米〕所遇，約爲 2500〔仟克〕之力．

反之，若將此棒固定於兩柱間以阻止其伸長，則此棒自 0° 熱至 100°C 時，兩柱上所受之力，爲每〔平方厘米〕2500〔仟克〕．

此等絕大之力，在機件製造中，宜加注意；有時設法避免，有時

加以利用，略舉數例如下：

輪箍．鉚釘． 木輪之外緣，往往紮以鐵箍 c（圖 214）．箍常燒熱，使其脹大，方可套入輪周．待其冷後，則因其收縮之力，使輪輻 b 與輪緣 d 及軸承 a 之相連接，益形堅固．

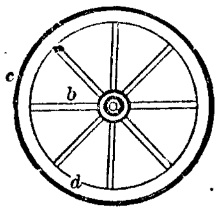


圖 214．輪箍．

圖 215．鉚釘．

同理以鉚釘接合兩金屬物（圖 215），必先以鉚釘燒至紅熱，然後釘之．待其既冷，則鉚釘收縮，使兩金屬物愈加緊接．

屋頂洋鐵皮之釘法． 屋頂之洋鐵皮，只應將其一邊與屋樑釘住，蓋如是，讓其有伸縮之餘地也．倘將其四邊盡行釘住，則在夏日，洋鐵皮有皺起之虞，而至冬日，又有割裂之患矣．

火車鐵軌與車街鐵軌． 火車鐵軌，銜接之處，常留餘隙，以備夏日軌條伸長之餘地．而於街車之鐵軌，則非必要．因其枕木緊埋土中，不能有些許之移動，鐵軌雖因溫度之變化而生伸縮之力，固定之枕木，大可對付裕如也．

厚玻璃杯． 熱之不慎，則易破裂．蓋玻璃對熱爲不良導體，熱之不勻，則突熱之部分，膨脹特甚，而其周圍阻止之，因以破裂．又如煤油燈之玻璃罩，某部驟然遇冷而收縮，遂致破碎．

習題三十四

(1) 一長 50〔呎〕之鋼尺在 20°C 時爲正確者，在 50°C，應長若干？以此鋼尺量黃銅絲，設兩者均在 0°C，得銅絲之長爲 246.8〔呎〕。已知鋼與黃銅之線脹係數各爲 0.000010 及 0.000019，問此銅絲在 20°C 時，實長多少？

(2) 在 20°C 時，一鋼條長 201〔厘米〕，一鋅條長 200〔厘米〕。若熱至 320°C 時，何者較長，長多少？（鋅之線脹係數爲 0.000029）。

(3) 玻璃瓶塞如嵌入過緊時，可將瓶頸置於火上熱之，則栓即易拔出，何故？

(4) 黃銅一塊，在 15°C 時，體積爲 3500〔厘米^3〕。若熱至 128°C，求其體積。

(5) 注熱水於玻璃器內，玻璃厚者易裂，而薄者較爲安全，其故安在？

(6) 玻璃筒在 4°C 時之容積爲 1〔升〕，在 120°C 時爲何？

(7) 將兩種不同之金屬條，如鐵與黃銅，焊合一起，成爲複棒（圖 216），複棒加熱後，即變彎曲，試述其故，並其可能之應用。

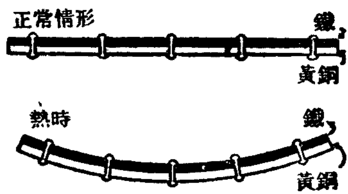


圖 216.

第三十五章

液體之膨脹

§180. 眞實膨脹與皮相膨脹. 燒瓶中盛冷水至頸際 A 處(圖 217),置爐上熱之,則見水面由 A 處逐漸上升至 B 處,A,B 相距,可達若干〔厘米〕,此明示液體受熱膨脹,其體積增大也. 若熄滅爐火,瓶水漸漸冷卻,而水面亦漸漸下降,直至初時之位置而止.

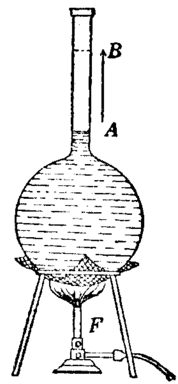


圖 217. 液體之膨脹.

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

圖 218.

將液體盛入圖 218 所示之細頸玻璃瓶內. 命 v_0 表 0°C 瓶內液體之體積, A 表其頂點. 假令溫度升高至 t°C, 如僅論玻璃之膨脹,因容器之容積增加,其結果當使瓶內液頂降下至 C. 即容積 AC,表玻璃瓶容量,對於 t°C 之增量. 命 β_g 表玻璃之容脹係數,則容積 AC 應等於 $v_0\beta_g t$.

事實上,溫度升高,瓶內之液體亦隨之膨脹. 再命 β_l 表液體之容脹係數,通常液體膨脹較固體爲大,即 β_l 之值大於 β_g,故實

際上瓶內液體之頂點常在 A 之上端，如 B。 卽容積 BC 爲液體對於 t°C 之膨脹，而等於 $v_0\beta_l t$。

但吾人所目見者，僅爲原在 A 之液頂，膨脹後升高至 B 而已。故以 v_0t 除此可見之膨脹 AB，稱爲**皮相膨脹係數**(apparent coefficient of expansion)，以 β_{lg} 表之。與此相對，以 v_0t 除液體單獨的(其實，是眞正的)膨脹 CB，則曰**眞實膨脹係數**，卽 β_l 也。

由上述之二定義，可以立卽證明

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

換言之，皮相膨脹係數，等於眞實膨脹係數，減去容器物質之容脹係數。

液體之膨脹係數(見表 8)，皆指其眞實膨脹係數而言。 除水與水銀略小外，溫度每升高 1°C，液體之膨脹約爲其原體積之 $\frac{1}{1000}$ 上下。液體之愈富揮發性者，膨脹愈甚。

表 8. 液體之膨脹係數

水(15°C 至 100°C 之平均值)	0.00037
水銀	0.00018
硫酸	0.00057
酒精	0.00112
二硫化碳	0.00121
醚	0.00163

玻璃之容脹係數，約爲 0.00003，與普通液體相去甚遠。如不爲極精確之測量時，玻璃容器之膨脹恆可略去不計，卽將液體之皮相膨脹與眞實膨脹，不加區別，亦無大誤。 例如酒精溫度計

之皮相膨脹係數為 0.00109，而酒精之眞實膨脹係數為 0.00112 也。

§181. **在各溫度中液體之密度。** 一液體之溫度自 0°C 升至 t°C 時，其體積 v_0 膨脹而成 $v_0(1+\beta t)$，但其質量則絲毫無變也。

命 d 與 d_0 表液體在 t°C 與 0°C 時之密度，則有

$$v_0 d_0 = v_0(1+\beta t)d,$$

得

$$d = \frac{d_0}{1+\beta t}$$

【例】 測得水銀在 0°C 時之密度 $d_0 = 13.6$〔克/厘米^3〕，又測得其容脹係數 $\beta = 0.00018$，則

水銀在 100°C 時之密度 $d_{100} = \dfrac{13.6}{1+0.00018\times 100} = 13.36$，

水銀在 200°C 時之密度 $d_{200} = \dfrac{13.6}{1+0.00018\times 200} = 13.15$。

氣壓計之溫度的改正 水銀之密度，既隨溫度而不同，則兩地之氣壓計(§96)所指示之水銀柱高，有時雖相同，而其氣壓則未必相等，要視當時兩地之溫度是否相同也。故由氣壓計所讀得之水銀柱高，恆須加以溫度的改正；氣壓計上常附一小溫度計，即為此用。

今有氣壓計在溫度 t°C 時，水銀柱高 H。則在此氣壓下，若溫度為 0°C，水銀柱之高當為 H_0。由下式決定：

$$H_0 d_0 = Hd \quad 即 \quad H_0 = H \times \frac{d}{d_0}$$

但
$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{1+\beta t},$$

於是
$$H_0 = \frac{H}{1+\beta t},$$

吾人將各地同時間不一定同溫度之氣壓 H，一律依上式改為 H_0 後，方可比較其高低。

§182. 水之反常膨脹. 水之膨脹，頗為奇特。其密度在 4°C 時為最大。換言之，在 4°C 之下，水之體積反因溫度之升高而縮小；在 4°C 以上，始隨溫度之增加而脹大。

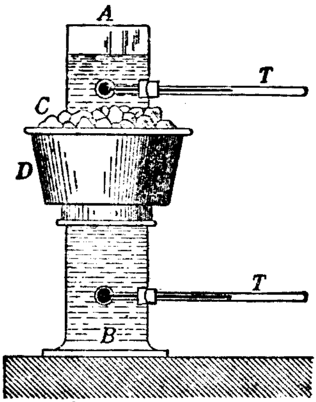


圖 219. 水之反常膨脹實驗。

水之反常膨脹性，可用如圖 219 所示之儀器表現之。貯水（約 15° C）於圓筒 AB 中，而在筒外中部圍以冰鹽冷劑。於筒之上部及下部，各插水銀溫度計 T。上下兩溫度計之溫度，均行下降，而下一溫度計下降尤速，當其達 4°C 之時，上一溫度計尚在 6°, 7°C 之間。下一溫度計到達 4°C 後，即行停止下降；而上一溫度計之下降，則又加快，直至於 0°C，此時筒之上部及中部之水，開始凝結為冰；而下一溫度計，又再繼續

下降。

此一實驗，乃示水之溫度初為 15°C，上中部之水為冰塊所冷卻後，密度增大而下沈，故下冷而上溫。直至下部之水降至 4°C 時，密度最大，上部之水不復下沈，繼續冷卻以至於 4°C。過此，密度轉小，上部之水，再行冷卻，亦不復能下沈；於是下部之水得保留其為 4°C，而上部之水先達 0°C，開始結冰。

1〔克〕之水，在 0°C 與 20°C 間，體積之變更，有如圖 220 中曲線所示。在 4°C 時，體積最小，為 1〔立方厘米〕，此即'克'單位之原始定義也。

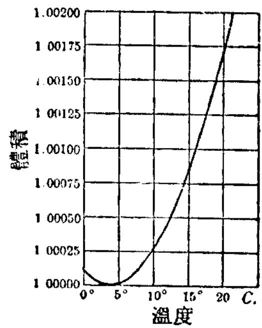


圖 220.　水之反常膨脹.

在自然界中，水之反常膨脹，頗關重要。冬季湖沼之水，因上面接觸於寒冷空氣而冷卻，其表面之水因之較重而下沈，下層之水隨之上升，以成對流作用。因此，湖中之水，溫度頗為均勻。待全部之水漸次冷卻，其溫度降至 4°C 時，則對流之作用停止。表面之水，雖更行冷卻，但其體積反行膨脹，不復再能下沈，溫度續降，即凝為冰，被蓋湖面。冰下深處之水，溫度極難降至 4°C 以下，水族動物，因此而幸得終歲生存。

習題三十五

(1) 由圖 220 水之膨脹曲線，求水在 0°，4°，10°，及 20°C 時之密度。

(2) 二箱 A 及 B，各充滿 4°C 及 0°C 之水，上下有管連通，各具活門，

以司啓閉。(*a*)若活門同時開啓，水將如何流動，試解釋之。(*b*)若 *A* 中之水爲 50°C, *B* 中之水爲 90°C, 則流動之方向若何?

(3) 一 10〔加侖〕之大玻璃瓶，在 30°C 時裝滿酒精，放在 5°C 之地窖中。問有若干〔夸脫〕之酒精，似乎不見?

(4) 有金屬塊在水銀或某液體中之浮力如下:

在水銀中　　0°C 時爲 27.2〔克〕;　80°C 時爲 26.88〔克〕;

在某液體中　0°C 時爲　2　〔克〕;　80°C 時爲　1.86〔克〕。

求(*a*)此金屬及(*b*)液體之膨脹係數。(水銀之膨脹係數爲 0.00018)

(5) 溫度爲 32°C 時，由氣壓計測得某處之大氣壓力，爲 764.8〔毫米〕水銀柱高，問當時之大氣壓力爲多少〔克/平方厘米〕?

(6) 某容器適容 0°C 之水銀 1360〔克〕，但至 100°C 時，僅容 1338〔克〕。(*a*)求此容器之容脹係數。(*b*)容器熱至 50°C 時，水銀溢出若干? (*c*)水銀溢出 15〔克〕時，容器與水銀之溫度若何?

第三十六章

氣體受熱後體積與壓力之增加

§183. 氣體之膨脹. 固體與液體受熱而膨脹,其壓力變化甚小,吾人可不加以注意,一切實驗同在大氣壓力下行之,卽可。氣體則不然,氣體必須密閉於容器中,溫度升降時,不但其體積變更,卽其壓力亦可隨之有甚大之增減。

如第三章圖 10 所述之實驗中,加熱,使瓶內空氣之溫度增高,則左管支 b 之水面下降,而右管支 c 之水面上升,可見空氣體積之增加。不特此也,空氣之壓力,亦同時增加,所增加者爲左右兩管支水柱高度之差。

故氣體受熱時,宜分别使其壓力不變,而研究其體積之脹大,或使其體積不變,而研究其壓力之增加,卽所謂等壓變化與等容變化是也。

184. 給呂薩克定律. 吾人先在一定不變之壓力下,研究氣體體積與其溫度之關係,卽所以測定其膨脹係數。

貯氣體於 G 瓶內(圖 221),置入水槽 E 中。當其受熱而膨脹也,A 管內之水銀柱被擠下降,而 B 管內之水銀柱則被迫上升。如是 G 內氣體之壓力,將隨 A,B 兩管中水銀柱高度之不同而有變更;爲欲保持氣體之壓力一定而不變,乃開放活門 R,

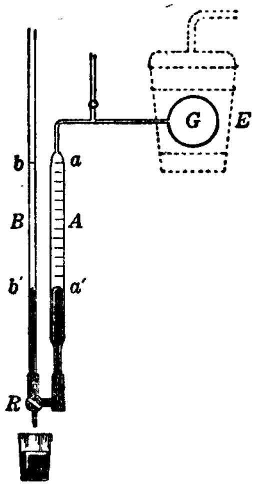


圖 221. 氣體之等壓膨脹.

讓水銀流出一部分,至 A 與 B 兩管中之水銀柱高度相同而止. 此時 A 管中與 G 瓶內之氣壓,恆等於 B 管上端之大氣壓力,而 G 內氣體體積之增量,可由 A 管中水銀柱降低之多少讀出.

由此種實驗,吾人知各種氣體在一定壓力下,體積之增量,恆與其溫度之增量成正比,溫度每升高 1°C, 體積卽隨之增加其在 0°C 時者之 $\frac{1}{273.2}$, 是爲**給呂薩克定律** (Gay-Lussac's law),卽

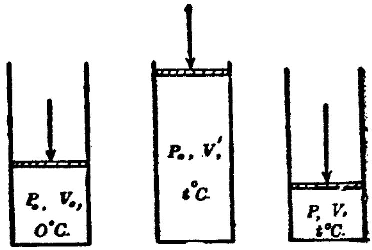
$$V = V_0\left(1 + \frac{t}{273.2}\right)$$

所謂各種氣體,無論其爲空氣,氧,氮,氫,氦等,其膨脹係數莫不等於 $\frac{1}{273.2}$. 此與液體之膨脹係數因物而異者,截然不同.

