

遵照教育部頒布修正課程標準編輯

新課程標準世界中學教本

高級中學學生用

高中新物理學

上 冊

著者 蔡望斗

世界

局印行

孫光遠先生序

高中物理學教本爲數不多，而適合課程標準，利於教學者尤艱。壽君望斗本其多年研究，精心得與教學之經驗編成高中新物理學，綜觀全書選材新穎，編制縝密，由淺入深，循序而進，不特利於學，亦利於教。至於溫習提要尤爲是書特色，其有裨於學者可以無疑。洵善本也。爰誌數言，弁諸卷首。

民國二十六年一月

孫光遠 序於中大理學院

編輯大意

(1) 本書係遵照教育部公布之修正高級中學物理課程標準編纂而成，供高級中學及同等程度之師範學校，職業學校教科書之用。

(2) 本書分上下兩冊，上册述緒論，物性，力學，熱學，聲學。下册述光學，磁學，電學。所叙各種現象，原理等項，均由淺入深，循序漸進，學者習此，易見進步，而不致感受困難。

(3) 本書於各章之末，附有溫習提要，凡本章中所有定義，定律，公式，單位，儀器，方法等等，均分類列舉標題，而留相當空白。教師於授畢一章之後，務令學生先行溫習，而後填寫提要。學者經此一番功夫，所得印象必深，他日升學，會考，預備至感便利。其他中西物理教本，雖亦有於章末附以提要者，但均為編者所作，而非學生自填，故其印象較淺。且有一部分學生，往往僅閱提要，不讀正文，而提要甚簡，致未能獲得全部之知識，亦為一大缺點。若竟不用提要，是猶因噎廢食，編者爰創新法，可使提要之利愈著，而其弊則已盡去之矣。又緒論後之溫習提要，已由編者填就，以作示例。

(4) 本書各章問題，分量平均，難易適度。其中關於解釋現象者，大都為日常生活之有趣問題。關於計算數量者，祇求學生能了解原理，應用公式，求得正確數值，註明適當單位，凡須應用較深算學方能解決者，概不列入。

(5) 本書所用名詞，悉以教育部公布之物理學名詞（國立編譯館編訂）為依據。中等學生，開始校正，易收譯名統一之效。

(6) 本書插圖，均置於右首。較之一圖在左，一圖在右，極不

整齊者，易於翻閱，而且美觀，此亦排印教本改進之一點。

(7) 本書編纂，先有綱要，編者曾用作筆記，試教有年，屢加修改。今就此綱要，擴充成書，故於實際教學情形，定能適合。

(8) 本書編纂時，參考中英日文物理學書籍雜誌二十餘種，取其長而棄其短。書中舉例，力求簡明。示教實驗均屬輕而易舉。至於教材之排列，文字之組織，尤費斟酌。區區之意，惟期增進教學效能，不敢謂為盡善盡美也。海內君子，進而教之，不勝幸甚。

編者識於中央大學

上册目次

緒論

- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| 1. 物質與物體.....1 | 9. 質量之單位.....5 |
| 2. 自然科學與物理
學.....1 | 10. 時間之單位.....6 |
| 3. 觀察與實驗.....2 | 11. C.G.S.制及F.P.S.制...6 |
| 4. 歸納與演繹.....3 | 12. 我國新訂之度量
衡制.....7 |
| 5. 假說與理論.....3 | 13. 游標尺.....8 |
| 6. 理量.....3 | 14. 天平.....9 |
| 7. 單位.....4 | 15. 停錶.....10 |
| 8. 長度之單位.....4 | 16. 密度及比重.....10 |

第一編 物性

第一章 分子現象

- | | |
|------------------|-----------------|
| 17. 物質之通性.....15 | 22. 溶解.....21 |
| 18. 分子力.....18 | 23. 吸收.....22 |
| 19. 分子運動.....18 | 24. 粘滯性.....23 |
| 20. 擴散.....19 | 25. 表面張力.....21 |
| 21. 滲透.....20 | 26. 毛細現象.....25 |

第二章 固體

- | | |
|---------------|-----------------|
| 27. 彈性.....31 | 28. 虎克定律.....32 |
|---------------|-----------------|

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 29. 彈簧秤.....32 | 31. 延性及展性21 |
| 30. 應變之種類33 | |

第三章 液體

- | | |
|-------------------|--------------------|
| 32. 液體中之壓力.....37 | 37. 水壓機.....43 |
| 33. 靜液之自由面.....39 | 33. 阿基米得原理.....44 |
| 34. 連通管.....40 | 39. 物體之浮沉.....45 |
| 35. 自來水.....42 | 40. 液體比重之測法.....47 |
| 36. 巴斯噶原理.....42 | 41. 固體比重之測法.....49 |

第四章 氣體

- | | |
|-------------------|------------------|
| 42. 氣體之性質.....57 | 47. 氣體之浮力.....62 |
| 43. 氣體之比重.....57 | 48. 波義耳定律.....63 |
| 44. 氣體之壓力.....58 | 49. 流體壓力計.....64 |
| 45. 大氣壓之測定.....59 | 50. 各式唧筒.....65 |
| 46. 氣壓計.....60 | 51. 虹吸管.....67 |

第二編 力學

第一章 力之分合及平衡

- | | |
|--------------------------|-------------------|
| 52. 力之圖示.....73 | 58. 平行力之合成.....78 |
| 53. 合力與分力.....73 | 59. 力偶.....80 |
| 54. 力之平行四邊形
定律.....74 | 60. 平衡之條件.....81 |
| 55. 力之分解.....75 | 61. 重心.....81 |
| 56. 同點力之平衡.....77 | 62. 物體之平衡.....83 |
| 57. 力矩.....78 | 63. 浮體之平衡.....84 |

第二章 機械與功

64. 功	90	73. 功之原理	98
65. 功率	1	74. 差動滑輪	99
66. 簡單機械	91	75. 連動齒輪	100
67. 機械利益	92	76. 斜面	101
68. 槓桿	92	77. 螺旋	102
69. 秤	91	78. 磅	103
70. 複權法及代替法	95	79. 機械效率	104
71. 滑輪	96	80. 水車	104
72. 輪軸	98		

第三章 運動

81. 運動與靜止	111	86. 加速度	114
82. 位移	111	87. 等加速運動	114
83. 速度與快慢	112	88. 自由落體運動	115
84. 等速運動及變速 運動	112	89. 拋下運動	117
85. 平均速度及瞬時 速度	113	90. 拋上運動	117
		91. 拋體運動	118
		92. 斜面上之運動	120

第四章 動力學之基本定律

93. 牛頓之運動第一 定律	126	97. 力之絕對單位	128
94. 動量	126	98. 質量與重量	129
95. 衝量	127	99. 牛頓之運動第三 定律	130
96. 牛頓之運動第二 定律	127		

100. 萬有引力定律 ..131 |

第五章 圓周運動

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 101. 圓周運動.....136 | 106. 單擺.....141 |
| 102. 向心力.....137 | 107. 轉動.....143 |
| 103. 離心力.....138 | 103. 角速度.....144 |
| 104. 圓周運動之週期 139 | 109. 角加速度.....145 |
| 105. 簡諧運動.....140 | 110. 飛機.....146 |

第六章 摩擦

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 111. 摩擦.....151 | 114. 摩擦係數之測法 152 |
| 112. 摩擦之種類.....151 | 115. 減少摩擦之方法 153 |
| 113. 摩擦之定律.....152 | 116. 流體摩擦.....154 |

第七章 能量

- | | |
|---------------------|-------------------|
| 117. 功.....157 | 121. 動能.....158 |
| 118. 功之絕對單位.....157 | 122. 能之變化.....159 |
| 119. 瓦特.....158 | 123. 能量不滅.....159 |
| 120. 位能.....158 | 124. 永久運動.....160 |

第三編 熱學

第一章 溫度及溫度計

- | | |
|------------------|-----------------------|
| 125. 溫度.....163 | 129. 水銀溫度計之優點.....166 |
| 126. 溫度計.....163 | 130. 最高及最低溫度計.....167 |
| 127. 溫度計之固定點 164 | |
| 128. 溫度標.....165 | |

第二章 膨脹及其應用

- | | |
|------------------------|----------------------|
| 131. 固體之膨脹171 | 135. 氣體之膨脹178 |
| 132. 固體線膨脹之應用173 | 136. 絕對溫度179 |
| 133. 液體之膨脹175 | 137. 氣體定律180 |
| 134. 水之膨脹177 | 138. 定容氫溫度計181 |

第三章 熱量與比熱

- | | |
|---------------------|---------------------|
| 139. 熱之來源186 | 142. 比熱187 |
| 140. 熱之本性186 | 143. 比熱之測法188 |
| 141. 熱量之單位187 | |

第四章 物態變化

- | | |
|---------------------|--------------------|
| 144. 熔解192 | 152. 昇華199 |
| 145. 凝固192 | 153. 臨界溫度199 |
| 146. 復冰193 | 154. 永久氣體之液化 200 |
| 147. 冷劑194 | 155. 製冷設備201 |
| 148. 汽化及液化195 | 156. 濕度202 |
| 149. 蒸發196 | 157. 濕度計203 |
| 150. 飽和汽197 | 158. 氣象問題205 |
| 151. 沸騰198 | |

第五章 熱之傳播

- | | |
|--------------------|----------------------|
| 159. 熱之傳播210 | 162. 輻射213 |
| 160. 傳導210 | 163. 冰箱及熱水瓶214 |
| 161. 對流212 | 164. 暖室法214 |

第六章 熱與功

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 165. 熱功當量.....218 | 167. 蒸汽輪機.....220 |
| 166. 蒸汽機.....219 | 168. 內燃機.....221 |

第四編 聲學

第一章 波動

- | | |
|-----------------|-------------------|
| 169. 波動.....225 | 173. 波之反射及折射 227 |
| 170. 橫波.....226 | 174. 波之干涉.....228 |
| 171. 縱波.....227 | 175. 駐波.....229 |
| 172. 波前.....227 | |

第二章 聲波

- | | |
|--------------------|--------------------|
| 176. 聲波.....232 | 180. 聲波之干涉.....236 |
| 177. 聲波之速度.....234 | 181. 拍.....237 |
| 178. 聲波之反射.....234 | 182. 共鳴.....238 |
| 179. 聲波之折射.....235 | 183. 聲波速度之測法 240 |

第三章 樂音

- | | |
|-----------------|--------------------|
| 184. 樂音.....244 | 187. 音品.....247 |
| 185. 響度.....245 | 188. 都卜勒原理.....248 |
| 186. 音調.....245 | 189. 音階.....248 |

第四章 樂器

- | | |
|--------------------|------------------|
| 190. 樂器.....253 | 194. 昆忒管.....257 |
| 191. 弦之振動.....253 | 195. 聲帶.....258 |
| 192. 氣柱之振動.....254 | 196. 留聲機.....259 |
| 193. 簧及膜之振動...256 | |

圖表目次

[圖]

1. 米原器	5	26. 自來水	42
2. 公斤原器	5	27. 壓力之傳達	43
3. 市寸與厘米之關係	8	28. 水壓機之原理	43
4. 游標尺	8	29. 水壓機	44
5. 天平	9	30. 阿基米得原理之實驗證明	45
6. 停錶	10	31. 阿基米得原理之理論證明	45
7. 慣性	15	32. 物體之浮沉	45
8. 擴散(一)	19	33. 浮體	46
9. 擴散(二)	20	34. 浮沉子	46
10. 滲透	20	35. 比重瓶	47
11. 吸附	23	36. 液中物體重量之測法	47
12. 防滲面罩	23	37. 比重計	48
13. 肥皂液膜之收縮	24	38. 漢埃儀器	48
14. 表面張力之解釋	25	39. 輕固體比重之測法	50
15. 毛細現象	26	40. 測空氣之重	58
16. 毛細現象之解釋	27	41. 馬德堡半球	59
17. 虎克定律	32	42. 托里拆利實驗	59
18. 彈簧秤	33	43. 福廷氣壓計	60
19. 液體壓力之量度	37	44. 無液氣壓計	61
20. 靜液怪事之實驗	38	45. 氣壓記錄器	62
21. 鉛直線與自由面	39	46. 氣體之浮力	62
22. 氣泡水準	40	47. 氣球及飛艇	63
23. 連通管(一)	40	48. 波義耳實驗	63
24. 連通管(二)	41	49. 流體壓力計	64
25. 兩液之境界面	41		

50. 抽氣機	65	82. 三種槓桿	92
51. 潛水作業	66	83. 秤	94
52. 吸取唧筒	67	84. 定滑輪	96
53. 壓力唧筒	67	85. 動滑輪	96
54. 消防唧筒	67	86. 複滑輪	97
55. 虹吸管	68	87. 輪軸	98
56. 斷續虹吸及斷續泉	68	88. 功之原理	98
57. 一直線上二力之合成	74	89. 差動滑輪	99
58. 力之平行四邊形	74	90. 連動齒輪	100
59. 合力之計算	74	91. 斜面	101
60. 力之多邊形	75	92. 螺旋	102
61. 力之分解	76	93. 測微計	102
62. 帆所受風力之分解	76	94. 螺旋壓機及起重螺旋	102
63. 二力之平衡	77	95. 劈	103
64. 三力之平衡	77	96. 上擊水車	104
65. 數力之平衡	77	97. 下擊水車	105
66. 力矩	78	98. 水輪機	105
67. 同方向二平行力之合力	79	99. 位移之合成	111
68. 反方向二平行力之合力	80	100. 位移之分解	112
69. 力偶	80	101. 平均速度	113
70. 重心	81	102. 落體試驗	115
71. 求重心法	82	103. 自由落體運動	116
72. 三角板之重心	82	104. 拋物線	118
73. 正立方體之重心	82	105. 拋體運動	118
74. 環之重心	82	106. 斜面上之運動	120
75. 三種平衡	83	107. 反作用定律	136
76. 穩定平衡	83	108. 馬曳車前進之理	131
77. 不穩平衡	84	109. 地球內部物重減輕	132
78. 隨遇平衡	84	110. 圓周運動	133
79. 浮體之平衡	85	111. 向心力	137
80. 功之量度	90	112. 離心力	138
81. 槓桿	92	113. 火車轉彎向內傾斜	138

114. 車軌之斜度	139	146. 水之最大密度	177
115. 簡諧運動	140	147. 氣體之膨脹	178
116. 單擺	142	148. 攝氏與絕對溫度之關係	180
117. 地	143	149. 定容氫溫度計	181
118. 陀螺	144	150. 熱量器	189
119. 角速度與線速度	144	151. 復冰	194
120. 角加速度與線加速度	145	152. 汽化熱之測法	195
121. 飛機	146	153. 最大壓力	197
122. 最大摩擦垂直壓力	151	154. 沸點與壓力之關係	198
123. 滾動摩擦	152	155. 氣體之液化	200
124. 滑動摩擦係數	153	156. 製冷設備	201
125. 滾動摩擦係數	153	157. 露點濕度計	204
126. 減少摩擦之方法	154	158. 毛髮濕度計	204
127. 降落傘	155	159. 乾濕泡濕度計	205
128. 能量不滅	160	160. 水爲非導體	210
129. 空氣溫度計	163	161. 金屬之傳導	211
130. 固定點之測法	164	162. 水之對流	212
131. 三種溫度標	165	163. 空氣之對流	212
132. 最高溫度計	167	164. 輻射計	213
133. 最低溫度計	167	165. 冰箱	214
134. 醫用溫度計	168	166. 熱水瓶	214
135. 息克斯溫度計	168	167. 熱水暖室法	215
136. 線膨脹	171	168. 室內空氣之對流	215
137. 面膨脹	172	169. 焦耳實驗	218
138. 容積膨脹	173	170. 往復蒸汽機	219
139. 鐵橋	174	171. 離心節速器	220
140. 補償擺	174	172. 蒸汽輪機	220
141. 複金屬板	174	173. 輪機之葉片	221
142. 溫度記錄器	175	174. 內燃機	221
143. 液體體脹係數之測法	175	175. 四個動程	222
144. 視膨脹	176	176. 飛機上用輻射形發動機	222
145. 水之膨脹曲線	177	177. 水波	225

178. 橫波.....	226	196. 利用共鳴以測音速.....	246
179. 縱波.....	227	197. 樂音與噪聲之成因.....	244
180. 波之干涉.....	228	198. 樂音與噪聲之代表曲線.....	244
181. 駐波.....	229	199. 測音器.....	245
182. 音之生成.....	232	200. 振數記錄器.....	246
183. 音叉之振動.....	232	201. 基音與泛音.....	247
184. 聲波.....	233	202. 一弦同時發出基音與第 一泛音.....	247
185. 聲波之傳播.....	233	203. 赫爾姆霍斯共鳴器.....	248
186. 真空不能傳聲.....	234	204. 等程音階.....	250
187. 聲波之反射.....	235	205. 風琴管.....	251
188. 聲波之折射(一).....	235	206. 板之振動.....	250
189. 聲波之折射(二).....	236	207. 膜之振動.....	250
190. 干涉管.....	236	208. 鐘之振動.....	250
191. 干涉之例.....	237	209. 棒之縱振動.....	257
192. 拍之成因.....	237	210. 昆忒管.....	257
193. 音叉之共鳴.....	239	211. 聲帶.....	258
194. 弦之共鳴.....	239	212. 收音盒.....	259
195. 空氣柱之共振.....	239		

[表]

1. 長度之單位.....	5	9. 比熱.....	188
2. 質量之單位.....	6	10. 熔點及熔解熱.....	192
3. 英制單位及其與法制單 位之關係.....	7	11. 冷劑.....	195
4. 我國現行度量衡制.....	8	12. 臨界溫度及臨界壓力.....	200
5. 普通物質之比重.....	11	13. 水汽之最大壓力及最大 密度.....	203
6. 氣體之比重與密度.....	58	14. 導熱係數.....	212
7. 固體之線脹係數.....	172	15. 聲波之速度.....	234
8. 液體之體脹係數.....	176	16. 音階.....	249

緒 論

1. 物質與物體(Matter and Body)

凡佔有空間一定之地位,可由吾人感官之知覺而認識其存在者,曰**物質**。物質之一部分,有大小形狀可言者,則謂之**物體**。故物質為構成物體之**實質**,例如桌,椅,板,櫈,均為物體,而構成此等物體之木材,則稱為物質。

物質之狀態有三:具有一定之體積及一定之形狀者,曰**固體**(Solid)。有一定之體積,但其形狀隨容器而改變者,曰**液體**(Liquid)。無一定之體積,亦無一定之形狀,不拘容器之大小,均可充滿於其間者,曰**氣體**(Gas)。固體,液體,氣體稱為**物質之三態**(Three states of matter)。水在平常溫度時為液體,熱之則化汽,冷之則成冰,可見物質之狀態,常隨溫度而變更。此種**物態之變化**(Change of states)當於第三編熱學中詳述之。又液體及氣體,皆極易流動,故此二者,又可總名之謂**流體**(Fluids)。

2. 自然科學與物理學(Natural Sciences and Physics)

宇宙之間,日月星辰,高山大川,鳥獸蟲魚,花草竹木,形形色色,存在於吾人周圍之物體集團,謂之**物質界**,或

曰自然界 (Natural world)。自然界中之一切物體，如星球之運行，風雲之幻變，每隨時而改易其位置及性質，此等變化，謂之自然現象 (Natural phenomena)。各種現象，雖繁簡不同，變化無窮，然皆合法則，循規律；其間因果關係，恆一定不易，是曰自然律 (Natural law)。研究自然現象，以明其因果關係，而發現各種自然律之科學，曰自然科學。

物理學爲自然科學之一種，專論物理現象，爲研究便利計，本書將分爲下列七編詳述之：

(一) 物性 (Properties of matter)；

(二) 力學 (Mechanics)；

(三) 熱學 (Heat)；

(四) 聲學 (Acoustics)；

(五) 光學 (Optics)；

(六) 磁學 (Magnetism)；

(七) 電學 (Electricity)。

3. 觀察與實驗 (Observation and Experiment)

自然科學既以自然現象爲研究之對象，故必須藉觀察以搜集事實。觀察云者，即就自然現象中，注意其經過之詳細情況也。惟天然發生之現象，機會不多，情形複雜，故僅恃觀察以尋求因果關係，頗非易事，必賴實驗以輔佐之。實驗云者，即應用適宜器械，使所研究之現象，得在吾人節制之下而觀察之也。自伽利略 (Galileo) 試驗落體運動後，學者始重視實驗，科學之進步，亦因之加速。惟天文、氣象等學，因其所研究之現象，非吾人所能節制，常須歷長時間之觀察，而後始能獲得相當之結果，故其進步較物理學、化學等爲遲緩也。

4. 歸納與演繹(Induction and Deduction)

由觀察及實驗，可得明白正確之事實(Facts)，自多數同類之事實，彙考審核，以得一普遍之定律者，謂之歸納法。由已知之定律，推出其他已知或未知之事實者，謂之演繹法。例如由動能與位能之互變，熱能與工作之關係等等，可得能量不滅之定律，又由此定律，可以推知一切機械，若不供給能力，而欲使之永久運動，乃為不可能之事實，前者為歸納，後者為演繹；歸納與演繹，乃研究科學之基本方法也。

5. 假說與理論(Hypothesis and Theory)

某一現象與他事之因果關係既明，換言之，即此現象所遵從之定律，已經求得時，則謂此現象已有解釋或說明(Explanation)。為解釋現象起見，吾人常憑思考，立一想像之說，是謂假說。假說之優劣，視其所能解釋事實之多寡而定，若所立假說與某種事實發生矛盾時，則當捨棄之，而另立新說。

若一假說，可以說明衆多之現象時，則此假說常被擴充而成一理論，或曰學說。例如解釋氣體之壓力，恆以分子運動之假說為依據，又因此假說所能解釋之現象甚多，故成爲一種學說。

6. 物理量(Physical Quantity)

凡可以設法量度其大小，輕重或多寡者，稱爲量。關於物性（如重量等）或物理現象（如速度等）之量，稱爲物理量。

物理學中，量之測定，極關重要。蓋吾人研究各種現象時，不特須確定與所研究現象有關之要素及原因，並須測定與其有關之物理量，而發見其間更正確之關係，方為滿足。前者屬於定性的 (Qualitative) 研究，後者屬於定量的 (Quantitative) 研究。例如一切物體，苟無支托，必向地面落下，考其原因，乃由受重力之作用所致。惟重力之大小，與質量及距離之關係若何，則必須由定量的研究，方能知之。

7. 單位 (Unit)

欲測一量，必須就同種類中取一適當之量，作為標準，此項標準，謂之單位。一量與其單位之比值，名為此量之數值 (Numerical value)。量之大小 (Magnitude)，須由數值及單位兩者同時表出之。初學物理者，對於量的問題，往往專重數值，忽視單位，實為大謬。今有一馬，日行千里，良駒也；若謂日行千步，則駑馬之不若矣。是故數值雖同，而單位互異，則量之大小迥殊，學者於此，當三致意焉。

單位分兩種：一曰基本單位 (Fundamental unit)，可用以直接測度一量之大小者，如長度 (Length)，質量 (Mass)，時間 (Time) 之單位是也。一曰導出單位 (Derived unit)，由基本單位適當組合而成者，如體積，速度等之單位是也。

8. 長度之單位 (Unit of Length)

單位制度，各國不同；學術上常採取法國制，因其進率為十，應用便利故也。法國制中，長度之單位為米，一米之長，最初所定者，等於通過巴黎天文台之子午線，自赤道至北極之長之一千萬分之一；嗣後發見當時測定子

午線時，略有差誤；且恐年代久遠，地球漸次冷縮，長度亦當改變，不能取為標準，乃於1891年改用鉑90%及鈹10%之合金，造成一國際米原器(International standard meter)貯於國際度量衡局中，此器約長1.02米，其橫斷面形如X(圖1)。在溝內距兩端約1厘米處，各刻有標線一條，在0°C.時，此兩標線間之距離即表正確之一米。

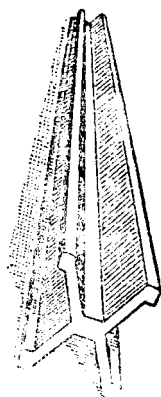


圖1. 米原器

以米為長度之單位，有時嫌其大，有時嫌其小，故實用上尚有多種補助單位，列表於下：

表 1. 長 度 之 單 位

譯 名	西 名	縮 寫	與米之關係
仟米(公里)	Kilometer	Km.	1000 米
佰米(公引)	Hectometer	Hm.	100 米
什米(公丈)	Decameter	Dm.	10 米
米(公尺)	Meter	m.	1 米
分米(公寸)	decimeter	dm.	0.1 米
厘米(公分)	centimeter	cm.	0.01 米
毫米(公厘)	millimeter	mm.	0.001 米

9. 質量之單位(Unit of Mass)

物體所含物質多寡之量，謂之質量。質量之單位為仟克，或稱公斤。國際度量衡局中，亦存有鉑鈹合金製成之公斤原器(Standard kilogram)，其形狀如圖2。一千立方厘米之蒸餾水在4°C.時之質量，即為1仟克。

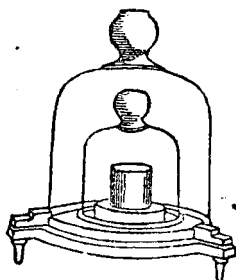


圖 2. 公斤原器

此種單位，實用時每嫌過大，故通常取其一千分之一為質量之單位，名曰 1 克。各種補助單位，如表 2。

表 2. 質量之單位

譯 名	西 名	縮 寫	與克之關係
仟克(公斤)	Kilogram	Kg.	1000 克
佰克(公兩)	Hectogram	Hg.	100 克
什克(公錢)	Decagram	Dg.	10 克
克(公分)	gram	g.	1 克
分克(公厘)	decigram	dg.	0.1 克
厘克(公毫)	centigram	cg.	0.01 克
毫克(公絲)	milligram	mg.	0.001 克

10. 時間之單位(Unit of Time)

時間之單位，各國皆用秒 (Second)。自今日正午至明日正午所歷之時間，稱為一太陽日 (Solar day)。惟一年之中，各太陽日之長短，微有差別，就一年中所有之太陽日而平均之，是謂1 平均太陽日 (Mean solar day)，簡稱 1 日。1 日分為 24 小時，1 小時分為 60 分，1 分又分為 60 秒。故 1 日共有 86400 秒，而 1 秒等於 1 平均太陽日之 86400 分之一。

11. C.G.S. 制及 F.P.S. 制 (C.G.S. System and F.P.S. System)

物理學中，常以厘米為長度之單位，克為質量之單位，秒為時間之單位，三者組合而成為厘米克秒單位制 (Centimeter-gran-second system)；或各取其英文之第一字母而稱之曰C.G.S. 制。其他一切物理量之單位，均可由此導出。例如面積之單位為平方厘米，即 (厘米)²，縮寫

爲 cm^2 。體積之單位爲立方厘米，即(厘米)³，縮寫爲 **c. c.**。1000 c. c. 等於 1 升 (Liter)，或曰 1 公升。

英美等國表長度用英尺 (Foot)，表質量用磅 (Pound)，表時間用秒 (Second)，故可稱爲 **F. P. S.** 制；其進率頗繁 (如表 3)，使用時不及 C. G. S. 制之簡便。

表 3. 英制單位及其與法制單位之關係

1 英里 (Mile, mi.)	== 5280 英尺.
1 碼 (Yard, yd.)	== 3 英尺.
1 英尺 (Foot, ft.)	== 12 英寸 (Inch, in.).
1 噸 (Ton, ton.)	== 2240 磅.
1 磅 (Pound, lb.)	== 16 英兩 (Ounce, oz.).
1 加倫 (Gallon, gal.)	== 4 夸脫.
1 夸脫 (Quart, q.)	== $57 \frac{3}{4}$ 立方英寸.
1 英寸	== 2.54 厘米.
1 米	== 39.37 英寸.
1 磅	== 453.6 克.
1 仟克	== 2.20 磅.
1 升	== 1.06 夸脫.

12. 我國新訂之度量衡制

我國舊有度量衡制度，至爲紊亂，尺有長短，斗有大小，秤有輕重。此種情形，實爲東西各國所無。自國民政府成立後，即根據法制單位，訂定新制，推行盡利。從此以後，度量衡制度可以統一矣。茲將現行市制與法制之關係，列表 (表 4) 並圖示 (圖 3) 如下：

表 4 我國現行度量衡制

3 市尺 = 1 公尺

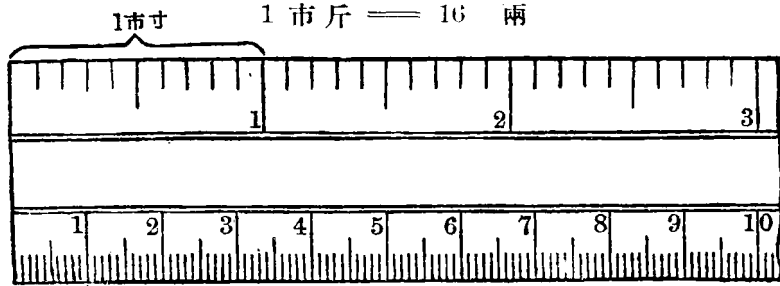
2 市里 = 1 公里

2 市斤 = 1 公斤

1 市升 = 1 公升

1 市尺 = 10 寸

1 市斤 = 16 兩



1厘米

圖 3. 市寸與厘米之關係(3市寸 = 10厘米)

13. 游標尺(Vernier)

欲測一物體之長度，須用刻度之尺棒，通常所用之米尺，其最小之分度，大概為毫米，惟所測物體之長度，未必恰為毫米之整數，而常帶有小數；此小數之值，在不求準確之測量時，可以略而不計，或藉目力之估計，得其近似之數值；但欲精密測定之，則必須用游標尺。

如圖 4. S 為主尺(Main scale), V 為游標尺。游標尺上分為十格，全長等於主尺上之九格，故游標尺上一格之

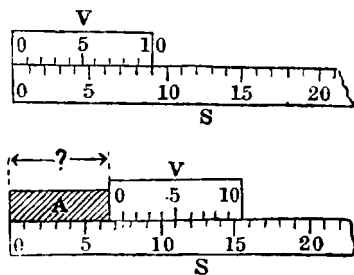


圖 4. 游標尺

長，爲主尺上一格之 $\frac{9}{10}$ 。設主尺上之分度爲毫米，則游標尺一格之長爲 0.9 mm.，兩者相差 0.1 mm.

設 A 爲欲測之物體，使其一端與主尺之零線相齊，他端與游標尺之零線相接。則此物體之長度，必等於兩零線間之距離。如圖 4 所示，A 之他端在 6 與 7 之間，故知其整數爲 6 mm.，細察游標尺上各分度線中，何者與主尺上之分度線最相接近，結果知第 5 線最合此條件。游標尺一格比主尺一格短 0.1 mm.，從第 5 線向左數至零線共差 0.5 mm.，即游標尺之零線在主尺上第 6 線之右 0.5 mm.，故物體之全長爲 6.5 mm.，一切物體之長度，均可用此法精密測定之。

14. 天平(Balance)

天平爲測物體質量之器械，如圖 5 所示。其主要部分，爲水平之橫梁(Beam)；梁上裝有三刀口(Knife-edge)，其一在中央，稜向下，擱於支柱上端之瑪瑙平板上；其他二刀口，分列於梁之二端，稜向上，各懸一盤(Pan)。左右兩刀口與中央之刀口，距離相等，梁之中央附有長指針(Pointer)一枚，隨梁擺動。支柱下端，有一小分度板，中爲零線，兩邊各刻若干格。測質量時，將物體置於左盤，砝碼(Weights)置於右盤。若兩者之質量相等，則指針或指零線，或左右擺動之格數相等。

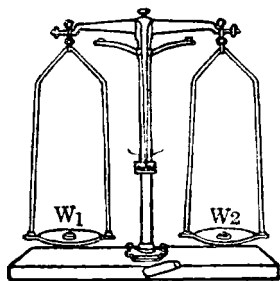


圖 5. 天平

砝碼爲銅所製成，0.1 克以下者，則用鋁或鉑，其配

合之法,大概如下:

100g., 50g., 20g., 10g., 10g.,
 5g., 2g., 1g., 1g.,
 0.5g., 0.2g., 0.1g., 0.1g.,
 0.05g., 0.02g., 0.01g., 0.01g.,

微小之質量,有時可以移動梁上之游碼 (Rider) 以求之。

15. 停錶(Stop Watch)

物理實驗時,量度短時間,必須用停錶,停錶與普通之錶不同;普通之錶,時針分針及秒針,運行不息,停錶上之秒針及分針,撥之始動,阻之即停,故觀察時間,甚為便利。圖 6 所示即為停錶。長者為秒針,短者為分針,平時兩針皆指零線。使用時,撥其上端,兩針轉動,再撥之即刻停止。又撥之則兩針復回至零線,錶面上等分為 60 分度,每 1 分度又細分為 5 小分度,故可將五分之一秒讀出。

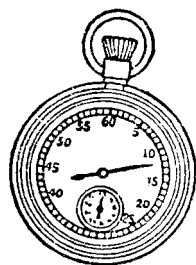


圖 6. 停錶

16. 密度及比重(Density and Specific Gravity)

各種物質,疏密不同,其緻密之程度,可用單位體積內所含質量之多寡表出之,是曰密度。設有一物體,其體積為 v , 質量為 m , 則其密度 d 可由下列公式求之:

$$d = \frac{m}{v}$$

由此推演而得

$$m = dv. \quad v = \frac{m}{d}.$$

例如 10 立方厘米水之質量為 10 克，故其密度為每立方厘米 1 克 (One gram per cubic centimeter)，或簡書為 1 克/立方厘米 (g./c.c.)。若用英制單位，則水之密度為 62.4 磅/立方英尺 (lb./ft.³)。可知各種物質之密度，其數值隨單位制度之不同而異。

各種固態及液態物體之質量與同體積 4°C. 之蒸餾水之質量之比，曰該物質之比重，即等於物體之密度與 4°C. 純水之密度之比。以式表之，則為：

$$\text{比重} = \frac{\text{物體之質量}}{\text{同體積 } 4^{\circ}\text{C. 純水之質量}}$$

$$\text{或 比重} = \frac{\text{物體之密度}}{4^{\circ}\text{C. 純水之密度}}$$

比重既係質量或密度之比，故為不名數，其值與單位制度無關。又因水之密度為 1 克/立方厘米，故在 C.G.S. 制中各種物質之比重，與其密度之數值相等。

數種普通物質之比重如表 5。

表 5. 普通物質之比重

鈉.....22.4	錫..... 7.3	水銀.....13.60
鉀.....21.5	鋅..... 7.1	濃硫酸.....1.85
金.....19.3	玻璃..... 2.4—4.5	硝酸..... 1.59
鉛.....11.4	鉛..... 2.7	鹽酸..... 1.27
銀.....10.5	人體..... 1.9—1.1	海水..... 1.03
銅..... 8.9	冰..... 0.917	牛奶..... 1.03
鐵..... 8.9	松..... 0.5	燈用洋油..... 0.80
黃銅.....8.5	杉..... 0.4	酒精..... 0.79
鐵..... 7.8	軟木.....0.25	汽油..... 0.75

溫習提要

〔定 義〕

1. 物質 —— 凡佔有空間之地位，可由吾人之感覺，而認識其存在者。
2. 物體 —— 物質之一部分，有大小形狀可言者。
3. 物質之三態 ——

物質三態	{	固體 —— 有一定之體積及一定之形狀
		液體 —— 有一定之體積而無一定之形狀
		氣體 —— 無一定之體積亦無一定之形狀

4. 自然科學 —— 係研究自然現象，以明其因果關係，而發現各種自然律之科學。
5. 物理學 —— 爲自然科學之一種，討論物性、力、熱、聲、光、磁、電等項物理現象。
6. 觀察 —— 就天然發生之現象中，注意其經過之詳細情況，曰觀察。
7. 實驗 —— 應用適宜器械，使所研究之現象，得在吾人節制之下而觀察之，曰實驗。
8. 歸納 —— 由觀察及實驗所得多數同類之事實，覈考審核，以得一普遍之定律者，曰歸納法。
9. 演繹 —— 由已知之定律，推出其他已知或未知之事實者，曰演繹法。
10. 假說 —— 爲解釋現象起見，吾人常憑思考，立一想像之說，謂之假說。
11. 理論 —— 假說至可以說明衆多之現象時，則稱爲理論，或曰學說。
12. 物理量 —— 凡可以度其長短，權其輕重，數其多寡，計其大小者，均謂之量。關於物性或物理現象之量，

謂之物理量。

13. 單位——欲測一量之大小，必須先定一標準，此標準之量，謂之單位。

單位	{	基本單位	{	長度之單位 — 厘米(以米原器為標準)
				質量之單位 — 克(以公斤原器為標準)
				時間之單位 — 秒(以平均太陽日為標準)
		導出單位		— 由上三種基本單位適當組合而成

14. C. G. S. 制及 F. P. S. 制——法制單位，表長度用厘米，表質量用克，表時間用秒，各取其英文之第一字母而稱之曰 C. G. S. 制；英制單位表長度用英尺，表質量用磅，表時間用秒，亦各取其英文之第一字母而稱之曰 F. P. S. 制。

15. 市制——根據法制訂定，3 市尺 = 1 米，1500 市尺 = 1 市里。

2 市斤 = 1 仟克，1 市升 = 1 公升。

16. 密度——單位體積內，所含之質量曰密度，密度為名數，其數值隨單位制度之不同而異。

17. 比重——物體之密度與 4°C. 時純水之密度之比曰比重，比重為不名數，故其值與單位制度無關。

[公 式]

1. 密度
$$d = \frac{m(\text{g. 或 lb.})}{v(\text{c.c. 或 ft.}^3)} (\text{g./c.c. 或 lb./ft.}^3)$$

2. 比重
$$\text{比重} = \frac{\text{物體之質量}(\text{g. 或 lb.})}{\text{同體積 } 4^\circ\text{C. 純水之質量}(\text{g. 或 lb.})} (\text{無單位})$$

或
$$\text{比重} = \frac{\text{物體之密度}(\text{g./c.c. 或 lb./ft.}^3)}{4^\circ\text{C. 純水之密度}(\text{g./c.c. 或 lb./ft.}^3)} (\text{無單位})$$

[儀 器]

1. 游標尺——用以測長度之小數，其 10 格之長等於

主尺上之 9 格

2. 天平——支柱上端,架一橫梁,兩端各懸一盤,物體置於左,砝碼置於右,可測物體之質量。
3. 停錶——測短時間時用之,撥之始動,阻之即停,可將 $1/5$ 秒讀出。

問題一

1. 汝曾受體格檢查否?汝之身長若干米?合若干英尺?若干市尺?
2. 汝之體重若干公斤?合若干磅?若干市斤?
3. 從前開運動會,短距離賽跑有 100 碼, 220 碼, 440 碼,現在改爲 100 米, 200 米, 400 米,試比較 100 碼與 100 米, 220 碼與 200 米, 440 碼與 400 米之長短。
4. 餅乾每箱 10 磅,售洋 4 元,10 市斤之價若干?
5. 京滬鐵路計長 312 仟米,特別快車須行六時半方可到達,間火車平均每小時行若干市里,合每秒若干市尺?
6. 1 英兩合若干市兩?
7. 牛奶 2 升重若干克?汽油 10 加倫重若干磅?
8. 12 磅之鉛球,其直徑爲若干英寸?
9. 100 立方厘米之冰,熔解成水,體積減小若干?
10. 直徑 2 毫米,長 3 米之銅絲,質量爲若干?
11. 設有金銀之合金一塊,重 200 克,比重爲 16,問其密度爲若干磅/立方英尺?又其中所含金銀之量各爲若干?
12. 公斤原器爲鎔 90% 及鈹 10% 之合金所製成,試求此合金之比重及公斤原器之體積。