§185. 氣體方程式. 溫度不變時,氣體之壓力與其體積之關係,有波義耳定律(§102);壓力不變時,氣體之體積與其溫度之關係,又有給呂薩克定律. 一定質量之氣體,當其壓力與溫度同時變化時,可由波義耳及給呂薩克兩定律,而求其體積.

有氣體於此(圖 222),在溫度 0°C,壓力 P_0 下,體積爲 V_0;若溫度變爲 t°C,壓力變爲 P,則其體積將若何?

先於此兩狀態(a)及(c)之間，假設有一過渡狀態，如(b)，壓力仍爲 P_0，僅溫度由 $0°$ 變成 $t°C$，體積因之由 V_0 變成 V'. 此時，依給呂薩克定律，得



(a)　(b)　(c)

圖 222.

$$V' = V_0\left(1 + \frac{t}{273.2}\right)$$

其次，再論由(b)變至(c)，卽溫度不變，僅壓力由 P_0 變成 P，體積隨之由 V' 變成 V. 此時，依波義耳定律，得

$$P_0V' = PV \qquad P_0 : P = V : V'$$

將上二式合併，得

$$PV = P_0V_0\left(1 + \frac{t}{273.2}\right),$$

卽

$$\frac{PV}{1 + \frac{t}{273.2}} = P_0V_0 = \text{常數}.$$

故已知一定質量之氣體，在 $0°C$ 之體積與壓力後，則在任何狀況時，其溫度，體積，壓力三者之中，能知其二，卽可由上式求其餘之第三者.

上一公式，係集合氣體膨脹與氣體壓縮之兩定律而來. 其所代表，實爲氣體性質之全部，稱爲**氣體方程式**(gas equation).

§186. 查理定律. 由氣體方程式觀之，保持氣體之體積不變，卽 $V = V_0$ 時，得

$$P = P_0\left(1 + \frac{t}{273.2}\right)$$

換言之，每溫度升高 1°C，壓力之增量等於其在 0°C 時之壓力之 $\frac{1}{273.2}$，是爲**查理定律**(Charles' law)。 各種氣體，如空氣，氧，氮，氫，氦等，莫不皆然。此 $\frac{1}{273.2}$ 之壓力係數，又適與氣體之膨脹係數同值。一般氣體之性質，眞是簡單之極！

氣體之變化，完全遵循氣體方程式者，曰**理想氣體**(perfect gas)。氣體，如空氣，氧，氮等，離理想氣體之情形不遠，而尤以氫爲然；至較複雜之氣體，且易於液化者，如氨與二氧化碳等，則與理想氣體頗有出入。

【例 1】　某定質量之氣體，在 20°C 時，體積爲 345〔厘米³〕。 問在壓力不變之狀况下，熱至 35°C 時，其體積爲何？

$$V = 345\left(1 + \frac{35 - 20}{273.2}\right) = 345\left(1 + \frac{15}{273.2}\right) = 345 \times 1.055$$

$$= 364\ [\text{厘米}^3].$$

【例 2】　炸藥 500〔克〕，燃燒後所生之氣體，在 0°C 時之體積爲 250〔升〕，壓力爲 1〔仟克/厘米²〕。若以同量之炸藥，閉於 1〔升〕之容器中，而燃燒之，則達 1100°C，求其壓力。

由氣體方程式，有

$$P = P_0V_0 \times \frac{1 + \frac{t}{273.2}}{V} = 1 \times 250 \times \frac{1 + \frac{1100}{273.2}}{1}$$

$$= 250(1 + 4.026) = 1256\ [\text{仟克/厘米}^2].$$

壓力如此之大，難怪爆炸！

§187. 絕對溫度. 由 $P = P_0\left(1 + \frac{t}{273.2}\right)$ 之一式觀之，可知溫度降至冰點之下 $273°.2$ C 時，氣體將毫無壓力之可言. 此特別之溫度，稱為**絕對零度**(absolute zero). 絕對零度，為一極限點. 各種氣體，在其溫度降至此點之前，均將液化；故在實際上，所有氣體悉不能達到絕對零度.

以絕對零度為起點而計算之溫度，稱為**絕對溫度**(absolute temperature). 通常用 °K 表絕對溫度〔度〕數，以別於攝氏溫度〔度〕數之 °C. 若以 T 與 t 各表絕對溫度與攝氏溫度之數值，則有

$$T = t + 273°.2$$

於是氣體方程式可書為

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0V_0}{T_0} = \text{常數} \qquad (T_0 = 273.2°\text{K})$$

(1) 故在壓力不變時，氣體之體積，與其絕對溫度成正比；(2) 體積不變時，氣體之壓力與其絕對溫度成正比；(3) 溫度不變時，氣體之壓力與體積，互成反比.

§188. 氣體之密度. 依定義，氣體之密度為其單位體積之質量，與固體或液體同. 但氣體之體積，隨溫度及壓力而變. 若將(1)一氣體之壓力加倍，而不變其溫度，則其體積縮小一半，而氣體之質量始終未改，故其密度增大一倍. 同理，若將一氣體(2)之溫度由 0°C 增至 273.2C，而不變其壓力，則體積加倍，而密度減半. 是故一氣體之密度，至不一定. 為確定計，言氣體密度

時，必須附帶說明其溫度與壓力；否則，毫無意義.

因此之故，吾人恆言在溫度 0°C，壓力 76〔厘米〕水銀柱下之氣體，爲在標準狀況下之氣體. 在標準狀況下，氣體之密度，乃爲確定之值.

氣體密度對於空氣密度之比. 各種氣體之壓力，體積，溫度三者之間之關係，一律相同；因之，任何兩氣體，在同溫度同壓力下，其密度之比，乃爲一定不易. 例如在標準狀況下，取氯與空氣而比較之.

1〔升〕氯氣之質量爲 3.22〔克〕，

1〔升〕空氣之質量爲 1.29〔克〕，

兩者密度之比爲 2.49. 若將此二種氣體之壓力各增加 1〔大氣壓〕，則其體積同爲縮小一半，兩者密度之比，仍爲 2.49. 又若將此二種氣體同升至某溫度，結果亦復不改，因兩者之膨脹係數相同也.

此 2.49 之值，爲氯氣對於空氣之比重. 氣體之比重，皆對於空氣而言，見表 9. 氣體比重之測定，較爲簡單. 祇須用

表 9. 氣體之比重及密度

	密度（在標準狀況下）	比重（對於空氣）
空氣	0.001293	1
氫	0.000089	0.069
氧	0.001430	1.105
氮	0.001256	0.971
二氧化碳	0.001977	1.529
氯	0.003219	2.49

同一之容器，在相同之任何狀況下(卽壓力相同，溫度相同)，先後將空氣與此氣體分別稱之，卽得。

空氣密度之測定. 欲測定空氣在標準狀況下之密度，祇須在§19所述，稱空氣之實驗中，裝入空氣之動作，在76〔厘米〕水銀柱高之大氣壓力下，於冰水中行之。

實測之結果，爲

空氣之密度 = 0.001293〔克/厘米^3〕

既知空氣之密度，以之與任何氣體之比重相乘，卽得此氣體之密度 d。

氣體質量之計算. 某氣體已知其對於空氣之比重爲 s. 在溫度 t°C，壓力 h〔厘米〕水銀柱高下，其體積爲 V. 求此氣體之質量 m.

此氣體在標準狀況下之體積，將爲

$$V_0 = V \times \frac{h}{76} \times \frac{1}{1 + \frac{t}{273.2}}$$

而
$$m = V_0 d$$

又
$$s = \frac{d}{0.001293}$$

從此三式，得

$$m = dV \cdot \frac{h}{76} \cdot \frac{1}{1 + \frac{t}{273.2}} = V \cdot \frac{h}{76} \cdot \frac{0.001293 \times s}{1 + \frac{t}{273.2}}$$

習題三十六

(1) 氣體之體積,溫度,壓力三者,能否同時加倍之。

(2) 加熱於一定質量之氣體,使其體積加倍,同時壓力加倍,則其絕對溫度增加多少?

(3) 一裝氧氣之筒,有 1.5〔立方呎〕之容積,若在 18°C 時充滿氧氣,其壓力爲 1200〔磅/吋^2〕。使用時之溫度爲 27°C,則開放活門後可膨脹至若干〔立方呎〕?

(4) 在標準狀况下之空氣密度爲 1.293〔克/升〕,求在壓力 50〔厘米〕水銀柱高及 50°C 時之密度。

(5) 一汽車胎在 17°C 時打入空氣,氣壓達 50〔磅/吋^2〕。在熱天行駛後,胎內溫度達 25°C,若胎不能伸脹,將有壓力若干? 若胎之壓力不能超過 60〔磅/吋^2〕,則升高至何溫度時,胎將破裂?

(6) 若壓力不變,在 20°C 時將 200〔立方米〕之氧,加熱使成 250〔立方米〕,求其溫度。

(7) 一鋼筒充滿 15°C 及大氣壓力下之空氣,封閉之。放入爐中,則其壓力爲 2.54〔大氣壓〕,求爐之溫度。若爐之溫度可達 1000°C,則筒內之氣壓,將爲若干?

(8) 在 1〔大氣壓〕力下 21°C 之空氣 2〔立方米〕,將其壓入筒內,氣體之壓力達 150〔厘米〕水銀柱高,同時溫度升至 40°C,求筒之體積。

(9) 有由深 16〔米〕之池底浮出氣泡,設池底之溫度爲 4°C,水面溫度爲 10°C 時,求氣泡體積在達水面與在池底時之比。

(10) 某容器內之空氣,重 5〔克〕,原爲大氣被封閉者,將容器連接於抽氣筒上而抽去空氣。當其氣壓爲 8〔毫米〕水銀柱高時,問器內剩餘之空氣多少?

(11) 有輕氣球,在 12°C 及壓力 620〔毫米〕水銀柱高下,體積爲 180〔立方米〕。已知氫對於空氣之比重爲 0.069,求球內氫之質量。

第三十七章

熱之傳遞

熱由一處傳遞於他處,其法有三:傳導,對流,輻射,是也. 此三種方法,每多同時進行,或其中之一特別顯著,則視實際之情形而定.

§189. **傳導.** 一物體各部分之溫度,如有不同,則熱經由物質次第傳遞,從高溫部分移至低溫部分,直至全部溫度均勻,始行停止. 同樣,如有溫度不同之兩物體,互相接觸,則熱由溫度較高之物體傳至溫度較低之物體,待兩者之溫度相等而後止. 此種傳熱方法,為吾人所最常見者,稱為**傳導**(conduction).

物質對於熱之傳導,難易大有不同. 易於導熱之物質,謂之**良導體**;不易導熱之物質,謂之**不良導體**. 通常金屬等物為良導體;木材,棉,絹,毛及液體與氣體,皆為不良導體. 導體中以銀為最佳,銅次之,鐵又次之. 不良導體中,以氣體為最著. 棉襖,皮袍之所以為禦寒善品者,亦以其包藏多量之空氣故也.

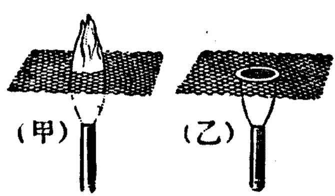


圖 223.

置銅絲網於本生燈口,在其上以火柴點之,則燄僅生於網之上部者(圖 223 甲),以銅絲網爲良導體,一受熱量,即導之於其他部分,使網之下面煤氣之溫度不能達於燃點故也. 同理,若在網下點火,則燄不生於網之上面(圖 223 乙). 故以銅絲網包圍火燄,則燄限於網內,煤坑中所用之**安全燈**(圖 224),即本此理製成. 安全燈之下部,被以玻璃圓筒,而於其上罩一圓筒形銅絲網,即使有爆發性之氣體進入網內而發火時,其火燄亦不致延燒至網之外部,以燃着網外之可燃氣,因可免去爆炸之患,而成安全之燈.

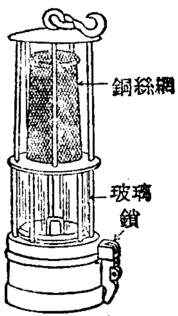


圖224.　安全燈.

雖在同一溫度 —— 例如室內溫度 —— 中之物體,吾人每覺其冷熱不一,蓋導熱程度之有良否,以及比熱之有大小,實爲其原因焉. 物體之導熱愈佳,且比熱之值愈大者,其由吾人與之接觸而較暖之皮膚上,每〔秒〕鐘奪去之熱量亦愈多,因之皮膚冷卻愈快. 故同爲室內溫度,金屬似冷,棉絮似暖;若溫度較高於皮膚,則感覺適得其反. 百〔度〕之棉絮尙能握於手中,而百〔度〕之鐵塊則炙手 不堪須臾忍受. 欲賴人體之感覺,以作溫度之數量測定,其不足爲準也明矣,此又其一端耳.

§190. 對流.　流體爲不良導體,已如上述,但其中一部分受熱,則起膨脹,密度減小,向上升起,其他部分冷而密度大者移來補充,再受熱又移向上方. 如此交相代替,將熱帶走,是爲對

流(convection)。

水與空氣之對流,爲吾人所熟知者;水之煮沸,烟囱之通風(圖 225),皆對流之實例。 瓶中盛水,置於火上熱之(圖 226),若水中雜以少許細木屑,即可顯出水之對流情形。 瓶底近火之水,受熱膨脹而上升,其他部分冷而密度大者下沈,移來補充,遂成對流,終致全部之水,達於沸騰。

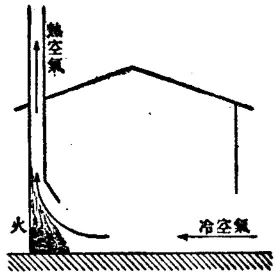


圖 225. 煙囱之通風.