第一編 物性

第一章 分子現象

17. 物質之通性(General Properties of Matter)

一切物質,均有若干共通之性質,是謂物質之通性,分述如下:

1) **廣延** (Extension) 凡屬物體,必佔有一定之空間,故有一定之廣延,吾人能認識物體之存在,即藉其具有此項性質之故。

2) **慣性** (Inertia) 凡屬物體,苟不受外物之作用,則靜止者永遠靜止,運動者繼續保持其原有之運動狀態,簡言之,即動者恆動,靜者恆靜,是曰慣性。

取厚書一本,直立桌上,如圖 7 所示,以手急推其下部,則書必向後倒,此靜者恆靜之故也,若徐徐推之,使全書向前進行,驟然停止推動,則書必向前倒,此動者恆動之故也。

由慣性言之,可知凡欲使物體之靜止者發生運動,運動者變更其原有之狀態,必須有外物之作用,此種作用,稱之曰**力** (Force)。

兩力之方向,彼此相向時,稱爲**壓力** (Pressure; 彼此相背時,稱爲**張力** (Tension)。例如置書於桌上,則桌面上

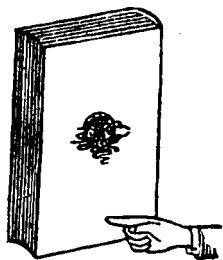


圖 7. 慣性

受有壓力。以繩懸物，則繩上受有張力。

(3) **重量 (Weight)** 用手托石，則覺手上受有壓力。將手放開，石即下墜。其他一切物體，如無支托之力，皆向地面落下。由此可知地球對於地面上之物體，必有吸引之力。是曰**重力 (Gravity)**。物體所受重力之大小，謂之**重量**。

實用上表示力之大小，常以克爲單位。“1克之力”或曰“**1克重**”(Gram weight)，即在緯度 45° 之海平面上，質量1克之物體所受之重力，稱爲**力之重力單位 (Gravitational unit of force)**。英制力之重力單位爲“1磅重”，其義亦同。

凡屬物體，必皆具有重量。實爲吾人所熟知。惟所常注意者，即重量與質量之區別是也。蓋重力之大小，因緯度及高度之不同，而稍有差別。故同一物體，其重量常因地而變更。在兩極較重，在赤道較輕；在平地較重，在高山較輕。而其質量則與地位無關。在同一地點，各種物體之重量，與其質量成正比例。鐵之質量爲同體積水之質量之 7.8 倍，其重量亦爲水之 7.8 倍；質量相等之兩物體，其重量亦相等。故若用天平測得物體之質量後，即可比較重量之大小。

(4) **不可入性 (Impenetrability)** 凡二物體，既各具有一定之廣延，故不能同時並存於同一之空間，是曰不可入性。

固體、液體之有不可入性，吾人固深信而不疑。而氣體之物，每有認爲無此性質者，其實不然。試取空瓶一個，倒插入水槽中，水不能進入瓶內。若將瓶口略行側轉，則見有氣泡上昇，同時水即進入瓶中，以補其缺，可知氣體亦有不可入性也。

(5) 可分性 (Divisibility) 凡屬物體,皆可用機械方法或由自然力之作用,使之分割成爲微粒,是曰可分性。極少量之洋紅,可使一杯之水染成紅色,一入芝蘭之室,卽覺香氣襲人,諸如此類,皆爲物質可分之明證。

取一微小之物體,用物理方法,分而爲二,再分則爲四,循是以往,終必達於一定之限度而不可再分,此極限之最小顆粒,謂之分子 (Molecule)。凡同種物質之分子,其性質皆相同,故物質乃由多數同類之分子集合而成,此種假說,爲英人道爾頓所創,故稱爲道爾頓之分子說 (Dalton's molecular hypothesis)。若將分子用化學方法再行分割,則得與分子性質全異之二個或數個更小之顆粒,是謂原子 (Atom)。至於原子之構造若何,容後詳述之。

(6) 多孔性 (Porosity) 凡屬物體,無論其組織如何緻密,其間必存有無數細隙,是曰多孔性。50 c. c. 之酒精與 50 c. c. 之水混合之後,其體積約爲 97 c. c. 此液體有孔之故也。美人培根 (Bacon), 曾將水密閉於鉛球內,而施甚大之壓力於球上,結果水成細露逸出球外,此固體有孔之例也。至氣體之多孔,甚爲顯著,無庸舉例,就現今所知,物質之不呈多孔性者,僅玻璃一種而已。

(7) 壓縮性 (Compressibility) 加壓力於物體之外部,則其體積必因之減小,是曰壓縮性。此種性質,以氣體爲最強,液體及固體則甚弱。

(8) 質量不滅 (Conservation of mass) 燃燭而燭漸短,植樹而樹日長,一若物質可生可滅,隨各種變化而增減其質量者,實則宇宙間之物質,有一定之總量,不因任何物理的或化學的變化而有所增減者也,是曰質量不滅。

之定律蠟燭燃燒時，與空氣中之氧化合而成二氧化碳氣，逸散空中。樹木生長時，其所需之養分，必自空氣及土壤中吸收之。細察各種變化中，關於物質之量，於此若為增，則於彼必為減，一增一減，其量相等，故就全體言之，固未嘗稍有生滅也。

18. 分子力(Molecular Force)

物質為分子所組成，已如上述。欲使分子與分子離開，須用相當之力，足見各分子之間，必有互相吸引之力，是曰**分子力**。分子引力分為兩種：一曰**內聚力**(Cohesion)，即同種分子間之引力。一曰**附着力**(Adhesion)，即異種分子間之引力。從水中取出之玻棒，必有水滴附着於棒端，即為附着力之作用。水銀之內聚力甚大，而其與玻璃之附着力甚小，故將玻棒插入水銀中，水銀不能附着於玻棒上。

任一分子對於其四周附近之分子，皆有吸引之力，惟其作用之範圍甚小。若兩分子間之距離在 8×10^{-6} 毫米以上，即不能發生作用。故玻棒折斷後，因其距離增大，超出分子力之作用範圍，雖加壓力，亦難接合也。若將截面燒熔，成為半流動體，使其分子易於密接，然後可以接合之。

19. 分子運動(Molecular Motion)

物質之分子，既受內聚力之作用，似應互相密集，然其間仍容有孔隙者，蓋由於其分子不絕的作劇烈運動故也。固體之分子與分子間，距離甚小，而內聚力甚大，其分子祇能在極小之範圍內，作往復之振動，故其形狀體

積皆有一定。液體分子間之距離亦甚小，惟其內聚力不及固體之大，分子極易滑動，故雖有一定之體積，但無一定之形狀。氣體分子間之距離最大，內聚力至弱，因此分子運動極為自由，故能充滿於任何容器之內也。

20. 擴散(Diffusion)

取一長玻璃筩，半盛以水，然後徐徐注入着色之酒精。因酒精之密度較小，故最初酒精在上，清水在下，二者之境界，判然分明。歷時稍久，則漸次模糊，終至完全混合。若用硫酸銅之濃溶液及水試之，亦得同樣之結果。

又如圖 8 之裝置，上面之瓶中，盛密度較小之氫，下面之瓶中，盛密度較大之二氧化碳氣。開放瓶口之塞，使其相通，則氫即下降，二氧化碳氣即上昇，至均勻混合，密度相等而後止。

由上二實驗，可知兩種密度不同之流體，彼此相接觸，歷相當時間後，能互相侵入，而成爲密度均一之混合流體。此種現象，謂之擴散。

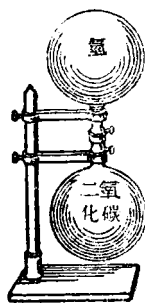


圖 8. 擴散(一)

擴散現象，乃由分子運動所致。因物質之分子，運動激烈，而以氣體爲尤甚，故使兩種流體相接觸時，此流體之分子飛入於他流體中，同時他流體之分子亦飛入於此流體中；如此循環不已，自能漸次混合也。

兩種氣體之間，隔有多孔之物，而非直接接觸時，亦能發生擴散之現象，可試之如次：如圖 9 所示，A 爲生瓷圓筩，筩壁細孔甚多，筩口向下，用木塞塞住，塞之中央，插一 U 字形玻璃管 C，C 管中貯着色之水。此時因 A 筩之

內外均爲空氣，壓力相等，故 C 管左右兩端之水面齊平。取玻璃鐘罩 B，懸於 A 管之上。於鐘罩下面通入煤氣，罩中空氣即被驅出，擴散現象同時開始。煤氣分子，穿過管壁細孔，進入管中，其量多；空氣分子亦由細孔出至管外，其量少，因此管內壓力增加，故 C 管內之水面，左端降低，右端升高。鐘罩除去，煤氣四散，C 管水面，仍復原狀。

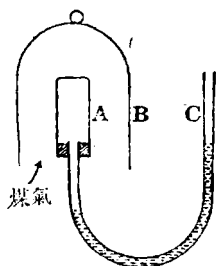


圖 9. 擴散 (二)

21. 滲透 (Osmose.)

取一無底之瓶，如圖 10 所示，下面用薄膜或羊皮紙包住，內盛着色之酒精，瓶口塞以木塞，中插一玻璃管。將此瓶直置於水槽中，水即透過薄膜進入瓶內，酒精亦透過薄膜，出至瓶外，故槽中之水，亦染有顏色，同時瓶內之酒精上昇而入於玻璃管中，可見透入之水，必較透出之酒精爲多。

凡兩種液體，隔以多孔之薄膜，能透過此薄膜而進行擴散之現象，謂之滲透。滲透作用，亦由分子運動所致，與上述擴散之理相同。

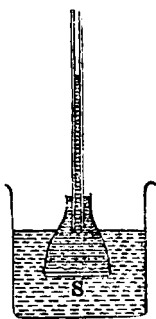


圖 10. 滲透

滲透之實例頗多，如以鹽醃菜，白菜內滲出之水量，較之自外面滲入鹽水之量爲多，故菜身縮小，又如加鹽於煮熟之豆上，則豆皮皺縮，理亦與上同，但如烏賊魚等，其體內本含有鹽分，若將其浸於淡水之中，則其體反而膨大，他如醃肉、醃蛋，皆係利用滲透之作用。

如上實驗，瓶內酒精上昇管中後，因重量而生向下壓力，此壓力達於一定之程度後，滲透作用可視為完全停止，於是管中液面不再昇高，此種壓力，乃用以防止膜外液體之透入，稱為**滲透壓力**(Osmotic pressure)，其大小可以底膜內面之壓力量度之。

又在上述之實驗中，若不用着色之酒精，而以白糖，食鹽，硫酸銅，礦物鹽類，或礦物酸類等之溶液代之，亦同樣能呈滲透之現象；但樹脂，澱粉，蛋白質等則不能透過。大凡**晶質**(Crystalloid)均能自由透過薄膜，而**膠體**(Colloid)則否。利用此種性質，使混合物質中之成分，互相分離之法，謂之**滲透分析法**(Dialysis)，工業上多利用之。

22. 溶解(Dissolution)

投物質於液體內，其物質即分割甚細，散佈於全部液體之中，成為密度均一之混合物，任何機械方法，均不能使其再行分離，此種現象，謂之**溶解**，由溶解作用所得之混合液體，曰**溶液**(Solution)，被溶解之物質，曰**被溶質**(Solute)，用以溶解被溶質之液體，曰**溶劑**(Solvent)，單位容積之溶液內所含被溶質之質量，曰**濃度**(Concentration)，例如白糖溶解於水中，即成白糖之溶液；白糖為被溶質，水為溶劑，1立方厘米之糖水中，所有白糖之質量，即為其濃度。

在一定溫度之下，一定體積之液體內所能溶解之被溶質有一定之限度，換言之，即在一定狀況之下，溶液之濃度，不能超過一定之極限，此極限謂之在此狀況下之**溶解度**(Solubility)，溶液之濃度，已達其極限值時，謂之**飽和溶液**(Saturated solution)。

固體之溶解度，隨溫度之昇降而增減，故使高溫度時之飽和溶液冷卻時，溶液中之被溶質必已超過其溶解度，於是多餘之固體逐漸析出。此析出之固體分子，排列整齊，成爲極有規則之形狀，是曰晶體 (Crystal)。反之若分子之排列，無一定之規則者，曰非晶體 (Amorphous body)。如冰糖，水晶等均爲晶體；木炭，玻璃等均爲非晶體。

有時將高溫度之飽和溶液，靜置一旁，使其徐徐冷卻，則多餘之固體，仍可強含而不析出。此時之溶液，謂之過飽和溶液 (Supersaturated solution)。若將容器稍稍搖動，或投入固體一小粒，則多餘之量，立即結晶而析出。

兩種液體互相混合之現象，亦稱溶解。例如將酒精注入水中而攪拌之，酒精即溶解於水中。通常稱量少者爲被溶質，量多者爲溶劑。兩種液體，可依任意之比，互相混合，不似固體之有一定限度也。

23. 吸收(Absorption)

曾習化學者，常知氨、氮等氣體，不能用排水法取之，因其極易溶解於水也。將盛氨之瓶，倒插入水中，水即衝入瓶內，足見其溶解之速。此種氣體溶解於液體中之現象，謂之吸收。

液體所能吸收氣體之量，與壓力之大小成正比例，而與溫度之高低成反比例。例如開去汽水瓶之蓋，即盛發氣泡，注入杯內時，則氣泡更多，蓋因此時壓力減小，其中所能吸收之二氧化碳氣之量亦大減。故多餘之氣體，即逸散於空中。又如加熱於盛水之玻璃杯時，亦有氣泡上昇，因水之溫度升高，其中所吸收之空氣，即行逸出。故

也。當溫度一定時，單位體積之液體所能吸收之氣體，其體積恆為一定，此一定之氣體體積，稱為本生之吸收係數 (Bunsen's absorption coefficient)。

固體之表面，亦能吸收氣體，謂之吸附作用 (Adsorption)。吸附作用之最著者，為多孔質之木炭，能吸附其本身體積九十倍之氮，六十五倍之二氧化硫，或三十五倍之二氧化碳。如圖 11，先將充滿水銀之試驗管倒插於水銀槽中，再由管口導氣入內，水銀即被壓下，然後取木炭一小塊，送入管中，浮於水銀面上，管中所有之氣，即盡行吸附於木炭上，故水銀仍復上昇。

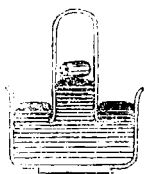


圖 11. 吸附

近世戰爭時所用之防毒面罩，即應用吸附之理而製成。將吸附作用甚強之活性碳素 (Active carbon) 儲於罐內，納罐於袋，與面罩相連，使兵士所吸入之空氣，先由罐中通過，然後再入肺中，可以防禦敵人所施之毒氣，以減少危害。圖 12 所示，即為兵士帶面罩之狀況。



圖 12. 防毒面罩

金屬之物，其內部亦能吸收氣體，謂之吸留 (Occlusion)。鉀在平常溫度時，可吸留其本身體積 370 倍之氣，是為最顯著之一例。

24. 粘滯性 (Viscosity)

液體內某部分對於他部分起運動時，其內部常有

一種摩擦力，以妨礙其運動之作用，反抗其形態之改變，此種性質，謂之粘滯性。例如倒清水於地上，水即流散。倒膠水於地上，則流散較難。即因膠水之粘滯性較清水為強故也。又盛液體於杯中，以玻棒攪之，使其擾動，但不久液體即能停止運動者，亦為粘滯性之作用。

25. 表面張力(Surface Tension)

吾人常見水蟲能疾行於水上，蚊蟲能靜立於水面，若取縫針一枚，細心橫置水面，亦可浮而不沉。細察蟲足及縫針之旁，水面略有凹陷，其情形與置一粒鉛彈於緊張之薄膜上，彈旁薄膜亦略有凹陷者，完全相同。由此可見液體之表面，猶如緊張之薄膜，有收縮成爲最小面積之力，是曰**表面張力**。

如圖 13, (a) 爲一銅絲圈，上縛一棉紗線圈，將其浸入肥皂液中，然後取出，則圈內張有一層薄膜，其情形如 (b)。用燒熱之鐵針，將線圈內之薄膜刺破，則線圈立即成爲圓形如 (c)。因線圈外之薄膜，欲收縮成爲最小面積，則線

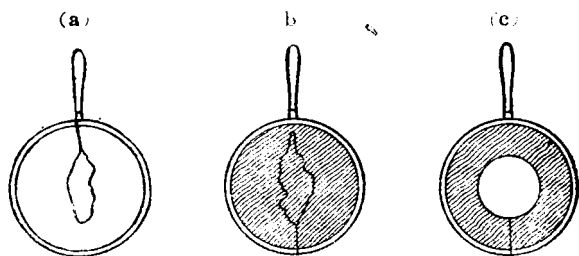


圖 13. 肥皂液膜之收縮

圈內之面積必當爲極大，而周界一定之各種平面形中，以圓之面積爲最大，是以線圈張成圓形也。

將酒精與水適當混合,使其密度與橄欖油相等,用玻璃管取橄欖油一滴,放入液中,此油滴可存於液內任何地位,因表面張力之作用,油滴之表面須收縮成爲最小面積,而體積一定之各種立體形中,以球體之面積爲最小,故油滴成爲球形,落下之雨滴,瀉地之水銀,草上之露珠等,皆成球形者,理亦與上同,通常液體之所以不成爲球形者,因重力之影響大於內聚力之故。

表面張力之原因,可由圖 14 說明之, A 爲液體內部之一分子,以 A 爲心,畫一圓球,假定球內之分子,對 A 有吸力,球外之分子,對 A 無吸力,因 A 周圍之分子排列均等,故各方向之吸力,成爲平衡,將近液面之分子 B,下半部所受之內聚力,較上半部爲

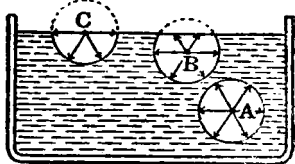


圖 14. 表面張力之解釋

大,適在液面之 C 分子,上部爲空氣,全受下部液體分子之吸引,故有曳之向內之趨勢,遂生表面張力,是猶平繫一繩,中懸重物,繩上即生張力之情形相類似。

各種液體之表面張力,大小不同,水銀之表面張力最大,水次之,油,酒精,醚等則甚小。

26. 毛細現象(Capillary Phenomena)

將直徑不等之毛細管(Capillary tube)數個,插入能潤濕玻璃之液體,例如水中,則水即上昇於管內其面呈凹形,如圖 15 (a);若將此諸管插入不能潤濕玻璃之液體,例如水銀中,則管內之水銀面反較管外爲低,其面呈凸形,如 (b).此種現象,以管徑愈細而愈著,故稱爲毛細現象,依實驗與理論之結果,得定律如下:

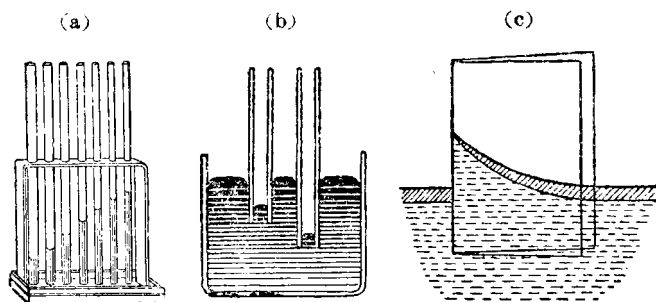


圖 15. 毛細現象

在同一液體中，毛細管內外液面高度之差，與管之半徑成反比例。

是謂久倫定律 (Jurin's law)。

毛細現象，不限於在上述之毛細管中始能發生。若取玻璃板二塊，其一邊相密接，他邊以紙夾於其中，使稍稍離開，將此二玻璃板直立於水或酒精中，因二板間之距離，自左至右，漸次放大，故液體之上昇，成爲如圖 15(c) 所示之狀況，是亦毛細現象也。

毛細現象，因液體之分子力與表面張力而生。凡液體之內聚力較小，而液體與毛細管之附着力較大時，則與管壁接觸之液體，必被牽引而上昇，於是四周高起，中央低落，遂成凹面。如圖 16(A) 中之 aob 。同時因表面張力之作用，須縮小液面之面積，乃由凹面張成平面 $a'o'b'$ 。此平面已高出於管外之液面，又因附着力之作用，使液面復呈凹形；而表面張力再使其張成平面，如是繼續作用，液面漸次上昇，直至液柱 $amnb$ (如圖 B) 之重量，與表面張力相同而後止。若液體之內聚力甚大，而與其管壁之附着力甚小時，則成凸面，如圖 C 中之 aob ，與上述相

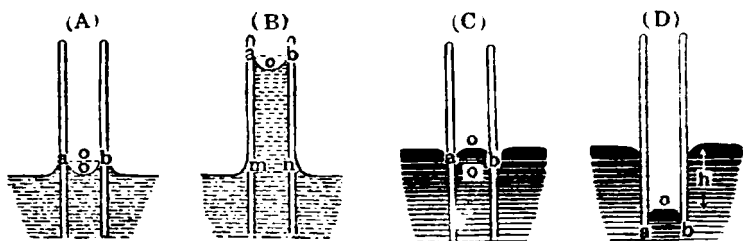


圖 16. 毛細現象之解釋

同之理由，可以說明管內之液面，必漸次下降，直至管外 h 深度（如圖 D）之液重，施於 O 點之壓力，與凸面 aob 之表面張力相等而後止。

溫習提要

[定 義]

1. 物質之通性：

(1) 廣延：

(2) 慣性：

(3) 重量：

(4) 不可入性：

(5) 可分性：

(6) 多孔性：

(7) 壓縮性：

(8) 質量不減:

2. 力:

3. 壓力及張力:

4. 力之重力單位:

5. 分子力 { 內聚力:
 附着力:

6. 分子運動:

7. 擴散

8. 滲透

滲透壓力:

滲透分析法:

9. 溶解:

(1) 溶液:

(2) 被溶質:

(3) 溶劑:

(4) 濃度:

(5) 溶解度:

(6) 飽和溶液:

(7) 過飽和溶液:

10. 晶體與非晶體:

11. 吸收:

 吸附:

 吸留:

12. 粘滯性:

13. 表面張力:

14. 毛細現象:

[定 律]

久倫定律:

問題二

1. 刀柄鬆脫時,可將刀豎立,執柄向下擊之,則刀即嵌入柄內,其故何在?
2. 公共汽車未停時,不可爭先上下,何故?
3. 試舉一實驗,證明物質之不滅性。
4. 粘貼郵票,必先用水少許濕之,然後可使固着於信封上,何故?
5. 破鏡不能重圓,何故?若必欲使其重圓,常用何法以致之?
6. 取石墨之粉末而強壓之,則成堅固之鉛筆心,何故?

7. 近地面之空氣,密度較大,愈高則密度愈小,但其間並無顯明之層次,何故?
8. 空氣爲氮氧之混合物,但無論何處其混合比例,大致相同,何故?
9. 醃魚何以可成鹹鯊?
10. 養金魚之瓶,須常常換水,若經久不換,則魚必死去,何故?
11. 污穢之處撒以炭屑,可以減少臭氣,何故?
12. 以油滴於水上,即散布於水之全面,何故?注火油於溝渠或污水之上,可以除滅蚊蟲,其故安在?
13. 投樟腦一小粒於水上,樟腦在水面游移不定,其理若何?
14. 自管口落下之水滴,每滴之體積相等,何故?
15. 衣服上有洋燭油跡時,當用何法以除去之?其理若何?
16. 試舉數種日常所見之毛細現象.
17. 試舉出數種日常所見之現象,可用表面張力解釋者.
18. 設在直徑 1.8 毫米之毛細管中,水面上昇之高度爲 15 毫米;求管內水面所有之表面張力,又欲使水面昇高 30 毫米時,則其直徑應爲若干?

第二章 固體

27. 彈性(Elasticity)

物體受有外力，則變更其形狀，或體積，如除去外力，則立即恢復其原狀，此種性質謂之**彈性**。一切固體皆有此性，惟強弱不同；其富有彈性者，則謂之**彈性體** (Elastic body)，如橡皮，發條等是也。彈性體之內部，所呈恢復其原狀之力，謂之**彈力** (Elastic force)。此項彈力，為應付外力而生，故外力與彈力形成一種**應力** (Stress)。因外力作用而生之形狀或體積之變化，謂之**應變** (Strain)。

物體受力即生應變，外力一去則由彈力之作用，可使恢復其原狀，但若外力過大，形體改變殊甚，雖將外力除去，亦不恢復原狀，可見物體之彈性，具有最大之極限，是謂**彈性限度** (Elastic limit)。物體所受之外力，若超出其彈性限度時，則生**永久應變** (Permanent set)，即其形狀改變之後，能永久保持而不再變。金、銀、銅等之彈性限度均小，易生永久應變，故將其裝入模型中，可以壓成有花紋之貨幣。

有數種物質，雖在彈性限度內除去外力，但仍須歷相當之時間後，方能完全回復其原狀，如是之現象，曰**彈性後效** (Elastic after-effect)。銅絲、橡皮及玻璃絲等，為有彈性後效之較著者。又若物體受外力之時間過久，則外力雖去，亦不能再復原狀，是曰**彈性疲勞** (Elastic fatigue)。例如彎竹為弓，數月之後，雖去其弦，竹亦不能伸直矣。

28. 虎克定律(Hooke's Law)

如圖 17 所示, S 爲螺旋彈簧, 上端固定, 下端懸盤, 中間附裝一指針 P, 隨彈簧之伸縮而上下, 盤中置砝碼, 則彈簧伸長, 其延伸之長度, 由指針在其旁直立之鏡尺上指示之。先於盤中置砝碼 100 克, 視彈簧伸長若干毫米, 然後增加砝碼至 200 克, 300 克等等, 則彈簧延伸之長度, 必爲前次之 2 倍, 3 倍等等, 由此實驗之結果, 可得一定律如下:

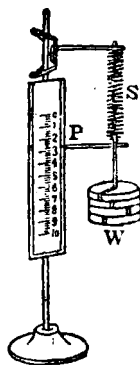


圖 17. 虎克定律

在彈性限度內, 以力作用於物體, 其所生之應變, 與應力成正比例。

上述定律, 爲 1676 年英人虎克所發明, 故稱虎克定律, 以算式表之, 則爲:

$$\frac{\text{應力}}{\text{應變}} = \text{常數} = e.$$

上式中之 e , 爲各種物體所特有之常數, 稱爲該物體之彈性係數 (Modulus of elasticity). 彈性係數與彈性限度完全不同, 不可混淆。申言之, 即某物體之彈性係數大者, 其彈性限度未必亦大, 反之如彈性係數小者, 其彈性限度未必亦小是也。例如鋼鐵之彈性係數頗大, 故可利用之以製發條, 彈簧等物, 而其彈性限度則小; 又如橡皮之彈性限度雖大, 而其彈性係數則甚小。

29. 彈簧秤(Spring Balance)

如圖 18, 爲一常用之彈簧秤, 係應用虎克定律而製成, 其主要部分, 即爲一螺旋彈簧, 外加一銅製之殼, 以資

保護殼上有刻度，通常一邊為克數，以 G 字為記，一邊為英兩數，以 Oz. 為記，平時指針指零，若加力於鈎上，則彈簧延長，力之大小可由指針所指之刻度讀出之。如於鈎上懸一物體，則由彈簧延長之多少，可知物體所受重力之大小，故用彈簧秤所測得者為物體之重量，而非其質量。



圖 18.

彈簧秤

30. 應變之種類

物體所生之應變，種類不一，均適合虎克定律，其最重要者有下列數種：

(1) 伸長 (Elongation) 將一金屬線或橡皮條之上端固定，而於下端懸一重錘，則其長度必較前增加，是曰伸長。

設 L 為線之原長， a 為其橫斷面積，

l 為延伸之長， w 為重錘之重量，

則 $l/L =$ 單位長所生之延長，(應變)

$w/a =$ 單位面積上之張力 (應力)

由虎克定律，得

$$w/a : l/L = E$$

$$\text{故 } w = E \cdot \frac{la}{L}$$

上式中之 E ，為一常數，謂之伸長之彈性係數，或稱楊氏係數 (Young's modulus)。

(2) 彎曲 (Bending) 將棒之兩端支住，而於其中點懸一重錘，或固定棒之一端，而於他端加一與棒垂直之力，此時棒所生之應變，謂之彎曲，欲棒彎曲所需之力，與

棒之長及厚最有關係：棒長則彎曲易，棒厚則彎曲難。鐵橋及房屋等之橫樑，皆豎置板狀之材料，且其長度不能過大者，即此之故。

(3) 扭轉 (Tortion) 夾住棒之一端，而於他端施以方向相反，大小相等之二平行力時，則其應變稱為扭轉。與扭轉所需之力最有關係者，為棒之半徑，故粗大之棒，頗難使其扭轉也。

31. 延性及展性(Ductility and Malleability)

以外力作用於物體，超出其彈性之限度，而物體尚不致破壞，得引長之使成細線之性質，曰延性。或壓展之使成薄片之性質，曰展性。鉑、銀、鐵、銅等皆富有延性。而以鉑之延性為最富，可引之成直徑僅十萬分之三英寸之細線。金、銀、錫等，皆富有展性。而以金之展性為最富，可展成厚僅百萬分之一毫米之薄箔。玻璃、水晶等物質，熔解之後，亦可引長之成為細線。水晶依此法抽得之細線，其直徑可較 2.5×10^{-6} 厘米為小。

溫習提要

[定 義]

1. 彈性：
2. 彈力：
3. 彈性限度：
4. 永久應變：

5. 彈性後效:

6. 彈性疲勞:

7. 彈性係數:

8. 應變:

(1) 伸長:

(2) 彎曲:

(3) 扭轉:

9. 延性:

10. 展性:

[定 律]

虎克定律

[公 式]

1. 彈性係數:

2. 楊氏係數:

[儀 器]

彈簧秤:

問題三

1. 製造發條,彈簧等,何以不用銅而用鋼?
2. 於彈簧秤之鈎上,懸重 5 斤之物體時其指標移下 2 厘米,若將一未知重量之物體,懸於鈎上,結果指標移下 8 厘米,問此物體之重若干?
3. 設於彈簧下端懸重 10 兩,則彈簧延長成 5 寸;若懸重 15 兩,則延長成 5 寸 5 分,問此彈簧原長若干?
4. 以 160 磅之重物,懸於橫截面為 0.1 平方英寸之銅絲上,求銅絲上之應力 (即單位面積上所受之力).
5. 設有銅絲長 30 米,用力使其拉長 2 毫米,求應變 (即單位長所延伸之長).
6. 有一木條,以架支其兩端,中央懸 100 公斤之重錘,棒之中點下墜 4 厘米,若欲其墜下 10 厘米,當懸重若干之錘?
7. 設有半徑 0.3 毫米,長 250 厘米之金屬線,固定其一端,而於他端懸 2 仟克之重物,金屬線延長 8 毫米,求此金屬線之楊氏係數.
8. 試舉數例,以明彈性體之應用.

第三章 液體

32. 液體中之壓力(Liquid Pressure)

液體有重量,且內聚力頗小,分子極易滑動,故其內部具有壓力。關於液體之壓力,有數事爲吾人所當注意者,分條述之如下:

(1) 壓力之方向 取洋鐵罐一個,於其四壁及底上鑽若干小孔,然後壓入水中,則水即由諸小孔流入罐內,可知液體內任何部分,對於各方向均有壓力。其向下者曰向下壓力 (Downward pressure); 向上者曰向上壓力 (Upward pressure); 向左右四方者曰旁壓力 (Lateral pressure)。待罐中充水後,將其取出,則水復由諸小孔流出罐外,且在罐壁附近之處,水流出之方向,與罐壁成垂直,稍遠則因重力之作用而成曲線,由此可知靜止之液體,

對於容器內壁或液體內任意平面之壓力方向,恆與器壁或平面成垂直。

(2) 壓力之量度 物體之全面積上所受之壓力曰全壓力 (Total pressure), 其單位面積上所受之壓力曰壓力強度 (Intensity of pressure), 或簡稱壓力。

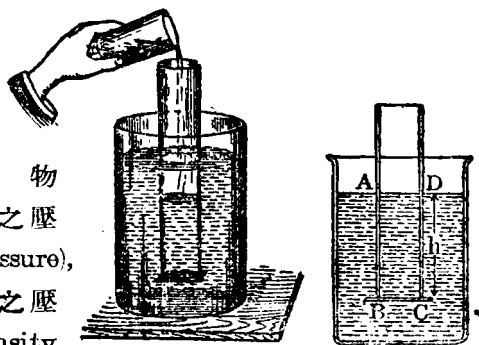


圖 19. 液體壓力之量度

如圖 19,用銅片按住玻璃圓筒之下端,而壓入於水中,因上壓力之作用,銅片能附着於筒口而不下墜,若注水於圓筒中,至筒內外之水面相平時,銅片即脫離筒口而沉下,可知此時上下兩方之壓力相等,銅片因其自身之重量而墜下,且此種壓力必等於液柱 ABCD 之重量。

設 $a =$ 平面 BC 之面積 (以 cm.^2 為單位)
 $h =$ BC 在液面下之深度 (以 cm. 為單位)
 $d =$ 液體之密度 (以 g./c.c. 為單位)
 $P =$ BC 上所受之全壓力
 $p =$ BC 上之壓力強度。
 則 $ah =$ 液柱 ABCD 之體積, (其單位為 c.c.)
 $ahd =$ 液柱 ABCD 之重量, (其單位為 g.)
 故 $P = ahd$ 克。

而 $p = \frac{P}{a} = hd$ 克/平方厘米, (或寫作 g./cm.^2)

由上式可知液體內部之壓力,與深度成正比例,又若 BC 不與液面平行時,則因液體內一點之壓力,對於任何方向皆相等,故其壓力強度,亦可用 h 與 d 之乘積量度之,但此時之 h 代表 BC 在液面下之平均深度。

(3) 靜液之怪事 (Hydrostatic paradox) 由上所述,液體內一點之壓力,與深度成正比例,盛液之容器,其底上各點之深度相同,故任何一點之壓力,必皆相等,因之凡底面積相等,而上部形狀不同之各種容器,其底面所受之全壓力,

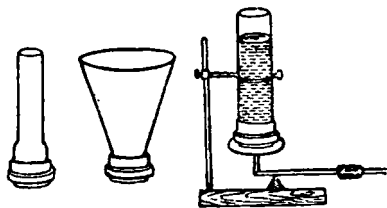


圖 20 靜液怪事之實驗

亦必相等。可用圖 20 之裝置，實驗證明之。取形狀不同，而底面積相等之三器，順次載之於圓板上，因右端懸有重錘，故圓板向上緊壓。注水入器內，至相當高度時，水即由下漏出。水開始漏出時，三器中之水面均等高，可知圓板上所受液體之壓力相等，與器之形狀無關。此事常人每目為怪誕，故曰靜液之怪事。

33. 靜液之自由面 (Free Surface of Liquid at Rest)

以線懸錘俟其靜止，則其所取之方向，必與重力方向相一致。此線稱為鉛直線 (Plumb line)，如圖 21 中 OP 線是。凡與鉛直線垂直之平面，稱為水平面 (Horizontal plane)。

靜止之液體，與空氣接觸之表面常保持水平，換言之，即與重力方向成垂直，稱為靜液之自由面。假定液面不為水平而成傾斜時，則於液體內部同一水平面內取 A, B 兩點，如圖 21 所示。此兩點離液面之深度各為 h 及 h' ，因 h

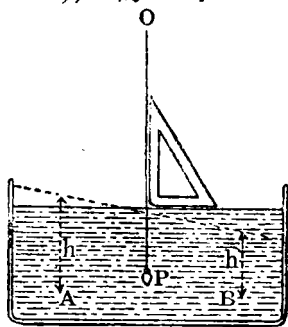


圖 21. 鉛直線與自由面

大於 h' ，故 A 點上之壓力必較 B 點上之壓力為大，於是液體分子必自 A 向 B 滑動，而不能成為靜止矣。

通常論地勢之高低，均以海平面 (Sea level) 為標準，如言某地高出海平面若干尺是。海平面者，係指海水之表面而言，海面遼闊，一望無際，處處與重力方向成垂直；而地球為球形，故海面亦必為球面。至於容器內之液面，如嚴格言之，亦當為球面，惟其面積甚小，曲度極微，故可視為平面耳。

氣泡水準(Spirit level) 爲檢驗平面是否水平之器,其形狀如圖 22. 於略具彎曲之玻璃管中,盛醚或酒精,而留一氣泡,然後密封之,固着於平底之架上,因自由面必取水平方向,故氣泡恆據最高之點,如將此器置於水平面上則氣泡恰在玻璃管之正中。

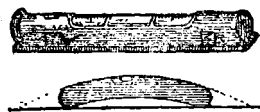


圖 22. 氣泡水準

34. 連通管(Communicating Tubes)

如圖 23 所示之器具,曰連通管. A, B, C 爲形狀不同之支管,其下有一橫管連接之,注液體於任一管內,即可流入其他各支管中,連通管內之液體,當靜止之時,各支管內液面之高低,有兩種情形,茲分別研究之:

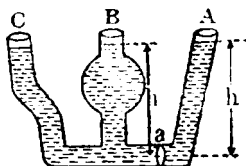


圖 23. 連通管(一)

(1) 同種液體 於連通管內,注入同種液體,待其靜止之後,則各支管內之液面,必皆位於同一之水平面上,如圖 23,於連接之橫管內,設想有一垂直平面 a,則當液體靜止時,a 左右兩邊所受之壓力相等,否則將向左或向右流動。

設 $d =$ 液體之密度,

$h =$ a 面離 A 管內液面之平均深度,

$h' =$ a 面離 B 管內液面之平均深度,

則 $hd =$ a 面右邊所受之壓力,

$h'd =$ a 面左邊所受之壓力,

但 $hd = h'd,$

故 $h = h'.$

即 A, B 兩支管內之液面在同一水平面上, C 管內之液面, 亦可同理證明之。

(2) 異種液體 將密度不同, 且不相混合之兩種液體, 先後注入連通管內, 則自其境界面至兩管內液面之高度, 與液體之密度成反比例。如圖 24, 先將密度較大之液體, 例如水銀, 注入 U 字形管內; 再由一管注入密度較小之液體, 例如水, 則水面必較水銀面為高。茲先證明兩液體之境界面必為一水平面:



圖 24. 連通管

如圖 25, 假定兩液之境界面為一不規則之曲面如 CGHD, 於液體內同一水平面上取任意之兩點 E 及 F, 則此兩點上之壓力應相等。

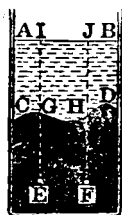


圖 25

兩液之境界面

設 d_1, d_2 各為上下兩液體之密度,

則 E 點上之壓力 = $IG \cdot d_1 + GE \cdot d_2$,

F 點上之壓力 = $JH \cdot d_1 + HF \cdot d_2$,

故 $IG \cdot d_1 + GE \cdot d_2 = JH \cdot d_1 + HF \cdot d_2$,

即 $(IG - JH)d_1 = (HF - GE) \cdot d_2$(1)

但 $IG + GE = JH + HF$,

故 $IG - JH = HF - GE$(2)

就 (1), (2) 兩式論之, 可知欲 (1) 式成立, 必須

$$d_1 = d_2$$

或 $IG - JH = HF - GE = 0$

即 $IG = JH, GE = HF$.