竈內用盤曲管以熱多量之水,即應用水之對流現象裝置而成,如圖 227 所示。

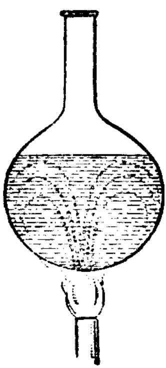


圖 226. 水藉對流而煮沸。

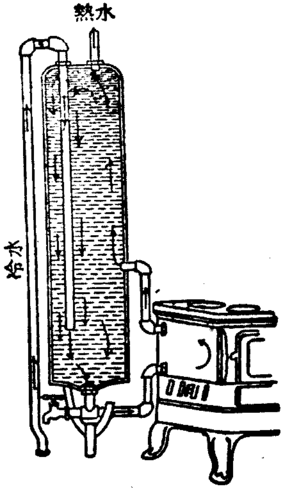


圖 227. 盤曲管與熱水箱之裝置。

冬日爐火溫室，亦賴空氣之對流作用．爐之周圍與爐接觸之空氣，由傳導而得熱，即起對流以散播熱量於全室(圖 228)．

大氣中，空氣之對流而成風；海洋中，水之對流而成寒流與熱流，乃對流之大規模者．

人類之衣服，禽獸之羽毛，皆用以保持體溫者，考其所以能禦寒之故，皆因此等物質足以阻止貼膚空氣之對流，至於其爲非良導體，尙爲次要之原因也．

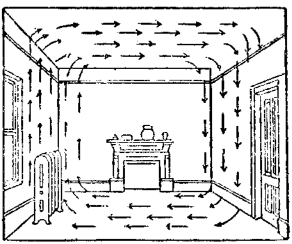


圖 228. 室中空氣之對流．

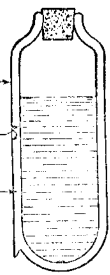


圖 229. 保溫瓶．

熱之傳導與對流，皆賴物質，故在眞空中即不能發生． 基於此理，保溫瓶 (圖 229，俗稱熱水瓶)之雙層玻璃圍壁間，成抽去空氣，可保溫亦可保冷． 內部之熱，勿使散失，是保溫也；外部之熱，勿使傳入，是保冷也．

§191. 輻射． 熱體附近雖無物質，亦恆能散播熱量於其四周，此種傳熱現象，顯非傳導與對流所致． 例如太陽與地球之間，有一部分之極大距離，毫無物質存在，足以傳導熱量或發生對流作用，而地球面上全部之熱量，可謂來自太陽． 此種超越

眞空而傳遞熱量之現象，稱爲輻射(radiation)。

熱體每單位時間內輻射之熱量，視其本身之溫度而定。溫度高者輻射熱量多，低者輻射熱量小。在地面上，每〔平方厘米〕受自太陽輻射而來之熱量，約爲每〔分〕鐘2〔卡〕，此就黑色物體之面正對太陽而言。黑色物體吸收熱量之本領，較之白色者爲强。

一切物體，包括吾人身體在內，都在不斷輻射熱量中，此事似屬奇怪。曝於日光中之物體，雖不斷吸收太陽輻射之熱，而其溫度終不能繼續增高，漫無止境，此或由於傳導對流作用，同時散失熱量之故。但置物體於眞空之玻璃罩中，亦復如是，當非傳導對流所致，實以物體亦在輻射也。物體輻射而出之熱量，隨其溫度升高而加大，至每〔秒〕鐘射出之熱量，等於吸入之熱量時，溫度不再增高，而成平衡。在平衡溫度中，物體仍不停止其輻射作用。

白色物體輻射熱量，較之同溫度之黑色物體所輻射者爲小。保溫瓶之內外壁鍍銀，即所以減小其輻射與吸熱作用也。煮水之洋鐵壺，底部燻黑，易於吸熱，側壁能保持光潔，則輻射減小，亦節省燃料之一道也。

習題三十七

(1) 冬季熱由屋中逸出，暑天則由屋外侵入，有何三法？

(2) 建築房屋，使其冬溫而夏涼，應行注意之點，試列舉之。

(3) 冰淇淋桶中之筒用金屬，外面則用木桶，何故？

(4) 皮衣內穿較反穿爲暖，何故？

(5) 電風扇扇來之空氣，溫度是否與室內靜止空氣相同？何以覺其涼快？

(6) 無風之時，如何使煙囪內之煙洩出？

(7) 一平常通煙甚佳之爐，在引火時發煙甚盛，試解釋之。

(8) 熱水瓶漏氣之後，保溫功用大減，何故？

(9) 尋常屋中火爐之煙囪高 10〔米〕，截面積爲 100〔厘米^2〕，囪內氣體之平均溫度爲 260°C，囪外空氣之溫度爲 0°C，問囪外同體積之空氣，較囪內者重多少？

(10) 通常說，煙囪中之煙直升則天晴，此說有無科學根據？

(11) 冬天將棉被曬於太陽光下後，應用時比較溫暖，試言其理。

(12) 塗黑之圓面，半徑 5〔厘米〕，正對太陽光間，每〔秒〕鐘吸收熱量多少？若圓面本身不行輻射，則其溫度將每〔分〕鐘升高多少？已知其熱容量爲 80〔卡/度〕。

(13) 煮水放在爐火之上，冷藏食物放在冰塊之下，是何緣故？

(14) 有經驗的主婦，常先把金屬茶匙放在玻璃茶杯之內，然後再冲沸水，如是可以減少爆裂機會，試言其理。

第三十八章

熔解與凝固

§192. **熔解與凝固.** 加熱於固體使其溫度逐漸升高,至某一時期,則見其成為液體狀態,是為**熔解**(fusion or melting).將此液體冷卻,則又復行凝結,而成固體,是為**凝固**(solidification).

試驗管 A 中置萘少許,及溫度計 T(圖230),裝於較大之玻璃管 B 内,以火在 B 下徐徐熱之.兩管間之空氣,所以使 A 管溫度升高,不致過驟者也.

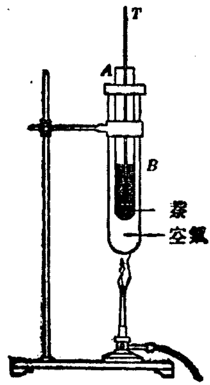


圖 230.

時時注意溫度計 T,須其溫度上升甚緩.達 80°C 時,管中之萘開始熔解.自此以後,若吾人時時攪動溫度計,使液體與固體相混合,則見其溫度停於 80°C 而不動;直至全部固體俱熔解成液體,溫度方又徐徐上升.

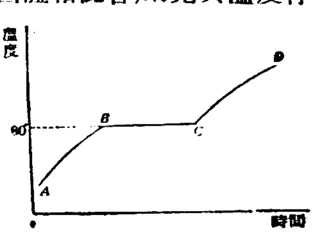


圖 231.

圖 231 卽表示此種現象,以橫坐標代表自實驗開始後之時間,縱坐標代表 A 管之溫度.當熔解開始後,至完全熔解止,其間溫度停止上升之一段情形,卽由水

平線段 BC 表之。

若重作此實驗，熱之較速，則 BC 線段之長度減短，但其離橫坐標軸之高度，仍為 80°C。

滅火，讓 A 管中之萘徐徐冷卻，則恰見上述現象，反演一次。凝固之現象，開始於液體之溫度降至 80° C 時，而自此以後，溫度停留不變，直至凝固全部完成，方又繼續下降。

吾人所可注意者，一物質熔解與凝固，所在之溫度為相同，是也。

§193. 熔點. 一物質在一定之溫度，開始熔解或凝固；正在熔解或凝固進行時，此溫度保持不變，稱為**熔點**（melting point），或**凝固點**（solidifying point）。

近 230°C，錫始熔解與凝固；鉛則須高於 300°C。至於鐵，則需更高之溫度。熔解鑄鐵之爐，則溫度須達 1000° C 以上。鉑達 1775°C 始熔；熔鉑之法，用氫氧吹管之火燄，即其一也。

鎂，石灰，碳等為最難熔解之物，須用電爐以熔之。

反之，若干液體，須至甚低之溫度，方能凝固：水銀近 −40°C 始行凝固；酒精則須低於 −100°C。

§194. 水與冰. 水至 0°C 而凝結成冰，冰亦至 0°C 而熔解成水。在 0°C 以上，則冰不能存在；在 0°C 以下，則水不能復見。於是水與冰互相混合而並存時，其為 0°C 無疑，此冰與水之混合物之所以常用於實驗中也。

若加熱於此混合物，冰則熔解；但冰尙未熔盡之前，混合物之溫度仍為 0°C. 又若以 0°C 下之冷劑，包圍此混合物，使之冷卻，則見水漸凝固；但水尙未全部凝固為冰之前，混合物之溫度仍在 0°C.

總之，在 0°C 時：

(1) 冰能變為水；

(2) 水能變為冰；

(3) 水與冰能同時並存，互相平衡而不變化.

0°C 為此三事合在一體之唯一溫度.

§195. **熔解時體積之變更.** 通常固體於熔解時，體積概行膨脹；而液體於凝固時，則概行收縮；故固體常沈於熔解液之下方. 惟冰則不然，常浮於水面而不下沈，可知為上述通性之例外. 冰熔解時，體積收縮；水凝固時，體積膨脹. 水結成冰，體積約增 9%. 冬日花瓶，水管(圖 232)，往往自行破裂，即為水在凍結時體積增大所致.

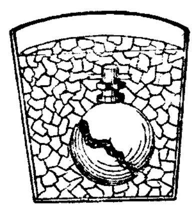


圖 232. 凍破.

巖石細罅中，不免有水浸入，遇冷凍結，體積驟脹，巖石因生裂紋，迨春回大地，日暖冰融，年復一年，而巖石崩解矣，因有天凍地裂之語. 草木每因凍冰而遭殃. 幼芽嫩葉，往往因其水分之結冰，而致折損.

金屬中如鉍，銻，銀，及鑄鐵，凝固時，體積亦反增大. 作鑄模

之金屬品,宜其於凝固時具有膨脹之特性,方能緊壓模樣,而將花紋精細顯出。故印鑄局多用鉛,銻,與銅之合金,以爲鑄模。

§196. 壓力對於熔點之影響. 物體之體積於熔解時膨脹者,若增加壓力,則熔點因之升高,縮小者反是,壓力增而熔點降。

例如石蠟之熔點,在 1〔大氣壓〕下爲 46.3°C,而在 100〔大氣壓〕下,則升高爲 49.9°C;冰之熔點在 1〔大氣壓〕下爲 0°C,而在 10〔大氣壓〕下,降至 −7.4°C,等是。

此等結果,不難解釋。加壓力於物體,有使其減小體積之傾向,此與加熱使冰熔解或降低溫度使石蠟凝固,有同一之旨趣。故冰之熔點與石蠟之凝點,不得不降低及升高各若干〔度〕,以抵消此影響,而保持平衡之狀態也。

冰之熔點因壓力增大而下降之現象,可以鐵絲繞一冰塊,下懸重物,以顯示之(圖 233)。雖在零〔度〕以下,鐵絲亦能逐漸陷入冰塊之中,宛如刀割,此由冰塊與鐵絲接觸之處,所受之壓力甚大,熔點降低,遂行熔化故也。但熔解之水掛在鐵絲上者,又復結冰。又鐵絲過處溝痕中之水,一因壓力解除,恢復其 0°C 之凝點,二因被下部受壓力正在熔解之冰,吸去熱量,以是再行凍結。故鐵絲將穿過冰塊下墮,而冰塊完整如故。

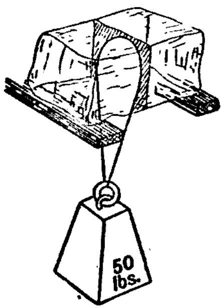


圖 233. 穿過冰塊之鐵絲.

冰河之成因,亦同此理。高山之巔,積雪甚厚,其底部所受之

壓力甚大；是處之雪，隨之熔解成水，由積雪之罅隙上升；待達於壓力較小處，復行結冰。經若干時間後，形成龐大之冰塊。冰塊底部受上層重量之壓力而熔解，卽沿山腹之斜面徐徐下滑，遂成冰河。

§197. **熔解熱.** 加熱於漸次熔解之固體，其溫度停留於熔點而不上升者，因所加之熱量，全用以抗勝固體分子互相結合之力，使成液體也。

在熔點時，熔解1〔克〕之固體，成爲液體，而不變其溫度，所需之熱量，稱爲**熔解熱**，或**熔解潛熱**(latent heat of fusion)。故欲熔解固體時，非僅加熱使其達到熔點卽爲已足，尙須繼續供給其所需之熔解熱，方能全部熔解。

又液體正當凝固時，雖不斷放熱，而其溫度並不立見下降者，因須將以前熔解時所吸收之熱量盡行吐出故也。凝固1〔克〕液體所放出之熱量，稱爲**凝固熱**。

同一物質之凝固熱與熔解熱相等。熔解熱或凝固熱，可用量熱器測定之。

表10. 熔解溫度(°C)及熔解熱(〔卡/克〕)

物質	熔解溫度	熔解熱	物質	熔解溫度	熔解熱
水銀	−38.8	2.8	銀	960	26
冰	0	80	金	1060	16
錫	232	14.6	銅	1083	42
鉛	327	5.9	鉑	1775	27
鋅	419	26	鎢	3380	

【例 1】　有 $-3°C$ 之冰 25〔克〕，投入量熱器之水 200〔克〕中而熔解之。量熱器之原來溫度爲 30°C，最後爲 17.6°C．　求冰之熔解熱。

已知冰之比熱爲 0.50，又命 L 爲冰之熔解熱，則

冰由 $-3°C$ 升至 $0°C$ 時，吸入之熱量 $= 25 \times 0.5 \times 3$,

在 $0°C$，冰熔解時吸入之熱量 $= 25L$,

冰熔解成水後，自 $0°C$ 升至 $17.6°C$ 吸入之熱量 $= 25 \times 1 \times 17.6$,

量熱器中之水，由 30° 降至 17.6°C 放出之熱量 $= 200(30 - 17.6)$

若量熱器本身放出之熱量（即其水當量）甚小，可以略去不計，則上列吸入之熱與放出之熱兩者相等，即：

$$25 \times 0.5 \times 3 + 25L + 25 \times 17.6 = 200\,(30 - 17.6),$$

得

$$L = 8 \times 12.4 - 1.5 - 17.6 = 80 \text{〔卡〕}.$$

【例 2】　在地球之兩極，每〔平方厘米〕每〔年〕受自太陽之熱量平均爲 75,000〔卡〕。　問此熱量能熔解多少厚之冰？

設 x 爲所求之厚度，則在地面上面積 1〔平方厘米〕之冰之體積爲 $1 \times x$〔立方厘米〕．冰之密度爲 0.92，故其質量當爲 $x \times 0.92$〔克〕。　欲使如許之冰熔解，需熱 $x \times 0.92 \times 80$〔卡〕，因冰之熔解熱爲 80〔卡〕也。於是依題言，得

$$x \times 0.92 \times 80 = 75000,$$

即

$$x = 1020 \text{〔厘米〕},$$

約爲 10〔米〕厚之冰。

由此例題，可明大山巔上積雪之終年難消也。

§198. 起寒劑．　糖入水中則消逝而成勻和之糖水，吾人謂："**糖溶化**（或**溶解** dissolve）**於水**"。溶化之現象與熔解之現象，爲判然不同之兩事。　但固體溶化於液體中，尋常亦須吸收熱

量；此熱量卽取給於液體之本身；於是溶化能使液體及其鄰接之物體冷卻。此種冷卻，往往甚著，例如以硝酸銨溶化於水，則水之溫度可降低 25°C 之多。

利用熔解或溶化時吸收熱量之現象，而製成起寒劑(或稱冷劑 freezing mixture)。有若干種之起寒劑，爲一般所知者：

(1) 1 分水 + 1 分硝酸銨；

(2) 5 分鹽酸 + 8 分硫酸鈉；

(3) 4 分冰 + 1 分硫酸；

(4) 2 分冰 + 1 分食鹽。

第一，第二兩種之吸熱，爲屬於溶化者。此等起寒劑中之二物，在尋常溫度混和後，卽得零〔度〕以下之溫度。

第三種起寒劑中之硫酸，使冰熔解，而硫酸又與水化合。但其化合發生之熱，不敵熔解所需之熱，於是混合物之溫度降低。反之，若以 1 分之冰與 4 分之硫酸相混合，則結果相反。往往有此種之例，混合吸熱現象，反爲化合放熱現象所掩蔽。

在最後之一種中，吾人同時利用其熔解與溶化之吸收熱量。冰遇食鹽而熔解成水，而食鹽又溶化於水中；因此，溫度能降至 −21°C。此爲其最低之限度，因更低於 −21°C，鹽水亦將凝固，冰與食鹽相分離，而將前所吸收之熱量放出矣。此種起寒劑，常用以製造涼食，如冰淇淋等。

冰與氯化鈣之混合物，能達更低之溫度；最低溫度爲 −50°C，此起寒劑足以使水銀凝固。

習題三十八

(1) 60〔克〕之水，由 30°C 冷至全部凝結爲冰，放出若干〔卡〕之熱?

(2) 將在 −3°C 之冰 50〔克〕，投入一杯 98°C 之水 275〔克〕中，此混合物之溫度爲若干?

(3) 將在 327°C 時熔解之鉛 500〔克〕，倒入 19.5°C 之水 1000〔克〕中，混合物之溫度爲 28°C，求鉛之熔解熱。

(4) 有冰兩塊，互相重疊，自上用力壓之，不久即合而爲一，其故何在?

(5) 有 100〔克〕之冰與 200〔克〕之水，同盛於杯內，徐徐加熱，每〔分〕鐘 800〔卡〕，問幾〔分〕鐘後，此混合物之溫度開始上升? 每〔分〕鐘上升多少?

(6) 1〔升〕之水，結成冰後，體積多少?

(7) 欲使物體冷卻，用零〔度〕之水與零〔度〕之冰，孰更有效，試言其故。

(8) 一瓶容量爲 1〔升〕，滿裝 0°C 之水，用塞緊緊塞住，使其中之水結冰，求此時瓶壁所受之壓力。已知欲使水減少原有體積之 $\frac{1}{1000}$，須加每〔平方厘米〕20〔仟克〕之壓力。

第三十九章

氣　化

§199. 氣化與液化. 置水於火燄之上，水卽消逝，是爲**氣化**(vaporization)，蓋水化成氣，與四周之空氣相混合矣。此氣名爲**水蒸氣**，簡稱爲**汽**(steam)。吾人又能將水蒸氣，重新變成水，謂之**液化**(liquefaction)，或稱**凝結**。法以冷瓷盆覆於汽上，移時，水珠凝於盆上矣。

凡液體皆能氣化，一如水然。灑酒精，醚，煤油，或二硫化碳數滴於地上，不久便乾，蓋化爲蒸氣，發散於空氣中矣。鄰近之處，或可嗅得其臭。然亦有若干液體爲"安定"者，卽在尋常溫度中，吾人每不覺其在氣化，如油，水銀等是也。但若將其溫度升高，亦卽揮發化氣。

有若干固體，不經熔解，亦能直接變爲氣體，謂之**昇華**(sublimation)。如碘，萘等是。盛碘之瓶中，常見其爲紫色，蓋充滿碘之蒸氣故也。萘丸(洋樟腦丸)日久漸小，卽由昇華作用。雪在零〔度〕以下，亦能逐漸消失，因其表面隨時氣化，發散而去也。

§200. 飽和蒸氣. 氣化實驗，在眞空中行之，更爲顯著。取托里坼利管 *A* 與 *B* 倒立於同一之水銀槽上。*A* 爲量氣壓之用，***B* 爲作氣化實驗之用**。最初，兩管中之水銀面高度相同，上

端留有眞空。

藉一彎曲之滴管,將一滴之醚引入 B 內(圖 234) 醚即潛過水銀柱而上升。 及其達水銀面上之眞空部分,便又消失,而同時水銀面驟然降下高度 h,是醚在眞空中氣化矣;而其蒸氣之壓力,乃使水銀柱下降,並即以降下水銀柱之高度 h 量之。

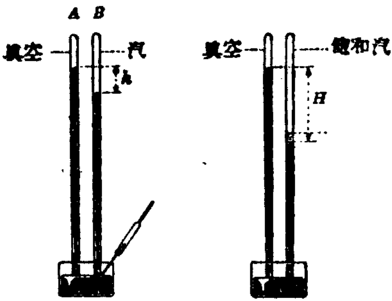


圖 234. 飽和蒸氣.

如是繼續引醚入 B,每引進一次,壓力亦增加一次。但壓力之增加,亦有其限度,此限度 H 約爲 43 〔厘米〕水銀柱高,稱爲醚蒸氣之**最大壓力**。 嗣後再將醚引入管中,則不復氣化矣;仍爲液態之醚,浮於水銀面上。 吾人稱此最大壓力之蒸氣所占有之空間爲達**飽和**(saturation),此時之蒸氣稱爲**飽和蒸氣**(saturated vapor)。

上述蒸氣達飽和後,液體"不復氣化矣",此爲一種簡便之說法。實際上,在任何狀況下,液體之氣化,不斷進行,無時或輟。設有多量之液體,密閉於容器內,其上部爲眞空。 液體分子運動不已,常有若干分子,速度頗大,能衝出液面,散入於器內液面上部之空間中。此等分子逐漸增多,蒸氣之質量及其壓力隨之增加,終將達一極限之値而止。 蓋因此已氣化之分子,係密閉於器內,東奔西撞,不能逸散,故其來近液面者,將有若干重復回到液內,而仍成爲液體分子。 此種情形,繼續進行,永不停止;

但逸出液面與侵入液面分子之數目相等時，器內蒸氣之密度及其壓力，將不再增加，而成所謂最大密度與最大壓力。此時之情形，亦可視爲一種平衡狀態，然在液面處，分子仍不斷出入，惟出入之數目相等而已。所謂飽和蒸氣，即蒸氣在液體上方達到此種平衡狀態者。

§201. 飽和蒸氣壓. 蒸氣分子與器壁及液面相碰撞，亦生相當之壓力，其情形與氣體完全相同。飽和蒸氣所生之最大壓力，稱爲**飽和蒸氣壓**(saturated vapour pressure)。

加熱使液體溫度升高，則有更多之分子由液內逸出，其蒸氣之密度增加，與器壁碰撞之數目亦增，故飽和蒸氣壓隨溫度之升高而增加。

惟在一定溫度之下，飽和蒸氣之密度有一定之值，不因其所占之容積之大小而異，故飽和蒸氣壓亦然，以有供給蒸氣分子之源——液體，同時存在故也。蓋若增加其容積，則其中蒸氣之密度與壓力減小，成爲非飽和矣，而與液面接觸之蒸氣分子之數目亦少，如是逸出液體而入於空間之分子乃較多，而一部分之液體遂復氣化，待蒸氣之密度與壓力，再達前次飽和之值時，乃復呈平衡狀態。反之，如減小器中空間之容積，則其中蒸氣之密度增加，自蒸氣返入液面之分子乃較多，而一部分之蒸氣遂行凝結，至蒸氣之密度與壓力，亦達前此飽和之值時，乃復成平衡狀態。

例如水銀之飽和蒸氣壓，在室溫時，僅爲 0.001〔毫米〕水銀柱高，故用水銀壓力計時可以略而不計。在 100°C，水銀之飽和

蒸氣壓，則為 0.27〔毫米〕水銀柱高。

在同一溫度下，各種蒸氣有其不同之最大壓力，例如，在 20°C 時，水蒸氣之飽和蒸氣壓為 1.7〔厘米〕水銀柱高，酒精蒸氣則為 4.4〔厘米〕，醚蒸氣為 43.3〔厘米〕(圖235)。物體之極易揮發者，即以其在室溫時飽和蒸氣壓頗大之故也。

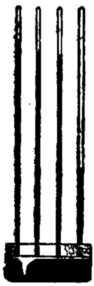


圖 235. 各種飽和蒸氣壓.

另一氣體之存在，並不能阻止液體之氣化。譬如在空氣中，水亦能蒸發也。與氣體相混之蒸氣，其最大壓力之數值，與在同一溫度下而在真空中者相等。所異者，在真空中，氣化快而達飽和速；與氣體相混者，則較緩較遲耳。蒸氣之壓力與氣體之壓力相加，得混合氣體之全壓力。

§202. 水在各溫度下之飽和蒸氣壓. 在一密封之容器中，盛液體與其蒸氣而漸熱之，則常在飽和平衡中，隨時可量其溫度與蒸氣壓。

蒸氣壓力之應用甚廣。今以水為例。在尋常溫度中，水蒸氣之壓力為氣象學者所必知，而在 100° C 以上者，又為汽機所必需。

尋常溫度下水蒸氣壓力之測定. 此實驗之儀器裝置與 § 200 同。兩托里拆利管 a 與 b 同直立於一水銀槽上(圖 236)。以 b 作氣壓計用；a 中含有水蒸氣及過剩之水。器 A 中滿儲以水，可用火熱之，或用冰冷卻之，以變更 a 管中飽和水蒸氣之溫度。

實驗之結果如下：

溫度	飽和汽壓	密度([克/厘米³])
0°C	4.60〔毫米〕(水銀柱高)	4.88×10^{-6}
10°	9.21	9.44×10^{-6}
20°	17.54	17.35×10^{-6}
30°	31.82	30.4×10^{-6}
50°	92.51	83.0×10^{-6}
80°	355.1	293.1×10^{-6}

欲使汽熱至100°C（最大壓力為760〔毫米〕），應以器 A 將 a，b 兩管自頂至踵完全封閉．此時管 a 中之水銀，將降至與槽內之水銀面相平．

上述之儀器，當不適宜於此最後之一實驗．

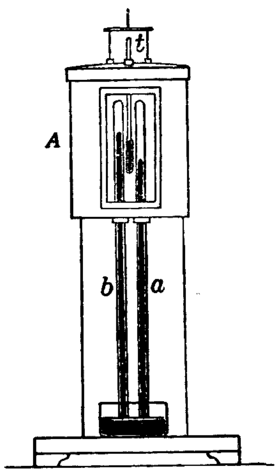


圖236. 飽和水蒸氣壓之測定．

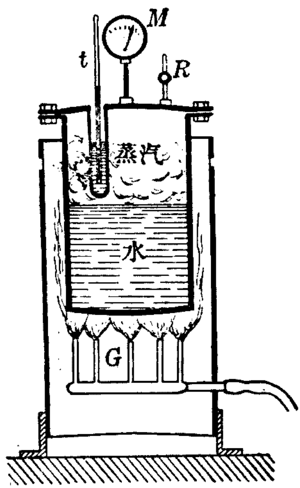


圖237.

在100°C以上水蒸氣壓力之測定． 在此實驗中，最大壓力可至極大之數值．水與水蒸氣密閉在金屬燒鍋 A 中，鍋上附有

金屬氣壓計 M (圖 237). 鍋底以多枝煤氣管 G,强烈熱之.

先啓活塞 R,使水沸騰若干時,自 R 吐出之水蒸氣,將鍋中之空氣挾以俱出;於是閉活塞,此時水上所剩者,祇飽和水蒸氣耳.在溫度計 t 上,讀其溫度,同時在氣壓計 M 上,讀其蒸氣壓力,於是得在各溫度下之最大壓力,結果如下:

溫度	飽和汽壓	
100°C	14.7〔磅/吋^2〕即	1〔大氣壓〕
110°	20.8	1.4
150°	69.1	4.7
200°	225	15.3
250°	576	39.2

蒸汽機之鍋爐,爲一封閉之鐵鍋,鍋中儲水,熱至 100° C 與 200°C 之間,使其發出之飽和蒸氣,可達每〔平方吋〕15 至 225〔磅〕之最大壓力.燃料爲煤.添煤,則溫度高,汽壓增大,反之溫度低,汽壓亦降.故可添減燃煤以增降汽壓.此等壓力大於大氣壓力,可利用以做功,因有蒸汽機之發明,而爲現代工業之開端.

習題三十九

(1) 酒瓶必須密封,何故?

(2) 將一滴水,一滴醚,放在掌內,能辨別何者爲水,何者爲醚否?

(3) 一瓶覆於水面,其中有 50〔厘米^3〕之空氣,且有飽和水蒸氣. 已知此時大氣壓力爲 75〔厘米〕水銀柱高,溫度爲 20°C,水上升瓶中達 10〔厘米〕之高. 求瓶中乾空氣之重量. 水蒸氣在 20°C 時之最大壓力,爲 17.5〔毫米〕水銀柱高.

第四十章

沸　　騰

§203. 沸騰現象之敍述. 瓶中盛水,以火熱之(圖 238),則水之溫度由對流而逐漸升高,吾人將見瓶之內壁,發生若干空氣細泡,升至水面而破裂. 此等細泡中之空氣,為以前溶解於水中,而今被逐出者也. 其次,吾人見從瓶底發生若干水蒸氣之氣泡;但此等汽泡在上升至水面之前,卽行消失,蓋此等汽泡從較熱之水底發出,遇上層較冷之水,重行凝結. 在此凝結之中,發出絲絲之聲,吾人則曰,水在響矣. 最後,至一時期,水之全部溫度皆已齊一增加,則汽泡升至水面方行破裂,吾人則曰,水在沸矣. 是為**沸騰**(boiling)之現象.

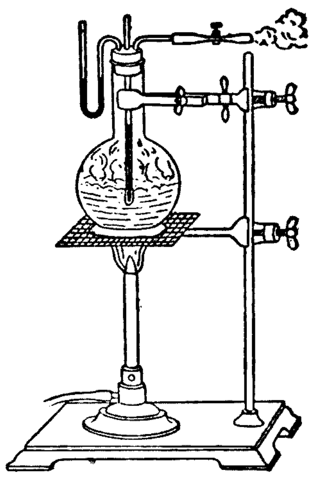


圖 238. 沸騰現象.

水蒸氣為無色之透明體,視之弗見. 試觀沸水在玻璃瓶中,瓶中除水外,充滿汽,而透明如初,吾人所見圖中瓶塞靠右端橫管之口吐出霧狀之煙,此非為水蒸氣之本身,蓋汽驟遇外界之冷空氣,已液化而凝成無數之纖小水珠集團矣.

在水未沸之前，瓶中溫度計之水銀柱逐漸升高，以達於 100°C 而水沸；及其既沸也，則停留於 100°C 不動. 開管壓力計之兩水銀面，則始終保持相同之高度. 由此可知水之沸騰，其溫度為 100°C，其飽和蒸氣壓等於大氣壓力. 倘將橫管之出口，略為夾住，則溫度計可再上升，而壓力計亦顯相當之增加.