觀前式表示兩液之密度相等, 故其境界面可為任意曲面。後式表示 G, H 離液面等高, 故 CGHD 應為一水平面。

兩液之境界面，必為水平，已如上述。通過境界面 c' 引水平面 cc' ，則 c, c' 兩面上之壓力應相等，命 h_1, h_2 表 A, B 兩液面到境界面之高，則有

$$h_1 d_1 = h_2 d_2,$$

或
$$h_1 : h_2 = d_2 : d_1$$

即兩管內液面之高度，與液體之密度成反比例。

35. 自來水(City Water Supply)

自來水或稱都市給水，係根據連通管之理而致應用者，井與噴泉，理亦相同。

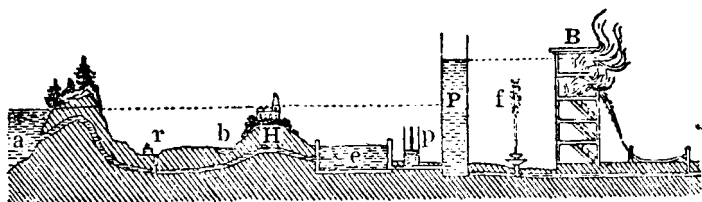


圖 26. 自來水

如圖 26 所示，為某都市自來水敷設之情況。水自水源 a 經過道路 r ，河床 b ，高地 H 等之下層，而入於水池 e 內。經過濾後，再用唧筒 p 將水壓至貯水器 P 內，以增高水面之位置，然後由埋於地下之鐵管，分送至全市各處，以供使用。就理論言， e 內之水面應與 a 處等高，但水自 a 至 e ，中途受有阻力，故事實上 e 中之水面必較 a 處為低。又自噴水器 f 與消防龍頭射出之水，因受空氣之阻力，故亦不能與 P 內之水面相齊平。

36. 巴斯噶原理(Pascal's Principle)

如圖 27 所示，左端為一中空銅球，球面上有若干小

孔，銅球之上，裝一圓筒，內有活塞，盛水於球中，用力將活塞壓入，則水由四面小孔射出，射出時之方向，與球面垂直，且強度相等，由此實驗，可知

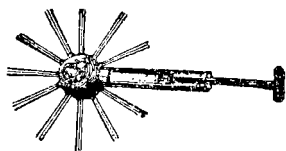


圖 27. 壓力之傳達

凡密閉器內之液體，其一部分受有壓力時，則液體即將此壓力，傳達於其他各部分，而壓力強度不變。

上述原理，為 1623 年法國科學家巴斯噶所創，故曰巴斯噶原理。

37. 水壓機 (Hydraulic Press)

如圖 28，大小二圓筒之下，以管連接之，內盛以水，筒中各配一活塞。若以小筒之活塞上施以壓力 P ，則於大筒之活塞上必須加一較大之力 W ，方可成為平衡；蓋由巴斯噶原理，兩活塞上之壓力強度恆相等故也。設大小兩活塞之橫斷面積各為 A_1 及 A_2 ，則

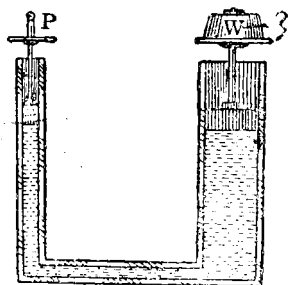


圖 28 水壓機之原理

$$\frac{W}{A_1} = \frac{P}{A_2}, \text{ 或 } \frac{W}{P} = \frac{A_1}{A_2}.$$

又因活塞面積之比，等於其直徑平方之比，設大小兩活塞之直徑各為 D_1 及 D_2 ，則

$$\frac{W}{P} = \frac{D_1^2}{D_2^2}.$$

觀上式，可知 A_1 (或 D_1) 較 A_2 (或 D_2) 甚大時，則 W 較 P 亦甚大，故可以小力生成大力。

水壓機即根據上理製成，用以壓棉花或紙，或榨油，

壓形等，鐵工廠中備有大水壓機，其壓力常達10000噸以上。水壓機之構造如圖29，當小活塞p提上時，水由C桶經活門V而入小筒中，將p壓下，則V閉而V'開，小筒中之水，即通過K管，進入大筒中，而p上所受之壓力，藉水之傳達，作用於大活塞P上，使其上昇，故置於平臺上之物，即受強有力之壓榨。

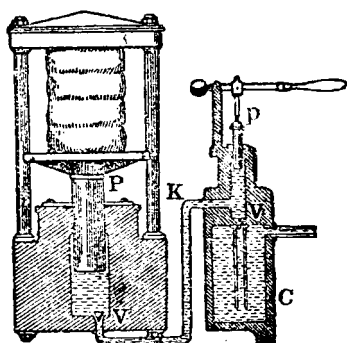


圖 29. 水壓機

38. 阿基米得原理(Archimedes' Principle)

前述液體內部之壓力，與深度成正比例，故置物體於液體中，其下面所受液體之向上壓力，必較其上面所受之向下壓力為大。易言之，即凡在液體中之物體，均受有向上之力，是曰浮力(Buoyancy)。吾人能於水中移動一大石，或以一指抵池底，可以支持自身之體重者，皆因浮力之作用，致其視重量(Apparent weight)較實重(True weight)減輕故也。古時希臘哲學家阿基米得於沐浴之時，偶覺其體重減輕，於是發現浮力之定律：

凡物體在液體中時，其視重量必較實重為小，所減輕之重量，等於被物體所排開之液體之重量。

是曰阿基米得原理，可以實驗證明之。

如圖30，C為金屬圓筒，B為金屬圓柱，B之體積恰與C之容積相等。將C及B懸於天平之左方，於右盤內置砝碼，使成平衡，然後將圓柱B沒入杯中之水內，天平

即成傾斜，此即圓柱之視重量減輕之故。若注水於圓筒 C 內，待水面與筒口相平時，天平復成平衡，可知 B 在水中所減輕之重量，與被其排開同體積之水重相等。

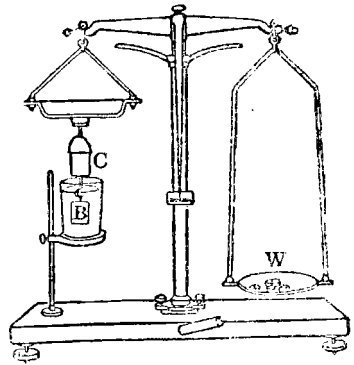


圖30. 阿基米得原理實驗證明

阿基米得原理又可用液體之壓力說明之：如圖31，浸立方體 aorc 於液體中，使其上下兩面 ao 及 cr 與液體之自由面平行，則作用於立方體四面之旁壓力，必適成平衡狀態，因其深度相等，故壓力亦必相等也。而作用於上下兩面之壓力則不然；因 ao 面上所受向下之全壓力，等於液柱 sa 之重量，er 面上所受向上之全壓力，等於液柱 sc 之重量。此兩者之差，即為物體所受之浮力，等於與物體同體積之液柱 oc (=sc - sa) 之重量。

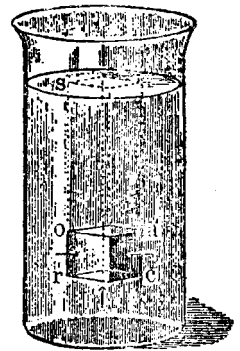


圖31. 阿基米得原理之理論證明

39. 物體之浮沉

設物體在空氣中之重量為 W ，其體積為 V ，密度為 d ；物體在液體中之視重量為 W' ，與物體同體積之液重（即浮力）為 B ，液體之密度為 d' ，則

$$W' = W - B = Vd - Vd' = V(d - d')$$

由上式可知：

(1) 物體之重量大於液體之浮力，即 $W > B$ 或 $d > d'$

時，則物體沒入液中，直達器底而後止，是曰沉 (Sink)。

(2) 物體之重量等於浮力，即 $W = B$ ，或 $d = d'$ 時，則物體可於液體中之任何處所靜止，一若有線繫住者，故可稱之曰懸 (Suspend)。

(3) 物體之重量小於液體之浮力，即 $W < B$ 或 $d < d'$ 時，則物體祇有一部分在液體內，一部分在空氣中，是曰浮 (Float)。

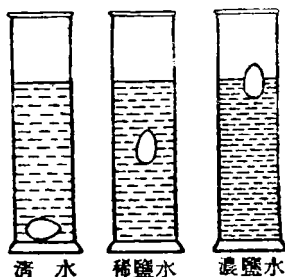


圖 32. 物體之浮沉

例如置雞蛋於清水中，則沉於器底；置於食鹽之濃溶液中，則浮出液面。若食鹽溶液之濃度適當，則雞蛋可懸浮於水中。

浮體 (Floating body) 之重量，等於其沒入部分同體積 (如圖 33 中之 $mben$) 之液重。輪船、兵艦多用鋼鐵建造船身，其全體之重量，等於排開之水重，故能浮於水面；若載重愈多，則被排開之水量亦愈大。通常船舶之載重容量，皆以噸表之，此噸數即為因載重而排開之水之重量。

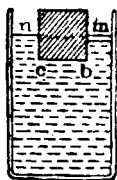


圖 33. 浮體

魚類腹中有鰾，故能在水中自由浮沉。鰾脹則腹中之水排出，於是體重減輕，向上浮起；將水吸入腹內，同時鰾即縮小，於是體重增加，遂向下沉。潛水艇 (Submarine) 參閱緒論前面之插圖。浮沉之原理，與魚類相同，可用浮沉子 (Cartesian diver) 實驗以明之：法取醫生盛打針藥水用之小玻璃瓶一個，於其頸上懸一適當之重物，使其

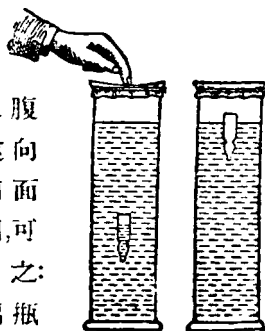


圖 34. 浮沉子

能垂直浮於水中。如圖 24 右方所示者。再取橡皮薄膜（破舊之足球或籃球膽均可利用）緊紮筒口，以指案膜，則壓力增大，水即進入小瓶內，其中空氣即被壓縮全體之重量因之增加，故爾下沉（如左圖所示）；去指則壓力減少，瓶中空氣復行膨脹，將水逼出，重量減輕，故又向上浮起。

40. 液體比重之測法

液體之比重測法頗多，茲將最重要者列舉之：

(1) 應用比重瓶 (Specific gravity bottle) 比重瓶之構造如圖 35 所示。塞中有細管，瓶內盛液，使液面與細管上之指標相齊為止，故此時瓶內液體之容積，成爲一定。故先用天平稱得空瓶之重量，然後分別測定盛液及盛水時之重量，液體之比重即可求得。

設 W 爲比重瓶自身之重量，
 W_1 爲瓶內盛液體時之重量，
 W_2 爲瓶內盛純水時之重量，
 S 爲液體之比重。

$$\text{則 } S = \frac{W_1 - W}{W_2 - W} .$$

(2) 應用重錘 (Sinker) 取一重錘，先測其重量，然後將其沒入液體及水中，再測其重量。

設 W 爲錘在空氣中之重量，
 W_1 爲錘在液體中之重量，
 W_2 爲錘在純水中之重量。



圖 35. 比重瓶

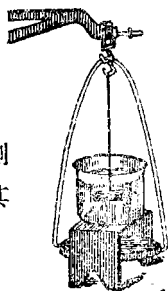


圖 36. 液中物體重量之測法

則 $W - W_1$ 爲與錘同體積之液重,

$W - W_2$ 爲與錘同體積之水重.

$$\text{故 } S = \frac{W - W_1}{W - W_2}.$$

(3) 應用比重計 (Hydrometer) 工業上測酸類, 酒精等之比重時, 多應用比重計. 其構造如圖 37 所示, 上爲一細長玻璃管, 內封刻度之紙尺, 管下有膨大之泡二, 於下方泡內封入水銀或鉛粒, 使能垂直浮於液體中. 將此計插入各種液體中, 視液面所在處之刻度, 可以直接讀出該液體之比重. 由浮體之原理, 比重計自身之重量, 必等於被其排開之液重, 可知液體之比重愈大, 則其沉下之部分愈少. 故比重計

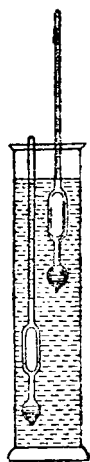


圖 37 比重計

可分兩種: 一種用以測比重小於一之液體, 如圖之右方所示者, 1 之記號刻於紙尺之下端, 一種用以測比重大於 1 之液體, 如圖之左方所示者, 1 之記號刻於紙尺之上端.

(4) 漢埃方法 (Hare's method) 如圖 38 所示爲漢埃儀器, 將一 U 字形玻璃管倒置之, 管口浸入兩種液體中, 上端用橡皮管接於抽氣機, 將管中空氣抽去少許則液體必同時昇入兩管中. 管旁有直立之尺, 尺之下端附一

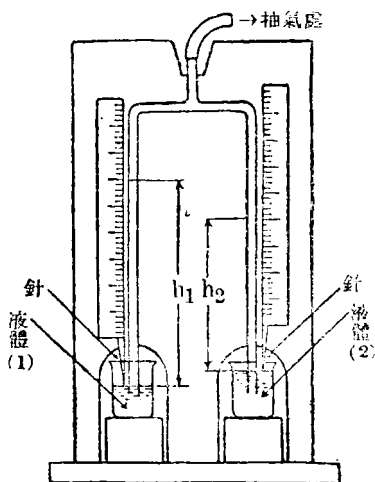


圖 38 漢埃儀器

指針，其尖端與杯中液面相觸時，則管中液體上昇之高度，可由其液面所指之刻度讀出之。

設 P 爲杯中液面上所受之大氣壓力，
 P' 爲管內液面上所受殘餘空氣之壓力，
 h_1, h_2 各爲液體(1),(2)上昇之高度，
 d_1, d_2 各爲液體(1),(2)之密度。

則 $P' + h_1 d_1 = P = P' + h_2 d_2$ ，(因此時管內外之壓力成平衡)。

故 $h_1 d_1 = P - P' = h_2 d_2$ 。

或 $\frac{d_2}{d_1} = \frac{h_1}{h_2}$ 。

由上式可知液體(1),(2)之密度，與其昇入管內之高度成反比例。若以純水代替液體(1)，則 d_2/d_1 即表液體(2)之比重。故應用漢埃儀器，祇須測知 h_1 及 h_2 ，即可推算液體之比重。

41. 固體比重之測法

固體之比重，測法亦甚多，茲就各種情形，述其重要之方法如次。

(1) 固體之形狀有規則者 固體若爲球體、平行六面體，或圓柱體等有規則之幾何形狀時，則可由長度推算出其體積，用天平稱得其質量，以體積除質量，即爲該固體之密度，再以水之密度除之，即得比重。

(2) 固體之重於水者 固體較水爲重時，則能全體沒入水中，故可先在空氣中測得物體之重量，再將物體浸於水中權之，由此兩種重量，可求物體之比重。

設 W 爲物體在空氣中之重量，

W' 爲物體在純水中之重量。

則由阿基米得原理可知

$W - W'$ 爲與物體同體積之水重。

$$\text{故 } S = \frac{W}{W - W'}$$

(3) 固體之輕於水者

固體較水爲輕，則入水時必有一部分露出水面，故須繫一重錘，使其強行沒入水中，如圖 39 所示。

設 W 爲物體在空氣中之重量，

W_1 爲重錘在純水中之重量，

W_2 爲物體與錘同在水中之重量。

則 $W + W_1 - W_2$ 爲與物體同體積之水重。

$$\text{故 } S = \frac{W}{W + W_1 - W_2}$$

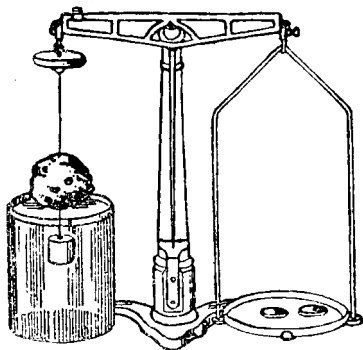


圖 39. 輕固體比重之測法

(4) 固體之能溶解於水者 若固體浸入水中，即行溶解，則其在水中之重量，不能用上法測定之，必須另擇一種液體，不能溶解該固體者，先仿(1)法測得固體對於該液體之比重，然後以液體之比重乘之，即得。

設 W 爲物體在空氣中之重量，(須實測)

W_1 爲物體在液體中之重量，(須實測)

W_2 爲與物體同體積之水重，(不必測)

S' 爲液體之比重，(可檢閱比重表)

則 $\frac{W}{W - W_1} = S''$ (物體對於液體之比重)

$$\frac{W - W_1}{W_2} = S'$$

兩式相乘,則得

$$\frac{W}{W_2} = S'' \cdot S'$$

故 $S = S' \cdot S''$

(5) 固體碎屑之比重 固體之碎屑或粉末,可用比重瓶求其比重。

設 W 爲物體之重量,

W_1 爲瓶中盛滿水時之重量,

W_2 爲物體盛入瓶中,使瓶內之水溢出一部分,水面仍在指標處時之重量。

則 $W + W_1 - W_2 =$ 與物體同體積之水重。

故
$$S = \frac{W}{W + W_1 - W_2}$$

溫習提要

[定義]

1. 全壓力及壓力強度:
2. 鉛直線:
3. 水平面:
4. 靜液之自由面:

5. 海平面:

6. 物體之浮沉:

[原 理]

1. 連通管的原理:

(1) 同種液體:

(2) 異種液體:

2. 巴斯噶原理:

3. 阿基米得原理:

[公 式]

1. 全壓力 P :

2. 壓力強度 p :

3. 水壓機兩活塞上之壓力與活塞之面積及直徑之關係:

方 法]

1. 液體比重之測法:

(1) 應用比重瓶:

(2) 應用重錘:

(3) 應用比重計:

(4) 漢埃方法:

2. 固體比重之測法:

(1) 形狀有規則者:

(2) 重於水者:

(3) 輕於水者:

(4) 能溶解於水者:

(5) 固體之碎屑:

儀器]

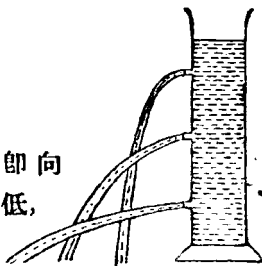
1. 氣泡水準:

2. 水壓機:

3. 浮沉子:

問題四

1. 盛水於右圖所示之圓筒內,水即向筒旁各小孔射出,孔之位置愈低,則水之射程愈遠,試說明其理由。



2. 水桶之箍,近底者粗,近口者細,其理若何?
3. 將磚一塊,平置或豎置於地上時,地面上所受之全壓力及壓力強度,有無改變?
4. 滿盛水銀於底面積為10平方厘米,高20厘米之容器內,其器底所受之全壓力及壓力強度各為若干?
5. 插長1.5米之細管於底面積為 100π 平方厘米,高40厘米之桶蓋上,求桶底所受之全壓力,及桶壁所受之旁壓力.
6. 取杯盛水,約及其半,置於天平之左盤中,於右盤內加適當之砝碼,使其平衡,然後用線懸一銅塊,以手持線,而將銅塊沒入水面之下,此時天平仍能保持其平衡否?試申其理.
7. 相傳荷蘭童子,偶見海水從堤中流入,乃以掌阻之. 假設此洞之面積為2平方厘米,洞口離海面高1米,問此童子掌上須用若干之力?
8. 於試管中盛入水銀,水,油(密度 0.9g./c.c.)三種液體,設水銀層深2厘米,水層深3厘米,油層深1.5厘米,求管底所受之壓力.
9. 用氣泡水準檢驗平面之水平與否,必須就互相垂直之兩方向驗之,而後始能確定,其故安在?
10. 於連通管內注入水與煤油(密度 0.8g./c.c.)時,其境界面至水面之距離為12厘米,問自境界面至煤油面之距離若干?
11. 於U形管內先後注入水銀及某種液體,當靜止時,水銀面至境界面之距離為0.175米,某液面則為0.28米,求此液體之密度.
12. 設水壓機小活塞之橫斷面積為5平方厘米,大活

塞之橫斷面積爲 100 平方厘米,欲使置於大活塞上重 2 仟克之物體上昇,則小活塞上須用力若干?

13. 設水壓機大小兩活塞之直徑各爲 20 英寸及 $\frac{1}{2}$ 英寸若於小活塞上施以 120 磅之力,則大活塞上所生之力爲若干?
14. 於圖 28 中,設大小兩圓筒之面積各爲 150 平方厘米及 15 平方厘米,當大筒活塞上載重 3 仟克時,小筒中之水面應高於大筒中若干?
15. 有浮於桶中水上之冰塊,待其全體溶解後,桶中水面之高低有何變化?試說明之.
16. 欲將 100 克重之鐵塊壓入水銀內,須加力幾何?
17. 有浮於海面之冰山,試求 (a) 冰山位於海面上下之體積之比, (b) 設冰山在海面以上之體積爲 1000 立方尺,其全部之體積若干? (c) 此冰山之重量爲若干仟克?
18. 以線懸重 10 仟克之物體 (比重 2.5), 而使其體積之半浸入於水中,求線上之張力.
19. 有比重爲 9 之中空金屬,於水中稱之,重 715 克,在空氣中稱之,重 810 克,求其中空之容積.
20. 附比重 0.25 之軟木於重 41.25 克之鉛塊上,使二者結合後能在水中任何處所靜止,問軟木之體積應爲若干立方厘米?
21. 有比重 0.9 之液體 3 升與比重 1.5 之液體 2 升,互相混合,求混合液之比重.
22. 地球之平均密度爲 5.6 g./c.c. , 而其平均半徑則爲 6.37×10^8 厘米,問地球之質量爲若干?
23. 有重 35 克之比重瓶,滿盛以水共重 135 克,滿盛硫

- 酸共重 215 克,求硫酸之比重.
24. 有重 7.83 克之鉛塊,在酒精中重 7.33 克,在水中重 7.19 克,求酒精及鉛塊之比重.
25. 將橫斷面積一定之浮秤,插入水中時,其沉入於水中之部分,等於全長之二分之一;若將此浮秤插入另一液體中時,則沉入其全長之三分之二,求此液體之比重.
26. 用漢埃方法測液體之比重時,兩杯中之液面是否必須在同一水平面上?又兩管之粗細,是否必須相同?
27. 將 58 克重之物體沉入於水中權之,其視重量為 46 克,求此物體之體積及比重.
28. 附錘於重 16 克之木塊,使之沉入於水中權之,共重 6 克,若單獨將錘沉入於水中權之,計重 30 克,求此木塊之比重.
29. 有重 13 克之冰糖一塊,在石油中重 6.6 克,求冰糖之比重 (石油之比重為 0.8).
30. 充水於比重瓶中,共重 65 克,次將重 10 克之固體碎屑投入瓶中,而拭去其溢出之水後,則共重 73 克,求此固體之比重.

第四章 氣體

42. 氣體之性質(Properties of Gas)

氣體與液體同屬流體,除氣體極易壓縮與擴張而外,其他性質,幾與液體完全相同,故第三章中所述關於液體之定律,亦可適用於氣體,例如、

(1) 靜止氣體之壓力,常垂直作用於物體之表面。

(2) 靜止氣體中一點之壓力,對於任何方向皆屬相等。

(3) 在同一水平面上各點之壓力皆相等;任意兩點之壓力差,等於以此兩點間之垂直距離為高之氣柱之重。

(4) 密閉之氣體,其一部分受有壓力時,則氣體即將此壓力傳達於其他各部分,而壓力強度不變。(巴斯噶原理)

(5) 凡物體在氣體中時,其視重量必較實重量為小,其減輕之重量(即浮力),等於被物體所排開之氣體之重量。(阿基米得原理)

43. 氣體之比重(Specific Gravity of Gas)

前述固體與液體之比重,均以 4°C .時之蒸餾水為標準;氣體則不然,各種氣體之比重,係在標準狀況時(溫度 0°C .,大氣壓 760 毫米),氣體之密度與空氣之密度之比。數種氣體之比重與密度如表 6。

表6. 氣體之比重與密度

氣 體	密度g./c.c.	比 重	氣 體	密度g./c.c.	比 重
空 氣	0.001293	1.0000	氫	0.000929	
二氧化碳	0.001977	1.5291	氯	0.003211	
氧	0.001429	1.1056	一氧化碳	0.001250	
氮	0.001250	0.9574	氫	0.000771	
氫	0.000178	0.1381	水汽(100°C.)	0.000598	
氫	0.000089	0.0695	煤 氣	0.000414	

上表內尚有六種氣體之比重，學者試一一求出，填於表中，以資練習。

44. 氣體之壓力(Pressure of Gas)

氣體之有壓力，其原因有二：一由其分子之劇烈運動而生，例如密閉器內之氣體，對於器壁之壓力，即因分子運動，衝突器壁而生者也。一由其重量而生，例如大氣(Atmosphere)對於地面及地面上物體之壓力，即屬於此。大氣者，彌漫於地球周圍之空氣也。因其重量而生之壓力，則謂之大氣壓 (Atmospheric pressure)。茲舉二實驗：一以明空氣之有重量；一以明大氣之有壓力。

(1) 取如圖40之玻璃瓶，先秤得其重量，然後用抽氣機排除瓶中空氣而再秤之，則其重量較前減輕，此減輕之重量，即為抽出空氣之重量。若將空氣復行放入瓶中，則其重量立即復原。由此可知空氣亦有重量，惟其量至微，故平時不甚注意而已。

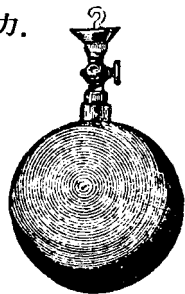


圖 40.

測空氣之重

(2) 取如圖41之兩個鐵製半球，併合之

恰成一中空之鐵球，當球中有空氣時，極易將兩半球分開，因此時球內外之空氣壓力，互成平衡之故。若用抽氣機將球中空氣抽出，緊閉活門，以兩手拔之，頗難分開，此即由於球外受有大氣壓之作用所致。德國物理學家葛利克 (Otto von Guericke, 1602—

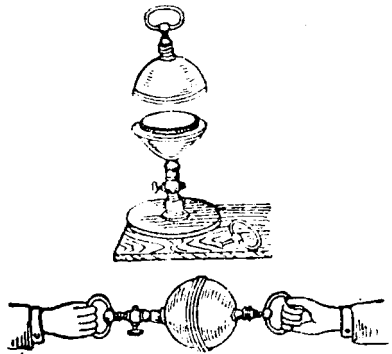


圖 41. 馬德堡半球

1686) 曾在馬德堡地方行此實驗於德皇之前，故名此球為馬德堡半球 Magdeburg hemispheres。當時所用之球，內徑為 22 英寸，兩方各繫馬八匹，始能拉開，可見氣壓之大。

45. 大氣壓之測定

離地面愈高，則空氣之密度漸次減小，以至於零，但無顯然之表面。假設上下層空氣之密度相同時，則其深度約為 8000 米。吾人生存於此氣海之中，當受有甚大之壓力。此項大氣壓力之大小，首先測定者，為伽利略之大弟子托里拆利，(1608—1647) 故名其實驗曰托里拆利實驗 (Torricelli's experiment)，述之如次：

取長約 1 米一端封閉之玻璃管（稱為托里拆利管），滿盛水銀，以手指摑住管口，倒插於水銀槽中，

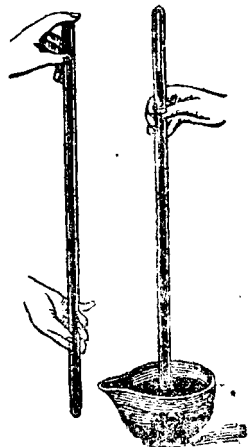


圖 42. 托里拆利實驗

然後移開手指，則水銀即隨之降下，至管內所存水銀柱之高度約為76厘米而止；無論玻管是否直立，管內外兩水銀面間之垂直距離恆不變。此水銀柱之高度，名曰氣壓高度 (Barometric height)。其管內水銀面上之部分，則謂之托里拆利真空 (Torricellian vacuum)。

由上實驗，可知槽中水銀面上所受之大氣壓，必等於管內水銀柱之向下壓力。故若測得氣壓高度，即可表示其時之大氣壓力。惟氣壓之大小，恆隨時隨地而有差異，通常以在緯度 45° 之海平面上，溫度為 0°C 。而水銀柱之高度適為76厘米時之大氣壓，作為標準，名曰1大氣壓 (One atmosphere)。因水銀之密度為每立方厘米13.6克，故由壓力之公式 $p=hd$ ，可得

1大氣壓 = $76 \times 13.6 = 1033.6$ 克/平方厘米，約合英制每平方英寸15磅。

46. 氣壓計 (Barometer)

量度大氣壓之器械曰氣壓計，俗稱晴雨表，其種類頗多，茲擇其要者，述之如下：

(1) 福廷氣壓計 (Fortin's barometer) 福廷水銀氣壓計，係利用托里拆利實驗而製成者，其外形如圖43之左方所示。內部為一直立之托里拆利管，外加銅套，以資保護。套之上部透明，其旁刻有標度，並附一游標尺。管之下端插入皮製之水銀

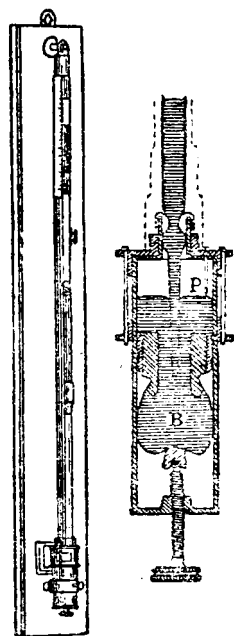


圖43. 福廷氣壓計。

槽 B 中，如圖之右方所示，觀測時，先轉動槽下之螺旋 S，使槽中之水銀面，恰與固定之象牙針 P 之尖端相接觸，然後從套上之刻度及游標尺，精密讀出氣壓高度。因套上所刻之尺度，以針之尖端為起點，故槽中之水銀面，必須先令其與針端相觸也。

(2) 無液氣壓計 (Aneroid barometer) 水銀氣壓計攜帶不便利，故用圖 44 所示之無液氣壓計，其主要部分為

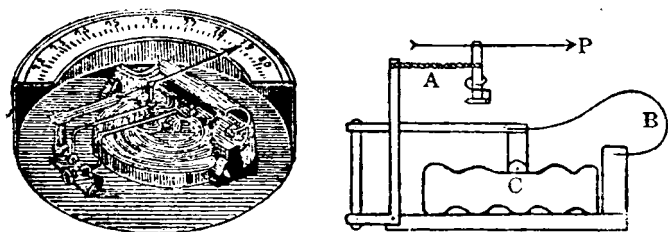


圖 44. 無液氣壓計

一薄金屬板所製之圓盒 C，而有凹凸溝紋，內容少量空氣，中承支柱，連於槓桿，當大氣壓力改變時，盒面溝紋隨之生高低之變化，感覺極為靈敏，此微小之變化，牽動支柱，復經槓桿連續擴大其作用，由鍊條 A 傳至指針 P，使之轉動，故可由氣壓計之表面，讀出當時之大氣壓。B 為彈條，裝於柱上，因盒中空氣極為稀薄，苟無彈條，必將受外面空氣之重壓，而致破裂。

(3) 氣壓記錄器 (Barograph) 如圖 45 所示，為氣壓記錄器，係用數個圓盒重疊而成，指針之端，附一墨水筆，可將大氣壓之變化，隨時記錄於旋轉圓筒外貼之紙上，對於氣象研究，甚為便利。

氣壓計之用途有二：其一，因水汽較空氣為輕，天將雨時水汽必多，氣壓降低，久雨將晴，水汽減少，氣壓升高。

故由大氣壓之高低，可以預測天氣之晴雨。又由各地大氣壓之高低，亦可推測暴風之方向，蓋風為空氣之流動，必自高氣壓處流向低氣壓處故也。其二，離地愈

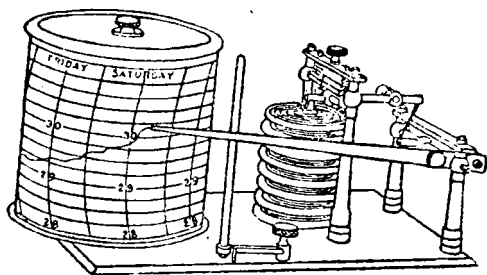


圖45 氣壓記錄器

高，氣壓愈低，大概每離海平面12米，氣壓高度約減少1毫米，故氣壓計亦可用以測量高度。

47. 氣體之浮力 (Buoyancy of Gas)

氣體有浮力，前已述及，(參閱 § 42) 茲更舉一實驗以明之：如圖 46，天平左端懸一大空球，右端懸砝碼，使成平衡。將此天平置於抽氣機之玻璃罩內，抽去罩中空氣，則天平頓失平衡，因平衡時，必有下式之關係：

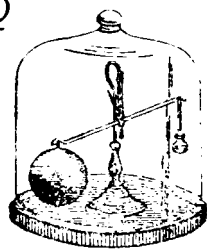


圖 46. 氣體之浮力

球重 - 球所受浮力 = 砝碼重 - 砝碼所受浮力，

而 球所受之浮力 > 砝碼所受之浮力。

故 球之實重量 > 砝碼之實重量。

是以懸球之一端必向下降落也。

如物體自身之重量，小於其所受空氣之浮力，則可上昇空際，氣球 (Balloon) 及飛艇 (Air-ship) 均係利用此理製成，如圖 47 所示，上為大氣囊，內容氫或氦，下繫一籃，人坐其中，可以居高遠眺，故軍事上常用以探視敵情。若

在籃中置各種自記儀器，繫繩於球下，然後將球放上，則可測量高空之壓力，溫度，或密度等狀況，故於氣象上亦頗關重要。囊中所裝氣體，不可過多，否則上昇時，因外而壓力減小，囊中氣體隨之擴張，必有

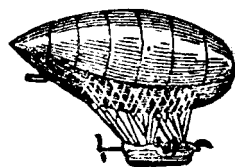
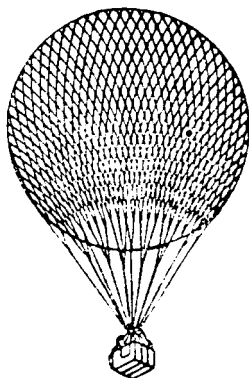


圖 47. 氣球及飛艇

破裂之虞。若將氣門放開，使氣體外逸，浮力減小，則球必冉冉而下矣。飛艇之上，裝有推進機及舵，可以任意向一方向進行，尤為便利。

48. 波義耳定律 (Boyle's Law)

如圖 48, A, B 為兩玻璃管，下端以橡皮管連接之，管中盛水銀，先將 A 管上端之活門放開，則兩管內之水銀面必在同一水平面上。上下移動 B 管，使 A 管內之水銀面約在管之中央，然後將活門關住，使一定量之空氣，密閉於 A 管內。此時若將 B 管上下移動，則兩管內之水銀面，不復在同一水平面上。移上時，A 內空氣之體積縮小，壓力增大，等於大氣壓與兩液面高度差之和；移下時，A 內空氣之體積放大，壓力減小，等於大氣壓與兩液面高度差之較。英國理學家波義耳 (1627-1691) 用此方法，研究各種氣體

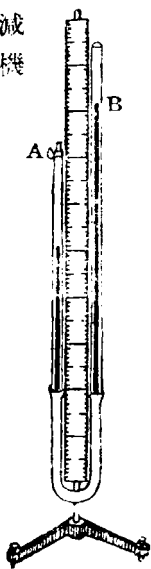


圖 48. 波義耳實驗

之體積與壓力之關係，得一定律如下：

一定量之氣體，當溫度不變時，其壓力與體積成反比例：

是曰波義耳定律。

設 P 為氣體之壓力， V 為其時之體積，則此定律可以下式表之：

$$P \propto \frac{1}{V}, \text{ 或 } PV = K \text{ (} K \text{ 為常數)}$$

又設氣體之密度為 d ，質量為 m ，則

$$V = \frac{m}{d},$$

代入上式，即得

$$P \cdot \frac{m}{d} = K \text{ 或 } d = \frac{K}{m} \cdot P$$

m 及 K 均為常數，故 $\frac{m}{K}$ 亦為常數，由是可知：

一定量之氣體，當溫度不變時，其密度與壓力成正比例。

49. 流體壓力計(Manometer)

量度密閉器內之氣體或液體之壓力，所用之器械曰流體壓力計。在圖 49 中：

(1) 為開管流體壓力計 (Open manometer) 用兩端開放之曲玻璃管，內盛水銀或其他液體，管之一端，用厚橡皮管

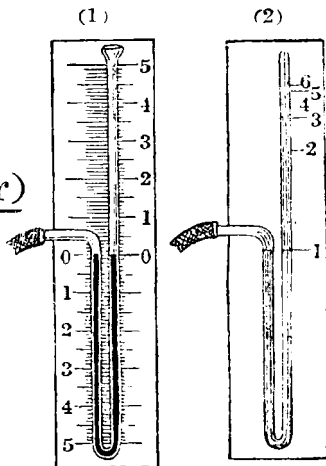


圖 49. 流體壓力計

連於欲測壓力之流體容器上。若容器內流體之壓力，等於大氣壓時，則兩枝管內之液面成爲水平，若其壓力大於或小於大氣壓時，則兩枝管內液面之高低亦不相同。吾人由管旁之刻度，讀出兩液面所示之高度，而推算容器內流體壓力之大小。設 P 爲所測之壓力， h 爲兩液面之高度差， d 爲管中液體之密度，則

$$P = \text{大氣壓} \pm hd \text{ 克/平方厘米。}$$

(2) 爲閉管流體壓力計 (Closed manometer) 管之一端封閉，其中密閉空氣之壓力，恆與容器內流體之壓力相平衡。由波義耳定律，此密閉空氣之壓力愈大，則其體積愈小。故若於管旁預先刻成 1, 2, 3 ... 等氣壓之度數，則可視管中液面之示度，測得器中流體之壓力。凡欲測較大之流體壓力時，常用此種壓力計。

50. 各式唧筒 (Pump)

唧筒之種類甚多，可大別之爲二類：一曰空氣唧筒 (Air pump)，用以增減容器內氣體之密度；一曰水唧筒 (Water pump)，用以吸取低處之清水。茲分述數種常用之唧筒於下：

I. 空氣唧筒

(1) 抽氣機 (Air pump) 最簡單之抽氣機，其構造如圖 50 所示。S 爲圓筒筒中配以活塞 (Piston) K，活塞及筒底各裝一向上開之活門 (Valve) W 及 V，L 爲導管，T 爲圓板臺，R 爲玻璃罩，其中空氣即爲吾人所欲抽去者，將活塞提上時，筒內幾成