此等事實，有助於吾人對於沸騰之了解. 試思水底發生之一汽泡. 此汽泡中含飽和汽，內為飽和汽壓，此壓力有使汽泡脹大之傾向；在另一方面，汽泡外面所受之壓力，則為水所受之大氣壓力，此壓力有壓縮汽泡之傾向. 當泡內之汽之最大壓力不敵大氣壓力時，則汽泡不待升至水面即行消滅. 但最大壓力與大氣壓力相等時，則汽泡能直升水面而放出蒸氣.

§204. 沸點. 液體沸騰時之溫度，曰**沸點**(boiling point). 由上所述，可知液體在任何溫度皆可沸騰，祇須此時之飽和蒸氣壓，等於液體所受之外加壓力耳.

外加壓力，通常即為大氣壓力；敞口煮水，即其一例. 液體在 1〔大氣壓〕下沸騰之溫度，稱為正常沸點. 故水之正常沸點為 100°C. 同樣，醚與酒精之沸點，各為 34.6°C 及 78°C.

§205. 沸點隨壓力而變更. 水之沸點為 100°C. 此僅指水在氣壓 76〔厘米〕水銀柱高之下而言. 但壓力可變更，吾人將見其沸點亦隨之而改；壓力增高，沸點亦升，壓力減低，沸點亦

降．此完全由於飽和汽壓隨溫度而增減(§ 202)之故也．下述實驗，足以表示沸點與壓力之關係．

盛水於玻璃瓶內，熱之使其沸騰後，緊塞瓶口而倒置之，如圖239．此時在瓶內上部之水蒸氣乃飽和者，其汽壓卽等於大氣壓力：故瓶中水之溫度降至沸點以下時，沸騰立卽停止．今若注冷水於瓶頂外，以冷卻之，則瓶中飽和汽將有一部分凝結爲水，而其內之壓力乃驟降至大氣壓力以下，惟此時瓶中之水，其溫度下降不及壓力降落之速，故瓶中之水，復行沸騰，至其壓力復達到飽和汽壓之值而後已．

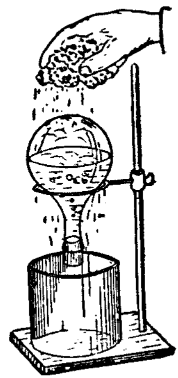


圖 239.
沸點與壓力之關係．

大氣壓力隨高度而遞減(§ 94)，故水之沸點，亦因之下降． 例如在昆明，拔海 1900〔米〕，大氣壓力約爲 60〔厘米〕水銀柱高，水之沸點僅約 93.5° C 耳．又在高山之巔，每有食物不能煮熟之患． 欲食物之易熟，常緊蓋烹飪之鍋，其目的亦係藉以增加鍋內之汽壓，使鍋內沸騰之溫度，能達較高之值耳．

§206. 汽消毒器． 煮水欲達 100°C 以上，須於密閉器中行之，俾其最大汽壓得高於大氣壓力也． 通常於密閉汽鍋上端，附一安全活門． 當鍋內汽壓達於一定限度時，活門卽被壓開，藉以放出一部分之汽，溫度亦卽不再上升，水在沸騰矣． 可於其上之金屬氣壓計，讀得壓力，因而知此時之溫度(§ 202)．

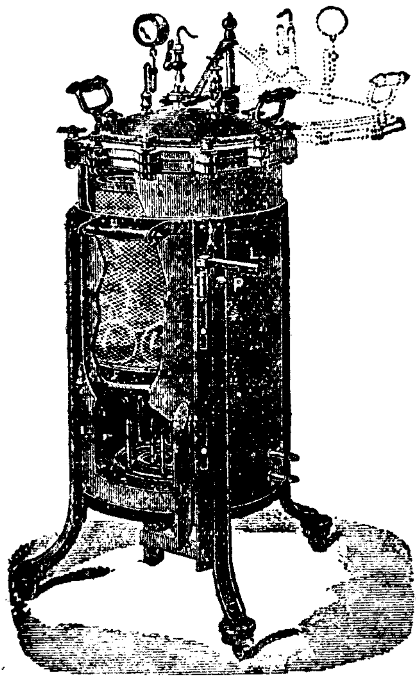


圖 240. 汽消毒器.

若欲改變溫度,則可調節安全活門.

如圖 240 所示,爲汽消毒器. 普通醫院外科所用之刀鉗,以及紗布棉花,納入其中,加熱消毒. 又由骨中提膠提油,以及製造罐頭食品殺菌等,亦多用之. 紹興酒盛罎中,泥封其口,再置鍋中,用木桶覆蓋蒸煮後,可保藏數十年之久,亦即此理. 惟木桶難勝 20 〔磅/吋^2〕之壓力而不漏氣,故其溫度亦鮮能超過 110°C 耳.

§207. 氣化熱. 考液體由沸騰或蒸發等作用而氣化時,亦與固體之熔解爲液體時相同,需要一定之熱量. 如注酒精或醚於皮膚上則感覺寒冷;又室內盂中之水,每較室內氣溫爲低者,皆因液體蒸發時,將其四周及自身之熱量,吸收而去之故. 雖不絕加熱於沸騰之液體,其溫度停留於沸點而不變更者,即因所加之熱量,全供液體氣化之消耗,苟非液體氣化完盡,溫度決不上升也.

在任何溫度下,液體皆在氣化,故言氣化時所需之熱量,當特別指明液體之溫度。 1〔克〕液體氣化成爲同溫度之飽和蒸氣所需之熱量,稱爲**氣化(潛)熱**(latent heat of vaporization)。通常皆指其在正常沸點而言,故水之氣化熱爲 540〔卡〕係指其在 100°C 時也。 但在 0°C, 則爲 596〔卡〕; 而在 200°C, 則爲 476〔卡〕耳.

反之,1〔克〕之飽和蒸氣,凝結爲液體,即液化時,亦必放出相等之熱量. 可知液化與氣化,其關係與凝固與熔解完全相同.

液體之氣化熱,亦可用量熱器以測定之. 盛液體於鍋中而蒸之,令所生之蒸氣,通入於量熱器內之盤曲管中,而被冷卻,凝結爲液體(圖 241),稱其重量,並測其所放出之熱量而得.

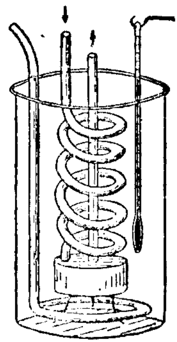


圖 241.
氣化熱之測定.

【例】 量熱器中有 5°C 之水 400〔克〕, 量熱器之水當量(包括盤曲管在內)爲 48〔克〕. 通入 100°C 之飽和水蒸氣,待其凝結後,測得量熱器之溫度爲 29.5°C, 凝結之水爲 18〔克〕. 求水在 100°C 時之氣化熱.

命 x 爲水之氣化熱,則

汽在液化時,所放出之熱量 $= 18x$,

凝結成水後,所放出之熱量 $= 18(100 - 29.5)$;

而 量熱器所吸入之熱量 $= (400 + 48)(29.5 - 5)$;

於是

$$18x + 18(100 - 29.5) = (400 + 48)(29.5 - 5)$$

得

$$x = 539\text{〔卡/克〕}$$

液體之氣化熱(見表 11),與其比熱或熔解熱相較,要大得多,而水爲尤甚. 1〔克〕之水氣化所需之熱量,可使 6〔克〕之冰熔解,或 5〔克〕之水煮沸,而有餘.

表 11. 氣化熱

物質	沸點°C	氣化熱(〔卡/克〕)
水	100	540
酒精	78.3	205
醚	34.5	88.4
水銀	357	65

夏日炎熱時,撒水庭園或室內,則感覺涼爽者,即因所撒之水,於蒸發時吸收其所需之氣化熱,地面與空氣中之熱量隨之減小故也. 又扇風時,亦感覺涼爽者,其主因在促進汗之蒸發,因而吸收體熱,爲其氣化之用. 如置盛水之試驗管於醚中,在醚中吹入空氣,使其盛行蒸發,則管內之水,溫度下降,竟可結冰.

208. 汽暖室. 在工業上,往往應用水蒸氣凝結時所生之熱,作爲熱源. 木器或石器中盛物,不能用火加熱,則可直接或用管通入水蒸氣以熱之.

近代之建築中,冬日恆利用液化熱量,以暖房屋. 鍋爐中煮水成汽,導入置於室中之輻射器(圖 242),汽遇冷而凝結,因而放出熱量,使室溫暖. 凝結之水,又復流入鍋中,重行汽化.

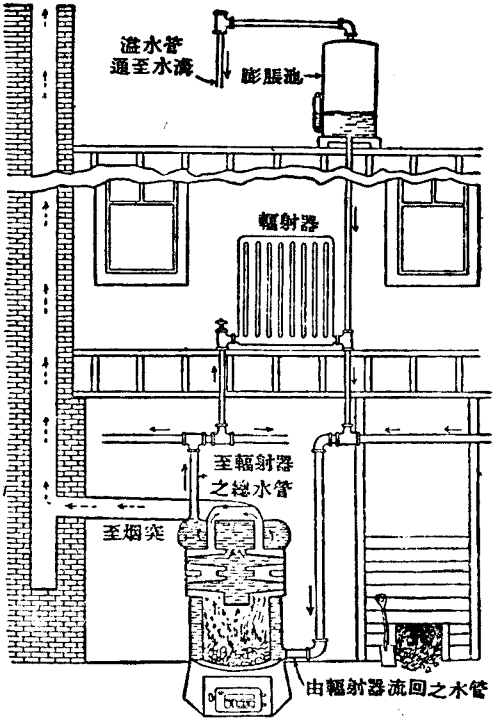


圖 242. 蒸汽暖室.

§209. 蒸餾. 爲許多應用,欲得純水,須用蒸餾(distillation)之法. 將水在 B 器中(圖 243)煑沸,使其汽經過冷凝管 T,重復凝結爲液態,滴下而入 P 瓶之水,頗爲純潔,不潔之物則留於煑水之 B 器中. 故蒸餾之作用,包括使液沸騰及使蒸氣凝結之二步驟,即氣化與液化也.

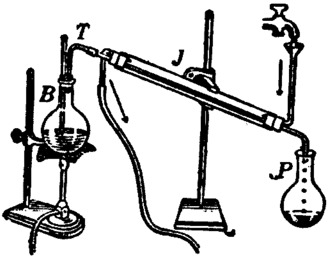


圖 243. 蒸餾.

分餾 兩液相混和，則其沸點大都介乎兩者之間，且視兩液體之成分而定. 故可採用蒸餾法，將其分離，是爲**分餾**(fractional distillation). 試以水與酒精之混合物爲例：酒精較水易揮發，卽其沸點較水爲低，混合液之蒸氣中酒精成分較水加多，照此比例進行，經若干時間後，鍋中剩餘之混合液中水之成分逐漸增加，沸點亦漸提高，蒸餾而出之液體中，水亦漸多，此時宜卽停止. 將餾出之液體，再行蒸餾，如是輾轉分部蒸餾，則所得之液體逐步加純. 我國各地之升酒與重升酒，卽由分餾而得.

用分餾之法，卽可由石油，卽碳氫水化合物之混合液中，提煉汽油及燈油. 汽油在 70°～120°C 時蒸出，燈油則在 150°～300°C 時蒸出.

習 題 四 十

(1) 將爐火扇紅，使水沸騰較速，繼續扇之，是否可使番薯煮熟較速? 與汝母討論之.

(2) 如將數種液體之混合液，用蒸餾法使之分離. 何種液體，首先逸出? 其中必混有一小部分其他液體，何故?

(3) 30〔克〕100°C 之水蒸氣，凝結而冷至 20°C 時，放熱若干?

(4) 一游泳池長 20〔米〕，闊 10〔米〕，平均深度爲 1.5〔米〕. 通入水蒸氣使水由 13°C 升至 17°C，問須若干〔克〕之水蒸氣. 若以 100°C 之沸

水傾入,須多少〔克〕方能得同樣之結果?

(5) 由 100〔度〕之沸水與 100〔度〕之水蒸氣所灼之火傷,以何者爲烈.試說明其理由.

(6) 將 0°C 之冰, 50°C 之水,與 100°C 之水蒸氣,依重量 10:9:1 之比混合之,其溫度如何?

(7) 糖及鹽對於水之沸點,有何影響? 試實驗之.

(8) 汽消毒器上氣壓計之壓力爲 20.8〔磅/吋^2〕,問器內水之溫度爲何?

第四十一章

大氣中之水蒸氣

§210. 蒸發. 液體之氣化,僅限於表面上,而不見蒸氣泡者,謂之**蒸發**(evaporation). 若增大液體之氣化表面,則蒸發

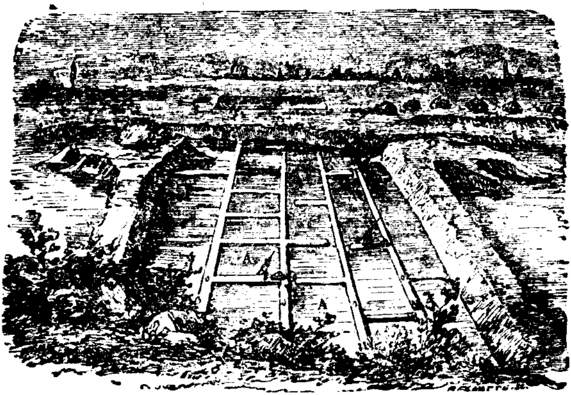


圖 244. 鹽田.

加速. 例如欲衣服之速乾,須揭竿張之. 同理,鹽田之曝鹽,將海水導入田野中,分布於廣大之面積上,使其易於蒸發而得鹽(圖 244).

§211. 濕度. 因河,池,海洋中之水,不斷蒸發之故,大氣中常含有水蒸氣. 其多寡情形,可以每〔立方厘米〕空氣中所含水蒸氣之質量表示之,是爲**絕對濕度**(absolute humidity).

大氣中所含之水蒸氣，如已近於飽和狀態，則其再能含容之汽，爲量甚微，因之濡濕之衣服等物，其水分不能急速蒸發，不易乾燥，此時之空氣，謂之**濕潤**．反之，空氣中之汽，距飽和程度甚遠，能再容多量之汽時，則水分之蒸發頗速，此時之空氣，謂之**乾燥**．又兩處空氣中所含之汽量雖相等，但如一方溫度較他方爲高，則其至飽和時所需汽量亦較多，故在此方空氣可謂乾燥，而在他方則又濕潤．由此可知，以絕對濕度言空氣之乾濕，有未盡善者也．蓋空氣乾濕之度，關係於其中現含汽量，及其溫度之高低甚明．

爲表示空氣之乾濕程度起見，通常皆用某體積空氣內現存汽量 m〔克〕，與在當時溫度下達飽和時所能含之汽量 M〔克〕之比，稱爲**相對濕度**(relative humidity)．然某體積空氣內現存之汽量 m，與其同體積之飽和汽量 M 之比，等於其密度之比；而溫度一定時，兩者密度之比，復等於其壓力之比．故設空氣中現存之汽之壓力爲 p，飽和汽之最大壓力爲 P 時，則

$$\text{相對濕度} = \frac{m}{M} = \frac{p}{P}$$

上式中，如 $m = M$，或 $p = P$ 時，則濕度爲 1；是大氣中含飽和之汽矣，實際上，可謂絕無之事．故相對濕度，恆小於 1，通常以百分數表之．濕度之大小，關係於吾人之健康甚大．濕度過大時，每感潮濕之苦，易於發生感冒；濕度過小時，則過於乾燥，易生喉痛等是．通常合乎衞生之最良濕度，爲在 50% 至 60

% 之間.