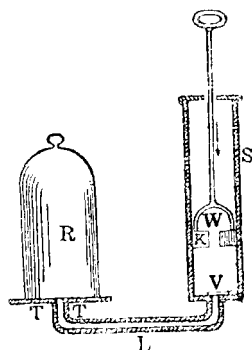


圖 50. 抽氣機

真空，故活門 W 關，R 內之空氣即壓開 V 門而入筒中，活塞壓下時，筒內被壓縮之空氣即將活門 V 壓閉，而衝開活門 W，逸出於活塞以上，再將活塞提上，則 W 又閉而 V 又開，R 內之空氣復進入筒中，同時活塞上之空氣，由空隙出至筒外，如是將活塞上下抽壓，可使罩內之空氣逐漸稀薄，但不能成爲真空，其故有二，一因活門 V 多少具有重量，故罩內空氣之壓力減少至不能壓開此活門時，則空氣即無由進入於筒內，一因活塞壓下時，不能與筒底完全密着，而必留有餘隙，故提上活塞時，筒內不能生成真空，即使活門 V 全無重量，但筒中存留之空氣，仍具有微小之壓力，若罩內空氣之壓力，等於此項壓力時，活門 V 亦不能壓開，欲免此弊，多於筒底加入適量之油，而稱之曰油唧筒 (Oil air pump)。

(2) 打氣筒 (Compression pump) 打氣筒或稱壓縮唧筒，係將抽氣機之兩活門依反對方向安置之，使其均向下開，故上下抽壓活塞時，可將空氣壓入容器內，自由車、汽車之輪胎及球類等之充氣，即應用此種唧筒。

受壓空氣 (Compressed air) 之應用頗廣，如潛水艇之排水，水雷之發射等，均利用之，又如圖 51 所示者，爲潛水作業之情形，中央爲一潛水鐘 (Diving bell)，利用受壓空氣，使水不致浸入鐘內，左右二人各着潛水衣 (Diving suit)，在水底作工，船上運轉打氣筒，由橡皮管輸送新鮮空氣於潛水衣內，其呼出之空氣，則由胸部之活瓣透出於水上，凡採取真珠，打撈船舶，建築橋基，及

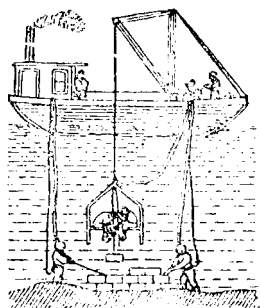


圖 51. 潛水作業

其他水底工程,多用此種潛水衣或潛水鐘,頗稱便利。

II. 水唧筒 (又名抽水機)

1. 吸取唧筒 (Suction pump) 如圖 52 所示者,為吸

取唧筒,其構造及活門之安置,與抽氣筒無異。提上活塞,則筒內幾成真空,於是 B 閉 A 開,低處之水因大氣之壓力壓入筒內。按下活塞,則 A 閉 B 開,水昇至活塞上。再提上時,井水復昇入筒中。同時活塞上之水即由旁管流出。

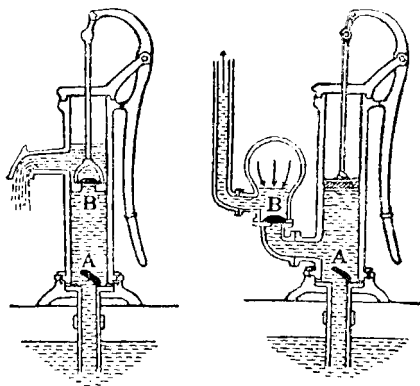


圖 52. 吸取唧筒 圖 53. 壓力唧筒

(2) 壓力唧筒 (Force pump) 如圖 53 所示者,為壓力唧筒,提上活塞, A 開 B 閉,

水入筒中。按下活塞, A 閉 B 開,水即進入氣室 (Air chamber)。因室中受壓空氣之彈力,將水由旁管壓出,射至高處,且可無斷續之弊。又若用槓桿連結兩壓力唧筒,使其活塞交互上下,如圖 54 所示者,則出水更多,頗利救火。故曰消防唧筒 (Fire pump)。

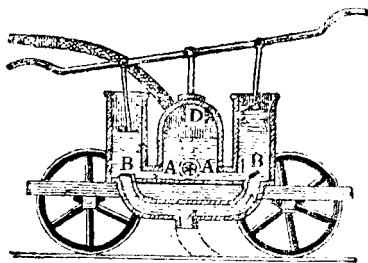


圖 54 消防唧筒

51. 虹吸管 (Siphon)

利用大氣壓力,使高處之液體移至低處之器械曰

虹吸管，如圖 55 所示，為一彎曲之管，一端長，一端短，內盛液體，以指捫管口，而將短管插入杯內之液中，然後放開手指，則液體即由長管之口，源源流出，其理由可解釋之如下：

設 P 為大氣壓，
 d 為液體之密度。
 自杯內液面 A 至最高點 F 之距離為 h_1 ，
 自長管之口 D 至最高點 F 之距離為 h_2

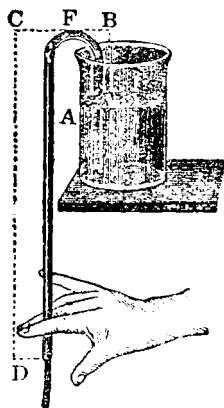


圖 55. 虹吸管

通過 F 點作一垂直截面，則此橫截面之

右方所受之旁壓力 $= P - h_1 d, \dots$ (必須為正)

左方所受之旁壓力 $= P - h_2 d, \dots$ (可以為負)

但 $h_1 < h_2$,

$\therefore P - h_1 d > P - h_2 d$,

即自右向左之壓力，大於自左向右之壓力，故液體能陸續由長管口流出，明乎此理，則可知 $h_1 d > P$ 或 $h_1 = h_2$ 時，液體均當停止流動，學者試分別說明其理由，又若在真空之內，則因 $P = 0$ ，故液體亦必停止流動。

如圖 56，左方所示者為斷續虹吸 (Intermittent siphon)，

由漏斗內插一小虹吸管而成，注水於漏斗，至水面達於虹吸管之最高點時，則水即由管口 O 流出，若漏斗內繼續添水，但

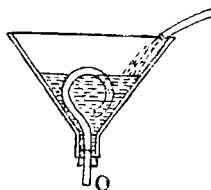


圖 56 斷續虹吸及斷續泉

注入之水量少，流出之水量多，於是水面逐漸降低，至與短管之口相平時，水即停止流出，其後添注之水，儲積於漏斗內，待其水面達於管之最高點時，則上述之作用，又周而復始，因之流出之水，或斷或續，故曰斷續虹吸。圖之右方所示者為斷續泉，因水在地層中經過之路，與斷續虹吸之情形相同，故泉水流出，亦有斷續。

溫習提要

[定 義]

1. 氣體之比重：
2. 大氣壓：
3. 氣壓高度：
4. 托里拆利真空：

[定 律]

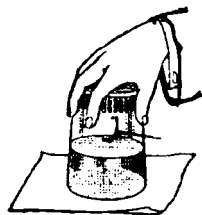
1. 波義耳定律：
2. 氣體之密度與壓力之關係：

[儀 器]

1. 馬德堡半球：
2. 福廷氣壓計：

3. 無液氣壓計:
4. 氣壓記錄器:
5. 氣球及飛艇:
6. 流體壓力計:
 - (1) 開管:
 - (2) 閉管:
7. 空氣唧筒:(注意活門之安置)
 - (1) 抽氣機:
 - (2) 打氣筒:
8. 水唧筒:(注意活門之安置)
 - (1) 吸取唧筒:
 - (2) 壓力唧筒:
 - (3) 消防唧筒:
9. 虹吸管:
10. 斷續虹吸:

問題五

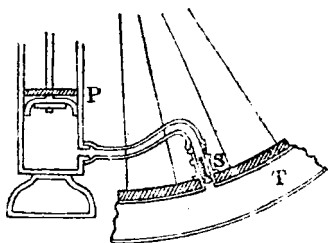


1. 取杯盛水,以紙覆之,將杯倒執,如同,水不流出,何故?
2. 吾人身上所受之大氣壓甚大,但並不感覺壓迫者,何故?
3. 設有一人,其表面積為1.2平方米,問在標準狀況時,此人所受之大氣壓為若干仟克?
4. 托里拆利管內徑之大小對於水銀柱之高度有無影響?若內徑過小時又當如何?
5. 在標準大氣壓時,以水代替水銀作托里拆利實驗,則水柱之高應為若干厘米,約合若干英尺?
6. 設傾斜氣壓計之玻璃管,使與水平面成 30° 之角,其管內水銀柱之長為150厘米,求此時之大氣壓。
7. 若將氣壓計置於玻璃罩內,而抽去罩中空氣時,結果若何?
8. 於空氣中等重之木塊與鉛塊,究係何者較重?
9. 置杯於天平之盤上,所測得之質量,係杯本身之質量,抑係杯與杯內所容空氣之總量?試述其理。
10. 設有重500克之氣球,內盛氫氣,球之容積為1500升,求此球在空氣中所受之上壓力。
11. 以長10厘米之試驗管,管口向下,壓入水銀中,如欲使管內空氣之體積,減為一半時,則管口應沈入水銀面下若干?
12. 將粗細均勻,兩端開口之長玻璃管,插入水銀中,至其上端伸出水銀面上之長為10厘米時,以指密閉管口,而將此管提起至伸出水銀面上70厘米而止,

此時管內之水銀面較管外高 50 厘米,求其時之大氣壓力.

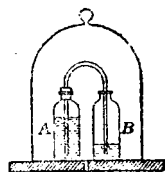
13. 設有球形氣泡,自水底浮至水面時,其直徑擴大成二倍,求水之深度. (大氣壓 = 76 厘米)
14. 試求大氣壓為 770 毫米,溫度為 6°C . 時空氣之密度.
15. 設大氣壓為 76 厘米時,用開管流體壓力計量度容器內氣體之壓力,得兩管內水銀面之高度差為 4 厘米,求氣體之壓力.(有二解)
16. 試大氣壓為 76 厘米時,用閉管壓力計量度水汽罐內水氣之壓力,設其密閉管中之水銀面較管頂低 20 厘米,而與罐相連之管中水銀面更低 16 厘米,求水汽之壓力.
17. 設抽氣機之玻璃罩及導管之容積為 V , 圓筒內活塞所能移動部分之容積為 v , 罩內空氣之壓力為 P . 當活塞上下抽壓三次後,其壓力當減為若干? n 次後如何?

18. 右圖中 P 為活塞,上有軟皮,其形如碟, T 為車輪之一部分, S 為活門,附有螺旋彈簧,使其緊閉,試解釋此種打氣筒之作用.



19. 用水唧筒汲水,最多能將水送至如何高處?

20. 取 A, B 兩瓶,置於鐘罩之內, A 上有塞,緊閉瓶口, B 則無之,以一虹吸管連接之,如右圖所示,抽去罩內空氣,則 A 內之水即由曲管流入 B 中.若將空氣放入,則水復流回 A 瓶,試說明其理.



第二編 力學

第一章 力之分合及平衡

52. 力之圖示(Graphic Representation of Force)

凡欲決定一力，其必要條件有三：即大小(Magnitude)，方向(Direction)，及作用點(Point of application)是也。故此三者，稱爲力之三要項(Three elements of force)。以作用點爲起點，沿力之方向作一線段，長短與力之大小成比例，並於其末端附一箭頭，此種線段可以表示力之三要項，稱爲力之圖示。

物理量中，僅有大小而無方向可言者，曰無向量(Scalar quantity)，如質量等是也；若除大小而外尚須兼論其方向者，曰有向量，或簡稱向量(Vector quantity)，如力等是也。

53. 合力與分力

二個以上之力，可以合而爲一，使其作用與諸力之作用相同，則此一力名曰諸力之合力(Resultant of forces)。反之，一力亦可分爲二個以上之力，此數力即謂之分力(Component of force)。由數力求合力，曰力之合成(Composition of forces)，由一力求分力，曰力之分解(Resolution of force)。作用於同一直線上之二力，若方向相同，則其合力等於二力之和，方向不變；若方向相反，則其合力

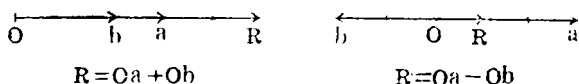


圖 57. 一直線上二力之合成

等於二力之較。方向與大者相同，如圖 57 所示，二個以上之力，亦可用同法求其合力。

54. 力之平行四邊形定律 (Law of Parallelogram)

(of Force)

作用於一點之二力，若不在同一直線上，而其間成一角度時，則其合力可用下法求之：

以二力為兩邊，作一平行四邊形，則通過作用點之對角線，即為所求之合力。是謂力之平行四邊形定律，可以下之實驗證明之：

如圖 58 於小圓桌上釘一白紙，將結於一點之三線繞過滑車而置之於桌上線之他端各懸重量不等之法碼，固定一滑車，而變動其他二滑車之位置，使三力平衡，用鉛筆記取三線之位置，然後將線移去，在白紙上作三直線代表三力之方向，並於其上各取一線段，與力之大小成比例，如右方所示之 f_1, f_2, f_3 。以 f_1 及 f_2 為兩邊作一平行四邊形，通過交點引

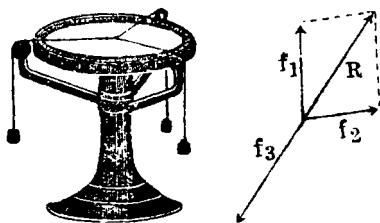


圖 58. 力之平行四邊形

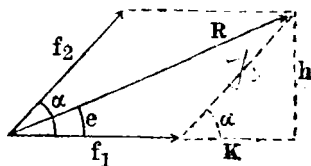


圖 59. 合力之計算

一對角線 R 。若精細爲之，可知 R 與 f_3 必在同一直線上，且長短相等，故此對角線即代表 f_1, f_2 二力之合力。

設有二力 f_1 及 f_2 ，其間所夾之角爲 α ，則按餘弦定律，可得

$$R^2 = f_1^2 + f_2^2 + 2f_1f_2\cos\alpha \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{又 } \tan\theta = \frac{h}{f_1+x} = \frac{f_2\sin\alpha}{f_1+f_2\cos\alpha} \dots\dots\dots (2)$$

由(1)式，可求合力之大小；由(2)式，則可定合力之方向。若 $\alpha=90^\circ$ ，即二力互相垂直，則 $R = \sqrt{f_1^2 + f_2^2}$ ；若 $\alpha=0^\circ$ 或 180° 即二力成一直線，則 $R = f_1 \pm f_2$ ；均爲特例。

又合力亦可以二力爲邊，所作三角形之第三邊表之，是謂力之三角形 (Triangle of forces)，實則三角形即半個平行四邊形，其第三邊即爲平行四邊形之對角線。

二力或三個以上之力，欲求其合力時，可應用平行四邊形定律或三角形法，先求二力之合力，再求此合力與第三力之合力，依此類推，即可求得諸

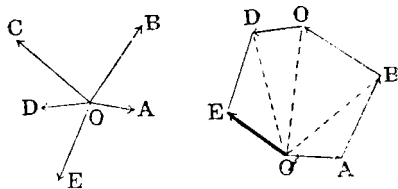


圖 6. 力之多邊形

力之合力。但若用多邊形以求合力，尤爲便利，例如欲求 OA, OB, OC, OD, OE 五力，可先自一點 G' 作 $O'A \perp OA$ ，再自 A 點作 $AB \perp OB$ ，……… $DE \perp OE$ ，連接 $O'E$ ，成一多邊形 $O'ABCDE$ ，其最後之一邊 $O'E$ ，即表五力之合力，此種多邊形，謂之力之多邊形 (Polygon of forces)。

55. 力之分解

上述用平行四邊形定律，可將二力合併而爲一。若

反其道而行之，則可將一力分之而為二，但二力之合力，其數唯一，而一力之分力，組數無窮，因以一力為對角線，可以作成無數平行四邊形，其代表分力之二邊亦隨之改變其方向與長短故也。是故欲使問題之解答確定，必先與以一定之方向。如圖

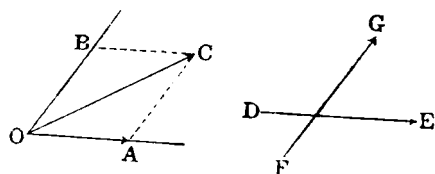


圖 61. 力之分解

61. \vec{OC} 為欲分解之一力， \vec{DE} 及 \vec{FG} 為預定之方向，自 O 、 C 兩點各引二直線與 \vec{DE} 、 \vec{FG} 平行，所成平行四邊形之兩邊 \vec{OA} 及 \vec{OB} ，即為所求之分力。

力之分解最常遇之問題，為將一力分成互相垂直之二分力，例如帆船所受之風力，若就互相垂直之兩方向分解之，可以說明其乘風前進之理由。例如圖 62 所示，

\vec{CA} 為風力， θ 為風向與帆面所成之角度，將 \vec{CA} 分解之，使其一分力與帆面垂直，如 $\vec{CP} = C \sin \theta$ ，他一分力與帆面平行，如 $\vec{CD} = CA \cos \theta$ ，前者可以推動船帆，後者對帆不生作用。又因船上所張之帆與船之進行方向成一角度 ϕ ($\phi \neq 90^\circ$)，故分力 \vec{CP} 不能完全

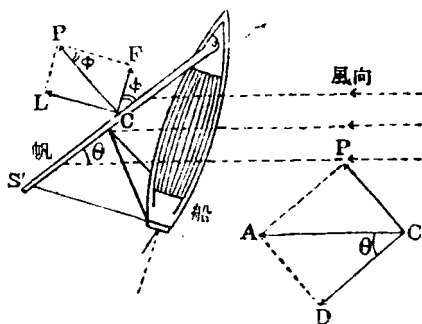


圖 62. 帆船受風力之分解

利用之以推船前進。必須將 \vec{CP} 再行分解，使其一分力與船之進行方向平行，如 $\vec{CF} = CP \sin \phi = CA \sin \theta \sin \phi$ ，可以推船前進者，惟此分力而已。其他一分力與船之進行

方向成垂直,如 $\vec{CL} = \vec{CP} \cos \phi = \vec{CA} \sin \theta \cos \phi$, 張帆航行之船身,恆向一方傾斜者,即因受此分力之作用所致。

56. 同點力之平衡 (Equilibrium of Concurrent Forces)

作用於同一點上之諸力,曰同點力。一物體同時受數力之作用,而仍不起運動之狀態,與未受力前無異者,則此數力謂之互相平衡。

(a) 二力之平衡 (圖 63)

二力作用於同一直線上,而方向相反,大小相等,則成平衡。

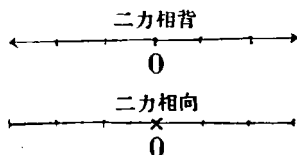


圖 63. 二力之平衡

(b) 三力之平衡 (圖 64)

三同點力作用於同一平面內,若其中任意一力,與其餘二力之合力在同一直線上,且大小相等,而方向相反,則此三力成爲平衡。

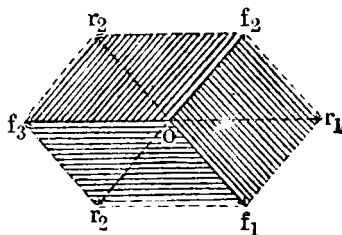


圖 64. 三力之平衡

(c) 數力之平衡 (圖 65)

三個以上之同點力作用於同一平面內,若順次以此數力爲邊,適可作成一多邊形時,則此數力互成平衡。上述三力成平衡時,則此三力亦必順次爲一三角形之三邊。

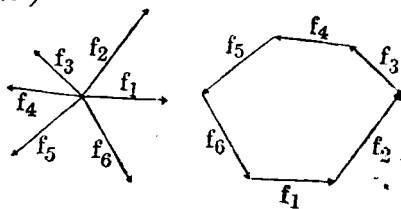


圖 65. 數力之平衡

57. 力矩(Moment of Force)

凡物體受有任何大力,但其形狀,體積毫不變更者,謂之剛體(Rigid body),此為理想之物體,實際無之:惟金石之類,荷受力不甚大時,則其形體之改變至微,故可以剛體目之。

施力於剛體上,使其繞軸線迴轉之效果,不僅與力之大小有關,且須視軸與力之作用線間距離之遠近,方能決定,例如圖 66 所示,於木板上穿一小孔 O ,插入一水平軸而懸之,次於另一點 A 上繫一細繩,以手曳繩,使木板繞 O 軸迴轉,若力之方向與 OA 成垂直時,則木板最易轉動,因距離為最大故也,若力之作用線通過 O 軸時,則木板不能轉動,因距離為零故也,若以 f 表力, d 表自 O 軸至力 f 之作用線之距離(如 ON),則使木板轉動之效果,當視乘積 fd 之大小決定之,是謂 f 力對於 O 點之力矩 Moment of force about point O ,距離 d 稱為力臂 (Arm of force)。

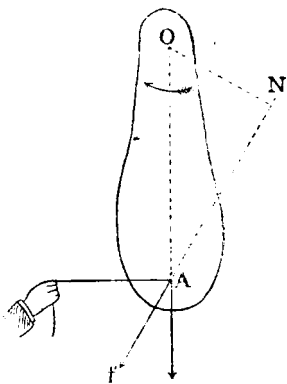


圖 66. 力矩

距離 d 稱為力臂 (Arm of force)。

58. 平行力之合成(Composition of Parallel Forces)

作用於剛體上之諸力,若互相平行,則謂之平行力,平行力非同點力,故求合力時,不能應用前述之方法,茲述其求法如次。

(a) 同方向二平行力之合力

如圖 67, P, Q 爲同方向之二平行力, 作用於物體上之 A, B 二點, 在連接 A, B 之直線上 O 點處, 假定有一與 P, Q 平行而反向之力 F , 適與 P, Q 成爲平衡, 則 F 必須等於 $P + Q$; 且 P, Q 二力對於 O 點之力矩亦必相等, 因 P 之力矩可使物體依反時針向繞 O 旋轉, Q 之力矩可使物體依順時針向繞 O 旋轉, 若二者相等, 方不

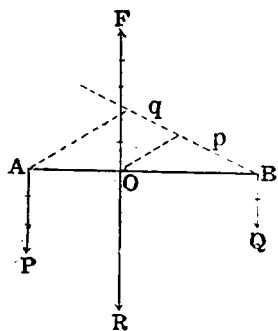


圖 67. 同方向二平行力之合力

不生轉動而成平衡之狀態, 故

$$P \cdot AO = Q \cdot BO,$$

$$\text{即 } \frac{AO}{BO} = \frac{Q}{P}.$$

若在 F 力之作用線上另有一力 R , 與 F 等值而反向, 則 F 與 R 亦成平衡, 可見 R 即爲 P, Q 之合力, 因其效應與 P, Q 兩力相同故也, 由是可知

同方向二平行力之合力, 等於二力之和, 方向相同, 其作用點內分連接兩力作用點之直線爲兩線段, 與二力之大小成反比例. 此內分點可用幾何作圖法求之, 如圖中虛線所示).

(b) 反方向二平行力之合力

如圖 68, P, Q 爲反方向之二平行力, 作用於物體上之 A, B 二點, 且 P 較 Q 爲大, 與上同理, 可得

$$R = P - Q,$$

$$\frac{AO}{BO} = \frac{Q}{P}$$

惟此時之O點在BA延長線上，與大力P較近之處，由是可知

反方向二平行力之合力，等於二力之差，方向與較大一力之方向相同，其作用點外分連接二力作用點之直線為兩線段，與二力之大小成反

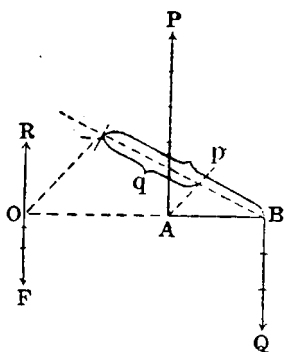


圖 68. 反方向二平行力之合力比例。(外此分點亦可用幾何作圖法求之)。

(c) 三個以上平行力之合力

三個或三個以上平行力之合力，可用(a)或(b)之方法，先求得二力之合力，然後再求此合力與第三力之合力，如是逐次推求，其最後所得者，即為諸平行力之合力。

59. 力偶(Couple)

平行之二力，若大小相等，方向相反，則稱為力偶。其效應在使物體發生轉動。例如旋轉螺旋釘，或用鑰匙絞緊發條等均須應用力偶。如圖 69 所示者。此兩力所在之平面，曰力偶面(Plane of couple)。兩力間之垂直距離，曰力偶臂(Arm of couple)。在力偶面內任取一點O，自O點引直線OAB與力偶P、Q垂直，則

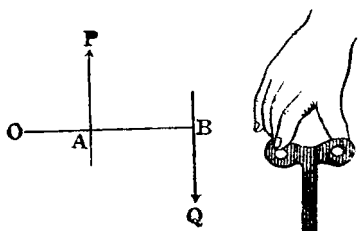


圖 69. 力偶

$$\begin{aligned}
 \text{力偶對於 } O \text{ 點之矩} &= Q \cdot OB - P \cdot OA \\
 &= P(OB - OA) \quad (\because P = Q) \\
 &= P \cdot AB.
 \end{aligned}$$

無論 O 點之位置如何， $P \cdot AB$ 之值恆不變，此一力與力偶臂之乘積，曰**力偶矩** (Moment of couple)。

60. 平衡之條件(Condition of Equilibrium)

物體受力之作用，則當生**移動** (Translation)，受力矩之作用，則當生**轉動** (Rotation)。若同時受有數力，但仍不移動，亦不轉動時，則此數力之合力必為零，其力矩之代數和亦為零，是為平衡所必要之條件。由是可知作用於同一平面內之三力，若互相平衡時，則此三力或彼此平行，或同過一點。如彼此平行，則其中任意一力，必與其餘二力之合力在同一直線上，且大小相等，方向相反。如不成平行，則其中之一力，對於其他二力之交點之力矩，必須為零，方可不生轉動，可知此力亦通過其他二力之交點，換言之，即三力同過一點也。

61. 重心(Center of Gravity)

物體之各部分，均受有重力，此等重力，可以視為互相平行，其合力可用 §58 (c) 之方法求之，如圖 70 所示，此合力即為物體之重量，而其作用點，則曰物體之**重心**。

以線懸物體，則此線延長之必通過重心，否則作用於重

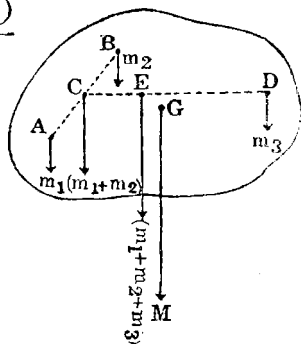


圖 70. 重心

心上之重力 w ，與線上之張力 t ，成爲力偶，結果物體將生轉動，而不能靜止。根據此理，可求物體之重心。如圖 71，先於 A 點繫線懸之，待物體靜止後，繪出線之方向，次將線繫於 B 點而懸之，亦同樣繪出其線之方向，此兩線之交點 G，卽爲所求物體之重心。

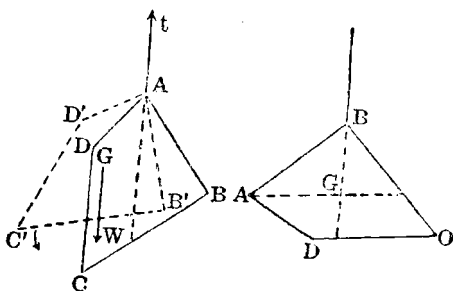


圖 71. 求重心法

組織均勻，形狀簡單之物體，其重心之位置甚易知之，例如：

(1) 直棒之重心在棒之中央。

(2) 三角板之重心爲中線之交點，因三角板可以視爲由無數平行於一邊之直棒所成，而此等直棒之重心之規跡，卽爲三角形之中線，如圖 72。

(3) 平行四邊形之重心爲對角線之交點。

(4) 正立方體，平行六面體等之重心爲對角線之交點，如圖 73。

(5) 圓板及球之重心，均在其中心。

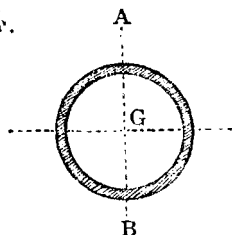
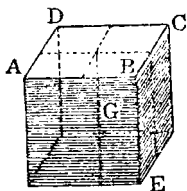
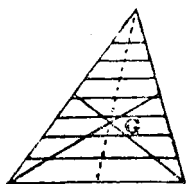


圖 72. 三角板之重心

圖 73. 正立方體之重心

圖 74. 環之重心

6 輪或環之重心,亦在其中心,位於環之外,如圖 74 所示,可見物體之重心,不必定在物體之本身內也。

62. 物體之平衡(Equilibrium of A Body)

推一物體,使之傾覆(Overturning),難易不同,表示此種難易之程度,謂之物體之穩度(Stability),就穩度之大小而言,物體平衡之狀態,可分為三種:一曰穩定平衡(Stable equilibrium),凡靜置之物體,稍行推動,仍能回復原位,而不致傾覆者屬之,如圖 75

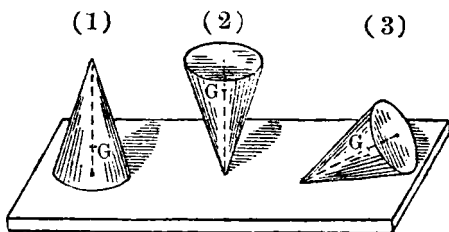


圖 75. 三種平衡

中之(1),二曰不穩平衡(Unstable equilibrium),凡稍推即行傾覆,不能回復原位者屬之,如(2),三曰隨遇平衡(Neutral equilibrium),凡推動時既不傾覆,亦不回復原位,聽其所至而休者屬之,如(3),茲將三種平衡之條件,分別研究之:

(1) 穩定平衡 取一直棒,上鑽小孔,中插一釘,懸於壁上,如圖 76 之左方所示,若支點 F 在重心 G 之上,則成穩定平衡,又就重心之位置而言,當物體被推動時,其重心之位置(如 G')較原來(如 G)為高,則亦成穩定平衡,因此時作用於重心 G' 之重力,對於 F 點之力矩,可使物體旋轉至其原位置故也,又如同圖

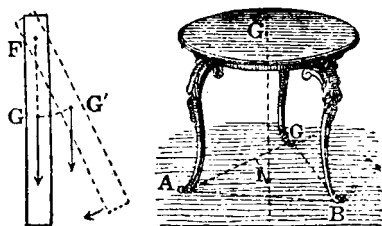


圖 76 穩定平衡

之右方所示者，為置於地上之圓樑，將樑腳與地面接觸之處連接而成之三角形，稱為基底。若基底甚大時，則通過重心之鉛直線，不易出基底之外，故稍受推動，可不致傾覆。

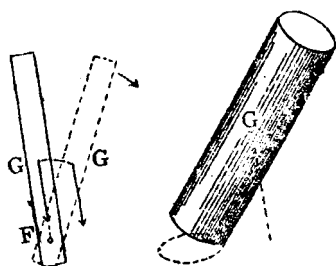


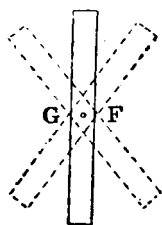
圖 77. 不穩平衡

(2) 不穩平衡 如圖 77

之左方所示，支點 F 在重心 G 之下，稍稍推動，重心之位置降低，則成不穩平衡。因此時作用於重心 G' 之重力，對於 F 點之力矩，可使物體向下倒轉，而不能回復其原有位置。又如右方所示之長圓柱，其基底甚小，而重心甚高，稍推之，通過其重心之鉛直線，即出基底之外，故極易傾覆。

(3) 隨遇平衡 如

圖 78 之左方所示，重心與支點相合，推動時重心不提高，亦不降低，不



論任何位置，皆可靜止，蓋因力矩為零，故無由發生轉動也。又如右方之球，其與地面接觸之處，雖僅一點，但通過重心之鉛直線，必經過此點，故為隨遇平衡。

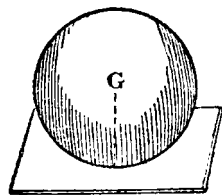


圖 78. 隨遇平衡

63. 浮體之平衡 (Equilibrium of Floating Body)

物體在液體中，其所受浮力之作用點，謂之浮力中心 (Center of buoyancy)。若物體全行沒入液體中時，則浮力中心即為與此物體同一形狀之液體之重心。若物體

浮在液面上時，則其浮力中心，爲與沉在液下部分同一形狀之液體之重心，故若將浮體稍行傾側時，則因其所排液體之形狀不同，浮力中心之地位，亦隨之變更。

如圖 79, G 爲浮體之重心, B 爲浮力中心, 當 G 與 B 在同一鉛直線上時, 則浮體保持平衡, 若稍行傾側, 則浮力中心由 B 移至 B' , 於是作用於 G 點之重力與作用於 B' 點之浮力, 成爲力偶, 浮力之作用線與 GB 線之交點 M , 曰 **定傾中心** (Metacenter). 若 M 在 G 之上, 則此力偶之效應, 可使浮體回復其原來之位置, 故呈穩定平衡, 若 M 在 G 之下, 則此力偶之效應, 反使浮體傾斜愈甚, 以至傾覆, 故呈不穩平衡。

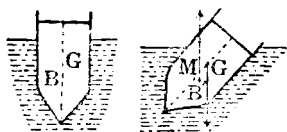
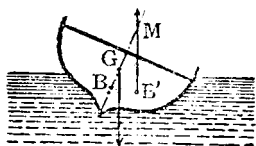
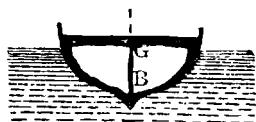


圖 79. 浮體之平衡

溫習提要

[定 義]

1. 力之三要項:
2. 力之圖示:
3. 向量及無向量:
4. 合力與分力:

5. 同點力:
6. 平衡:
7. 剛體:
8. 力矩:
9. 平行力:
10. 力偶:
11. 力偶矩:
12. 重心:
13. 穩度:
14. 穩定平衡:
15. 不穩平衡:
16. 隨遇平衡:
17. 浮力中心:
18. 定傾中心:

〔方法〕

1. 作用於同一直線上諸力之合成法:
2. 力之平行四邊形:
3. 力之三角形:
4. 力之多邊形:
5. 平行力之合成法:
 - (1) 同方向:
 - (2) 反方向:
6. 力之分解法:

問題六

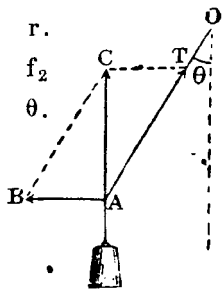
1. 設 f_1 f_2 爲分力, θ 爲其中所夾之角, r 爲合力, 試計算下列各題, 並作圖以驗其結果:

(a) $f_1=5$, $f_2=8$, $\theta=60^\circ$, 求 r .

b) $f_1=4$, $r=6$, $\theta=60^\circ$, 求 f_2

c) $f_1=6$, $f_2=10$, $r=14$, 求 θ .

2. 以線懸 40 克重之錘, 另以一線結於此線之一點上, 而以 20 克之力依水平方向拉之, 求懸線之張力, 及其對於鉛直線之傾角.

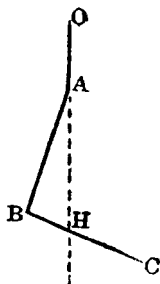


3. 設有三同點力 P, Q, R 互相平衡, Q 與 R 間之夾角爲 α , R 與 P 間之夾角爲 β , P 與 Q 間之夾角爲 γ . 試證明

$$\frac{P}{\sin \alpha} = \frac{Q}{\sin \beta} = \frac{R}{\sin \gamma}.$$

4. 取組織均勻之銅絲 ABC , 於其中點 B 曲折之, 將其一端 A 繫線而懸之, 延長懸線與 BC 相交於 H , 試證

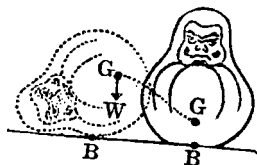
$$BH = \frac{1}{3} BC.$$



5. 有互相平行之二力 P 及 $3P$, 作用於相距 6 尺之二點上, (a) 若方向相同, (b) 若方向相反時, 試各求其合力之大小, 方向及作用點.
6. 有兩石鼓, 一重 50 斤, 一重 40 斤, 裝於長 6 尺之木棒之兩端上, 一人以一手舉之, 問須用力若干, 又當執於棒之何處?
7. 橋長 30 尺, 重 6 噸, 兩端置於支柱上, 有重 2 噸之汽車駛至橋長 $1/3$ 之一點時, 兩支柱上所受之力各若干?
8. 設有一力與水平面成 30° 之傾斜, 試分解爲兩分力: 一與水平面平行, 一與水平面垂直.
9. 設帆與船之進行方向成 30° 之角, 風向與帆面亦成 30° 之角, 當風力爲 30 仟克時, 帆面所受之壓力若干, 使船前進之力若干?
10. 試舉日常生活中應用力偶之例.
11. 有組織均勻之正方形板, 由其對角線圍成之四個三角形中, 截去其一, 求殘餘部分之重心.
12. 有組織均勻之圓板, 由其內部截去一直徑等於圓

板半徑之內切圓時,求其殘餘部分之重心.

13. 於長 1 尺, 質量 27 克之木棒
之一端, 附一直徑 2 厘米, 質
量 47.3 克之鉛球, 求全體之
重心.

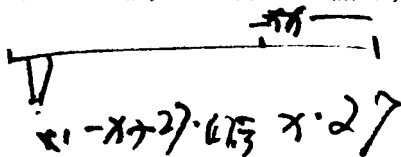


14. 說明不倒翁不倒之理由.

15. 鉛筆頗難直立, 何故? 若於其一端插一半
張之小刀一柄或二柄, 即可使其直立於
指上, 何故?



16. 船上貨物過輕時, 易於簸盪, 何故? 又若將
笨重貨物均裝於篷上, 艙內祇有乘客數
人, 則稍經風浪, 易遭覆舟之險者, 何故?



第二章 機械與功

64. 功(Work)

(a) **定義** 以力作用於物體上,使之移動時,曰此力對於物體作功,或曰**工作**.功有正負之分:凡物體移動之方向與力之方向相一致者為正,謂之**力對於物體作功**(Work done by a force on a body);凡物體移動之方向與力之方向相反者為負,謂之**物體反抗力之作用所作之功**(Work done against a force by a body).例如以手舉起重物,手上所用之力對於物體所作之功即為正,而物體反抗重力所作之功則為負.

(b) **量度** 功之大小,以作用之力,與作用點依力之方向移動之距離之乘積量度之.設 F 為作用之力, S 為移動之距離,則所作之功 W ,可由下式求之:

$$W = F \cdot S \dots\dots\dots (1)$$

若物體移動之方向與力之方向成一角度 θ ,如圖 80 所示者,則

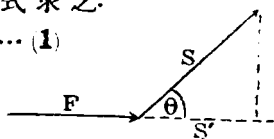


圖 80. 功之量度

$$W = F \cdot S' = F \cdot S \cdot \cos \theta \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式中,若 $\theta = 0^\circ$,則 $\cos \theta = 1$,其結果與 (1) 式相同;若 $\theta = 180^\circ$ 則 $\cos \theta = -1$,而 $W = -F \cdot S$,即物體移動之方向與力之方向恰相反對,故此時所作之功,成為負量.

(c) **單位** 以單位之力,使物體依其作用方向移動單位距離所作之功,即為功之單位,茲分述如下:

C. G. S. 制單位 以 1 克之力作用於物體上,使其依力之方向而移動 1 厘米之功,曰 1 克厘米(One gram centimeter). 故

$$1 \text{ 克厘米} = 1 \text{ 克} \times 1 \text{ 厘米.}$$

較大之功,則用**仟克米**(Kilogram meter)爲單位,

$$\begin{aligned} 1 \text{ 仟克米} &= 1 \text{ 仟克} \times 1 \text{ 米,} \\ &= 1000 \text{ 克} \times 100 \text{ 厘米,} \\ &= 10^5 \text{ 克厘米.} \end{aligned}$$

F. P. S. 制單位 以 1 磅之力作用於物體上,使其依力之方向移動 1 英尺之功,曰 1 呎磅(One footpound). 故

$$1 \text{ 呎磅} = 1 \text{ 英尺} \times 1 \text{ 磅.}$$

上述單位,爲功之**實用單位**(Practical units),功之**絕對單位**(Absolute units),容後再述(參閱第七章 § 118).

65. 功率(Power)

單位時間內所作之功,謂之**功率**.設在 t 秒內所作之功爲 W ,則功率 P 爲

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

功率之單位,在工業上最常用者爲**馬力**(Horse power),以 H. P. 表之.此爲英制單位,1 H. P. 即每秒間能作功 550 呎磅之功率,合每秒 76 仟克米.此外尚有一種單位,曰**瓦特**(Watt),俟後再述(參閱第七章 § 119).

66. 簡單機械(Simple Machine)

傳功之裝置,統稱曰**機械**,如蒸汽機,電動機,水輪機等稱爲**原動機**(Prime mover),而火力,電力,水力等,則稱

爲原動力(Prime power),一切機械,無論其結構如何繁複,要皆爲數種簡單機械所組合而成,簡單機械雖有多種,但可以槓桿與斜面爲代表,餘者均其變相而已,本章中將就各種簡單機械,分述其大要。

67. 機械利益(Mechanical Advantage)

一人之力,不足以舉百鈞,爲不用機械故也;蓋使用機械,可以小力勝過大力,所加之力,謂之動力(Effort),所勝之力,謂之阻力(Resistance),或曰重量(Weight),阻力 W 對於動力 P 之比曰機械利益,以 A 表之,則

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

數種機械,結合使用時,其全體之利益,等於各部分利益之乘積,設 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 爲各部分之利益,則因

$$a_1 = \frac{P_1}{P}, a_2 = \frac{P_2}{P_1}, a_3 = \frac{P_3}{P_2}, \dots, a_n = \frac{W}{P_{n-1}}.$$

$$\text{諸式相乘 } a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \dots \cdot a_n = \frac{P_1}{P} \cdot \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{P_3}{P_2} \cdot \dots \cdot \frac{W}{P_{n-1}} = \frac{W}{P}.$$

$$\text{故 } A = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \dots \cdot a_n.$$

68. 槓桿(Lever)

能於一定點之周圍自由轉動之棒,謂之槓桿,其定點,謂之支點(Fulcrum),如圖 S1 中之 F 點是,動力 P 作用於槓桿上之一點 A , 可將 B 點上之重物舉起,此 A 點即曰力點(Point of application),

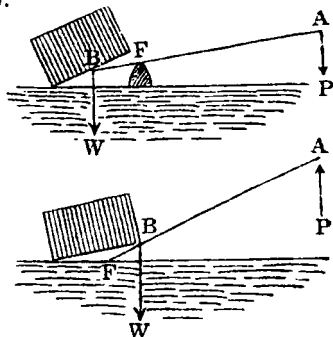


圖 S1. 槓桿

B 點則曰**重點** (Point of exertion). 支點與動力間之距離曰**力臂**, 與阻力間之距離曰**重臂**. 由力矩之理, 可知
 動力 × 力臂 = 阻力 × 重臂

即
$$\frac{\text{阻力}}{\text{動力}} = \frac{\text{力臂}}{\text{重臂}}$$

故當槓桿成平衡時, 動力與阻力之比, 等於兩臂之反比, 是為槓桿原理。

槓桿因其支, 重, 力三點相互位置之不同, 而分三種: 支點在中間者, 為第一種; 重點在中間者, 為第二種; 力點在中間者, 為第三種, 如圖 82 所示。

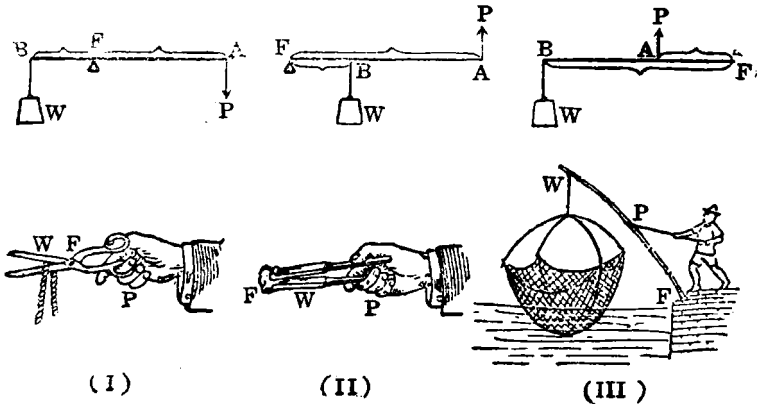


圖 82. 三種槓桿

在各圖中, 均有下式之關係:

$$P \cdot AF = W \cdot BF,$$

故其機械利益

$$a = \frac{W}{P} = \frac{AF}{BF}.$$

第一種槓桿之利益大於,等於,或小於 1,須視支點 F 之位置而定.第二種槓桿,因 AF 恆大於 BF,故其利益恆大於 1.第三種槓桿,因 AF 恆小於 BF,故其利益恆小於 1,即動力反較重量為大,但重點移動之速度則因此增大.由此可知一切機械對於力及速度,有一得必有一失,二者不可得兼,當視使用之目的,以定選擇之標準.例如以網捕魚,若用第二種槓桿,則用力雖省,但速度不大,魚必一躍而出網外,故必須用第三種槓桿,然後可以舉網得魚也.

69. 秤(Steelyard)

秤為第一種槓桿,其重臂為定長,通常用以測物體之重量,較天平為便利,而精密則不及也.如圖 83,設

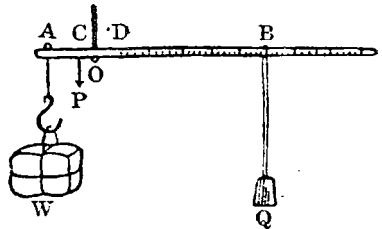


圖 83. 秤

Q 為秤錘之重量,

P 為秤杆及鈎之重量,

C 為秤之重心,

W 為物體之重量.

則當鈎上未懸物體時,秤錘須懸於 D 點而成平衡.按槓桿原理,應有

$$P \times CO = Q \times DO \dots \dots \dots (1)$$

次懸物體於鈎上,而移錘於 B 點,又成平衡,則有

$$W \times AO + P \times CO = Q \times BO \dots \dots \dots (2)$$

從 (2) 式減去 (1) 式,則得

$$W \times AO = Q(BO - DO) = Q \times BD.$$

$$\text{故} \quad \frac{W}{Q} = \frac{BD}{AO}.$$

上式中, Q 及 AO , 均為常數, 可知 W 正比例於 BD , 故以 D 點為零點, 而刻線於其右, 祇須移動定重之秤錘, 即可由 BD 之長短, 測知物體之重量.

70. 複權法及代替法

天平亦為第一種槓桿, 其兩臂應相等, 故為等臂槓桿. 假如兩臂之長短, 略有差別時, 則秤量時不能得正確之結果. 欲免此種差誤, 須用複權法或代替法.

(a) **複權法** (Double weighing) 又名皋斯法 (Gauss-method). 法將物體與砝碼各載於一盤權之, 次交換兩者之位置再權之. 設兩次所需之砝碼各為 Q 及 $Q + q$, 物體真正之質量為 P , 天平兩臂之長為 a 及 b , 則

$$Pa = Qb \dots \dots \dots (1)$$

$$Pb = (Q + q)a \dots \dots \dots (2)$$

(1), (2) 兩式相乘, 則得

$$P^2 ab = Q(Q + q)ab$$

兩邊先以 ab 除之, 再開平方, 即得

$$P = \sqrt{Q^2 + Qq} = Q + \frac{q}{2} - \frac{q^2}{8Q} + \frac{q^3}{16Q^2} - \dots$$

因 q 之值甚小, 故 q^2, q^3, \dots 之值更小, 可以略而不計, 於是

$$P = Q + \frac{q}{2} = \frac{Q + (Q + q)}{2}.$$

即物體真正之質量, 為兩次砝碼之平均數.

(b) **代替法** (Method of substitution): 置物體於一盤, 而置鉛粒, 紙片等於他盤, 使天平平衡, 然後取出物體, 易

以砝碼，仍使平衡，此時砝碼之和，適與物體之質量相等。用此法權得之結果，較上法尤為正確。

71. 滑輪(Pulley)

升旗，掛帆，汲水，起重，常用滑輪，輪之周緣，鑿有凹溝，以便繞繩，曳繩則滑輪轉動，重物亦隨之舉起，茲將各種滑輪，分述於下：

(a) 定滑輪 (Fixed pulley) 如圖 84，為定滑輪，當輪轉動時，其軸之位置不變。此種滑輪，為等臂槓桿之變形，僅能改變力之方向，而不能省力。因按槓桿原理：

$$P \cdot AC = W \cdot BC,$$

但 $AC = BC,$

故 $P = W,$

其機械利益 $a = \frac{W}{P} = 1.$

(b) 動滑輪 (Movable pulley) 如圖 85，為動滑輪。當滑輪轉動時，其軸能上昇或下降，而變易其位置。此種滑輪，為第二種槓桿之變形，可省一半之力，因

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

而 $AB = 2CB,$

故利益 $a = \frac{W}{P} = \frac{AB}{CB} = 2.$

(c) 複滑輪 (Combination of pulleys) 將若干滑輪組合之，則成複滑輪。組合之法有三，如圖 86 所示。

如 (I)，重量 W 與各繩上張力之和相平衡，而各繩之

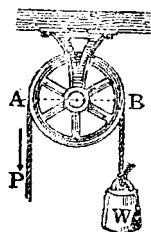


圖 84. 定滑輪

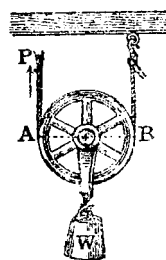


圖 85. 動滑輪

張力均等於 P 。故若有 n 個滑輪，依此法組合時，則繩當分爲 n 部分，其張力之和應爲 nP 。故

$$W = nP,$$

而利益 $a = \frac{W}{P} = n$ 。

若 n 爲偶數，則定滑輪與動滑輪之個數均爲 $\frac{n}{2}$ ，其繩端

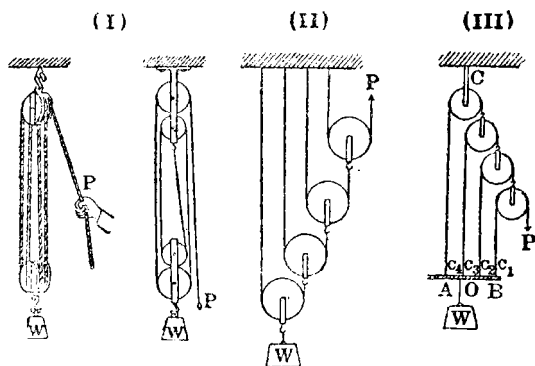


圖 86. 複滑輪

應固着於上。若 n 爲奇數，則定滑輪之個數較動滑輪多 1，其繩端應固着於下。又 (I) 圖左右兩種裝法雖異，但利益相同，惟在左者，使用較爲便利。

如 (II)，所有滑輪皆爲動滑輪，而每一動滑輪之利益均爲 2，故若有 n 個依此法組合時，則其全體利益爲

$$a = 2 \times 2 \times 2 \times \dots = 2^n,$$

$$W = aP = 2^n P.$$

此種複滑輪，利益最大，但使用時，頗感不便。

如 (III)，係將 (II) 顛倒而得，故懸點 C 處向上之力 F 應爲 $2^n P$ ，而 F 與向下兩力 W 及 P 成爲平衡，故

$$F = W + P = 2^n P,$$

$$\therefore W = (2^n - 1) P,$$

$$\therefore a = \frac{W}{P} = 2^n - 1,$$

又因 C_1, C_2, C_3, \dots 各點上之力順次為 $P, 2P, 3P, \dots$, 故重物 W 不當懸於 AB 之中點, 而須在 A 點附近之處, 此點可用平行力之合力求作用點之方法以求之。

72. 輪軸(Wheel and Axle)

半徑不等之兩圓柱, 裝於同一軸上, 即成輪軸, 大者為輪, 小者為軸, 如圖 87 所示。設 R, r 各為輪與軸之半徑, 則按槓桿原理, 可得

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

故其機械利益為

$$a = \frac{R}{r}.$$

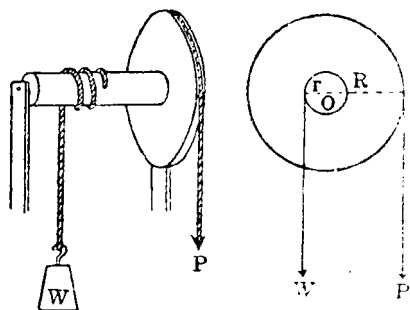


圖 87. 輪 軸

73. 功之原理(Principle of Work)

上述應用槓桿, 滑輪等機械, 可一小力勝過大力, 但就工作方面言之, 則無所得失。舉例如下:

如圖 88, 設於槓桿之一端 B 懸重物 W , 而於他端 A 用力 P 拉之, 使其由水平位置 AB ,

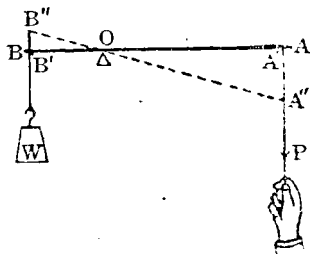


圖 88. 功之原理

移至傾斜位置 $A''B''$ ，此時 P 對於槓桿所作之功則應為 $P \times A'A''$ ，槓桿對於 W 所作之功為 $W \times B'B''$ ，因

$$\triangle A'OA'' \sim \triangle B'OB'',$$

$$\therefore \frac{A'A''}{B'B''} = \frac{A''O}{B''O} = \frac{AO}{BO} \dots \dots \dots (1)$$

又由槓桿原理，可知

$$\frac{W}{P} = \frac{AO}{BO} \dots \dots \dots (2)$$

從(1),(2)兩式，可得

$$\frac{W}{P} = \frac{A'A''}{B'B''},$$

$$\therefore P \times A'A'' = W \times B'B''.$$

即重量與動力所作之功相等，其他一切機械，亦莫不如此，由是可得一普遍之定律曰

無論何種機械，若其摩擦作用可以略去，則動力所施於機械上之功，與機械對於阻力所作之功恆相等。

此定律為 1687 年牛頓所創設，稱曰功之原理。

74. 差動滑輪 (Differential Pulley)

如圖 89 所示，為差動滑輪，上為半徑不等之兩定滑輪，固接成爲一體，下爲一動滑輪，以一連續不斷之鐵鍊聯結之，滑輪之緣上有齒，恰可嵌入鍊中

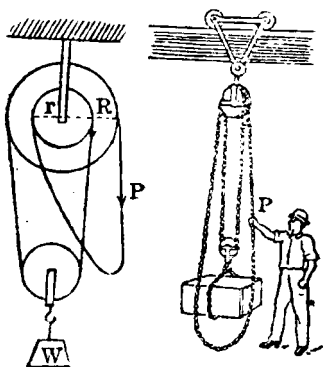


圖 89. 差動滑輪

以免滑動。

設兩定滑輪之半徑各為 R 及 r ，則當轉動一周時， P 下降之距離為 $2\pi R$ ，其所作之功為 $P \cdot 2\pi R$ ；同時 W 上昇之距離為 $\frac{1}{2}(2\pi R - 2\pi r)$ ，作功 $W \times \frac{1}{2}(2\pi R - 2\pi r)$ 。按功之原理，可知二者應相等，即

$$P \cdot 2\pi R = W \times \frac{1}{2}(\pi R - \pi r),$$

$$2RP = (R - r)W$$

故機械利益

$$a = \frac{W}{P} = \frac{2R}{R - r}.$$

由上式，可知兩定滑輪半徑之差（即 $R - r$ ）愈小，則其利益愈大。

75. 連動齒輪 (Train of Gear Wheels)

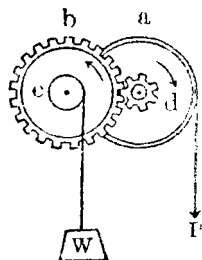
邊緣有齒形突起之輪曰齒輪 (Gear wheel)，將若干齒輪，結合使用之，由一輪之轉動，可以引起他輪之轉動者，則曰連動齒輪。如圖 90 所示，設 a, c 表圓周， b, d 表齒數，則用力 P 將繩曳下，使 a 輪旋轉一周時， P 所經之距離為 a ，作功 $P a$ ；而 b, c 僅轉動 $\frac{d}{b}$ 周，故 W 上昇之距離

為 $\frac{d}{b} \times c$ ，作功 $W \times \frac{dc}{b}$ 。由功之原理，

可得

$$Pa = W \times \frac{dc}{b},$$

$$\frac{W}{P} = \frac{ab}{cd}.$$



故機械利益

圖 90. 連動齒輪

$$A = \frac{a\text{之圓周}}{c\text{之圓周}} \times \frac{b\text{之齒數}}{d\text{之齒數}}$$

連動齒輪之利益甚大，應用亦頗廣。若結合之齒輪數較二為多時，其機械利益亦可依上法推求之

76. 斜面(Inclined Plane)

與水平面成一傾斜角度之平面，謂之斜面，如圖 91 所示，從船上起貨，往往利用斜面，藉以省力，茲分兩種情形，研究斜面之機械利益：

(1) 動力 P 之方向與斜面平行 如圖 (1)， W 為物體之重量，分解之使成 ON ($\perp AB$)，及 NW ($\parallel AB$) 兩分力，則動力 P 應與分力 NW 等值而反向，始成平衡。

$$\therefore \triangle OWN \sim \triangle ABC,$$

$$\therefore \frac{OW}{NW} = \frac{AB}{BC} = \frac{1}{\sin \theta}.$$

故機械利益

$$a = \frac{W}{P} = \frac{AB}{BC} = \frac{1}{\sin \theta}.$$

(2) 動力 P 之方向與水平面平行 如圖 (2) 將 W 分解為 ON

($\perp AB$)，及 NW ($\parallel AC$) 兩分力，則動力 P 應與分力 NW 等值而反向，始成平衡，與上同理，可得機械利益

$$a = \frac{W}{P} = \frac{AC}{BC} = \cot \theta.$$

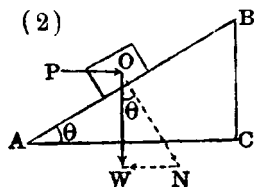
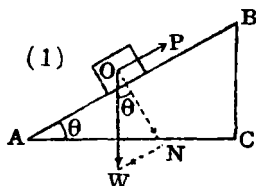
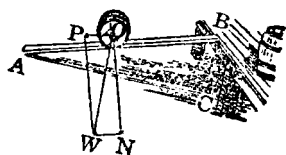


圖 91. 斜面

由上兩式觀之，當傾斜角 θ 甚小時，則利益愈大，換言之，即斜面宜長，而高 (BC) 宜短。山路多迂迴曲折 (Zigzag) 者，即增加斜面之長，使費力較省也。

77. 螺旋 (Screw)

螺旋為斜面之變形，如圖 92 所示，將紙裁成一直角三角形，卷於圓柱之上，其斜邊所成之曲線，曰螺紋 (Screw thread)，相鄰兩螺紋間依軸之方向之距離，曰螺距 (Pitch)，如 S 或 AB。在圓柱上沿螺紋刻成突起之形狀者，稱為陽螺旋 (Male screw)，於中空之圓筒中，刻成適合陽螺旋之小槽時，是為陰螺旋 (Female screw)。

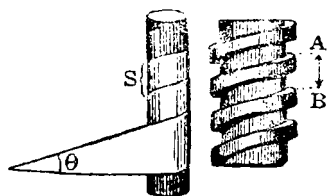


圖 92. 螺旋

陽螺旋在陰螺旋中轉一周時，則其進退之距離，等於一螺距。測微計 (Micrometer) 即根據此理製成，用以精確測定薄片之厚度，或圓球之直徑，其螺距為 1 毫米，若旋轉不及一周時，則毫米之小數，可由圓帽上讀出。通常於圓帽邊緣刻成 100 等分，故用此器測得之長度，可以正確至百分之一毫米。

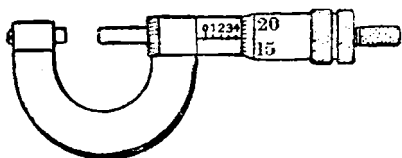


圖 93. 測微計

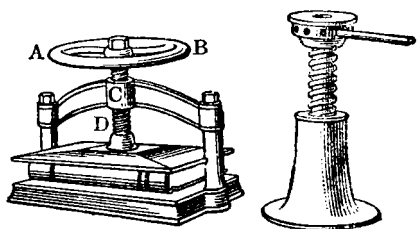


圖 94. 螺旋壓機及起重螺旋

螺旋之應用甚廣，例

如圖 94 所示之螺旋壓機 (Screw press), 及起重螺旋 (Jack screw) 皆是也。設 W 為阻力 (即壓機所生之壓力, 或起重螺旋所舉起之重量), 槓桿之長為 r , 沿切線方向, 作用於桿端之動力為 P , 螺距為 s , 則由功之原理, 可得

$$P \cdot 2\pi r = W \cdot s,$$

故機械利益

$$a = \frac{W}{P} = \frac{2\pi r}{s} = \cot\theta.$$

其結果與斜面之第二公式相同。

78. 劈 (Wedge)

劈為兩斜面所合成, 其斷面成等腰三角形, 如圖 95 所示。通常用以劈開物體, 如伐木之斧, 即為一例; 或墊於重物之下, 使其稍稍舉起。設作用於劈背 BC 上之動力為 P , 木頭所呈之阻力為 R, Q , 此兩力相等, 且各與劈面 AB, AC 垂直。因 P, Q, R 三力成爲平衡, 故可由 §60, 知此三力相交於一點。在下圖中, $ORPQ$ 爲一菱形, 其對角線互相平分, 故有

$$\frac{1}{2}P = Q \sin \frac{1}{2} \angle OQP,$$

又劈之頂角 A 與 $\angle QOP$ 互爲補角, 故 $\angle A = \angle OQP$, 代入上式, 則得

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

由是可知劈之機械利益

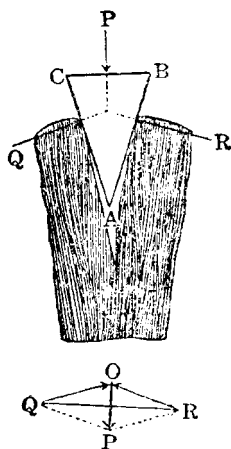


圖 95. 劈

$$a = \frac{Q}{P} = \frac{AB}{BC}$$

故劈之頂角愈小時，則其機械利益愈大，蓋頂角小則BC亦小也。鈍刀磨之則成鋒利者，即因其刀口之角度變小之故。

79. 機械效率(Mechanical Efficiency)

以上討論各種機械時，均假定其本身無重量，且無摩擦之作用，但事實上均不可避免，故加於機械上之功（稱為輸入 In-put），常有一部分消耗於無用之地，而機械所完成之有用工作（Useful work 即輸出 Out-put），遂較輸入之功為小，輸出與輸入之比，曰機械效率，以 E 表之，則

$$E = \frac{\text{輸出}}{\text{輸入}}$$

其值小於 1，故通常以百分數記之。如槓桿之摩擦甚小，故其效率近於 100%；複滑輪之效率甚小，約為 40% 至 60%；起重螺旋之摩擦甚大，故其機械利益雖鉅，但其效率則僅 25% 而已。

80. 水車(Water Wheel)

利用水力作功之機械，曰水車。上部受水者，曰上擊水車(Overshot wheel)，即如圖 96 所示；下部受水者，曰下擊水車(Undershot wheel)。下擊水車效率之

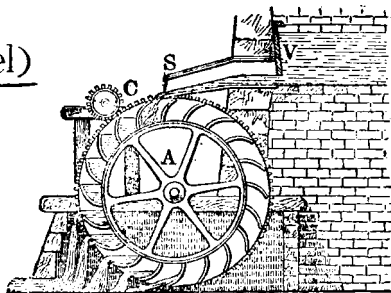


圖 95. 上擊水車

最大者，為柏爾吞式(Polton)，如圖97所示。輪之周緣，裝有葉板(Blade)，由高處流下之水，衝擊板面，使全輪轉動，更用皮帶或齒輪，連至其他機械，引起轉動，而成有用之功。

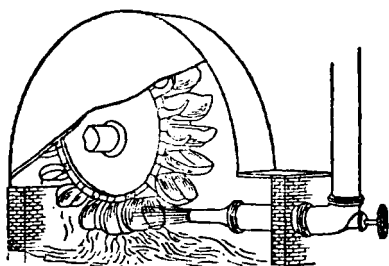


圖 97. 下擊水車

較水車效率更大者，有水輪機(Water turbine)，其構造如圖98所示，(1)為輪機之外函，(2)為內函，固定不動，其中裝有渦狀導翼(Guide

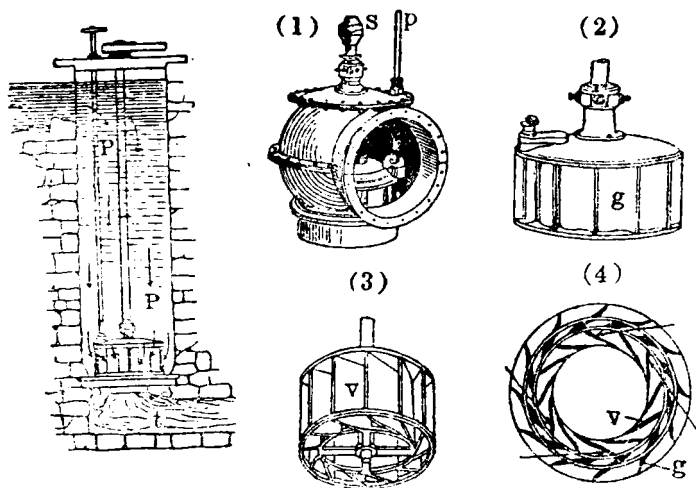


圖 98. 水輪機

vane)，(3)為轉動部分，其上裝有葉板，(4)為導翼及輪機之橫斷面。水自高處流下，先經導翼g，以最有效之角度，衝擊葉板v，使之轉動，廢水由t處排出。此種原動機之效率，可達85至90%。近代水力發電所，多用之以發電，如

尼加拉瀑布 (Niagara Falls), 水頭 (Head) 甚高, 該處即設有
大規模之水力發電廠, 頗為有名。

溫習提要

[定 義]

1. 功:
2. 功率:
3. 機械利益:
4. 機械效率:

[原 理]

1. 槓桿原理:
2. 功之原理:

[公 式]

1. 求功:
2. 求功率:

[單 位]

1. 功之實用單位 $\left\{ \begin{array}{l} \text{克厘米:} \\ \text{仟克米:} \\ \text{呎 磅:} \end{array} \right.$

2. 功率之單位——馬力：

[簡單機械]——注意其機械利益

1. 槓桿

2. 滑輪：

(1) 定滑輪：

(2) 動滑輪：

(3) 複滑輪：

(4) 差動滑輪：

3. 輪軸：

4. 連動齒輪：

5. 斜面：

6. 螺旋：

7. 劈：

[原動機]

1. 上擊水車：

2. 下擊水車：

3. 水輪機：

[方法]

1. 複權法：

2. 代替法:

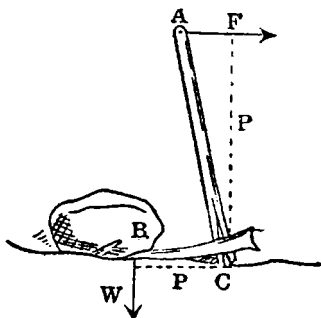
[儀器]

1. 秤:

2. 測微計:

問題七

1. 有質量 10 克之物體,沿傾角 30° , 高 20 厘米之斜面降下,求重力所作之功。
2. 將 50 仟克重之物體,舉至 40 米之高處,求反抗重力所作之功。
3. 有一蒸汽機,能於一小時內將 200 噸之水提高至 20 呎處,問其功率為若干馬力?
4. 以 15 馬力之機關,能於一小時內,將幾噸之水提至 25 呎之高處?
5. 用唧筒將 10 米下之井水吸上,設每分鐘汲上之水重 380 仟克,問須用若干馬力之原動機運動唧筒?
6. 有火車頭能以每小時 30 哩之速度牽引重 100 噸之列車,求其功率為幾馬力?但作用於列車之阻力,為每噸 15 磅。
7. 試舉三種槓桿之實例。
8. 右圖所示,為以鋤撬石之狀況,屬於第幾種槓桿?設



W 爲 455 斤, P, P 各長 140 及 20 厘米, 求所需之動力 F, 及機械利益.

9. 設有一組纖均勻之棒, 其長爲 8 尺, 重 50 磅, 今於 A 端懸 80 磅之重物, B 端懸 120 磅之重物, 由甲乙二人擔之. 若甲所擔之處, 離 A 端 2 尺, 而甲乙二人所費之力相等, 則乙所擔之處, 應距 B 端幾尺?
10. 將比重爲 1, 長爲 2 米, 及比重爲 4, 長爲 1 米之二棒, 依一直線接合之, 二棒之橫斷面積皆爲 10 平方厘米, 欲使此接合後之棒, 依水平靜止, 則支點應在何處? 須用力若干? 又此棒若於水中支持之, 其支點是否相同?
11. 有兩臂長度稍異之天平, 若左盤置物體, 右盤上須加 94 克之砝碼, 始成平衡; 若右盤置物體, 則左盤上須加 93.65 克之砝碼, 而成平衡, 問左右兩臂何者較長, 又物體之質量若干?
12. 設有一秤, 其重臂長 1 寸 5 分, 刻度起點 (即零點) 與 3 斤刻度間之距離爲 1 尺 2 寸, 求此秤上所用秤錘之質量.
13. 今有一秤, 欲求其上所懸秤錘之質量, 祇可用尺, 不許用其他之秤, 當用何法?
14. 設有滑輪 5 個, 依三種複滑輪之方法組合之, 欲將 4690 斤之重物提起, 各須用力幾何? (各繪一圖)
15. 設輪軸之軸與輪之直徑之比爲 1:15, 須於輪上施以若干之力, 始能將軸上所懸 45 仟克之物體舉高!
16. 有軸上固定二輪之輪軸, 其半徑各爲 9 厘米, 6 厘米, 3 厘米. 今於軸上所卷線之一端懸 20 仟克重之錘, 而於小輪上依反對方向所卷線之一端懸 1 仟

克重之錘，問於大輪上應懸若干重物，此輪軸方能平衡？

17. 試就動滑輪及輪軸，證明功之原理。
18. 有差動滑輪，其兩定滑輪之半徑，各為 50 厘米及 45 厘米，其下懸重 1000 仟克之物體，須用力若干，方能舉起？又其機械利益若何？
19. 如圖 90 之連動齒輪，設 a, b, c, d 之直徑各為 10, 12, 4, 3 厘米，求其機械利益，又若所用之力 $P = 10$ 斤，可將重若干之物體舉起？
20. 於長與高之比為 2:1 之斜面上置 50 仟克之物體，求 (a) 重物作用於斜面上之壓力；(b) 沿斜面之支持力；(c) 與水平面平行之支持力。
21. 有物體置於傾斜角為 θ 之斜面上，今以力與斜面成 φ 角之方向拽之，求所需之力。
22. 有螺旋壓機，一厘米之間共有螺紋 5 條，槓桿長 30 厘米，垂直作用於桿端之力為 50 克，求其所生之壓力。
23. 設有一起重螺旋，其旋距為 $1/2$ 毫米，力臂為 20 厘米，所用之力為 100 克，舉起之重量為 20,000 克，求其機械效率。
24. 設有瀑布，其水頭為 41.55 米，所用水輪機之效率為 85%，每秒經過輪機之水量為 121,800 升，求輪機所成有用之功。
25. 試比較上擊水車與下擊水車之優劣。

第三章 運動

81. 運動與靜止(Motion and Rest)

物體與物體間之空間關係，曰位置(Position)。凡物體之位置，隨時變更者，曰運動。反之，無論經過若干時間，而永不變換其位置者，曰靜止。物體之動靜，為一種相對的(Relative)觀念。例如一人靜坐於疾行之汽車中，對於汽車言，則為靜止，而對於路傍之樹木及房屋言，則為運動。又樹木及房屋等，對於地球，則為靜止，而對於太陽，則又為運動。地球自轉公轉，無時或息，故地面上之物體，無絕對靜止者；惟通常為討論便利起見，恆視地球為靜止，以作物體動靜之依據。

運動物體所經過之點，連結而成之線，曰路線(Path)。如路線為一直線，則曰直線運動(Rectilinear motion)，其方向恆一定不易。如路線為一曲線者，則曰曲線運動(Curvilinear motion)，其方向恆與時共變；而以曲線上某點之切線方向，表示其點之運動方向。

82. 位移(Displacement)

質點(Particle)位置之變化，謂之位移。位移有大小，有方向，故亦為一種向量；其大小以直線之長短表之，其方向以直線之方向表之。如圖99，線段 \vec{OA} ，表質點自O點至A點之位

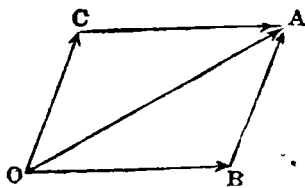


圖99. 位移之合成

圖99，線段 \vec{OA} ，表質點自O點至A點之位

移；若書作 \vec{AO} ，則表自 A 至 O 之位移，其方向適相反對。

位移既為有向量，故亦可用第一章 §§ 54, 55 所述之平行四邊形，或三角形，多邊形之法合成或分解之。如同 99， \vec{OA} 為 \vec{OB} 及 \vec{BA} 或 \vec{OC} 及 \vec{CA} 之合位移 (Resultant displacement)，而 \vec{OB} ， \vec{BA} 或 \vec{OC} ， \vec{CA} 則為 \vec{OA} 之分位移 (Component displacements)。又位移之合成，可不拘一定之次序，例如先自 O 點依 OB 方向移至 B 點，再自 B 點依 BA 方向移至 A 點，固得合位移 \vec{OA} ；若先自 O 點移至 C 點 ($\vec{OC} = \vec{BC}$)，再自 C 點移至 A 點 ($\vec{CA} = \vec{OB}$)，亦得同一之合位移 \vec{OA} 。

由一位移分解為二個以上之分位移時，其結果可多至無限，例如圖 100 之 \vec{OC} ，可分為 \vec{OB} 及 \vec{BA} ，亦可分為 \vec{OC} ， \vec{CD} ， \vec{DA} 等，但通常以分解為互相垂直之二分位移時，最為重要。

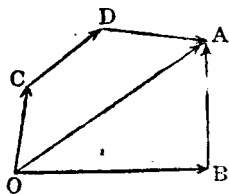


圖 100. 位移之分解

83. 速度與快慢 (Velocity and Speed)

凡運動之物體，在單位時間內，依一定方向所行之路，曰速度；如不論方向，僅計路程之長短時，則曰快慢。故快慢為無向量，而速度則為有向量，其合成或分解之法，與力及位移相同。在 C.G.S. 制中，速度之單位，為每秒若干厘米 (Centimeter per second)，簡書為厘米/秒，或 cm./sec. 在英制為每秒若干英尺，簡書為呎/秒，或 ft./sec.

84. 等速運動及變速運動

速度不變之運動，曰等速運動 (Uniform motion)，其速度曰等速度 (Uniform velocity)。速度依時而變者，曰變

速運動 (Variable motion), 其速度曰變速度 (Variable velocity). 變速運動之情形, 可分三種: (1) 方向一定, 快慢變更; (2) 快慢相等, 方向變更; (3) 方向快慢, 兩者俱變, 例如落體運動 (見本章 § 88) 屬於第一種, 圓周運動 (見第五章 § 101) 屬於第二種, 拋體運動 (見本章 § 91) 屬於第三種.

設 v 為等速度 (以厘米/秒為單位),
 t 為時間 (以秒為單位),
 s 為距離 (以厘米為單位)

則其關係如下式

$$s = vt$$

是為等速運動之基本公式.

85. 平均速度及瞬時速度

通常物體之運動, 在短時間內, 其速度可以相同, 而在長時間內, 頗難得等速運動. 例如火車開行之初, 速度漸次增大, 到達車站之時, 又須漸次減小, 即在中途, 直進時快, 轉彎時慢, 故速度不能一致. 但在一定之時間內, 必經過一定之距離, 以時間除距離, 則曰在此時間內之平均速度 (Mean velocity). 平常謂火車每小時行 60 公里, 飛機每小時行 200 公里, 均指平均速度而言.