212. 露點. 將一部分空氣之溫度,逐漸減低,使其中原未飽和之汽,達到飽和狀態,此時之溫度,稱爲**露點**(dew point). 空氣中所含之汽愈少,則其露點愈低. 在乾燥且寒冷之日,露點常在 0°C 以下.

欲測定露點,可用一光亮之金屬杯(圖 245),中盛以醚,插入溫度計及通氣管,杯口加塞,使其密閉. 送入空氣以加速醚之氣化,杯內溫度降低,至在其外面呈現一層露珠時,乃記杯內之溫度. 此時之溫度 t_1 當較眞正之露點略低. 停止送氣,杯內溫度又漸升高,露亦減少,不久消滅. 此時之溫度 t_1,當較露點略高. 兩者之平均值 $\frac{t_1 + t_2}{2}$,是爲眞正之露點.

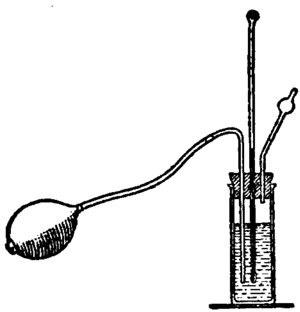


圖 245. 露點之測定.

既測知露點,則自飽和汽壓表(§ 202),可查得此時空氣中實際所含之汽之密度,與在此時之溫度下,空氣所能含之飽和汽之密度,兩者之比,即相對濕度也.

【例】 在某地氣溫爲 20°C,測得露點爲 10°C,求其相對濕度.

由表查得 10°C 之飽和汽之密度爲 9.44×10^{-6}〔克/厘米^3〕,此即此時此地大氣中實際上所含水蒸氣之密度也. 但大氣此時之溫度爲 20°C,所能含飽和汽之密度,由表查知爲 17.35×10^{-6}〔克/厘米^3〕. 故得

$$相對濕度 = \frac{9.44}{17.35} = 0.54 = 54\ \%$$

暮春初冬,露點之測定,頗有助於農家.如於黃昏之時,測得露點若在 5°C 之上,則夜間不致降霜.因水凝結時放出熱量,溫度之下降將行見緩,有不致落到零度之望矣.

213. 乾濕泡濕度計. 相對濕度之值,除由測定露點以推算之外,亦可根據氣化所生之冷卻現象而求之,**乾濕泡濕度計** (dry- and wet-bulb thermometer) 即本此理而成.有並置之兩溫度計(圖 246).其中之一,下部爲濕布所包裹,布之一端,浸入水中,使其常濕.除空氣中之水蒸氣已達飽和之時外,此濕泡溫度計所指示之溫度,將較無濕布包圍之乾泡溫度計所指示者,爲低.此乃由於濕布上之水,繼續氣化,而將其溫度減低所致.至於濕泡溫度計與乾泡溫度計,兩者所示溫度之差,其值乃視濕布上之水,氣化之緩速而定,惟氣化之緩速,又因空氣中所含水蒸氣之飽和程度(即其相對濕度)而異.故如預先將此種濕度計之指示,與用露點測定計算所得之相對濕度,互相比較,而作一表或圖;則觀測此兩溫度計,即可自表或圖,查得相對濕

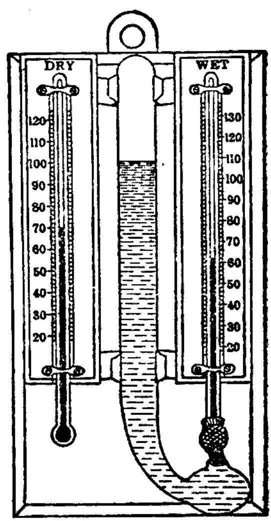


圖 246. 乾濕泡濕度計.

度之值。

§214. 露，霜，霧，雲，雨，雹，及雪之成因． 太陽西下後，地上固體如草，木，石等溫度之降落，較速於空氣，有時竟到露點之下，於是空氣中之水蒸氣，乃凝結於此等物體上，而成為**露**．若天氣甚冷，露點之溫度係在 0°C 之下，則所結之露，凍而為**霜**。

夜間地球之冷卻，不但使在地面上之固體的溫度，降至露點以下；且可使近於地面之空氣溫度，亦降至露點以下，如是近於地面上之水蒸氣，亦凝結而附着於空氣中之浮塵以成**霧**。

在地球面上高處之溫度，亦冷卻至露點以下之時，其中之水蒸氣，遂有一部分凝結於高空中之浮塵上而成**雲**．倘所凝結之水頗多，卽可下降為**雨**．下降之雨，在尚未抵地之前，如已凍結為冰，是卽為**雹**．若凝結時之溫度(卽露點)，乃在 0°C 之下，則其下降者為**雪**．

由此觀之，露霜與霧，雲雨及雹與雪之成因，均係大氣溫度降至露點之下所致．至於其所成者，果為露，霜，或霧，或雲或雨，或雹或雪，則視其冷卻所在之地點，與其凝結時溫度之高下而定。

習題四十二

(1) 霜在窗玻璃之內面抑外面生成？何故？

(2) 絕對濕度與相對濕度，有何區別？

(3) 在夏天不十分熱，而相對濕度甚高之日，何以亦頗覺不適？

(4) 霧與雨，露與霜，有何不同之點？

(5) 在長 10〔米〕，闊 6〔米〕，高 4〔米〕之屋中，溫度為 20°C，相對濕

度為60%，問屋中含水若干〔克〕？欲求達於飽和，尚須在屋中蒸發若干〔克〕之水？

(6) 夏日驟雨之前，特別悶熱，雨後始覺清涼，其故安在？

(7) 朝霧常於午前消散，何故？

(8) 使30°C之空氣，冷卻到10°C時生露，求空氣之相對濕度。

(9) 將落雪時，空氣之溫度常略升高，試解釋之。

第四十二章

氣體之液化

§215. 氣體液化之條件. 如第三十九章所述，由液體所生蒸氣之最大壓力，若溫度一定時，其值亦各一定. 若壓縮蒸氣，使其壓力超過於當時溫度下之最大壓力時，則蒸氣之一部分即行液化. 又蒸氣之最大壓力，隨溫度之下降而減少，故在某溫度未飽和之蒸氣，如漸次使之冷卻時，終可達到其最大壓力，此時如再事冷卻，則其中一部分之蒸氣，亦即液化. 可知欲使蒸氣(例如水蒸氣)液化時，可增加其壓力，或降低其溫度，或降低其溫度而同時增加其壓力.

普通所謂蒸氣，係指氣體之與其本身液體並存一處者，故使其液化不難. 至於普通所謂氣體，如氨，氯，及碳酸氣等，液化亦易；但氫，氧，氮，及氦等氣體，單靠壓力，無論如何壓縮，均不能變成液體，舊時遂認爲與蒸氣不同，特名之曰**永久氣體**(permanent gases). 其後因研究碳酸氣等之液化，發見各種氣體均有其特殊之臨界點. 將其溫度降低至各氣體之一特定溫度，而加以適當之壓力，即可使其液化. 如氣體溫度在此特定溫度以上，則雖加任何壓力，亦不能使之液化. 此加壓力於氣體能使其液化之最高溫度，謂之**臨界溫度**(critical temperature)；於臨界溫度，足以使氣體液化之最小壓力，謂之**臨界壓力**

(critical pressure).

茲將數種氣體之臨界溫度及臨界壓力,列表於下:

表 12. 臨界溫度與臨界壓力

物質	臨界温度(°C.)	臨界壓力(大氣壓)
水蒸氣	374	217.5
醚	197	35.8
氯	141	83.9
氨	130	115
碳酸氣	31.2	73
氧	−118	50
空氣	−140	39
氫	−240	12.8
氦	< −268	2.3

總而言之,氣體液化之條件爲:

(1) 氣體之溫度,應在其臨界溫度之下;

(2) 第一條件滿足之後,再施以充分之壓力,而後液化完成.

氣體之臨界溫度,遠高於室溫時,欲其液化,則無須更降低其溫度,在此狀況下,上述兩條件中之第一條件,早巳滿足,吾人祇須增加壓力可矣. 如水蒸氣,氨,醚等之液化是.

又若充分減低氣體之溫度,使其至某一溫度時,其最大壓力即爲1〔大氣壓〕,於是此時之氣體,已在飽和狀態中矣. 若再降其溫度,則液化立見(§ 105 與 § 209);在此狀況下,不需增加氣體之壓力即得液化.

所謂永久氣體,並無與其他氣體不同之處,僅其臨界溫度非常之低,決非通常冷劑(§198)所能到達,在未達臨界溫度之前,又

決非專事壓縮，所能奏液化之功耳。

§216. 氣體之液化. 欲使一氣體液化，必須降低其溫度，增加其壓力，卽壓縮與冷卻是也。

壓縮一氣體，恆藉强有力之唧筒以行之。此等壓氣筒，以原動機如蒸汽機或電動機使其動作，能達每〔平方厘米〕數百〔仟克〕之壓力。

冷卻之方法，有三：

(1) 起寒劑　使欲液化之氣體在管中流行，而管則置於冰水或起寒劑(§198)中。化學家常以此法凝聚若干氣體，如水蒸氣與二氧化氮等皆以此法而得其液態。起寒劑非爲工業之用品。

(2) 液化氣體之急速蒸發　一液化氣體之急速蒸發，能發生低溫度，因而能將另一更難液化之氣體液化。藉此第二液化氣體之急速蒸發，又可得更低之溫度，使第三種更難液化之氣體液化，如是類推，可得極低之溫度，將最難液化之氣體而液化之。

例如：用壓力以液化氯甲烷(methyl chloride, CH_3Cl)，此物在1〔大氣壓〕下之沸點爲$-23°C$。壓力減少時，液態氯甲烷蒸發而得$-60°C$，此溫度可使受有相當壓力之乙烯 (ethylene) 液化。液態乙烯蒸發後，可減低溫度至$-150°C$，此溫度足使受有相當壓力之氧氣液化。

如是推行，液態氧之蒸發，可製液態氫；而液態氫之蒸發，可製液態氦。吾人現在所能達到之最低溫度爲$-272.6°C$，離絕對零度相去甚近，當知絕對零度爲不可達之理想境界，將益有感於

人類成就之偉大!

(3) 舒放 一氣體自高氣壓解放至一低氣壓,即任其驟然爲大量之膨脹,謂之舒放。壓縮之氣體一旦舒放,則其溫度降低既快且多,爲使氣體冷卻之最有效方法也。 現代製造液化氣體,皆用此法。

工業上所用之液化氣體,最重要者爲空氣,氨,二氧化硫,氯,二氧化碳,氯甲烷,及氯乙烷等。

§217. 製冷設備. 普通之製冷設備,如造冰機,爲利用液態氨之氣化時吸收多量之熱而成。 在常態中,氨係氣體,但若增加其所受之壓力至 10〔大氣壓〕之多,即化爲液體。

用此製冷之原理,如圖 247 所示。所要冷卻之液體爲一種鹽

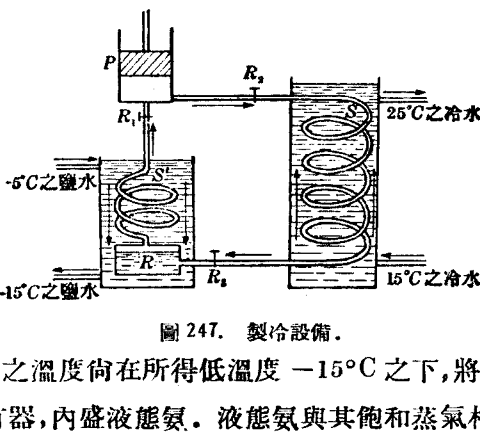


圖 247. 製冷設備.

水,其凝固之溫度尙在所得低溫度 $-15°C$ 之下,將鹽水置於池中,池中有器,內盛液態氨。液態氨與其飽和蒸氣相接觸。

P 爲壓氣唧筒,當其活塞自下向上時,活門 R_1 啓開,液態氨即氣化而膨脹,吸收多量之熱,鹽水之溫度得以降低。

其後,活塞向下壓迫氨氣,活門 R_1 閉而 R_2 開,氣入導管 S 之中而液化,液化時放出之熱量則爲流動之冷水所吸收. 液化之氨卽經 R_3 而返入 R 器中,於是重復進行如前.

氨之氣化與液化,在此爲運輸鹽水之熱量至繞於導管 S 四周之水之媒介,而此工作之完成,則全賴壓氣唧筒動作之上下不已也.

冷卻至 $-15°C$ 之鹽水,流入另一池中,池中置有清水數桶,於是水卽凍結爲冰,此一製冰機也.

若以冷卻至 $-15°C$ 之鹽水,流入金屬管中使其盤環於冷藏庫內,則庫內溫度下降,儲藏之食品不致腐敗;或令其環繞居室之四周數匝,於是室中空氣之溫度因是減低,此卽戲院中之冷氣設備也.

鹽水之溫度升高後,又流入 R 及 S' 之四周,而重行冷卻.

習題四十二

(1) 有一雙壁器,內盛 20°C 之水 8〔仟克〕,兩壁中儲液態氨. 欲使器內之水,全部結冰,問須蒸發液態氨若干? (氨之蒸發熱爲 500〔卡/克〕).

(2) 一圓柱唧筒中有二氧化碳 100〔克〕,壓力爲 42〔大氣壓〕,且使之在飽和蒸氣狀態中,以活塞壓縮之,使其全部液化,問需功若干? 液態二氧化碳之密度爲 0.82〔克/厘米^3〕,飽和蒸氣密度爲 0.16〔克/厘米^3〕.

(3) 傾 1〔升〕之液態空氣於一容器中而密閉之,容器之容積爲 2〔升〕,其溫度恒使之爲 10°C. 當液態空氣完全氣化後,其壓力爲何? 液態空氣之密度,約爲 1〔克/厘米^3〕.

第四十三章

熱　與　功

§218. **機械工作之化爲熱量.** 世傳燧人氏鑽木取火 可知人類自上古以來,卽熟知工作生熱之事實. 孩提之童,摩擦雙手以取暖,亦不待習物理學而後知. 一根火柴,擦之生熱,使火柴頭達燃點而燃燒. 輸入於機器之功,恆大於其所輸出者,亦以機器各部分有摩擦之故,摩擦厲害之處,發熱甚多,常耗去大量有用之機械工作. 凡此皆爲機械工作化爲熱量之例也.