如圖 101, 物體在 OX 直線上運動, 當 t_1 秒時, 物體完成一位移 \overrightarrow{OA} , 命為 s_1 , 當 t_2 秒時, 其位移為 \overrightarrow{OB} , 命為 s_2 , 則 $s_2 - s_1$ 為在時間 $t_2 - t_1$ 秒內所經過之距離. 故在此時間內之平均速度 V_m 為



圖 101. 平均速度

$$V_m = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}$$

若時間 $t_2 - t_1$ 極短，趨近於零時，則此平均速度即為物體在時刻 t_1 之瞬時速度 (Instantaneous velocity)。換言之，所謂某物體於某時刻之瞬時速度者，即於此時刻始，物體在一秒內，所將行之距離也。

86. 加速度 (Acceleration)

變速運動之物體，其速度隨時不同，在單位時間內，所起之速度變化，曰**加速度**。設一物體，在時刻 t_1 及 t_2 之瞬時速度各為 v_1 及 v_2 ，則 $v_2 - v_1$ 即為在時間 $t_2 - t_1$ 內之速度變化，在此時間內之平均加速度 a_m 為

$$a_m = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}.$$

若時間 $t_2 - t_1$ 極短，趨近於零時，則此平均加速度即為物體在時刻 t_1 之瞬時加速度。

在上式中， $v_2 - v_1$ 之單位為厘米/秒， $t_2 - t_1$ 之單位為秒，以秒除厘米/秒，即得加速度之單位為厘米/秒²，讀作每秒每秒若干厘米 (Centimeter per second per second 縮寫為 cm./sec.^2)，意即每秒內所生速度之變化，為每秒若干厘米也。

又若 v_2 小於 v_1 ，則 a 為負數，是為負加速度，或曰減速度 (Retardation)。速度逐漸減小之運動，曰減速運動 (Retarded motion)，速度逐漸增加之運動，曰加速運動 (Accelerated motion)。

87. 等加速運動 (Uniformly Accelerated Motion)

加速度不變之運動，曰等加速運動。

設 v_0 為起始時之速度，(稱為初速度 Initial velocity)，

v 爲 t 秒末之速度, (稱爲末速度 Final velocity),
 a 爲等加速度,
 s 爲 t 秒內物體所行之路程.

$$\text{則 } a = \frac{v - v_0}{t},$$

$$\text{故 } v = v_0 + at \dots\dots\dots(1)$$

又距離等於平均速度乘時間, 而平均速度爲

$$\frac{v_0 + v}{2} = \frac{v_0 + (v_0 + at)}{2} = v_0 + \frac{1}{2} at.$$

$$\text{故 } s = (v_0 + \frac{1}{2} at) \cdot t,$$

$$\text{即 } s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \dots\dots\dots(2)$$

又由(1),(2)兩式, 消去 t , 則得

$$v^2 = v_0^2 + 2as \dots\dots\dots(3)$$

若物體由靜而動, 則初速度 $v_0 = 0$, 上述三式變爲,

$$v = at,$$

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

$$v^2 = 2as.$$

88. 自由落體運動

無他物支持之物體, 因受重力作用, 必向地面落下, 是爲自由落體 (Freely falling body). 1590 年, 伽利略在比薩斜塔 (參看第一編前面之插圖) 上, 作落體試驗, 其所得結論謂各種輕重不同之物體, 如無空氣之阻力, 則其落下速度必相同。俟抽氣機發明後, (伽氏之後 60 年), 此結論甚易證明, 法用圖 102 之玻璃



圖 102. 落體試驗

筒內盛羽毛、紙片、銅片各一，如將筒中空氣抽出，則倒轉時，羽毛、紙片、銅片，皆同時落下。

落下之物體，爲等加速運動，其加速度由重力而生，故曰**重力加速度** (Acceleration of gravity)，常以 g 表之。 g 之數值，因地而異，兩極最大，爲 983.3 厘米/秒²，赤道最小，爲 978.1 厘米/秒²，通常計算時，多用 980 厘米/秒² 或 32.16 呎/秒²。

自由落體，初速爲零，加速度爲 g ，故在 § 87 之公式中，令 $v_0 = 0$ ，並以 g 代 a ，即得自由落體運動之三公式爲

$$v = gt \dots\dots\dots(1)$$

$$s = \frac{1}{2}gt^2 \dots\dots\dots(2)$$

$$v^2 = 2gs \dots\dots\dots(3)$$

又第 n 秒一秒內所行之距離，爲 n 秒之總距離，減去前 $n-1$ 秒之距離之差，故由 (2) 式得第 n 秒內所行之距離爲

$$\begin{aligned} s_n - s_{n-1} &= \frac{1}{2}gn^2 - \frac{1}{2}g(n-1)^2, \\ &= \frac{1}{2}\{g(n^2 - (n-1)^2)\}, \\ &= \frac{1}{2}g(2n-1). \end{aligned}$$

可知自由落體各秒內所行之距離，爲 $\frac{1}{2}g$ 之奇數倍 ($2n-1$ 表奇數)。自由落體運動之情形，如圖 103 表示之，甚爲明瞭，左邊表 n 秒末之總距離及瞬時速度，右邊表第 n 秒一秒內所行之距離。

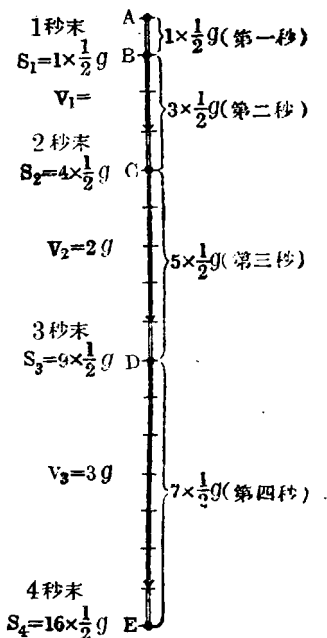


圖 103. 自由落體運動

89. 拋下運動

以初速度 v_0 將物體依鉛直方向拋下時,亦爲等加速運動,在 § S7 之公式中, a 以 g 代之,則得拋下運動之公式爲

$$v = v_0 + gt \dots\dots\dots (1)$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} gt^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$v^2 = v_0^2 + 2gs \dots\dots\dots (3)$$

90. 拋上運動

以初速度 v_0 將物體依鉛直方向拋上時,亦爲等加速運動,惟因加速度之方向,與初速度之方向適相反,故 § S7 公式中之 a 應以 $-g$ 代之,由是可得

$$v = v_0 - gt \dots\dots\dots (1)$$

$$s = v_0 t - \frac{1}{2} gt^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$v^2 = v_0^2 - 2gs \dots\dots\dots (3)$$

茲將此三公式,分別討論之:

I. 物體漸次上昇,速度逐漸減小,終至於零,而物體達於最高點,所需時間,可由(1)式求之,命 $v = 0$, 即得 $t = \frac{v_0}{g}$. 自此以後,物體即折而向下,降落地面.

II. 最高點與出發點之距離,可由(3)式求之,即命 $v = 0$, 則得 $s = \frac{v_0^2}{2g}$.

III. 物體上昇時,距離 s 逐漸增大,折回時 s 減小,當物體尚未拋上,或已折回原處時,則 s 爲零.在(2)式中,命 $s = 0$, 則得 $t = 0$ 或 $t = 2 \frac{v_0}{g}$, 可知自出發以至折回原處,

所需之時間，爲上昇至最高點所需時間之兩倍。又若將 $t = \frac{2v_0}{g}$ 代入(1)式，則得 $v = -v_0$ ，此即表示物體折回原處時之末速度，與初速度相等而方向相反。

91. 拋體運動(Projectile Motion)

斜向拋出之物體，曰拋射體(Projectile)。如圖 104，以速度 v ，依 OA 方向，將物體拋出，若無重力之作用時，則應作等速直線運動，故一秒後，物體至 A 點($QA = v$)，二秒後至 B 點($OB = 2v$)，等等；但因同時受有重力之作用，故一秒之末，物體之位置，應較

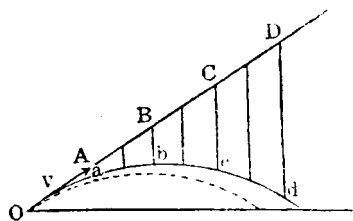


圖 104. 拋物線

A 點降低 $\frac{1}{2}g$ ，而在 a 點，同理，二秒之末，應在 b 點 ($Bb = 4 \times \frac{1}{2}g$)，三秒之末，應在 c 點 ($Cc = 9 \times \frac{1}{2}g$)，等等。將 O, a, b, c, d, \dots 等點連結之，即得拋射體所經之路線，此種曲線，名曰拋物線(Parabola)。以線若干條，各懸一小球，繫於直棒之等分點上，線長之比依次爲 $1:4:9:16:\dots:n^2$ 時，則諸球即呈一拋物線。又實際上因空氣阻力之關係，故拋射體所經之路線，如圖中虛線所示。

如圖 105 所示，可以研究關於拋體運動之種種：

(a) 將速度 v 分解之，則

得

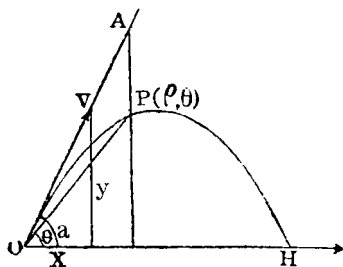


圖 105. 拋體運動

$$\text{鉛直分速度 } V_y = v \sin \alpha \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{水平分速度 } V_x = v \cos \alpha \dots\dots\dots(2)$$

(b) 水平方向爲等速運動,鉛直方向因受重力作用,故爲等加速運動,其情形與拋上運動無異,惟初速度爲 $v \sin \alpha$. 故

$$\text{水平距離 } S_x = v t \cos \alpha \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{鉛直距離 } S_y = v t \sin \alpha - \frac{1}{2}gt^2 \dots\dots(4)$$

(c) 如 § 90 討論 I, II, 同理, 可得

物體達最高點所需時間 t 爲

$$t = \frac{v \sin \alpha}{g} \dots\dots\dots(5)$$

最高距離 S 爲

$$S = \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \dots\dots\dots(6)$$

(d) 圖中 OH 稱爲水平射程 (Horizontal range), 自 O 至 H 所需之時間, 等於達最高點所需時間之二倍, 即 $\frac{2v \sin \alpha}{g}$. 以此值代入 (3) 式, 則得

$$OH = \frac{v \cos \alpha \cdot 2v \sin \alpha}{g} = \frac{v^2}{g} \sin 2\alpha \dots\dots(7)$$

由 (7) 式, 因 g 及 v 皆爲常數, 可知 OH 之值, 隨 $\sin 2\alpha$ 而變, 但正弦之最大值爲 1, 即 $\sin 2\alpha = 1$, 於是 $2\alpha = 90^\circ$, 而 $\alpha = 45^\circ$, 故拋射方向與水平線成 45° 之角度時, 水平射程 $\left(= \frac{v^2}{g} \right)$ 爲最大, 又因 $\sin 2\alpha = \sin(180^\circ - 2\alpha)$, 故當拋射角爲 α 及 $90^\circ - \alpha$ 時, 其水平射程相同.

(e) 設 t 秒之末, 物體在 P 點, 命 $OP = \rho$, $\angle OPH = \theta$. 過

P 點作鉛直線，與 Ov 相交於 A，在 $\triangle OPA$ 中，按正弦定律 (Law of sines) 可得

$$\frac{OA}{\sin \angle OPA} = \frac{PA}{\sin \angle AOP} = \frac{OP}{\sin \angle OAP},$$

$$\frac{vt}{\sin(90^\circ - \theta)} = \frac{\frac{1}{2}gt^2}{\sin(\alpha - \theta)} = \frac{\rho}{\sin(90^\circ - \alpha)},$$

$$\frac{vt}{\cos \theta} = \frac{gt^2}{2 \sin(\alpha - \theta)} = \frac{\rho}{\cos \alpha}.$$

由是可得 $t = \frac{2v \sin(\alpha - \theta)}{g \cos \theta},$

$$\rho = \frac{vt \cos \alpha}{\cos \theta},$$

故 $\rho = \frac{v^2 \cos \alpha \sin(\alpha - \theta)}{g \cos^2 \theta} \dots (8)$

上式中 $v, \alpha,$ 及 g 均為常數， ρ 及 θ 為變數，描點作圖，則成一拋物線，故 (7) 式即為拋射體所經路線之方程式。

92. 斜面上之運動

物體沿斜面滑下時，亦為等加速運動，其加速度 a 為重力加速度 g 之分加速度。如圖 106，將 g 分解為二分加速度 a 及 n ， n 與斜面垂直，因受斜面之阻止，不能發生運動。 a 與斜面平行，使物體沿斜面順滑而下。設斜面之傾斜角為 θ ，則

$$a = g \sin \theta,$$

$$n = g \cos \theta.$$

將 a 之值，代入 § 87 中之等加速運動公式 (3)，則得

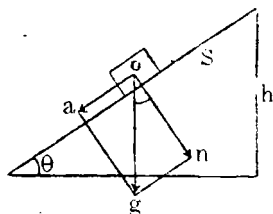


圖 106. 斜面上之運動

$$v^2 = v_0^2 + 2g \sin \theta \cdot S,$$

上式中, S 即為斜面之長, 設 h 為斜面之高, 則

$$\therefore h = S \sin \theta,$$

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

即物體沿高 h 之斜面上滑下, 所得之末速度, 與自高 h 之處, 以同一初速度 v_0 拋下時, 所得之末速度相等。

因 a 小於 g , 且 θ 愈小時, a 亦愈小, 故運動頗為遲緩, 極便研究。若物體自由落下, 或拋下時, 加速度 g 之值甚大, 故其運動情況, 頗難實測也。

溫習提要

[定 義]

1. 運動與靜止:
2. 位移:
3. 速度與快慢:
4. 平均速度:
5. 瞬時速度:
6. 加速度:
7. 自由落體:
8. 重力加速度:

9. 拋射體及拋物線:

10. 水平射程:

[單位]

1. 速度
2. 加速度:

[公式]

1. 等速運動:
2. 等加速運動: (1) (2)
(3)
3. 自由落體: (1) (2) (3)
4. 拋下運動: (1) (2) (3)
5. 拋上運動: (1) (2) (3)
最高距離: 達最高點所需時間:
6. 拋體運動
水平距離: 鉛直距離:
最高距離 水平射程:
7. 斜面上之運動:

問題八

1. 某甲向東行 6 里後,復向北行 8 里,試繪圖並計算其合位移.
2. 有一小舟,在靜水中之速度為每時 3 里,今欲橫渡一河,河廣 $\frac{1}{3}$ 里,水流速度為每時 4 里,划行方向與岸垂直,問渡至對岸,需時若干?又此舟流下之距

離幾何?

3. 有速度 2 里/時之小舟,行於水流 $\sqrt{3}$ 里/時之河中,如欲其進行方向與水流成垂直,則船首應指何方向?又合速度若何?
4. 在進行之火車內,望見落下之雨,向後傾斜,其理若何?
5. 有向東北方向駛行之汽車,其速度為 50 里/時,求其向東,向北之分速度.
6. 一物體由靜止開始運動,經 10 秒後,共行路 20 厘米,求其加速度,及 5 秒末之速度.
7. 設有運動體,其初速度為 26 厘米/秒,經 8 秒後,速度變為 50 厘米/秒,求其加速度,及 10 秒內所行之路程.
8. 一運動體,其初速度為 120 厘米/秒,加速度為 -2 厘米/秒²,幾秒後物體始能靜止?經過距離若干?
9. 一人以手握石,立於井邊,放手時,石即自由落入井中,經 2 秒而達水面,求井邊離水面之高,及石達水面時之速度.
10. 自由落體,第 12 秒內所行之路程若干?
11. 從斜塔上自由落下之物體,其達地面最後之一秒內所行之路,為全程之 $\frac{9}{25}$,求此斜塔之高.
12. 有自由落下之物體,其路線上一點 A 處之瞬時速度為 29 米/秒,又 B 點處之瞬時速度為 49 米/秒,求 A, B 兩點間之距離,及通過此距離所需之時間.
13. 以每秒 3.24 米之速度,依鉛直方向拋下石塊,4 秒後石塊之速度,及其經過之距離各若何?
14. 由高 100 米之靜止氣體上,以 5.4 米/秒之速度,鉛

直拋下一物體，經幾秒後，始達地面！

15. 有甲乙二球，於甲球自由落下 5 秒後，以 80 米/秒之速度將乙球鉛直拋下，問經幾秒後，乙球可追及甲球？
16. 以 24.5 米/秒之速度，依鉛直方向拋上之物體，能昇高至何處？需時幾何？在 2 秒及 3 秒時之距離及速度各若干？
17. 有一氣球，以等速度繼續上昇，於離地 100 米處放一石塊，經 5 秒後而達地面，求氣球上昇之速度。
18. 以初速度 78.10 厘米/秒，依與水平成 30° 之傾斜方向，將一物體拋出，求 (a) 2 秒後之鉛直距離，(b) 最高距離及所需時間，(c) 水平射程。
19. 由高 122.5 米之塔上，以 20 米/秒之速度依水平拋射物體時，問於幾秒後落於地上！此點離塔麓若干米？
20. 於高 160 米之砲臺依水平發砲欲擊中距砲臺 3000 米（水平距離）處之敵艦，砲彈之速度應若何？
21. 有於 490 米之高空，以 20 米/秒之速度，依水平正北方向進行之飛機，飛至 A 點之直上處落下一炸彈，因受正西風之影響，致落於 B 點而爆發。設 B 點在 A 點之東 250 米處，求此時西風之平均速度。
22. 有一斜面，其高為長之 $1/2$ ，一球自此斜面上滾下，求 3 秒所經之路程。
23. 沿傾斜 30° 之斜面將物體拋上若初速度為 250 米/秒，問物體能上昇至何處？
24. 由長 5 米高 2.5 米之斜面頂端，滾下一球，求其達於下端時之速度，及所需之時間。

25. 有置於斜面上之物體，其最初一秒間，滑下之距離為 40 厘米，設此斜面長 200 厘米，高 40.8 厘米，求由重力所生之加速度。

第四章 動力學之基本定律

93. 牛頓之運動第一定律(Newton's First Law of Motion)

運動現象，雖極複雜，然皆遵從一定之規律。大物理學家牛頓（參閱本編前面之插圖），確定此項規律，共有三條，稱爲牛頓之運動三定律 (Newton's three laws of motion)。茲先述其**第一定律**如下：

一切物體，若不受外力之強迫時，則靜者恆靜，動者恆依直線方向，等速進行，永無止境。

此定律所言者，即爲物體之慣性，故亦稱**慣性定律** (Law of inertia)。由此定律可知，欲打破物體之慣性，必須有外力之作用，故力爲發生加速度之原因。苟無外力，即無加速度，是以靜止之物體，不能開始運動，而運動之物體，亦無由改變其速度也。平常所見之運動物體，歷時稍久，即行停止者，乃因受有摩擦力及空氣阻力等之作用所致，非與慣性定律有所悖謬也。

94. 動量(Momentum)

體積相等之鐵球與木球，以相等之速度運動時，欲阻止鐵球必較難，阻止木球則較易，可見阻止運動物體之難易，必與質量之大小有關。又若兩球之質量相同，而速度不等時，則速度之大者，阻止亦較難，可見阻止之難易，又與速度之大小成正比。凡運動之物體，皆具有一種

與其質量及速度有關之量，其大小即以質量與速度相乘之積表之，是謂動量，設質量為 m ，速度為 v ，則

$$\text{動量} = mv,$$

動量亦為向量，其方向與速度之方向相同。

95. 衝量(impulse)

以力作用於一物體，使靜止者開始運動，或使運動者改變速度，其所得之效果，不僅與力之大小有關，且與施力時間之長短亦成正比例，此所施之力與作用時間之乘積，謂之衝量。例如裝貨之車，初推之不易立即運動，繼續推之，然後漸漸移動，若加力之時間愈長，則其運動之速度亦愈大。又如運動之物體，以力阻之，不能使之驟停，須歷相當時間，而後可使靜止，足見衝量之大小，與力及作用時間均有關係也。設 F 為作用之力， t 為作用之時間，則衝量 I 為

$$I = Ft.$$

衝量亦為向量，其方向與力之作用方向相同。

96. 牛頓之運動第二定律(Newton's Second Law of Motion)

物體受力之作用，則其速度發生變化，因之動量亦生變化，單位時間內所生動量之變化，曰動量之變化率。牛頓研究動量之變化與力之關係，得運動第二定律如下：

動量之變化率與所加之力成正比例，其方向與力之方向相同。

由上述之第一定律，可得力之定義；由第二定律，可得力

之測法。設 F 爲所加之力， m 爲物體之質量， v_0 爲初速度， v 爲於受力 t 秒後之速度，則按第二定律，得

$$F \propto \frac{mv - mv_0}{t},$$

$$\text{或 } F = K \cdot \frac{mv - mv_0}{t}.$$

上式中之 K 爲比例常數，其值由 F ， m ， v ， t 等之單位而定。若令作用於單位質量之物體上，使其於單位時間內生一單位動量之變化之力，爲力之單位，則因 $F=1$ ， $t=1$ ， $mv - mv_0=1$ ，故 K 亦等於 1。由是可得

$$F = \frac{mv - mv_0}{t},$$

$$\text{或 } Ft = mv - mv_0.$$

此即表示物體受力之作用，歷時間 t 後，其動量之改變，等於此力之衝量，改變之方向，與力相同。

又上式亦可書爲

$$F = m \cdot \frac{v - v_0}{t},$$

$$\text{但 } \frac{v - v_0}{t} = a,$$

$$\text{故 } F = ma.$$

即作用之外力，等於質量與加速度之乘積。

97. 力之絕對單位(Absolute Unit of Force)

第一編中已述力之重力單位爲“克重”或“磅重”，此種單位之大小，每隨地而異，例如在兩極所謂一“克之力”，較之在赤道上所謂一“克之力”爲大，蓋因質量

一克之物體，在各地方所受之重力不同故也。力之單位，其值不因地而異者，曰絕對單位，述之如下：

(a) **C. G. S. 制** 作用於質量 1 克之物體上，使其生 1 厘米/秒² 之加速度之力，為力之單位，即名曰 1 達因 (Dyne)。

(b) **F. P. S. 制** 作用於質量 1 磅之物體上，使其生 1 呎/秒² 之加速度之力，為力之單位，名曰 1 磅達 (Poundal)。

98. 質量與重量

質量之觀念，起自物體之慣性，物體之質量愈大，則其慣性亦愈大，故由慣性之大小，可以比較質量之多寡。例如有二物體，各以一定之力作用於其上，經相等之時間後，若所生速度之變化相同，則此二物體之慣性相等，由是可推知其質量亦相等。若甲物體速度之改變為乙之 n 倍，則甲物體之慣性為乙之 n 倍，由是可知甲物體之質量亦為乙之 n 倍。

重量為物體所受之重力，故為力之一種。物體受重力之作用，其所得之加速度為 g ，命 W 表物體之重量， m 表其質量，則由牛頓運動第二定律，可得

$$W = mg.$$

由此式求得之重量，其單位應為絕對單位，即以克為 m 之單位，而 $g = 980$ 厘米/秒² 時， W 之單位為達因；若以磅為 m 之單位，而 $g = 32$ 呎/秒² 時，則 W 之單位為磅達。又由此可知

$$1 \text{ 克重} = 980 \text{ 達因},$$

$$1 \text{ 磅重} = 32 \text{ 磅達}.$$

故由重力單位化爲絕對單位，須以 g 乘之；反之，由絕對單位化爲重力單位，須以 g 除之。

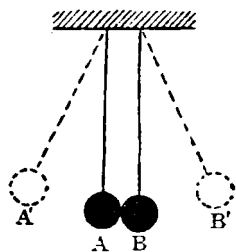
99. 牛頓之運動第三定律 (Newton's Third Law of Motion)

船夫以篙抵岸，船即離岸前進，可見與岸以一力時，岸亦還以一力，前者稱爲作用，或曰主動力 (Action)，後者稱爲反作用，或曰反動力 (Reaction)。牛頓根據實驗，得運動第三定律如下：

有一作用，則必有一反作用；此二力在同一直線上，大小相等，方向相反。

此定律亦稱反作用定律 (Law of reaction)。作用與反作用合稱之曰應力，由反作用定律，可知凡力皆成應力，不能單獨存在。

茲舉一簡單實驗，以證明第三定律。法取二鋼球 A、B，以等長之線懸之，如圖 107 所示，將 A 球移至 A' 之位置而放之，則 A 球回至原位時，以一力衝擊 B 球。B 球得此一力，即向上動至 B' 處，B' 與 A 等高，可見 B 球所得之力，等於 A 球原有之力。同時 A 球與 B 球相碰後，即停止於 A 處，可見 B 球必有一力還與 A 球，且大小相等，而方向相反。



初學者對於反作用定律，往往有二疑點：即作用與反作用既爲等值而反向，何以物體尙能運動一也；又如上例，以篙抵岸，何以祇見船之前進，而不見岸之後退二也。茲分別解釋之。

(1) 第一種疑點之發生，乃因誤認作用及反作用為加於一物體之力之故。實則乙物體受甲物體之作用時，其所引起之反作用，乃加於甲物體上，而非加於乙物體之自身也。故為便利計，凡物體所受之作用力，可分為兩種：自物體以外而來者曰**外力**(External force)，存在於物體之內部者曰**內力** Internal force)。例如圖 108，馬以一

力 B 曳車，車亦以等值而反向之力 B' 曳馬；就馬與車之全體而言，此 B 與 B' 二力恆成為內力，故與馬車之運動與否無涉。但馬以足向後

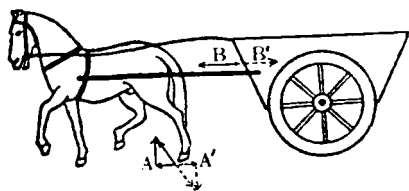


圖 108. 馬曳車前進之理

抵地，有一分力 A' ，地面上所引起反作用之分力 A ，加於馬足上，此分力對於馬車成為外力，故能曳車前進也。

(2) 設有兩物體，其質量各為 m 及 m' ，因相互作用而起運動，經 t 秒之後，其速度各變為 v 及 v' ，則由第三定律可得

$$m \frac{v}{t} = -m' \frac{v'}{t},$$

或
$$\frac{m}{m'} = -\frac{v'}{v}.$$

由上式可知兩物體之速度方向相反，其大小與質量成反比例。以篙抵岸時，因地球之質量甚大，故其速度極小，是以祇見船之前進，而不見岸之後退也。

100. 萬有引力定律 (Law of Universal Gravitation)

蘋果落地，因受重力之故；行星以一定軌道繞日運

行，因受太陽引力之故，宇宙之間，一切物體與物體之間，皆有相互作用之引力，是曰萬有引力，牛頓對於萬有引力創一定律如次：

凡宇宙間任意兩物體之間，均有引力互相作用於其連結線上，此項引力之大小，與兩物體質質量之乘積成正比例，與其間距離之平方成反比例。

是曰萬有引力定律。

設兩物體之質量各為 m 及 m' ，其間之距離為 d ，兩者相互作用之引力為 F ，則萬有引力定律可以下式表之：

$$F = K \frac{mm'}{d^2}$$

上式中之 K 為比例常數，稱為萬有引力常數 (Gravitational constant)，其值由所取之單位而定，在 C.G.S. 制中

$$K = 6.6579 \times 10^{-8}$$

通常物體間之引力，極為微小，例如兩物體之質量各為 1 克，其間相距 1 厘米時，則引力僅為 6.6579×10^{-8} 達因，約合 15×10^9 分之 1 克，故吾人無由感覺之。地球與太陽之質量甚大，故雖相距 93×10^6 哩，但其間引力仍有 4×10^{18} 噸之大。

任何物體，以在地面時之重量為最大，離地愈高，因距離增大，故重量減小。若在地面以下秤物時，其與地心之距離雖減小，但重量亦必減小。如圖 109，設物體在地球內部之一點 P 處， O 為地心，過 P 點作一平面 AB 與 PO 垂直，分地球為兩部分。

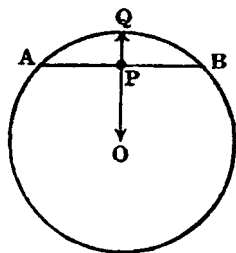


圖109. 地球內部物重減輕

在 AB 以下之部分,對於物體引力之方向爲 PO, 在 AB 以上之部分,對於物體引力之方向爲 PQ, 此二者之方向,恰相反對,故物體之重量減輕,若將物體置於地心 O 處,則因各方向之引力,互相平衡,故其重量當爲零。

溫習提要

[定 義]

1. 動量:
2. 衝量:
3. 作用及反作用:
4. 外力及內力:

[定 律]

1. 牛頓之運動第一定律:
2. 牛頓之運動第二定律:
3. 牛頓之運動第三定律:
4. 牛頓之萬有引力定律:

[單 位]

力之絕對單位 { 達因:
磅達:

[公 式]

1. 力:
2. 重量:
3. 萬有引力:

問 題 九

1. 試舉數例,說明慣性定律.
2. 有質量 20 克之彈丸,以 400 米/秒之速度發射之,其所具之動量幾何?若欲於 0.1 秒內使此彈丸停止,需力若干?
3. 設有質量為 m_1 及 m_2 之二物體,各以速度 v_1 及 v_2 於一直線上依同方向進行,若二者衝突後合而為一,則其速度如何?
4. 從高處跳下時,須以趾尖着地,是何用意?又茶杯落於石上易碎,落於厚毛毯上則不易碎,何故?
5. 水雷爆發於軍艦之側時,其一方為易破之海水,他方為堅牢之鋼板,而艦壁能遭其破壞者,何故?
6. 有質量 5 克之物體,於 5 秒間其速度由 60 厘米/秒變為 80 厘米/秒,求其所受之力.
7. 設有 10 磅達之力,作用於靜止之物體上,經 2 秒後,得 12 呎/秒之速度,問此物體之質量為若干?
8. 於質量 50 克之靜物上,繼續施以 100 達因之力,欲使速度成爲 30 米/秒,須歷若干時間?
9. 以 50 達因之力,作用於質量 10 克之物體上,求其所得之加速度.

10. 試就公式 $W=mg$ 說明重量與質量之區別。
11. 質量 100 克之物體,其重量爲若干?
12. 5 磅之力合若干磅達? 49000 達因之力,合若干克重?
13. 以棒打擊衣服,可以除去灰塵,何故?
14. 力能扛鼎之人,亦不能自舉其身,何故?
15. 人於車上推車,則車不動,而於車上推輪,則車前進,何故?
16. 由重 10 噸之礮,以 560 米/秒之速度發射 200 磅之礮彈時,礮身後退之速度若何?
17. 漁夫入池捕魚,兩足陷於泥中,若欲拔起一足,反令他足陷入愈深,何故?
13. 鎗彈之質量爲 20 克,以 400 米/秒之速度射出,在鎗筒中歷時 0.1 秒始出鎗口,求火藥之炸力,若鎗身後退之速度爲 0.5 米/秒,則鎗之質量爲若干公斤?
19. 某物體在地面之上重 20 磅,問於離地 2000 哩之高處,計重若干? (地球之半徑爲 4000 哩)
20. 設有兩物體,其質量各爲 200 克及 500 克,相距 10 厘米,問其間互相作用之引力爲若干?

第五章 圓周運動

101. 圓周運動(Circular Motion)

運動物體所經之路線，如爲一圓周，則稱曰圓周運動。物體以一定之快慢沿圓周運動時，爲一種變速運動。因速度之方向隨時變更故也。速度既有變化，則必有一加速度，此項加速度之大小及方向，可以下法求之：

如圖 110，物體以一定之快慢 v ，沿 O 圓之圓周上運動，在極短之時間 t 內，由 P_1 移至 P_2 ，在此兩點之速度，各以切線 P_1T_1 及 P_2T_2 表之，此兩速度之方向不同，而大小均等於

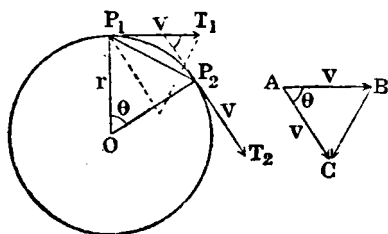


圖 110. 圓周運動

v 。試由任意一點 A ，作 $AB \perp P_1T_1$ ，又作 $AC \perp P_2T_2$ ，連結 BC ，則按向量之合成法則，可知 BC 即爲時間 t 內之速度變化。由加速度之定義，可得

$$a = \frac{BC}{t}.$$

因 P_1T_1 及 P_2T_2 各與半徑 OP_1 及 OP_2 垂直，而 AB 及 AC 又各與 P_1T_1 及 P_2T_2 平行，故

$$\triangle OP_1P_2 \sim \triangle ABC,$$

於是

$$\frac{BC}{P_1P_2} = \frac{AB}{OP_1},$$

$$\text{故 } BC = \frac{v}{r} \cdot P_1 P_2 \quad (r \text{ 爲半徑})$$

因時間 t 極短, P 與 P_1 甚爲接近, 故直線 $P_1 P_2$ 可視爲與弧 $\widehat{P_1 P_2}$ 相等, 而 $\widehat{P_1 P_2}$ 爲時間 t 內物體所行之路程, 故

$$\widehat{P_1 P_2} = \widehat{P_1 P_2} = vt,$$

代入上式, 則得

$$BC = \frac{v}{r} \cdot vt$$

$$\text{故 } a = \frac{BC}{t} = \frac{v^2}{r}.$$

加速度之方向, 卽爲 BC 之方向, 由圖易知 BC 恆與 $P_1 P_2$ 成垂直, 若 P_1 與 P_2 相距極近時, BC 之方向卽與半徑 $P_1 O$ 相重合. 故 圓周運動之加速度, 方向因物體所在之位置而異, 但常正向圓心, 至其大小, 則等於快慢 v 之平方與半徑 r 之商.

102. 向心力(Centripetal Force)

物體作圓周運動時, 必有一向心之加速度, 產生此加速度之力, 卽 **向心力**. 由上節已知 $a = \frac{v^2}{r}$, 代入公式 $F = ma$ 中, 卽得向心力爲

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

如圖 111, 以繩繫石, 執其他端而轉之. 石卽在以繩爲半徑之圓周上運動. 此時手上必須用力拉繩, 且旋轉愈快, 則需力愈大, 是卽向心力也. 若驟然

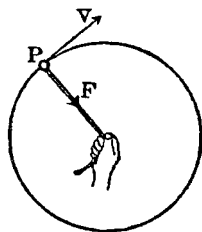


圖 111. 向心力

將手放開, 則向心力除去, 卽無由產生向心之加速度, 此

時物體如在 P 點,則必沿 P 點之切線方向,作等速直線運動,而不復成爲圓周運動矣。

103. 離心力 (Centrifugal Force)

由運動第三定律,可知有一向心之力,則必有一與之等值而反向之反作用,是曰離心力。如上述之例,手固以力執繩,石亦以力引手,而後可使繩子緊張,物體遂沿圓周運動。故向心力與離心力二者,存則並存,去則同去,存時爲圓周運動,去時則物體即脫離圓周軌道,而依切線方向飛去。例如附着於車輪上之泥,當車輪迅速旋轉,至離心力大於附着力時,即脫離輪緣,依切線方向飛出者,即此故也。又如圖 112,桶中盛水,用力使其在一垂直面內作圓周運動,此時水對於桶底之壓力即爲離心力,而桶底對於水之壓力則爲向心力。若轉動甚快,則水不致流出。若停止運動,或運動頗慢,則因離心力小於水所受之重力,故桶底向上時,水必向下流出。

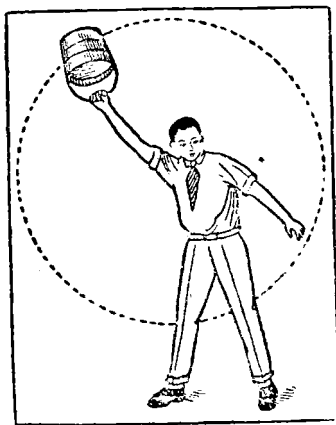


圖 112. 離心力

火車轉彎時,疾馳於一部分之圓周軌道上,若軌道面仍爲水平,則因慣性之理,

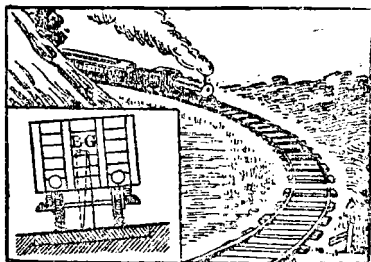


圖 113. 火車轉彎向內傾斜

必有出軌之虞。故必令裏軌略低，外軌略高，使車身向內傾斜，利用其重力之水平分力，（如圖 113 中之 GB）作為向心力，以與離心力相抵消，然後可使車身平衡，安然轉彎，而無傾覆及出軌之患矣。

如圖 114，G 表火車之重心，W 為其重量，分解之為二分力：其一為 GN，與軌道面垂直，與軌道面之反作用相平衡，其一為 GB，成水平方向，與離心力 F 相平衡。設軌道之彎曲半徑為 r，火車之質量為 m，其快慢為 v，軌道面與水平面所成之角度為 θ ，則因

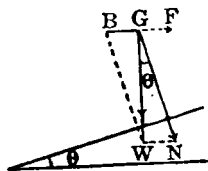


圖 114. 車軌之斜度

$$F = \frac{mv^2}{r},$$

$$W = mg,$$

$$\text{而 } \tan \theta = \frac{F}{W} = \frac{v^2}{rg},$$

$$\text{故 } \theta = \tan^{-1} \frac{v^2}{rg}.$$

此為鋪設軌道時所應注意者也。

104. 圓周運動之週期

物體自某點起，開始運動，歷一定之時間後，仍回至此位置，再依原有狀況，繼續運動，如是周而復始之運動，謂之週期運動 (Periodic motion)。每往復一次所需一定之時間，謂之週期 (Period)。例如物體以一定之快慢沿圓周運動時，即屬週期運動，繞行一周所需之時間，即為圓周運動之週期，茲命週期為 T，快慢為 v，半徑為 r，則

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

$$\text{又由 } a = \frac{v^2}{r},$$

$$\text{可得 } v = \sqrt{ar},$$

代入上式,即得

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r}{a}}$$

單位時間內往復循環之次數曰**振數**(Number of vibration), 或曰**頻率**(Frequency), 通常以 n 表之。週期愈大, 則振數愈少, 二者恰成反比, 故其關係可以下式表之:

$$T = \frac{1}{n}$$

105. 簡諧運動(Simple Harmonic Motion)

設有一點 p (如圖 115), 以一定之快慢運動於圓周上, 此動點在任意直徑 AB 上之投影 M , 亦同時在 AB 上往復移動, 每單位時間內, p 點沿圓周所行之路相等, 而 M 點沿 AB 上移動之距離則不同, 足見其速度及加速度均隨變更。此 M 點之運動, 曰**簡諧運動**。圓 ApB 曰**簡諧運動之參考圓** (Circle of reference), 半徑 OA 曰**振幅** (Amplitude)。

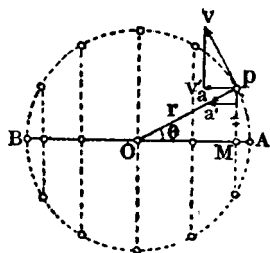


圖 115. 簡諧運動

若將 p 點之速度 v , 分解為二分速度, 一與 AB 平行, 一與 AB 垂直。其平行之分速度 v' , 即為 M 點之速度。

由圖知

$$v' = v \sin \theta = \frac{v \cdot Mp}{r}$$

上式中,速度 v 及半徑 r ,均為常數,可見 v' 之值,依 $\sin \theta$ 或 Mp 而正變,故 M 移近中心 O 時,其速度漸次增大,遠離 O 點,速度又減。

若將 p 點之向心加速度 a ,分解為二分加速度,一與 AB 平行,一與 AB 垂直,其平行之分加速度 a' ,即為 M 點之加速度,由圖知

$$a' = a \cos \theta = \frac{a \cdot OM}{r}$$

可見 a' 之值,依 $\cos \theta$ 或 OM 而正變,故 M 離中心愈遠,其加速度愈大,漸近中心,加速度亦漸減小,加速度之方向,恆正向中心。

又 p 點在參考圓上轉動一周時, M 點亦在 AB 上往返一次,故簡諧運動之週期,與圓周運動的週期相同,即

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r}{a}}$$

其中 r 即為振幅, a 為 M 點之最大加速度 (即在 A 點時之加速度)。

106. 單擺 (Simple Pendulum)

以線懸小球,釘住其他端,稍稍移動小球,使其離開平衡位置,將手一放,則小球即沿圓弧上往復振動不已,此種裝置乃鐘擺之最簡單者,故名之曰單擺,所懸小球,名曰擺錘 (Bob),線長 l (圖 116) 謂之擺長 (Length of

pendulum), 弧 AB 曰振幅, 角 θ 曰幅角 (Angle of amplitude). 當擺錘由平衡位置 A, 移至 B 點時, 因其所受之重力 W , 對於懸點 O 生成一力矩, 故必向左運動. 今將 W 分解為 N 及 T 兩分力, N 與 OB 一致, 故與線上之張力相平衡, 對於運動無關, T 與 OB 垂直, 可使擺錘相左運動. 至 A 點時, 速度最大, 由慣性之理, 仍繼續運動, 至 C 點而速度減為零, 於是折而向右, 以達 B 點, 如是循環往復, 適成週期運動. 苟無空氣阻力, 則 B, C 兩點等高, 且擺動永不停止.

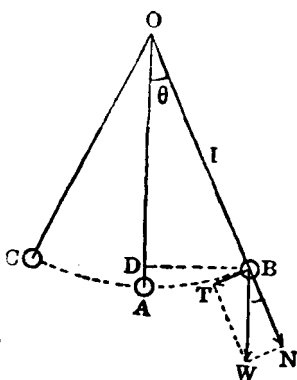


圖 116. 單擺

設擺錘之質量為 m , 則 $W = mg$. 由圖知

$$N = W \cos \theta = mg \cos \theta,$$

$$T = W \sin \theta = mg \sin \theta.$$

可知擺錘向 A 點運動之加速度 a 為

$$a = g \sin \theta = g \cdot \frac{BD}{l}.$$

當幅角甚小時, 則 \widehat{BA} 可視為與 BD 相等, 由上式可知加速度 a 與擺錘距 A 之距離成正比, 且其方向常向 A 點, 故單擺之運動亦為簡諧運動, 其週期 T 應為

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\text{振幅}}{\text{最大加速度}}},$$

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

化簡之，即得

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

由此式可得擺之定律如下：

單擺之週期，與擺長之平方根成正比例，而與振幅之大小，及擺錘之質量無關。

故在同一地點，等長之擺，週期亦等，是曰擺之等時性 (Isochronism)。計時之鐘，即利用此項性質而成。

又由上式，若先測定 l 及 T ，則可推算 g 之數值。通常欲測各地之重力加速度，多利用單擺，方法頗簡單，結果易正確。

107. 轉動 (Rotation)

物體之各質點，均繞同一軸線之周圍作圓周運動者，曰轉動。其中任一質點轉動一周時，所有質點亦同時轉動一周，故轉動體上各質點之週期皆相等。設某質點與軸線之距離為 r ，週期為 T ，則此點轉動之快慢 v 為

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

由此式可知轉動體上各質點之快慢不等，與距軸線之遠近成正比例。

地球以通過兩極之直線為軸，自轉不息，其上各點皆有離心力，而離心力 F 等於 $\frac{mv^2}{r}$ ，將上式中 v 之數值代入之，則得



圖 117. 地球

$$F = \frac{m}{r} \left(\frac{2\pi r}{T} \right)^2 = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}$$

近兩極處， r 較小，離心力亦小；近赤道處 r 較大，離心力亦大。久而久之，致其赤道直徑較兩極距離為大，此地球之所以成爲扁平球體也。

轉動體因慣性之作用，常具有保持其轉動軸線方向之性質，例如急轉之陀

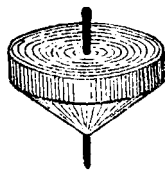


圖 18. 陀螺

螺可以直立者，即由此故，進行之腳踏車，不易傾倒者，理亦相同。

108. 角速度 (Angular Velocity)

轉動體上之各點，所轉過之角度，名曰物體之角移 (Angular displacement)。角移之單位，通常用弧度 (Radian)。

因 1 周角 = 2π 弧度 = 360° ，故 1 弧度 = $\frac{360^\circ}{2\pi} = 57.3^\circ$ 。

設物體之角移爲 θ 弧度，其所經之弧長爲 s ，弧之半徑爲 r ，則其關係如下式：

$$s = r\theta \quad \text{或} \quad \theta = \frac{s}{r}$$

角移之變化率，名曰角速度，其單位爲每秒若干弧度，簡書爲弧度/秒。設在 t 秒內之角移爲 θ ，則其平均角速度 ω 爲

$$\omega = \frac{\theta}{t} \text{ 弧度/秒。}$$

角速度不變之轉動，稱爲等角速轉動 (Uniform rotation)。與角速度相對，前此所討論之速度，可名爲線速度 (Linear velocity)。由 $s = r\theta$ ，

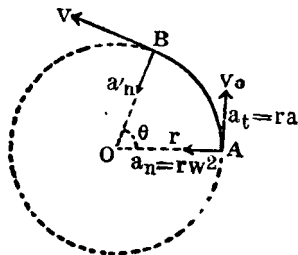


圖 119. 角速度與線速度

可得 $\frac{s}{t} = r \frac{\theta}{t}$, 而 $\frac{s}{t}$ 即為線速度 v , $\frac{\theta}{t}$ 即為角速度 ω , 故角

速度與線速度之關係, 可以下式表之:

$$v = r\omega,$$

上式中速度 v 之方向, 係沿圓周之切線, 故亦稱**切線速度** (Tangential velocity).

109. 角加速度 (Angular Acceleration)

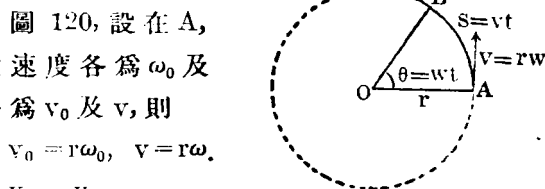
物體轉動時, 若其角速度不等, 則在每秒內所生角速度之變化, 曰**角加速度**. 其單位為每秒每秒若干弧度, 簡書之為弧度/秒². 角加速度不變之轉動, 曰**等角加速轉動** (Uniformly accelerated rotation). 設 α 為角加速度, ω_0 及 ω 各為開始及 t 秒之末之瞬時角速度, θ 為 t 秒內之角移, 則仿 § 87 等加速直線運動之例, 可得下列三公式:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \dots\dots\dots(1)$$

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \dots\dots\dots(2)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\theta \dots\dots\dots(3)$$

因角速度不等時, 則切線速度亦不等, 故沿切線方向必有一加速度, 是曰**切線加速度** (Tangential acceleration). 通常以 a_t 表之. 如圖 120, 設在 A, B 兩點時之角速度各為 ω_0 及 ω , 切線速度各為 v_0 及 v , 則



則

$$v_0 = r\omega_0, \quad v = r\omega.$$

由 (1) 式得 $\frac{v}{r} = \frac{v_0}{r} + \alpha t,$

圖 120. 角加速度與線加速度

$$\text{或} \quad \frac{v-v_0}{t} = r\alpha,$$

$$\text{而} \quad \frac{v-v_0}{t} = a_t,$$

$$\text{故} \quad a_t = r\alpha.$$

又上述圓周運動之加速度，其方向與切線垂直，故曰法線加速度(Normal acceleration)，以 a_n 表之，則因

$$a_n = \frac{v^2}{r},$$

$$\text{而} \quad v = r\omega,$$

$$\text{故} \quad a_n = r\omega^2.$$

因 a_t 及 a_n 互相垂直，故質點在各時刻之總加速度應為

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = r\sqrt{\alpha^2 + \omega^4}.$$

110. 飛機 (Aeroplane)

飛機為交通之利器，軍事上尤關重要。機之前面有一推進機(Propeller)，狀似竹蜻蜓，用輕油機關，使推進機迅速轉動時，空氣被推向後，

同時利用空氣之反作用，使飛機前進。此時翼面受有風壓，如圖 121 中之 D，將 D 分解之為 P、Q 兩力，P 之作用，可使飛機上昇，故稱舉揚力

(Lift)，Q 之作用，足以妨礙飛機之前進，故稱後推力(Drift)。故飛行時，舉揚力宜大，後推力宜小。又飛機進行時，翼面下空氣密度加大，翼面上部，氣壓甚小，成一低壓力部分，

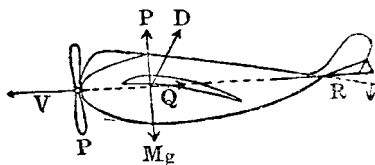


圖 121. 飛機

飛機之能上昇此爲一主要之原因。飛機尾部，裝有兩舵 (Rudder)：一爲垂直舵，司機之方向；一爲水平舵，司機之上下。

溫習提要

[定 義]

1. 圓周運動：
2. 向心力與離心力：
3. 週期運動：
4. 週期與振數：
5. 簡諧運動：
6. 單擺：
7. 等時性：
8. 轉動：
9. 角移：
10. 角速度：
11. 角加速度：

12. 切線加速度與法線加速度:

13. 舉揚力及後推力:

[定 律]

擺之定律:

公 式

1. 圓周運動之加速度:
2. 向心力及離心力:
3. 圓周運動之週期:
4. 單擺之週期:
5. 位移與角移之關係:
6. 切線速度與角速度之關係:
7. 切線加速度與角加速度之關係:
8. 法線加速度與角速度之關係:

單 位]

1. 角速度之單位:
2. 角加速度之單位:

問 題 十

1. 騎腳踏車轉變時,身體當如何?
2. 欲除去傘上之雨水時,可持傘柄急轉之,水即四散飛去,何故?
3. 於能懸 1 仟克重之繩之一端,繫一重 200 克之物體,而使其作半徑 50 厘米之圓周運動,當繩截斷時,

物體之速度若何?

4. 以繩繫盛水之桶,於鉛直面內迴轉之,使作半徑 1 米之圓周運動,欲使水不流出,則桶迴轉之快慢應若何?
5. 於長一米之線之一端,繫重 50 克之物體,持其他端而轉之,設物體之切線速度為 60 厘米/秒,求線上之張力.
6. 於長 1 米之線之一端,繫重 10 克之物體,持其他端而轉之,設此物體於 1 分間轉動 100 轉,其線適斷,求此線所能耐之最大張力.
7. 設地球停止自轉後,則在赤道處重 1 仟克之物體,應重幾克? (地球半徑 = 6.4×10^8 厘米;赤道上 $g = 978$ 厘米/秒²)
3. 地球自轉之快慢,增加為現時之若干倍時,則赤道上之物體,始無重量.
9. 有每日遲緩 5 秒之鐘,欲調整之,須將其擺長縮短若干? $T = \frac{3}{4} \times \frac{4}{1} \cdot \frac{5}{3} \quad T' = \frac{2}{5} \cdot \frac{4}{3}$
10. 甲擺往復振動 4 次時,乙擺適振動 5 次,求二擺擺長之比.
11. 將長 99.2 厘米之擺,置於某地而使之擺動,計其週期為 2 秒,求該地之重力加速度.
12. 礮管及鎗筒內壁,均製成螺旋狀之線條,用意若何?
13. 設有一輪,其半徑為 1 呎,每分鐘轉動 5 次,試求輪周上一點之切線速度,及在距中心為 8 吋處之切線速度,又此兩點之角加速度各若干?
14. 設有一輪,其半徑為 $1/2$ 米,在某時刻其角速度為每分鐘轉動 12 次,同時其角加速度為 0.3 弧度/秒².

試求：

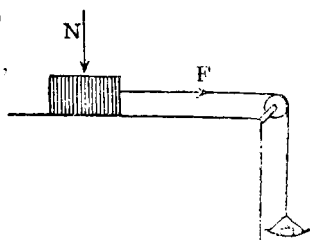
- (1) 在該時刻，輪周上一點之角速度，及切線速度。
- (2) 在該時刻，該點之切線加速度，法線加速度，及其總加速度。

第六章 摩擦

111. 摩擦 (Friction)

欲使一物體在他物體之表面上運動時，必須加力，足見兩物體之間，具有一種阻止運動之力，是曰**摩擦力**。

或略稱曰**摩擦**。如圖 122 置物體於桌上，繫繩之一端於物體，令其跨過一滑輪，而於他端懸盤，置砝碼於盤內，初則物體不動。若逐漸增加砝碼，終至物體能開始滑動。由此可知物體間之**摩擦力**，有一定之限度，此限



度曰**最大摩擦 (Maximum friction)**。當物體開始滑動時，繩上之張力 F ，即為最大摩擦，垂直作用於桌面之壓力 N ，則謂之**直壓力 (Normal pressure)**。

圖 122. 最大摩擦與直壓力

112. 摩擦之種類

一物體在他物體上移動時，所生之摩擦，曰**滑動摩擦 (Sliding friction)**。滑動摩擦可分兩種，在物體將次開始運動以前所表現者，曰**靜摩擦 (Static friction)**；在物體既已運動之後所表現者，曰**動摩擦 (Kinetic friction)**。動摩擦恆較靜摩擦為小。

一物體在他物體上滾動時，所生之摩擦，曰**滾動摩擦 (Rolling friction)**，例如圖 123，車輪在軌道上滾動時，

軌道即起高低之變化，輪之下方略凹，前方稍稍拱起，足以妨礙車輪之前進，是即滾動摩擦，其值恆較滑動摩擦為小。

又物體在空氣或水中運動時，恆受有空氣或水之阻力；煤氣或水在鐵管中通過時，亦受有管壁之阻力；如是之阻力，曰流體摩擦 (Friction of fluids)。

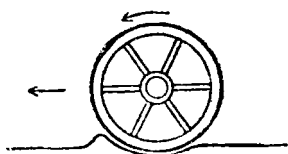


圖 123. 滾動摩擦

113. 摩擦之定律 (Law of Friction)

摩陵 (Morin) 及庫倫 (Coulomb) 兩氏研究摩擦力，由實驗之結果，得下列之定律：

最大摩擦與兩接觸面間之直壓力成正比例，而與接觸面積之大小無關。

設 F 為最大摩擦， N 為直壓力，則

$$\frac{F}{N} = \mu,$$

上式中之 μ 為比例常數，其值由接觸物質之性質而定，稱為摩擦係數 (Coefficient of friction)。例如乾燥之木與木間，其靜摩擦係數約為 0.6，動摩擦係數約為 0.5；鑄鐵與鑄鐵間塗油時，其靜摩擦係數約為 0.16，動摩擦係數約為 0.15；又鑄鐵與木之間，略塗以水，則其靜摩擦係數約為 0.65，動摩擦係數約為 0.22。又當兩接觸面間之相對速度不甚大時，則動摩擦係數之值，與運動之速度無關。

114. 摩擦係數之測法

A) 滑動摩擦係數 如圖 124，置物體於斜面上，而

逐漸增加其傾斜角度,至物體之重量,沿斜面之分力等於最大摩擦時,則物體開始滑下,此時斜面之傾斜角度,稱為摩擦限角(Limiting angle of friction),或曰靜止角(Angle of repose),意即斜面之傾斜角若超過此極限值時,則物體不能再成靜止矣,茲命 θ 表靜止角,則如圖可得

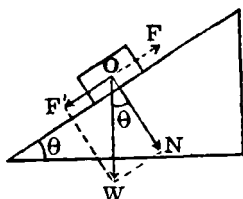
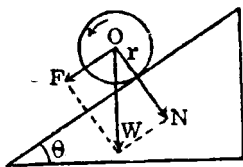


圖 24. 滑動摩擦係數

直壓力	$N = W \cos \theta,$
最大摩擦	$F = W \sin \theta,$
摩擦係數	$\mu = \frac{F}{N} = \frac{W \sin \theta}{W \cos \theta},$
故	$\mu = \tan \theta.$

故若測得靜止角 θ 之大小,即可推求滑動摩擦係數之值。

(B) 滾動摩擦係數 如圖 125, 置圓柱體於斜面上, 而逐漸增加其傾斜角度, 至物體開始滾下為止, 此時圓柱沿斜面滾下之力矩為 $Fr = Wr \sin \theta$, 直壓力 $N = W \cos \theta$, 命 γ 為滾動摩擦係數, 則有



$$W r \sin \theta = \gamma W \cos \theta,$$

故 $\gamma = r \tan \theta.$

圖 125 滾動摩擦係數

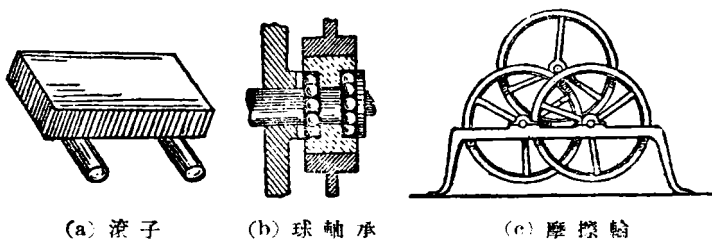
可知滾動摩擦係數之值, 亦可利用斜面以測之。

115. 減少摩擦之方法

摩擦愈大, 則消耗之功愈多, 故使用機械時, 常須設法減少摩擦, 最簡單之方法, 即於接觸面間, 塗以石墨或

機械油，使之潤滑，摩擦即可減少。此種物質，即稱曰滑料 (Lubricator)。

又因滾動摩擦常較滑動摩擦為小，故利用滾動以代滑動，亦為減少摩擦之常用方法。例如搬運重物時所用之滾子 Roller，車軸裝於球軸承 (Ball bearing) 中，其目的均在使接觸面間不受滑動摩擦，而受滾動摩擦。又如置一輪之軸於他兩輪之緣上，則轉動極易，其理亦與上同，此種裝置，名曰摩擦輪 (Friction wheel)。



(a) 滾子

(b) 球軸承

(c) 摩擦輪

圖 126. 減少摩擦之方法

116. 流體摩擦

由實驗之結果，關於流體摩擦，有一定律如下：

凡流體對於物體之阻力 F ，與流體之密度 d ，速度 v 之平方，及與運動方向成垂直之橫斷面積 s 三者成正比例。

以式表之即

$$F \propto s d v^2,$$

$$\text{或 } F = k s d v^2.$$

上式中 k 為比例常數，其值由流體之種類而定。船首多尖如刀稜，可使其所受之摩擦減小。又如高處落下之物體，其速度漸次增加，空氣阻力亦同時俱增，終至阻力與

重力適相平衡時，物體遂成等速落下。如圖 1-7 之降落傘 (Parachute) 即為利用空氣阻力之器械。飛行者由氣球或飛機上降落時，將傘張開，可以安全達於地上。傘頂有孔，使空氣由孔逸出，傘因得保持其直立之狀況。

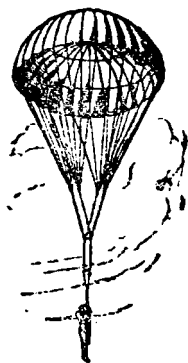


圖 127. 降落傘

溫習提要

[定義]

1. 摩擦:
2. 最大摩擦:
3. 摩擦 { 滑動摩擦:
滾動摩擦:
流體摩擦:
4. 摩擦係數:
5. 靜止角:

[定律]

1. 摩陵或庫倫之摩擦定律:
2. 流體摩擦之定律:

[方法]

1. 摩擦係數之測法:

2. 減少摩擦之方法:

問題十一

1. 車在石子路上易行,在鬆泥路上難行,何故?
2. 摩擦亦有利益否?
3. 有重 5 仟克之物體,靜置於水平面上,設兩接觸面間之摩擦係數為 0.5, 欲使此物依水平方向移動,需力幾何?
4. 以繩縛重物而曳之,若曳之愈力必握之愈緊,何故?
5. 於水平鐵板上,載一重 2 仟克之鐵塊,而以 400 克之力曳之,鐵塊始行移動.若所載鐵塊之重為 5 仟克時,則須用幾克之力,始能曳之使動?
6. 置物體於水平木板上,用 500 克之力,始能使之移動,如於物體上再加一重 3 仟克之砝碼時,則須用 800 克之力,始能使之移動.求其摩擦係數,及物體之重量.
7. 有重 100 克之物體,置於長 1 米之斜面上,當此斜面之高,漸次增加至 10 厘米時,物體即開始滑下,求其最大摩擦,及摩擦係數.
8. 一物體重 4 磅,置於斜面上,若斜面之傾斜角度增至 30° 時,物體即可開始滑動,設在傾斜角為 60° 時,而欲使物體不向下滑動,則須用若干之力以支持之! (力之方向,與斜面平行)
9. 雨點自高空落至地面,何以速度並不甚大?
10. 飛艇上之氣球,並非球形,而略似橄欖,用意何在?

第七章 能量

117. 能 (Energy)

張弓可以射箭,箭發可以傷人,二者皆具有作功之要素,此種要素,稱之曰能。他如舉高之重錘,受壓之空氣,飛行之彈丸,急流之瀑布,莫不可以作功,即莫不具有能量,故曰能者,乃功之要素;功者即能之表現而已。能與功之關係既如此,故凡物體所具能量之大小,即可以其所作之功測之,因此能之單位,完全與功相同。

118. 功之絕對單位

功之實用單位,前已述之, (參閱 § 64) 若力之單位,不用克,磅等重力單位,而改用達因,磅達等絕對單位時,則功之單位亦成爲絕對單位,茲分述於下:

(a) **C. G. S. 制** 以 1 達因之力,使物體依力之方向,移動 1 厘米之功,爲功之單位,命曰 **1 爾格 (Erg)**。

爾格之一千萬位,稱爲**焦耳 (Joule)**,亦爲常用之單位,即

$$1 \text{ 焦耳} = 10^7 \text{ 爾格}.$$

又爾格與克厘米之關係如下:

$$1 \text{ 克厘米} = 980 \text{ 爾格}.$$

(b) **F. P. S. 制** 以 1 磅達之力,使物體依力之方向,移動 1 英尺之功,爲功之單位,名曰 **1 呎磅達 (Foot poundal)**。

其與呎磅之關係爲：

$$1 \text{ 呎磅} = 32 \text{ 呎磅達。}$$

119. 瓦特 (Watt)

工業上常用馬力爲功率之單位（參閱 § 65），而在電氣工業中，則多以瓦特表功率之大小，1 瓦特即爲每秒作功 1 焦耳之功率，其與馬力之關係爲：

$$1 \text{ 馬力} = 746 \text{ 瓦特。}$$

瓦特之千倍曰仟瓦特 (Kilowatt)，簡書爲 k. w.，1 馬力約合 $\frac{3}{4}$ k. w.

120. 位能 (Potential Energy)

物體之能量，有因其位置之改變，或由其所蓄之勢而生者，謂之位能，或曰勢能，通常以 P. E. 表之。例如將一重物舉高後，其所有之能量，即爲位能。此項能量之大小，即可以舉高時所作之功測之。設物體之質量爲 m 克，將其舉高 h 厘米，必須作功 mgh 爾格，故物體所有之位能爲

$$P. E. = mgh \quad \text{爾格}$$

若以 g 除之，則

$$P. E. = mh \quad \text{克厘米}$$

121. 動能 (Kinetic Energy)

物體之能量有因其迅速運動而生者，謂之動能，通常以 K. E. 表之。例如鎗彈飛行時，其所有之能量，即爲動能。當其飛行之時，若遇障礙之物，則其速度逐漸減小，終至完全靜止，此時反抗阻力所作之功，即表鎗彈原有之

動能。設鎗彈之質量為 m 克，速度為 v 厘米/秒，所受阻力為 F 達因，受力後至靜止時所經之距離為 S 厘米，則所作之功為

$$FS = maS,$$

但由等減速運動之公式，可知當末速度為零時，應有

$$v^2 - 2aS = 0,$$

$$aS = \frac{1}{2}v^2,$$

代入上式，即得

$$FS = \frac{1}{2}mv^2,$$

故動能 $K. E. = \frac{1}{2}mv^2$, 爾格

若以 g 除之，則

$$K. E. = \frac{mv^2}{2g} \cdot \quad \text{克厘米}$$

122. 能之變化(Transformation of Energy)

以上所述之位能與動能，可合稱之曰機械能(Mechanical energy)。一物體所有之機械能，可以移至他物體上，或由一種狀態變為他種狀態，例如挽弓射箭，弓之能量，即傳遞至箭上，此能量移轉之例也。又如一物，鉛直拋上，速度漸減，離地漸高，故動能減小，而位能增大，此動能變位能之例也。若令高處之物，自由落下，其與地面漸次接近，而其速度，則漸增加，故位能減小，而動能增大，此位能變動能之例也。除機械能之外，尚有熱能，電能等等，狀態不一，均可互相改變，是曰能之變化。

123. 能量不減(Conservation of Energy)

各態之能，雖可互相改變，或由一物體移至他物體

上,但在變化前後,其量相等,換言之,即
 宇宙間所有之能,其總量恆
 爲一定,不因任何變化而有所
 增減者也。

是曰**能量不減律**(Law of conservation of energy)。茲舉一例以明之:如圖 128,設有一物體其質量爲 m 克將其舉高至 A 點,離地 h 厘米,則其所有之位能爲 mgh 爾格,若令此物體自由落下 h_1 厘米,而至 B 點,離地 h_2 厘米,故其位能僅爲 mgh_2 爾格,較原有位能減少

$mgh - mgh_2 = mg(h - h_2) = mgh_1$ 爾格
 而物體落下時,速度漸次增加,故動能亦漸次增加,若設物體至 B 點時之速度爲 v 厘米/秒則其動能爲

$$K. E. = \frac{1}{2} mv^2,$$

$$\text{但} \quad v^2 = gh_1,$$

$$\therefore K. E. = \frac{1}{2} m \cdot 2gh_1 = mgh_1 \text{ 爾格}$$

由是可知物體落至 B 點時,其所得之動能,即等於所失之位能,又在 B 點時,位能與動能之和爲

$$\begin{aligned} mgh_2 + \frac{1}{2} mv^2 &= mgh_2 + mgh_1, \\ &= mg(h_2 + h_1), \\ &= mgh \quad \text{爾格} \end{aligned}$$

此即表示物體落至任何點時,其位能與動能之總和,等於原有之位能,而未嘗增減也。

124. 永久運動 (Perpetual Motion)

無論何種機械,均須有外界供給能量,而後可使作

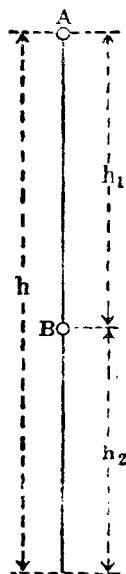


圖 128.
 能量不減

功,如能量繼續供給,則機械運轉不息,若不供給能量,而欲使之自動不已,即所謂永久運動者,乃必無之事也。蓋由能量不滅之定律,可知能量不可消滅,亦不能創生。

溫習提要

[定 義]

1. 能:
2. 機械能 $\left\{ \begin{array}{l} \text{位能:} \\ \text{動能:} \end{array} \right.$
3. 能之變化:
4. 永久運動:

[定 律]

能量不滅律:

[單 位]

1. 爾格:
2. 焦耳: \uparrow
3. 瓦特: 10^7 尔
4. 仟瓦特:

[公 式]

1. 位能:
2. 動能:

問題十二

1. 1 呎磅約合若干爾格?
2. 泰山高 1545 米,一人重 60 公斤,於 4 小時內到達山頂,問其功率爲若干瓦特?
3. 1 瓦特等於每秒若干呎磅達?
4. 礮彈重 3 仟克,以 200 米/秒之速度,鉛直向上發射,經 10 秒後,其位能爲若干?
5. 設有質量爲 100 克之物體,以 50 米/秒之初速度鉛直拋上,經 2 秒後,此物體之位能及動能各有若干?
6. 設有質量 10 克之物體,沿半徑 60 厘米之圓周等速轉動,若每分鐘共轉 35 次,求其所具之動能.
7. 有木板於此,今知其爲 150 米/秒速度之彈丸擊穿 2 厘米,設欲使此彈丸將此木板擊穿 18 厘米時,則其速度應如何?
8. 有質量 1 仟克之物體,沿高 9 厘米之斜面落下,其達於斜面最下點時之速度爲 5 厘米/秒,求其所失之能.
9. 質量 20 克之彈丸,以 40 米/秒之速度射出,穿入壁中 5 厘米,求壁之平均阻力.
10. 試就單擺之運動,說明能量之變化.

第三編 熱學

第一章 溫度及溫度計

125. 溫度(Temperature)

各種物體，冷熱不同，表示其冷熱之程度，謂之溫度。溫度之高低，吾人常藉感覺以判別之，如言溫、涼、冷、暖、嚴寒、酷熱等等，皆係由感覺所得，而形容溫度之高低者也。但僅恃感覺以定溫度，殊不正確，因各人之感覺既不相同，即使同一之人，其感覺亦常因環境而改變。例如時屆冬令，貧民苦寒，而身衣狐裘，圍爐談心者，猶謂“老天不翻北風，恐將熱壞人”也。故欲精確測定物體之溫度，必須用特製之器具，是曰溫度計。

126. 溫度計(Thermometer)

溫度計係利用物體熱脹冷縮之性質而製成，其種類不一，但最早發明者，則為伽利略之空氣溫度計(Galileo's air thermometer, 1593年)。其構造如圖 129 所示，上端為一玻璃泡(Bulb)，下連一直立之玻璃管，管徑頗細，將泡微熱之，則其中空氣膨脹，逸出少許，然後將玻璃管插入着色之水中，當泡內空氣冷卻時，瓶中之水，因大氣壓力之作用，昇入管內。若溫度發生變化，則泡內空氣或縮或脹，隨之管中水柱或昇或



圖 129.
空氣溫度計

降極爲靈敏，其昇降之度數，可由管後之尺上讀出。

最常用之溫度計有兩種，一曰水銀溫度計 (Mercurial thermometer)，一曰酒精溫度計 (Alcohol thermometer)，此種溫度計之製造，其步驟大致如次：

(1) 選擇一管壁堅厚，孔徑均勻之細玻璃管。

(2) 管之一端，吹一薄泡，其中貯以水銀，或着色之酒精。

(3) 加熱於泡，使其中液體膨脹，而自管之他端溢出，待管內空氣驅盡後，即將管口封閉。

(4) 刻度於玻璃管之旁，藉以指示溫度之高低。

127. 溫度計之固定點 (The Fixed Points of Thermometer)

用溫度計以測溫度之高低，必須有二固定點，作爲標準，即冰點及蒸汽點是也。此二點間之溫度差，名曰溫度計之基本間隔 (Fundamental interval)。茲分述其測法如下：

(1) 冰點 (Ice point) 將溫度計插入正在熔解之純潔冰屑中，如圖 130 之左方所示者，視液柱不再下降時於其頂點所在之處，刻一標線，是爲冰點。

(2) 蒸汽點 (Steam point) 如圖 130 右方所示者，爲一銅製之罐，內分兩層，其下貯純潔之水，以酒精燈熱之，使水沸騰，發出蒸汽。

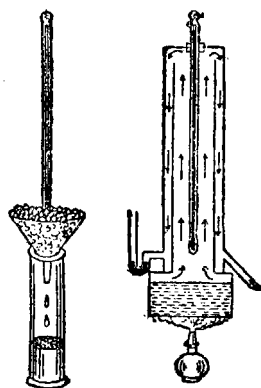


圖 130. 固定點之測法

將溫度計插入木塞中，視液柱不再上昇時，於其頂點所在之處，刻一標線，是為蒸汽點。惟此時罐內蒸汽之壓力，須適為 1 大氣壓，若壓力過大時，則須將蒸汽由右旁之管放出，過小時則可將管口塞住，使蒸汽壓力達於一大氣壓而止。左旁之曲管即為開管流體壓力計，由其中兩水銀面之高低，可知罐內蒸汽壓力之大小。

128. 溫度標 (Thermometric Scale)

溫度計上所刻之標度，謂之溫度標，或簡稱溫標。標度之分法，通常有三種：

一曰攝氏溫度標 (Celsius' thermometric scale)，以冰點作零度，蒸汽點作 100 度，而將基本間隔分為 100 等分，故亦稱百分溫度標 (Centigrade thermometric scale)，其度數用 $^{\circ}\text{C}$. 之記號表示之。

二曰華氏溫度標 (Fahrenheit's thermometric scale)，以冰、水及氯化銨之混合物之溫度為零度，而以冰點作 32 度，蒸汽點作 212 度，將基本間隔分為 180 等分，其度數用 $^{\circ}\text{F}$. 之記號表示之。

三曰列氏溫度標 (Réaumur thermometric scale)，以冰點作零度，蒸汽點作 80 度，而將其基本間隔分成為 80 等分，其度數用 $^{\circ}\text{R}$. 之記號表示之。

茲將三種溫度標之關係及化法述之如下：

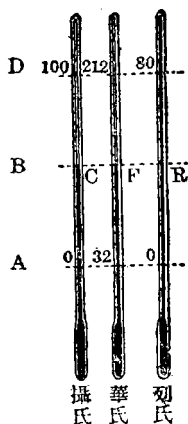


圖 131.

三種溫度標

如圖 131, A 爲冰點, D 爲蒸汽點, 在某溫度時, 水銀柱昇至 B 點, 設以 C, F, R 各表攝氏, 華氏, 列氏三種溫度計上所指示之度數, 則因

$$\frac{AB}{AD} = \frac{C}{100} = \frac{F-32}{180} = \frac{R}{80}$$

$$\text{或 } \frac{C}{5} = \frac{F-32}{9} = \frac{R}{4}$$

$$\text{故 } C = \frac{5}{9}(F-32) = \frac{5}{4}R,$$

$$F = \frac{9}{5}C + 32 = \frac{9}{4}R + 32,$$

$$R = \frac{4}{9}(F-32) = \frac{4}{5}C.$$

129. 水銀溫度計之優點

水銀溫度計之應用甚廣, 因其優點頗多故也, 茲略述之如下:

(1) 攜帶甚爲便利.

(2) 水銀與玻璃之附着力甚小, 故不致粘附於管壁.

(3) 水銀有色, 且不透光, 故其昇降, 甚易觀察.

(4) 水銀之膨脹係數(見第二章), 較玻璃爲大, 故泡不必甚大, 管徑亦不必甚細, 其所指示之度數, 仍極明顯.

(5) 水銀之比熱(見第三章)甚小, 故少量之熱, 即可增高其溫度.

(6) 水銀之凝固點(見第四章)較尋常溫度為低(-39°C .)，其沸點較尋常溫度為高(360°C .)，故其所能量度之溫度，範圍頗大，若於水銀面上，加以壓力較高之氮，則其沸點增高，此種溫度計，可以量至 500°C 。但欲量較低之溫度，則以用酒精溫度計為宜，因酒精須至 -130°C 。始行凝固也。

130. 最高及最低溫度計 (Maximum and Minimum Thermometer)

在某時間內，例如一日之中，溫度之高低，常隨時改變，最高為若干度，最低為若干度，均為研究氣象，園藝，以及養蠶，製種者所重視，因有最高及最低溫度計之發明。

最高溫度計之構造，係於水銀溫度計之管內，附設一鐵質之小指器 (Index)，如圖 132 所示。使用時，先以磁鐵將指器吸下，使與水銀柱上端相接觸，水平置之。溫度升高時，水銀膨脹，推動指器，移至左方。溫度降低，水銀收縮，而指器仍留原處不能移動。故經若干時間後，讀其指器右端所指之度數，即可知該時間內之最高溫度。

最低溫度計之構造，係於酒精溫度計之管內，附設一玻璃小指器，如圖 133 所示。使用時，先將

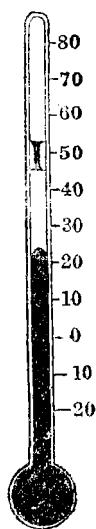


圖 132.
最高溫度計

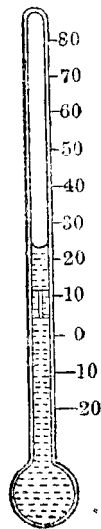


圖 133.
最低溫度計

溫度計直立，輕輕搖動，使指器落下，其上端適與酒精而相觸，然後水平置之。溫度降低時，酒精收縮，指器因受其表面張力之作用，亦隨之移於右方。溫度昇高，酒精膨脹，通過空隙而至左方，但指器仍留原處，不能移動，故經若干時間後，讀其指器左端所指之度數，即可知該時間內之最低溫度。

醫用溫度計(Clinical thermometer)亦為最高溫度計之一種，泡之上端，有一狹隙。當測驗體溫時，將其插入口中或他處，則溫度昇高，水銀膨脹，通過狹隙，進於管內。取出時，溫度降低，水銀收縮，因表面張力之作用，水銀柱在狹隙處截斷，而留於原處，故可指示其曾經達到之最高溫度。醫生使用時，必先將溫度計用力搖動，即可使水銀面降下，仍回入泡內。(參閱圖 134)。

若將最高溫度計與最低溫度計合併之成爲一種兩用之器，則曰息克斯最高最低溫度計(Six's maximum and minimum thermometer)，其構造如圖 135 所示。自 B 至 A 盛酒精，自 A 至 C 盛水銀，自 C 至 D 又爲酒精。

當溫度昇高時，B 內酒精膨脹，A 處之水銀面下降，而 C 處則上昇，右管內之指器 i' 被推向上。溫度降低時，則 C 處之水銀面下降，而 A 處上昇，左管內之指器 i 亦被推向上，指器之旁，附有彈力微弱



圖 134.

醫用溫度計

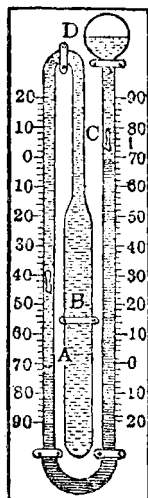


圖 135.

息克斯溫度計

之彈簧，適與管壁相觸，因此推上之後，非用磁鐵吸引，不致落下，故左管內指器下端所指之度數，為最低溫度，右管內指器下端所指之度數，為最高溫度。

溫習提要

[定 義]

1. 溫度：
2. 冰點：
3. 蒸汽點：
4. 基本間隔：
5. 溫度標：
 - (1) 攝氏：
 - (2) 華氏：
 - (3) 列氏：

[公 式]

三種溫度標之關係及化法：

[儀 器]

1. 空氣溫度計：

2. 水銀溫度計:
3. 酒精溫度計:
4. 最高溫度計:
5. 最低溫度計:
6. 醫用溫度計:
7. 息克斯溫度計:

問題十三

1. 攝氏溫度計上18度相當於華氏幾度?
2. 人體溫度爲 37°C ., 合華氏, 列氏各若干度?
3. 攝氏及華氏溫度計上所指示之度數相等時, 溫度如何?
4. 列氏及華氏溫度計上所指示之度數相等時, 溫度如何?
5. 華氏溫度標等於攝氏溫度標之二倍時, 溫度如何?
6. 夏季日間最高之溫度爲 90°F ., 晚間最低之溫度爲 45°C ., 各爲攝氏若干度?
7. 地球表面上最低之溫度爲 -98°F ., 最高之溫度爲 136°F ., 相差若干度? 試用華氏, 攝氏及列氏溫度標表出之.
8. 試比較水銀溫度計與酒精溫度計之優劣.

第二章 膨脹及其應用

131. 固體之膨脹(Expansion of Solids)

物體受熱，溫度升高，其長度、面積、容積皆隨之增加。此種情形，分別稱之曰線膨脹、面膨脹及容積膨脹。茲將各種膨脹係數研究之：

(1) 線脹係數 (Coefficient of linear expansion) 如圖

136 所示，將一金屬棒插於 A, B 兩直柱之孔中，旋緊 A 處之螺旋，使棒之一端固定，他端適與指針之短臂 D 相接觸。取火熱之，則見指針向上轉動，可知棒已增

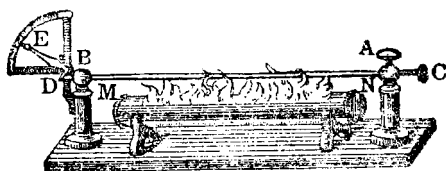


圖 136. 線膨脹

長。若取各種金屬棒同樣試之，則指針轉動之角度不同，故知膨脹之程度，與物質之種類有關。凡物體之溫度升高 1°C . 時，其所增加之長度與原長之比，謂之該物質之線脹係數。換言之，所謂線脹係數者，即當溫度上昇 1°C . 時，單位長所增加之長度也。

設 $l_0 = 0^{\circ}\text{C}$. 時物體之長度，

$l = t^{\circ}\text{C}$. 時物體之長度，

$\alpha =$ 物體之線脹係數。

則由定義可得

$$\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 t}.$$

故若測得 l_0 , l 及 t 諸數值,即可求出線脹係數。數種物質之線脹係數如表 7 所示:

表 7. 固體之線脹係數

物 質	α	物 質	α
因鋼 鎳 6%	0.000031	銅	0.00007
瓷 鋼 64%	0.000003	黃 銅	0.00009
玻 璃	0.000009	金	0.000019
鉑	0.000009	錫	0.000022
鐵	0.000012	鉛	0.000029
銀	0.000014	鋅	0.000029

(2) 面脹係數 (Coefficient of superficial expansion) 物體之溫度升高 1°C . 時,其所增加之面積與原面積之比,曰面脹係數。如圖 137,設有一正方形之板,上昇 1°C . 其各邊之長為 1,則當溫度升高 1°C 時,其各邊所增之長必等於線脹係數 α ,故增加之面積應為

$$(1+\alpha)^2 - 1^2 = 2\alpha + \alpha^2.$$

命 β 表面脹係數,則由定義,得

$$\beta = \frac{2\alpha + \alpha^2}{1^2 \times 1} = 2\alpha + \alpha^2.$$

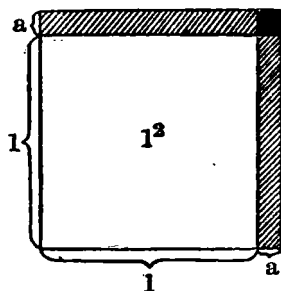


圖 137. 面膨脹

觀表 7 可知 α 之值均甚小,故 α^2 (即圖中右上角黑小塊之面積) 當更小,可以略而不計,於是

$$\beta = 2\alpha.$$

即面脹係數約等於線脹係數之二倍。

(3) 體脹係數 (Coefficient of cubical expansion) 如圖

138 所示,當銅球冷時,適可自由通過圈內,但當加熱後則不能通過此即容積膨脹之故.待其冷縮,則又自行跌落.凡物體之溫度升高 1°C . 時,其所增加之體積與原體積之比,曰體脹係數.