§219. **熱功當量.** 工作生熱,且有一定之數量關係. 換言之,消耗一定量之機械工作,使其全變爲熱時,則所得熱量,亦有一定. 功以〔焦耳〕計,熱以〔卡〕量. 然則,多少〔焦耳〕之功,能生一〔卡〕之熱? 此一數值,稱爲 **熱功當量** (mechanical equivalent of heat), 通常以 J 表之.

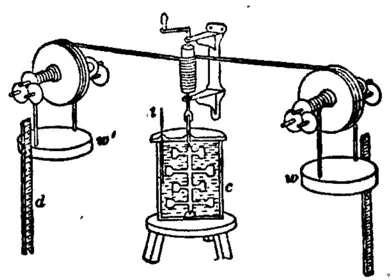


圖 248. 熱功當量之測定.

熱功當量,初由焦耳 (Joule) 以如圖 248 所示之裝置測定之. C 爲量熱器, 中置可以轉動之翼瓣. 翼瓣軸上纏線,跨過滑輪,下懸錘 w 與

w'. 命兩錘之總質量為 M〔克〕,錘下降之距離為 h〔厘米〕,由尺 d 上讀出,則重力對錘所作之功,為 $W = Mgh$. 因錘下降,牽動翼瓣在水內旋轉;因水對翼瓣之摩擦阻力,兩錘下降頗緩,無顯著之動能增加.僅其位能逐漸減小,且其全部悉由摩擦阻力而化成熱量,為水與容器所吸收,以增高其溫度. 命水與容器所增高之溫度為 t, 其熱容量為 C, 則其所吸收之熱量為

$$H = Ct \text{〔卡〕}.$$

於是有

$$Mgh \text{〔爾格〕} = Ct \text{〔卡〕},$$

即

$$1 \text{〔卡〕} = \frac{Mgh}{Ct} \text{〔爾格〕}.$$

據精密實測之結果,得

$$\begin{aligned} J &= 4.187 \times 10^7 \text{〔爾格/卡〕} \\ &= 4.187 \text{〔焦耳/卡〕}. \end{aligned}$$

故工作 W 與熱量 H 之間,有等式如下:

$$W\text{〔焦耳〕} = 4.187H\text{〔卡〕},$$

即

$$H\text{〔卡〕} = \frac{1}{4.187} W\text{〔焦耳〕}.$$

是熱以〔卡〕計外,亦可以〔爾格〕或〔焦耳〕表之,與工作相同.

§220. 力學功能定理之推廣. 在力學問題中,無摩擦阻力時,功能定律始為正確. 但摩擦阻力所生之熱量,與其所耗費之功,有一定之數量關係,已如上節所述,若將熱量 H 作為能之一種, $W = JH$ 一併計算在功或能之內,則在力與熱同時並存

之問題中，功能定理與能量不滅定律又為真確矣．焦耳實驗，即其明證．

§221. 熱之本性． 熱不能離開物質而存在，其為能之一種，已如上述．事實上，二物體溫度相異，而其他一切性質相同者，其在物理學上之區別，僅在較熱之物體分子運動較速，動能較大而已．熱之本性，即在乎是．所謂將物體加熱使其溫度升高者，無他，即增加其分子之速度與動能．苟屬氣體，而其體積又保持不變者，則此等分子，對於容器之壁，碰撞次數加多，猛烈加甚，是故其壓力隨溫度而增大．

有時物體受熱，而溫度不改者，如熔解熱與氣化熱是．熔解時輸入之熱能，化成工作，用以反抗固體分子互相結合之力，而使之鬆弛，於是，固體分子有規則之排列，變為液體中漫無秩序之狀態．氣化時所輸入之熱能，則使前在熔解時已經鬆弛之分子，更相遠離，而成氣體之狀態．結果成為位能，儲藏於液體或氣體之內部，其情形與吾人反抗地心吸力將物體升高時所做之功，成為物體之位能相似．再氣體復行液化，或液體復行固化時，即將前所吸收者全部放出，亦不外由其物質分子間之位能，再變為熱能而已，其情形亦與物體由高處下降時，將位能變為動能或工作相似．

至若氣體受熱而膨脹時，一面增加其內部分子之動能，一面則又對外而做工矣．

習題四十三

(1) 地面上受熱上升之空氣,升至高層,即行冷卻,何故?

(2) 試舉二例,表示熱能變爲機械能。

(3) 試舉二例,表示機械能變爲熱能。

(4) 0°C 之冰塊重 120〔仟克〕,曳過 25〔米〕之河中冰面上,若摩擦係數爲 0.08,問若干之冰已經熔解?

(5) 作熱功當量之實驗時,用質量 30〔仟克〕之錘,從 16〔米〕高處降下,可使 2〔仟克〕之水,溫度升高多少?

第四十四章

熱　　機

§222. 熱能之化為機械工作. 熱與功,為相當者.一定量之功,可以產生一定量之熱;反之,一定量之熱,亦合乎一定量之功. 一切物體,無論其溫度高低,多少都含熱量. 如何從一物體,取出熱量,變成機械工作,可為吾人利用,實一重要之問題,而現代文明,亦即肇端於斯.

在 § 217 所述之製冷設備中,吾人從較冷之鹽水池中,取出熱量,而投放於較暖之冷水池,如是使冷者更冷,熱者更熱,不但無機械工作,可供吾人之利用;吾人且須不斷供給機械工作,以使壓氣唧筒繼續動作. 此因違反熱自高溫度處流向低溫度處之天性,而不得不然也.

循乎熱之天性,自高溫處向低溫處,如一爐熊熊之火,散播其熱於空氣中,除可取暖煮飯外,欲利用其一部分之熱量以成機械工作,乃有各種熱機(heat engine)之發明.

§223. 蒸汽機. 熱機中最常見而又最為重要者為蒸汽機(steam engine),如火車頭是(圖 249). 其原理在加熱於盛水之汽鍋,使發生高大壓力之汽,賴其膨脹而作功者.

圖 250 表示蒸汽機之主要部分. 汽鍋 B 中所生之汽,自 S

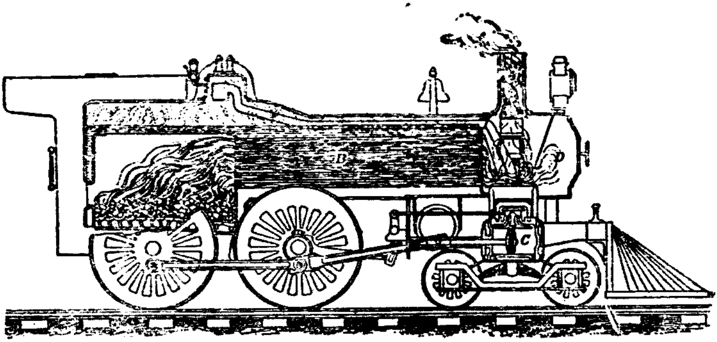


圖 249. 火車頭.

管通入蒸汽房,經過道 N 進汽筒 C 之右部中. 汽之壓力推動活塞 P,使其向筒之左方移動. 活塞 P 移動時,與活塞連接

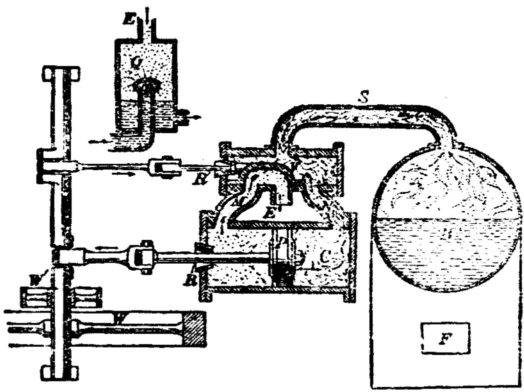


圖 250. 蒸汽機.

之桿 R 可使機軸 A 轉動 (圖 251); 如是在機軸上之偏心輪 K 亦隨之轉動,而牽動與 K 連接之桿 R',並使滑動活門 V 左右移動. 此活門 V 之位置及其移動之方向,適足以使活塞 P 在筒內極右端時, N 過道漸開露,而與蒸汽房通聯,同時在汽筒左端

之 M 過道,則與排汽房 E 通聯,如是存於 C 內之汽,漸次膨脹,壓迫活塞向左移動。當活塞 P 自右向左移動,N 過道將復完全與蒸氣房隔斷,及其將行至 C 之左端時,N 過道乃與排汽房 E 通接,膨脹後之汽,卽由 E 排出,至盛有冷水之冷凝器 Q 中。同時,V 活門適將 M 過道與蒸汽房聯通,故在 P 左面進入之蒸汽,復使活塞 P 向右移動。此後在 P 左面汽筒內之情形,與前此所述在其右面汽筒內之情形完全相同。活塞如是往復移動,乃使機軸上之飛輪,旋轉不息。

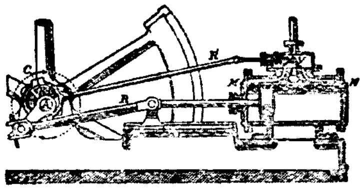


圖 251. 偏心輪

§224. **熱機之效率**. 考蒸汽機之作用,由於煤燃燒所供給之熱量,被水蒸氣吸收而輸入於汽筒內。此水蒸氣推動活塞而作功時,卽失去一部分熱量而冷卻,終被驅送以至於溫度較低之冷凝器內。設水蒸氣由汽鍋吸收之熱量爲 H_1,其在冷凝器中放出之熱量爲 H_2 時,則 $H_1 - H_2$ 爲水蒸氣在蒸汽機內所失去之熱量,卽變成機械之功者。於是 $W = J(H_1 - H_2)$ 爲熱機所產生之機械工作。

所謂效率,爲所得之工作與所費之能量相比。

在此處,工作爲 W,或以 $J(H_1 - H_2)$ 表之。所費之能量由經濟學觀點,當爲 H_1,而與 H_2 無關;因 H_1 從燒煤得來,而 H_2 則棄置於冷水中,通常不復值錢矣。

於是熱機之效率，為

$$e = \frac{H_1 - H_2}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1}$$

或書作

$$e = \frac{W}{JH_1}.$$

由理論及實驗結果，如蒸汽鍋之絕對溫度為 T_1，冷凝器之絕對溫度為 T_2 時，則有

$$\frac{H_1 - H_2}{H_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1};$$

於是熱機之效率為

$$e = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

在實際上，T_2 為冷凝器之溫度，常略高於其周圍之溫度，設為 300°K（= 27°C），已屬極低之數值矣。 熱機之效率 e，將因 T_1 增高而加大，設 $T_1 = 150°C = 423°K$，則效率 $e = \frac{123}{423} = 0.29$。 由此可知熱源所發生之 100〔卡〕中，至少有 71〔卡〕棄於冷凝器，至多僅 29〔卡〕變為機械工作，可供吾人利用，卽此之值，實際上已不可得。 若 $T_1 = 300°C = 573°K$，則 $e = 0.48$。故自瓦特氏(James Watt)以來，改良蒸汽機者，無不設法儘量提高汽之溫度也。

§225. 內燃機. 此種熱機，因其供給能量之燃料，係在機之內部燃燒，故稱**內燃機**(internal combustion engine)，有

用燃氣或汽油等之別。 用液體燃料者，先將其灑散為細點，與適當分量之空氣混合成為爆炸混合品，然後引入於內燃機之氣缸中而燃燒之。 此種混合氣體爆炸之後，壓力激增，遂迫氣缸中之活塞移動。 活塞之往返移動，乃由相連之桿傳遞於曲柄(crank)，而使機軸轉動。

內燃機氣缸，如圖 252 所示，其動作分為四步。

(1)進氣(int. ke) 設機已轉動，活塞自上向下移動，此時左

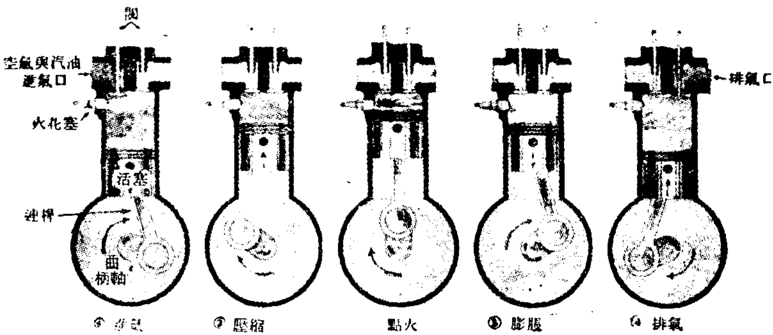


圖 252. 內燃機之四步衝程.

方之進氣閥(intake valve 又稱進氣活門)受軸上之凸輪(cam)作用而開，於是爆炸混合氣體乃進入氣缸內。

(2 壓縮(compression) 活塞既達氣缸之下端，進氣閥關閉；當其回向上行時，留存於缸內之混合氣體即被壓縮；及其達於氣缸之上端時，即有火花超越缸內電極之間，而將氣體點火(ignition)爆發，缸內壓力為之激增。

(3)膨脹(expansion) 此後氣體膨脹，壓迫活塞向下移動。

(4) 排氣(exhaust) 活塞行至氣缸之下部時,右方之排氣閥(exhaust valve)開啓;故活塞回向上行時,缸內剩餘之氣體乃被排出;及其達於氣缸之上端時,排氣閥即已關閉,而缸內情形回復到第一步將開始時之狀況。此後各步衝程反覆繼續進行。

由上述之動作程序觀之,爆炸氣體僅在第三衝程之短時間內將其能量送交機器,在其他三衝程之時間內,機器之轉動完全藉機軸上飛輪所積之動能,以維持其速度。欲求轉動之連續而均勻,內燃機之飛輪,特別重大(圖 253)。

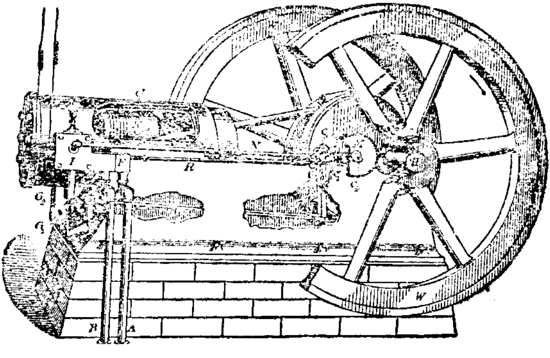


圖 253. 內燃機之飛輪.

內燃機之效率常可達到百分之三十以上,較諸最佳之蒸汽機約大二倍。 用此種熱機時,又無需鍋爐等設備,所佔之地位復小,故爲現代原動力廠所樂於採用.此液體燃料問題之所以爲各國注意也!

汽車與飛機上所用之發動機,即爲內燃機,自然不宜裝帶飛輪,故恆聯合幾個內燃機氣缸,交互作用,使旋轉均勻,速度加

人. 普通汽車爲四氣缸,即聯合四個內燃機氣缸而成,飛機之氣缸則多至十餘個(圖 254).

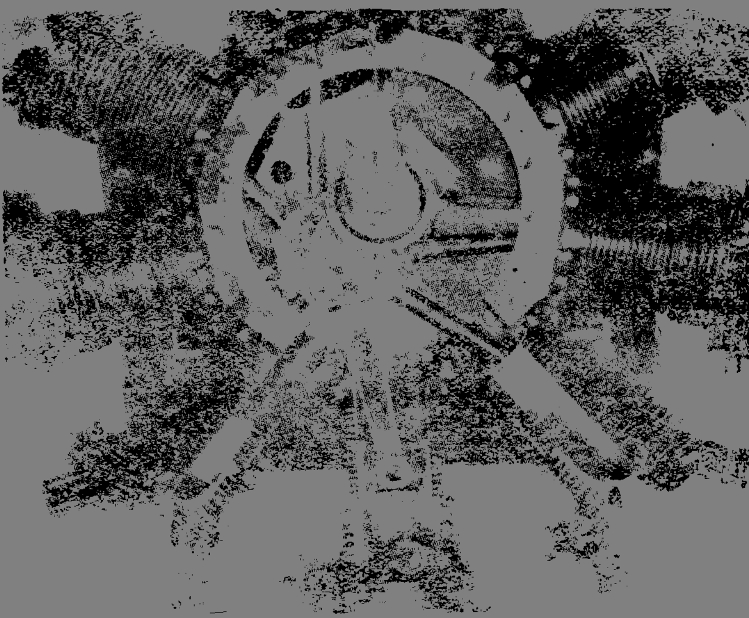


圖 254. 九氣缸輻射式飛機發動機.

習題四十四

(1) 每分鐘能供給200〔大卡〕之熱量於蒸汽機,而所供給之熱量僅其十分之一變爲功時,問此機之功率爲幾〔馬力〕?

(2) 汽車與飛機,何以不用蒸汽機,而用內燃機?

(3) 每〔加侖〕汽油約可得40,000〔大卡〕之熱. 有一內燃機每〔小時〕耗油10〔加侖〕,假定效率爲24%,可生若干〔馬力〕?

(4) 在汽車之氣缸中,汽油之燃燒可使溫度高至2400 °C,較鋼之熔點

爲高，問氣缸何以不至熔解?

(5) 一火車頭蒸汽機活塞之截面積爲 160〔吋²〕，衝程之長爲 2〔呎〕，若平均有效汽壓力爲 110〔磅/吋²〕。(a)活塞上之總壓力爲若干? (b)活塞來回一次，作功多少? (c)活塞來回一次，車輪即旋轉一次，若每〔分〕鐘輪轉 120 次，求火車頭之〔馬力〕。(d)若車輪之直徑爲 5〔呎〕，求火車之速度。(e)若車輪與鐵軌之摩擦係數爲 0.06，求火車所能載之重量。

附　　錄

上冊習題答數

習題一　(1) 35.3〔立方呎〕; 2204〔磅〕; 62.14〔磅〕. (2) 3.4 哩. (3) 3.9〔公斤〕. (4) 6.366×10^6〔米〕. (5) 11〔立方厘米〕. (7) 1.57〔弳〕; 90〔度〕.

習題二　(2) 8.8〔克/立方厘米〕;銅. (3)重度爲原來的 $1\,^1/_{14}$. (4)金 40.6〔克〕;銀 9.4〔克〕. (5) 0.80;煤油. (6)(*a*) 500〔立方厘米〕; (*b*)91〔立方厘米〕; (*c*) 800〔克〕, 8.8; (*d*) 銅. (7) 5.5〔立方米〕. (8) 7800〔仟克〕. (9) 0.114〔毫米〕; 0.63〔克/立方厘米〕.

習題三　(1) 45〔仟克〕. (2) 10〔厘米^3〕; 7000〔厘米^3〕; 1.28〔厘米^3〕. (3) 1:3. (4) 25〔厘米〕.

習題四　(2) 2〔厘米〕; 6〔厘米〕. (3) 1.7〔仟克〕. (4) 0.5〔仟克/厘米^2〕. (5) 398〔仟克/厘米^2〕; 0.992〔仟克/厘米^2〕. (7)(*a*)0.196〔仟克/厘米^2〕; (*b*) 0.786〔仟克/厘米^2〕; (*c*) 4.58〔仟克/厘米^2〕. (8) 20〔米^2〕. (9) 0.025〔厘米〕.

習題五　(1) 5〔仟克〕; 北偏西 54°10′. (2) 50〔仟克〕,與二力各成 60°. (3) 19.98〔仟克〕; 1〔仟克〕. (4) 2. (5) 3 及 1. (6) 18°30′; 0.81〔仟克〕. (7) $\sqrt{2}$ F,與他一分力 F 成 135°. (8) 162°50′, 135°, 62°10′. (10) 283〔磅〕. (11) 6.5〔仟克〕. (12) 6,方向與力 5 相同.

習題六　(1) 1.2〔仟克〕; 1.6〔仟克〕. (2)4〔尺〕. (3)*A* 80〔仟克〕, *B* 40〔仟克〕. (4) 80〔仟克-厘米〕. (5) 19.2〔厘米〕. (6)右方 8〔厘米〕處; 7.5〔仟克〕.

習題七　(1) 1852〔米〕. (3) 50〔厘米〕. (5) 120〔磅〕. (6) 145〔磅〕. (7) 55〔仟克〕;離粗端 2〔米〕處. (8) 80〔噸〕; 距東端 50〔呎〕.

習題八　(4) 52〔吋〕.

習題九 (1) 1300〔仟克·米〕; 7.2〔仟克·米/秒〕. (2) 10^5〔克·厘米〕; 7.23〔呎·磅〕. (3) 173,200〔仟克·米〕. (4) 104〔呎·磅/秒〕. (5) 240〔馬力〕.

習題十 (4) 0.1〔厘米〕. (5)距懸盤5寸處; 21寸處. (6) 270〔仟克〕; 9. (7)(*a*) 7.5〔仟克〕; (*b*) 11.7〔仟克〕. (9) 4.6〔斤〕; 6.4〔斤〕. (10) 4. (11) 20〔仟克〕. (12) 1.67〔仟克〕; 125〔仟克·米〕. (13) 5655〔仟克〕. (14) 1:1; 2. (15) 4:25. (16) 3840〔仟克〕. (17) 2000〔呎·磅〕; 3360〔呎·磅〕; 59.5%. (18) 37.5〔磅〕: 50〔磅〕. (19) 0.076〔馬力〕. (22) 150〔磅〕, 281.5〔吋〕.

習題十一 (1) 40〔克/厘米^2〕; 120〔仟克〕. (2)(*a*) 3〔仟克/厘米^2〕; (*b*) 0.8〔仟克/厘米^2〕; (*c*) 0. (3) 0.433〔磅/吋^2〕; 8.66〔磅/吋^2〕. (4) 2.31〔呎〕. (5) 115.5〔呎〕. (6) 1033.6〔克/厘米^2〕; 1033.6〔厘米〕. (7) 1125〔仟克·米〕. (8) 420〔噸〕. (9)(*a*) 144.7〔仟克〕; (*b*) 184.9〔仟克〕; (*c*) 1030〔仟克〕.

習題十二 (2) 0.938.

習題十三 (1) 20〔仟克〕. (2) 120〔厘米〕; 90〔厘米〕. (3) 4.33 $\times 10^3$〔磅〕. (4) 1.04〔呎〕.

習題十四 (1) (*a*) 2〔噸〕; (*b*) 3〔噸〕; (*c*) 1〔噸〕; (*d*) 1〔噸〕. (4) 154〔厘米^3〕.

習題十五 (4) 42〔磅〕. (5) 72〔仟克〕. (6) 1.7〔仟克〕. (7) 8; 0.8. (8) 0.8. (9) 2.6; 0.33. (10) 7.6. (11)(*a*) 150〔厘米^3〕; (*b*) 100〔厘米^3〕; (*c*) 2.7. (12)鋅 13.8〔克〕; 銅 26.9〔克〕. (10) 1.01.

習題十六 (4) 597〔仟克〕. (5) 1.25〔米〕. (6) 1250〔厘米〕. (7) 50〔仟克〕.

習題十七 (3) 8〔仟米〕. (4) 124〔噸〕; 145〔噸〕. (7) 713〔磅〕. (8) 1234〔克/厘米^2〕. (9) 66.3〔厘米〕. (10) 970〔米〕. (11) 6〔大氣壓〕.

習題十八 (5) 562〔厘米〕.

習題十九 (1) 870.4〔克/厘米^2〕. (2) $\frac{1}{3}$〔大氣壓〕. (3) 51〔厘米〕水銀柱高. (4) 105〔厘米〕水銀柱高. (5) 115〔磅/吋^2〕. (6) 5.2〔立

方呎]。(7) 3.45 [米]。

習題二十 (1) 22 [米]. (2) 53.9 [仟米/小時]. (3) 0. (4) 200 [米/分]. (5) 30 [米]; 160 [米]. (7) 14.5 [米/秒], 與火車進行方向成 163° 56′.

習題二十一 (1) 10 [秒]. (2) 10 [米/秒]. (3) 463 [米]. (4) (*a*) 1 [仟米/分^2]; (*b*) 1 分. (5) 19.6 [米]; 19.6 [米/秒]. (6) 14.8 [米/秒]. (7) 19.9 [米/秒].

習題二十二 (1) 1 [克]重; 980 [達因]. (2) 240 [達因]. (3) 65.3 [米/秒^2]. (4) $\frac{24}{49}$; 48 [米/秒]. (5) 240 [克]. (6) 0.68×10^6 [達因]. (7) 1 [仟克]. (8) 7.95×10^7 [達因]; 37.9 [厘米/秒^2]. (9) 15.36×10^6 [達因]. (10) 2×10^6 [達因]. (11) 150 [仟米/秒^2]; 1458 [仟米·秒^2]; 150×10^6 [達因]; 1458×10^6 [達因]. (12) 255 [仟克·米/秒]; 6.38×10^8 [達因]. (15) 0.102 [仟克·米]; 0.737 [呎·磅]. (16) 1.013 [巴]. (17) 10^5 [達因]; [焦耳]與[瓦特]. (20) (*a*) 70 [仟克]; (*b*) 78.6 [仟克]; (*c*) 61.4 [仟克].

習題二十三 (3) 50 [呎/秒]. (4) 28,000 [達因]. (5) 226 [厘米/秒^2].

習題二十四 (1) 9.65 [秒]; 94.5 [米/秒]. (2) 6.57 [米/秒]. (3) 2940 [厘米/秒]; 4410 [厘米]. (4) 0; 4.12 [米]. (5) 15.65 [秒]; 869.4 [米]. (6) 28 [米]. (7) (*a*) 1.02 [秒], 5.1 [米]; (*b*) 2.04 [秒], 35.3 [米]. (8) 10°53′. (9) 6.26 [米/秒]; 12.8 [秒]. (10) 1.92 [秒]; 21.8 [米]. (11) 4.37 [米].

習題二十五 (1) 196 [焦耳]; 8.85 [米/秒]; 106 [焦耳]. (2) (*a*) 48 [米/秒]; (*b*) 51.9 [米/秒]. (4) 10,400 [仟克]. (5) 3268 [焦耳]; 1089×10^7 [達因]. (6) (*a*) 2.45×10^6 [焦耳]; (*b*) 54.7 [馬力].

習題二十六 (2) 0.18. (3) 18.8 [磅]. (4) 8.3 [仟克]. (5) 5 [仟克]. (6) 36 [仟克]; 0.37, 0.55 [米]. (7) 286 [厘米/秒^2]; 586 [厘米/秒]; 181 [厘米/秒]. (8) 5.88×10^6 [呎,磅]. (9) 3.3 [秒]; 26.7 [呎].

習題二十七 (1) (*a*) 465 [米/秒]; 329 [米/秒]. (6) 7.02×10^5 [達因]. (7) 8° 56′. (8) 1283 [仟米/米].

習題二十八 (3) 17 倍。(4) 3.65×10^{18}〔噸〕。

習題二十九 (2) 16:25。(3) 981〔厘米/秒^2〕。(4) 快 30〔秒〕。

習題三十 (1) 3.3×10^{-24}〔克〕。 (15)(*a*) 1.27, 2.22, 0.97; (*b*) 18.2, 32, 14。

習題三十一 (2) 100°C, 37.8°C, −50°C. (3) 1832°F, 674.6°F, 102.2°F., 14°F. (4) −40°C.

習題三十二 (2) 252〔卡〕。(4) 12.4%。(5) 50〔克〕。

習題三十三 (1) 0.056〔卡/克〕。(2) 1035°C. (3) 6.6 及 13.4〔加侖〕。(4) 0.32〔卡/克〕。

習題三十四 (1) 50.015〔呎〕; 248.73〔呎〕。 (2) 鋅比鋼長 0.137 厘米〕。(4) 0.000187。(5) 3532.5〔厘米^3〕。(7) 1.0034〔升〕。

習題三十五 (1) 0.9999; 1; 0.9997; 0.9983. (3) 1.09〔夸脫〕。(4) (*a*) 0.000031; (*b*) 0.00097。(5) 1034.2〔克/厘米^2〕。 (6)(*a*) 0.000015; (*b*) 11.1〔克〕; (*c*) 67.7°C.

習題三十六 (2) 4 倍。(3) 123.7〔呎^3〕。(4) 0.719〔克/升〕。(5) 51.4〔磅/吋^2〕; 75°C. (6) 93.2°C. (7) 458.3°C.; 4.42〔大氣壓〕。(8) 1.079〔米^3〕。(9) 2.6。(10) 0.053〔克〕。(11) 33.5〔仟克〕。

習題三十七 (9) 63〔克〕。 (12) 2.62〔卡〕: 1.96°C.

習題三十八 (1) 6,600〔卡〕。(2) 70.4°C. (3) 5.94〔卡/克〕。(5) 10 分; 2.67°*C*. (6) 1.09〔升〕。(7) 1800〔仟克/厘米^2〕。

習題三十九 (3) 0.058〔克〕。

習題四十 (3) 18,600〔卡〕。 (4) 汽 1.93×10^6〔克〕; 沸水 14.5×10^6〔克〕 (6) 14.5°C. 之水。(8) 110°C.

習題四十一 (5) 2498〔克〕; 1666〔克〕。 (8) 31%。

習題四十二 (1) 1.6〔仟克〕。(2) 2140〔焦耳〕。(3) 101〔大氣壓〕。

習題四十三 (4) 7〔克〕。 (5) 0.56°C.

習題四十四 (1) 23.4〔馬力〕。 (3) 449〔馬力〕。 (5)(*a*) 17,600〔磅〕; (*b*) 70,400〔呎磅〕; (*c*) 256〔馬力〕; (*d*) 1885〔呎/分〕; (*e*) 74,780〔磅〕。