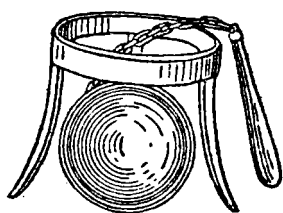


圖 138. 容積膨脹

設 $v_0 = 0^{\circ}\text{C}$. 時物體之容積,

$v = t^{\circ}\text{C}$. 時物體之容積,

$\gamma =$ 物體之體脹係數.

則由定義可得

$$\gamma = \frac{v - v_0}{v_0 t},$$

或 $v = v_0(1 + \gamma t)$.

又設有一立方體,其每邊之長為 1,則當溫度升高 1°C . 時,與 (3) 同理可得

$$\gamma = \frac{(1+a)^3 - 1^3}{1^3 \times 1} = 3a + 3a^2 + a^3.$$

略去 a 之高次項,即得

$$\gamma = 3a.$$

故體脹係數約等於線脹係數之三倍.

132. 固體線膨脹之應用

固體之線膨脹,應用甚多,茲舉數例於下:

(1) 木桶上之鐵箍,及車輪上之鐵圈,均須先行燒熱,使之伸長,然後套上,及冷收縮,即能箍緊,不致脫落.

(2) 四季之中,溫度不同,鐵軌連結,必留空隙,免因膨脹而生彎曲.同理建築鐵橋時,亦須妥為設計,使鋼鐵有伸縮之餘地,其情形如圖 139 所示.

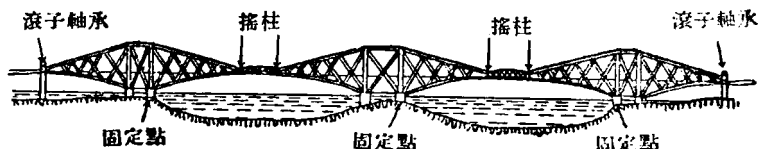


圖 139. 鐵橋

(3) 補償擺 (Compensated pendulum) 擺之週期,因擺長而異,如 §106 所述.時鐘之擺錘,若用線脹係數極小之因鋼 (Invar) 棒懸之,則擺長之改變極微,尚不致影響時間之快慢.若用其他金屬,則冬季週期變小,而夏季週期變大,時間快慢,殊不正確.欲免此弊,當用補償擺.其構造如圖 140 所示,係用兩組不同之金屬棒組合而成.例如一組用鐵棒 (F),線脹係數較小.一組用錐棒 (Z),線脹係數較大.觀圖易知鐵棒伸長,則可使擺錘降低.錐棒伸長,則可使擺錘升高.若於製造時,精密計算,適當配合,使一昇一降,恰足抵償,則溫度雖異,而擺長不變,以之記時,當無錯誤矣.

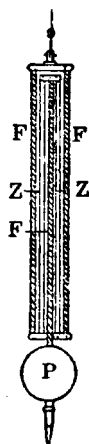


圖 140.

(4) 溫度記錄器 (Thermograph) 如圖 141 補償擺為兩種金屬釘合而成之複金屬板,其上為銅板,其下為鐵板.在某較低溫度時,兩板長短相同,如 (1) 所示.加高溫度,則因銅之膨脹較鐵為大,此棒遂成彎曲,如 (2) 所示.利用此種性質,將一複金屬板曲



圖 141. 複金屬板

成環狀，固定其一端，而於他端裝一指針，針端附一筆尖，使與可轉圓筒上之紙面相觸，如圖 142 所示。溫度昇高時，則指針向上，溫度降低時，則指針向下，故可於紙上畫一曲線，以示各時刻氣溫之變化，是曰溫度記錄器，為研究氣象者所必備之儀器。

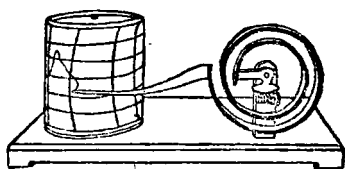


圖 142. 溫度記錄器

133. 液體之膨脹 (Expansion of Liquids)

第一章中所述之水銀或酒精溫度計，皆係應用液體之膨脹而製成，蓋各種液體，亦有熱脹冷縮之性質也。惟液體無固定之形狀，故通常論液體之膨脹，僅及其容積膨脹而已。液體之體脹係數，可用下法測定之：

如圖 143，兩玻璃筒之下，以一細管連結之，盛欲測之液體於其中，待兩液面相平時，將細管中央之活栓閉住。然後在左筒周圍繞以冰屑，使液體溫度降至 0°C ，右筒外面，注入熱水，使液體溫度昇至 $t^{\circ}\text{C}$ 。再將活栓放開，則左筒內之液面必降低，而右面則昇高，因此時右筒內液體之密度較大故也。設 h_0 , h 為兩液面之高， d_0 , d 為兩筒內液體之密度，則因壓力相等之故，必有

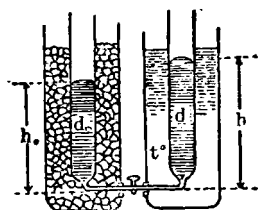


圖 143.

液體體脹係數之測法

$$h_0 d_0 = h d \dots \dots \dots (1)$$

命 v_0 , v 表 0°C 及 $t^{\circ}\text{C}$ 時一定質量液體之體積，則

$$v_0 d_0 = v d \dots \dots \dots (2)$$

(1). () 兩式相除, 則得

$$\frac{v_0}{h_0} = \frac{v}{h} \dots \dots \dots (3)$$

設液體之體脹係數為 k , 則

$$v = v_0(1 + kt),$$

代入 (3) 式, 並消去 v_0 , 即得

$$\frac{1}{h_0} = \frac{1 + kt}{h},$$

$$\therefore k = \frac{h - h_0}{h_0 t}.$$

故若測得 h, h_0 及 t , 即可計算 k 之數值. 數種液體之體脹係數如表 8.

表 8. 液體之體脹係數

液	體	k	液	體	k
水	銀	0.00018	酒	精	0.00110
硫	酸	0.00049	木	精	0.00115
白	蠟	0.00090		壓	0.00167

關於液體之膨脹, 尚有一事不可不注意者, 即當溫度昇高時, 不特液體膨脹, 同時盛液之容器, 亦必增大其容積, 故亦須顧慮及之也. 如圖 144, 試管內之液面, 本在 a 處, 加高溫度, 則液面昇至 b 處, 此 a, b 兩液面間之容積, 為外觀上之膨脹, 故曰視膨脹 (Apparent expansion). 但試管受熱, 其自身亦必膨脹, 如虛線所示者, 因之液面必先由 a 降至 c 處, 而液體之膨脹係數, 均較固體為大, 故再昇上至 b 處, 由是可知液體在實際上

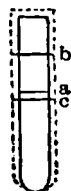


圖 144. 視膨脹

之膨脹,乃爲 c, b 兩液面間之容積,是曰實膨脹 (Real expansion).

134. 水之膨脹(Expansion of Water)

水之膨脹,與一般液體不同,當其溫度由 0°C . 逐漸昇高時,其體積反而縮小,至 4°C . 時爲最小, 4°C . 以上則復隨溫度之上升,而增大其體積,但其膨脹係數仍因溫度之間隔而異,例如自 5°C . 至 10°C . 膨脹係數爲 53×10^{-6} , 自 10°C . 至 20°C . 則爲 150×10^{-6} , 自 15°C . 至 100°C . 係數之平均值約爲 372×10^{-6} . 圖 145 之曲線,即示明水膨脹之情形,橫軸表溫度,縱軸表水之容度 (Specific volume), 即 1 克水所佔之容積,以 c. c. 爲單位所表出之數值, 4°C . 之水,容度爲 1.

水之容度,以 4°C . 時爲最小,故其密度當以 4°C . 時爲最大,此事可用圖 146 之器具實驗之法,於長圓筒中盛水,其中部圍以冰與食鹽之混合物,使水之溫度降低,結果可試得上部之水,其溫度由 4°C . 降低至 3° , 2° , 1° , 0° , 而結冰時,下部之冰仍保持 4°C . 之溫度,可知 4°C . 時水之密度,必較 0°C . 時爲大也.

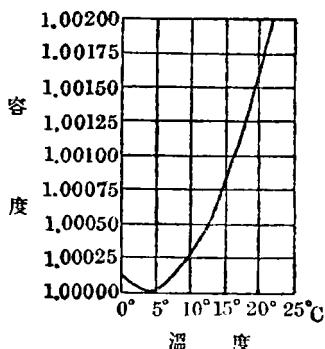


圖 145. 水之膨脹曲線

線,即示明水膨脹之情形

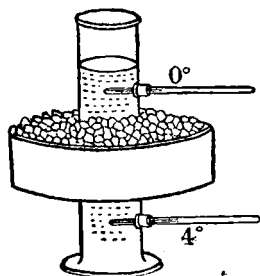


圖 146. 水之最大密度

結果可試得上部之水,其溫度由 4°C . 降低至 3° , 2° , 1° , 0° , 而結冰時,下部之冰仍保持 4°C . 之溫度,可知 4°C . 時水之密度,必較 0°C .

時爲大也.

135. 氣體之膨脹(Expansion of Gases)

氣體之膨脹，甚為顯著。如圖 147 所示，為以小管連結之兩玻璃泡，其中封入着色之液體，液面以上留有空氣。若以一



圖 047. 氣體之膨脹

掌握左泡，則液體即盡行移至右泡內，反之亦然，此即由於空氣膨脹之故。考各種氣體，其膨脹係數殆皆相同。惟氣體膨脹時，對於壓力之關係至鉅，故氣體受熱後，所生之變化，當分定壓及定容兩方面討論之。據實測之結果，知

一定質量之氣體，在一定壓力之下，溫度每昇高 1°C ，其體積殆增加 0°C 時

體積之 $\frac{1}{273}$ 。

是曰給呂薩克定律(Gay-Lussac's law)。 $\frac{1}{273} = 0.003663$ ，即

為各種氣體在定壓下之體脹係數。

設 V_0 為 0°C 時一定量氣體之體積。

V_1 為 $t_1^{\circ}\text{C}$ 時之體積，壓力仍與 0°C 時相同。

V_2 為 $t_2^{\circ}\text{C}$ 時之體積，壓力仍不變。

$$\text{則 } V_1 = V_0 \left(1 + \frac{t_1}{273} \right) = V_0 \frac{273 + t_1}{273},$$

$$V_2 = V_0 \left(1 + \frac{t_2}{273} \right) = V_0 \frac{273 + t_2}{273},$$

兩式相除，則得

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{273 + t_1}{273 + t_2} \dots\dots\dots(\text{I})$$

又加熱於氣體而不變其容積時，則其壓力之增加，亦有一定之規律，即

一定質量之氣體，在一定容積之下，溫度每升高 1°C ，其壓力殆增加 $\frac{1}{273}$ 時壓力之 $\frac{1}{273}$ 。

是曰查理定律 (Charles' law) $\frac{1}{273} = 0.003663$ ，即為各種氣體在定容下之壓力係數 (Pressure coefficient)。

設 P_0 為 0°C 時一定量氣體之壓力。

P_1 為 $t_1^{\circ}\text{C}$ 時之壓力，體積仍與 0°C 時相同。

P_2 為 $t_2^{\circ}\text{C}$ 時之壓力，體積仍不變。

$$\text{則 } P_1 = P_0 \left(1 + \frac{t_1}{273} \right) = P_0 \frac{273 + t_1}{273},$$

$$P_2 = P_0 \left(1 + \frac{t_2}{273} \right) = P_0 \frac{273 + t_2}{273}.$$

兩式相除，則得

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{273 + t_1}{273 + t_2} \dots\dots\dots(\text{II})$$

136. 絕對溫度 (Absolute Temperature)

由上節所述之定理，可知溫度若降至 0°C 以下 273° 時，則一切氣體之體積及壓力，均將為零，似與物質具有廣延及分子運動之學說相抵觸，但實際上所有氣體，在未達到此低溫度之前，早經變成液體或固體，故不能適用給呂薩克定律及查理定律也。此 -273°C 之溫度，通常稱為絕對零度 (Absolute zero)，以此為溫度之起點，而

標度仍採用攝氏溫度標時，則量得之溫度，名曰絕對溫度，命 $t^{\circ}\text{C}$ 。表攝氏溫度， $T^{\circ}\text{A}$ 表與之相當之絕對溫度，則

$$T = 273 + t,$$

由是上節中之公式(I)可改書為

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

即壓力不變時，氣體之體積，與絕對溫度成正比例。

同理(II)式亦可書為

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

即體積不變時，氣體之壓力，與絕對溫度成正比例。

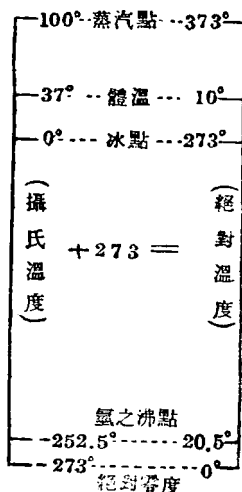


圖 148.

攝氏與絕對溫度之關係

137. 氣體定律(Gas Law)

給呂薩克，查理，及波義耳諸氏之定律，皆就氣體之壓力、體積、溫度三者之中，假定其一不變，而討論其餘二者之關係。若氣體之溫度改變時，其體積與壓力亦同時改變，則其關係可由下法求之：

設 V_1 為溫度等於 $t_1^{\circ}\text{C}$ ，壓力等於 P_1 時之體積， V 為溫度等於 $t_2^{\circ}\text{C}$ ，而壓力仍為 P 時之體積， V_2 為溫度等於 $t_2^{\circ}\text{C}$ ，壓力變為 P_2 時之體積。則由給呂薩克定律，得

$$\frac{V_1}{V} = \frac{T_1}{T_2} \dots \dots \dots (1)$$

又由波義耳定律,得

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \dots \dots \dots (2)$$

由(2)式,可得

$$V = \frac{P_2 V_2}{P_1},$$

代入(1)式,則得

$$\frac{P_1 V_1}{P_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

即

一定質量之氣體,其體積與壓力之相乘積,與絕對溫度成正比例。

是曰**氣體定律**。因此定律乃由波義耳定律及給呂薩克或查理定律合併而得,故亦稱**波義耳給呂薩克定律**,或曰**波義耳查理定律**。

138. 定容氫溫度計(Constant Volume Hydrogen Thermometer)

如圖 149 所示者,爲一標準定容氫溫度計,係根據氣體定律而製成。左爲一玻璃泡 A,其中貯定量之氫。右爲一水銀槽 D,以橡皮管使與中間之曲管 BC 相

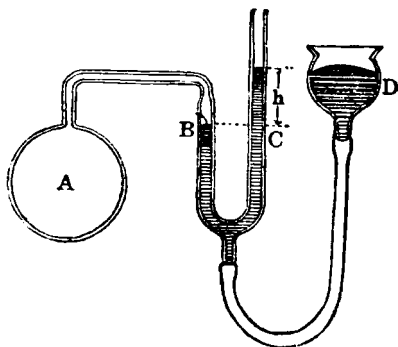


圖 149. 定容氫溫度計

連通, B 管內有一固定之針,上下移動 D,使水銀面與針尖相觸,則 A 內之氫佔有一定容積,欲測某物體之溫度時,先令 A 泡與該物體

密觸,調節 D 使 B 內水銀面適達針尖,量出 B, C 兩管內水銀面之高度差 h , 則 h 與此時大氣壓力之和,即為 A 中氫之壓力,命之為 P . 又設 0°C . 時, A 泡之容積為 V_0 , 其中氫之壓力為 P_0 , 則由

$$\frac{P_0 V_0}{P V_0} = \frac{T_0}{T},$$

得
$$T = \frac{273P}{P_0},$$

故由 P, P_0 可以算出 T 之數值, 惟為直接觀察起見, 通常先定冰點及蒸汽點, 於 C 管上水銀面所在處, 各刻以標線, 並在此兩點間等分為 100 度, 如是則當 B 內水銀觸於針尖時, C 中水銀面所指之度數, 即為物體之溫度, 可免計算之煩.

溫習提要

[定 義]

1. 線脹係數:
2. 面脹係數:
3. 體脹係數:
4. 視膨脹:
5. 實膨脹:

6. 容度:

7. 絕對零度與絕對溫度:

[定 律]

1. 給呂薩克定律:

2. 查理定律:

3. 氣體定律:

[公 式]

1. 膨脹係數:

2. 給氏定律:

3. 查氏定律:

4. 氣體定律:

[儀 器]

1. 補償擺:

2. 溫度記錄器:

3. 定容氫溫度計

問題十四

- 試舉數例以明固體膨脹之應用。
- 電燈泡上嵌於玻璃內之兩線，可否用銅絲？試言其理。
- 假設夏季之最高溫度為 40°C ，冬季之最低溫度為 -5°C 。今於溫度最低時鋪設鋼軌，已知鋼之線脹係數為 0.00011 ，各鋼軌之長為 120 尺，則連結處應留空隙若干？
- 有鋅棒一條，於 0°C 時長 128 厘米，問 200°C 時長若干？
- 有鋼製之米尺，於 10°C 時量得其長度為 99.981 厘米，於 40°C 時則為 100.015 厘米，求鋼之線脹係數，及此尺恰長 1 米時之溫度。
- 於溫度 0°C 時，有長度正確之黃銅尺，於溫度 25°C 時量得鐵棒之長為 4.215 米，問此鐵棒之實長幾何？
- 有溫度 0°C 時，其比重為 7.8 之鐵塊，求其於 200°C 時之比重。
- 設有一擺，於 0°C 時長 1 米，週期 2 秒，求此擺於 35°C 時之週期，但擺之線脹係數為 0.000018 。
- 在圖 140 所示之補償擺中，設於 0°C 時，兩旁鐵條之長為 l_1 ，中央鐵條之長為 l_2 ，鋅條之長為 l 。又鐵與鋅之線脹係數各為 α 及 α_1 ，試證當 $\frac{l_1+l_2}{l} = \frac{\alpha_1}{\alpha}$ 時則溫度雖有高低，而擺長仍無變化。
- 設溫度為 0°C 及 300°C 時，水銀之密度為 13.596 g./c.c. 及 12.875 g./c.c. 求水銀之體脹係數。

11. 有重 90 克之玻璃塊，沈於 12°C . 之某液體中秤之，計重 49.6 克。若加熱於液體，使其溫度昇至 97°C . 時，則重 51.9 克。求此液體之體脹係數。
12. 溫度計之液體，可否用水？有何缺點？
13. 醫用溫度計可否用沸水洗滌？何故？
14. 水銀溫度計插入熱水中時，最初水銀面反下降少許，其後復行上昇，試申其理。
15. 有一玻璃量筒，內盛液體，於 0°C . 時，液面指於 50 c.c. 處，於 -10°C . 時，液面指於 51 c.c. 處，求此液體之視膨脹係數及實膨脹係數。
16. 有溫度為 0°C . 之氣體，設不變其壓力，求其體積減至一半時之溫度。
17. 在標準狀況時，空氣 1 升之重為 1.293 克，求 1 升空氣於壓力 72 厘米之下，其重恰為 1 克時之溫度。
18. 當溫度 18°C .，大氣壓 75 厘米時，將 200 升之氫，盛入氣球內，昇至高空，測得溫度為 5°C .，大氣壓為 48 厘米。求此時氣球之容積。
19. 設溫度 17°C .，壓力 72.5 厘米時，氣體之體積為 145 c.c.，求溫度 7°C .，壓力 70 厘米時，此氣體之體積。
20. 將溫度 0°C .，體積 200 c.c.，壓力 819 mm. 之氣體，與溫度 17°C .，體積 580 c.c.，壓力 500 mm. 之氣體，同密封於容積 5460 c.c. 之容器內，而昇高其溫度至 100°C .，求此時氣體之壓力。（假定容器之容積不變）。

第三章 熱量與比熱

139. 熱之來源(Sources of Heat)

旭日東昇，則大地暖和，夕陽西沉，則寒氣侵人，蓋太陽乃最重要之熱源也。陽光直射之處，受熱較多，斜射之處，受熱較少，故早晚較日中為涼，赤道較兩極為熱，四季之分，亦由於此。

地球內部，亦發大熱，火山溫泉，即其明證。又開礦時，每掘深百呎，溫度約升高 1°C ，可知愈近地心，發熱愈多。

惟太陽與地球之熱，不能直接利用之以運轉機械，或燃燈，炊爨，必須燃燒柴木煤炭汽油之屬，此種物質，謂之燃料。考各種燃料之生成，均有賴於太陽，故其所生之熱量，實即由太陽間接得來。

兩手摩擦，可以取暖；鑽孔，鋸木，亦能生熱，故凡機械能消失之時，必有熱隨伴發生，是亦熱源之一種。

電流通過導體時，亦有熱量發生，電熨斗、電爐等均係利用此項性質而製成，電學中當再詳述之。

140. 熱之本性(Nature of Heat)

昔之學者，認熱為一種異於尋常物質且無重量之物，而稱之曰熱質(Caloric)。若熱質進入於物體中，則其溫度升高，反之則溫度降低。此種假說，謂之熱質說(Caloric theory of heat)。以之說明溫度升降等數種現象，似尚能自圓其說，但如鑽木取火，摩擦生熱等現象，則無由解釋。

之。吾人細考熱之來源，知無一非能之變形，則熱之本身，亦必爲能之一種，可無疑義。蓋加熱於物體，無異使其分子之運動更爲劇烈，故熱者乃分子之動能而非物質也。是爲現今科學家所公認之學說，謂之熱之動力說 (Mechanical theory of heat)。

141. 熱量之單位(Units of Heat)

學術上常用之熱量單位，有下列兩種：

(1) 卡路里(Calorie) 使純水 1 克之溫度改變 1°C 所需之熱量，曰 1 卡路里，簡稱 1 卡，或曰小卡(Small calorie)，通常以 cal. 記之。

(2) 仟卡(Large Calorie) 卡之千倍曰仟卡，亦稱大卡，以 Cal. 記之。

嚴格言之，則 1 卡之熱，實爲使水之溫度由 14.5°C 升高至 15.5°C 時所需之熱量。若在其他溫度時，水之溫度雖亦升高 1°C ，但其所需之熱量各不相同，惟因其相差甚微，故通常仍視爲 1 卡耳。

此外尚有一種英國熱量單位，曰 B. T. U. (British Thermal Unit)，即使純水 1 磅之溫度改變 1°F 所需之熱量。此種單位與卡之關係如下式：

$$1 \text{ B. T. U. } = 252 \text{ cal.}$$

142. 比熱(Specific Heat)

使質量 1 克之物質，溫度改變 1°C 所需之熱量，以卡爲單位所表出之數值，曰該物質之比熱。若物體之質量爲 m 克，其比熱爲 c ，則欲使其溫度改變 1°C ，必需 mc 卡之熱，是曰該物體之熱容量(Heat capacity)。

氣體之比熱，須分爲定壓及定容兩種情形測定之，若加熱於氣體，而不變其壓力時，則所求得之比熱，謂之定壓比熱 (Specific heat at constant pressure)，若容積不變時，則謂之定容比熱 (Specific heat at constant volume)。無論何種氣體，其定壓比熱恆較定容比熱爲大，蓋壓力一定時，所加之熱量，不僅用於增加分子之動能（即使氣體之溫度升高），且因其容積膨脹時，須反抗外界之壓力，及氣體之內聚力，以增大其分子間之距離，故亦需一部分之熱能也。

數種重要物質之比熱如表 9。

表 9. 比熱

固		體	
冰	0.502	鋅	0.094
鋁	0.219	銅	0.093
乾泥	0.200	銀	0.056
玻璃	0.19	錫	0.055
鐵	0.11	金	0.032
鉛	0.11	鉛	0.032

液		氣		定壓比熱	定容比熱
水	1	氫		3.41	2.42
酒精	0.58	沼氣		0.49	0.47
醚	0.54	水汽		0.48	0.37
硫酸	0.33	空氣		0.24	0.17
水銀	0.033	氧		0.22	0.15

143. 比熱之測法

測定比熱，通常用混合法 (Method of mixture)。如圖 15)，C 爲量熱器，亦稱卡計 (Calorimeter)，係一薄銅製成

之圓筒，內盛以水，置於大銅罐中而以木環隔離之，使其中熱量，不易散逸於外方。

T 為溫度計，S 為攪動器 (Stirrer)。使用時，先測得量熱器及水之質量，設各為 M 及 m_1 克，並用溫度計量得水之溫度，設為 $t_1^\circ\text{C}$ 。然後將欲測其比熱之物質 m_2 克，加高其溫度至 $t_2^\circ\text{C}$ 。後傾入量熱器中，而以攪動器攪動之。由溫度計上讀出此混合物之溫度，設為 $t^\circ\text{C}$ 。由 M, m_1, m_2 ，及 t_1, t_2, t 各種數據 (Data)，可以求出該物質之比熱 C 。因

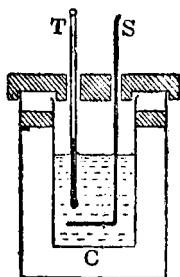


圖 150. 量熱器

物質之溫度，由 t_2° 降至 t° ，所失之熱為 $m_2C(t_2 - t)$ 卡，
 清水之溫度，由 t_1° 昇至 t° ，所得之熱為 $m_1(t - t_1) \times 1$ 卡，
 卡計之溫度，由 t_1° 昇至 t° ，所得之熱為 $MC'(t - t_1)$ 卡，
 若精細試驗，使散失之熱量極少，則物質所失之熱量，必與清水及卡計所得之熱量相等，於是

$$m_2C(t_2 - t) = m_1(t - t_1) + MC'(t - t_1),$$

$$\therefore C = \frac{(m_1 + MC')(t - t_1)}{m_2(t_2 - t)}.$$

上式中之 C' 為量熱器之比熱， MC' 即為其熱容量，通常稱之曰量熱器之水當量 (Water equivalent)，意即使量熱器之溫度升高 1°C 所需之熱量，相當於使 MC' 克之水，溫度升高 1°C 所需之熱量也。

溫習提要

[定 義]

1. 比熱:

2. 定壓比熱及定容比熱:

3. 熱容量:

4. 水當量:

[學 說]

1. 熱質說:

2. 熱之動力說:

[單 位]

1. 卡及仟卡:

2. B. T. U.

[其 他]

1. 熱之來源:

2. 混合法:

問題十五

1. 試述熱量與溫度之區別.
2. 海洋氣候,冬溫夏涼,大陸氣候,變化激烈,是何緣故?
3. 濱海之處,日間之風由海面吹向陸地,夜間則風向相反,試言其理.

4. 有質量 50 克之銀塊,使其溫度由 15°C . 熱至 95°C ., 須加熱若干卡?合若干 B. T. U.?
5. 質量 2.8 仟克之煤油,其熱容量為 1.204 仟卡,求其比熱.
6. 將質量 125 克之鐵塊,熱至 64°C . 而投入於溫度 16°C ., 質量 210 克之水中,設其混合物之溫度為 19°C ., 求鐵之比熱.
7. 將質量 5 磅之鐵球,熱至某溫度後,即投入於溫度 13°C . 質量 8 磅之水中,設其混合物之溫度為 48°C ., 求鐵原來之溫度.
8. 設有體積相同之二物體,其密度之比為 2:3,而比熱各為 0.12 及 0.19,試比較此二物體之熱容量.
9. 求鉛 50 克與錫 100 克之合金之比熱.
10. 將 120 克之銀塊,熱至 85°C . 而投入於溫度 18.5°C ., 質量 456 克之油中,設其混合物之溫度為 21.5°C ., 求油之比熱.
11. 將 200 克之銅塊,熱至 100°C . 而投入於溫度 8°C ., 質量 100 克之酒精中,設酒精之溫度上昇至 28.5°C ., 求酒精之比熱.
12. 將質量 10.205 克之銀塊,熱至 101.9°C . 後,投入於溫度 11.09°C ., 質量 81.34 克之水中,其混合物之溫度為 11.71°C ., 設量熱器之水當量為 2.91, 求銀之比熱.

第四章 物態變化

144. 熔解(Melting)

固體受熱，化爲液體，謂之熔解。此時之溫度，謂之熔點(Melting point)。固體之溫度，既達熔點後，若繼續加熱，即開始熔解，但溫度仍不改變，直至完全熔成液體，溫度方能升高。蓋此時所加之熱能，乃用以反抗固體之內聚力，以增大其分子間之距離，而使之變成液體也。因其蘊藏於內，而不表顯於外，故常稱之曰潛熱(Latent heat)。

使質量 1 克之固體，完全熔解成爲同溫度之液體，所需之熱量，謂之熔解熱(Latent heat of fusion)。數種物質之熔點及熔解熱如表 10。

表 10. 熔點及熔解熱

物質	熔點(°C.)	熔解熱卡	物質	熔點(°C.)	熔解熱(卡)
鎢	3001	—	鉛	327	5.8
鉑	1755	27	錫	232	14
鐵	1528	4.4	硫	119	10.8
銅	1083	41.9	冰	0	80
金	1063	16.1	水 銀	-39	2.8
銀	961	23.9	酒 精	-112	—
食 鹽	805	—	氮	-210	6.1
鋁	657	85.2	氧	-219	3.3

145 凝固(Solidification)

液體放熱，變成固體，謂之凝固。此時之溫度，謂之凝

點 (Solidifying point). 由實驗之結果,知同一物質之凝點與熔點相同;又凝固時放出之熱量,亦必與熔解時所吸收之潛熱相等,例如冰之熔點為 0°C ., 水之凝點亦為 0°C ., 又 0°C . 之冰,每克須吸收 80 卡之熱,始能熔化為水;而 0°C . 之水,每克須放出 80 卡之熱,然後可以凝結成冰.

大多數之物質熔解時則體積膨脹,凝固時則體積縮小,而水則反是,一容積之水,凝結為冰時,其體積約增加一成,故通常固體均沉於熔液之下而冰則浮於水面之上,嚴冬時,水缸常因結冰而致龜裂者,亦因冰之體積突然增大之故,他如鐵、鋁、錫等金屬,當凝固時,其體積亦反膨脹,此種特性,頗適合於鑄造之用,將此等金屬之熔液,注入模型內,待冷凝固,因其體積反而增大,故雖極纖細之花紋,亦能一一顯出,與原型相同,印刷用之活字,皆用鉛錫之合金鑄造者,即以此故.

純潔之水徐徐冷卻時,其溫度雖達 0°C ., 但仍不結冰,有時須降至 -4°C . 始驟然凝固,若注油於水面上,使與空氣相隔離,則其凝點更可降低至 -7°C . 以下,此種溫度已達凝結之下,而仍不凝固之現象,謂之過熔 (Superfusion), 或曰過冷 (Super-cooling). 如將水搖動,或投入冰塊,則其溫度即行上昇至 0°C ., 同時一部分之水,即行結冰.

146. 復冰 (Regelation)

物體之熔點,常隨其所受壓力之大小而略有差異,由實驗結果,得知物質熔解時,若體積縮小,則其熔點因壓力之增加而降低;反之,若熔解時體積增大,則其熔點因壓力之增加而升高,例如石蠟之熔點於 1 大氣壓時

爲 46.3°C ., 於 100 大氣壓時, 則昇至 49.9°C ., 又如冰之熔點, 於 1 大氣壓時爲 0°C ., 於 1000 大氣壓時則降至 -7.4°C ..

取冰二塊疊置之, 而施以壓力時, 可使合而爲一, 因接觸部分, 壓力加大, 熔點降低至 0°C . 以下, 於是熔解成水, 由空隙流出, 流出之水, 壓力較小, 故復行結冰, 又如圖 151 所示, 將一細鐵絲跨於冰塊上, 兩端各懸一重錘, 則鐵絲逐漸陷入冰中, 直至穿過, 但冰仍結成一塊, 而不分而爲二, 此亦因壓力加大, 則熔點降低, 熔成之水, 升至鐵絲之上, 壓力減小, 故仍凍結也, 此種現象, 謂之復冰。

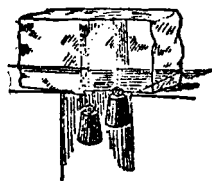


圖 151. 復冰

147. 冷劑(Freezing Mixture)

固體熔解爲液體時, 必須吸收熱量, 已如前述, 固體溶解於液體中時, 亦須吸收熱量, 使 1 克物質溶解所需之熱, 曰溶解熱(Heat of solution). 例如 1 克食鹽, 溶解於水, 須吸收 18.22 卡之熱; 又如 1 克氯化鉀, 溶解於水, 須吸收 59.7 卡之熱, 由是可知兩種或兩種以上之物質, 互相混合時, 因熔解與溶解之作用, 均須吸收相當之熱量, 故可使其自身及周圍之溫度降低, 此種混合物, 謂之冷劑, 夏季製造冰淇淋時, 多用冰及食鹽之混合物, 圍於罐之四周, 可使罐中牛乳, 雞蛋等混合液凝結, 是爲最普通之冷劑, 茲將數種冷劑之混合比, 及其所生之低溫度, 列表於下:

表 11. 冷劑

冷劑	混 合 比	溫 度
硝酸鈉.....水	75:100	-5.3°C.
氯化鈣(結晶).....水	250:100	-12.4°C.
硝酸銨.....水	60:100	-13.6°C.
硝酸銨.....冰	100:131	-17.5°C.
食鹽.....冰	33:100	-22°C.
氯化鈣(結晶).....冰	100:70	-54.9°C.

148. 汽化及液化(Vaporization and Liquefaction)

液體受熱，化而為汽(Vapor)，謂之汽化。反之，使汽放熱，變成液體，謂之液化。1克之液體，化為同溫度之汽，所需之熱量，曰汽化熱(Heat of vaporization)，亦為潛熱之一種。液化時，此種熱量須盡行放出。例如 100°C. 之水，每克須吸收 539 卡之熱，始能化為水汽；而 100°C. 之水汽，每克須放出 539 卡之熱，然後可以液化為水。即水之汽化熱為 539 卡。

汽化熱之測定，亦可用混合法。如圖 152，將欲測其汽化熱之液體，置於 A 器內，燃燈熱之，使其沸騰，所生之汽，經 B 而通入量熱器 C 內，中途遇冷凝結而成之液體，則留存於 B 泡內。A, C 之間，隔一鉛板，以防熱之輻射。C 器內液體之質量及溫度，當汽未通入之先，及汽已通入且經液化之後，均須精密測定，然後可以推算其汽化熱。

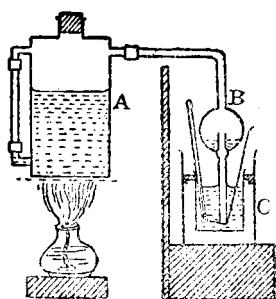


圖 152. 汽化熱之測法

設 m_1 及 t_1 各爲量熱器內原有液體之質量及溫度,

m_2 及 t_2 各爲汽已通入後液體之質量及溫度,

T 爲液體之沸點,

c 爲液體之比熱,

w 爲量熱器之水當量,

H 爲液體之汽化熱.

則 $m_2 - m_1$ 爲汽之質量.

$(m_2 - m_1)H$ 爲汽液化爲同溫度之液體時所放出之熱,

$(m_2 - m_1)(T - t_2)c$ 爲液化而成之液體,因降低溫度所放之熱,

$m_1c(t_2 - t_1)$ 爲量熱器內原有液體所得之熱.

$w(t_2 - t_1)$ 爲量熱器所得之熱.

因

$$(m_2 - m_1)H + (m_2 - m_1)(T - t_2)c = m_1c(t_2 - t_1) + w(t_2 - t_1)$$

故

$$H = \frac{(m_1c + w)(t_2 - t_1) - (m_2 - m_1)(T - t_2)c}{m_2 - m_1}$$

149. 蒸發(Evaporation)

液體表面逐漸汽化之現象,曰蒸發.灑水於地,不久自乾者,卽爲蒸發之作用.蒸發之快慢,有關於下列數事:

(1) 液體之性質 各種液體之蒸發,快慢互異.酒精之蒸發,較速於水,而醚之蒸發,則較速於酒精.凡易於蒸發之液體,稱爲揮發性之液體(Volatile liquid).

(2) 溫度之高低 液體之蒸發,雖隨時進行,但溫度愈高,則吸熱愈易,故蒸發愈速.濕衣曝於陽光之下,較易乾燥,卽爲一例.

(3) 壓力之大小 液面上氣體之壓力,足以影響蒸發之快慢.蓋壓力愈大,則汽分子不易飛出,故蒸發必較遲緩也.

(4) **液面之廣狹** 蒸發既爲由液體表面汽化之現象，故液面愈廣，則發出之汽必愈多，即蒸發更爲迅速。

(5) **空氣之流滯** 液面上之空氣，若流動不息，則可將已有之汽，挾之他去，於是蒸發現象，仍可照舊進行，反之，若空氣停滯不動，則妨礙汽之逸出，蒸發因之減慢。

150. 飽和汽(Saturated Vapor)

取杯盛醚，置於空中，則必繼續蒸發，終至完全乾燥而後已。若以蓋覆之，則可歷久而不乾。可知液體在密閉器內蒸發時，汽之密度與壓力漸次增大，至達於一定程度後，蒸發作用可視爲完全停止。此時之汽，曰**飽和汽**。其所具之壓力，曰**最大壓力**(Maximum pressure)。其密度曰**最大密度**(Maximum density)。又如圖 153，在托里拆利真空內，送入少許液體，則可以立即化而爲汽，同時水銀柱必下降少許，是即汽之壓力作用於水銀面上之故。若繼續送入液體，必至有一部分之液體，存於水銀面上，仍保持其液態而不再汽化，蓋已達飽和之狀態矣。此時水銀柱下降之長度，即表示飽和汽之最大壓力。若於管外以火微熱之，則存留之液體，仍可汽化，而水銀柱復繼續降下。可知**最大壓力**隨溫度之升降而增減。又水銀面上若不爲真空，而有空氣或他種氣體存在時，則蒸發較慢，但當飽和時，水銀柱之下降仍相同，故在一定溫度之下，液面上有其他氣體存在之結果，僅影響於汽化之快慢，而最大壓力則不變。

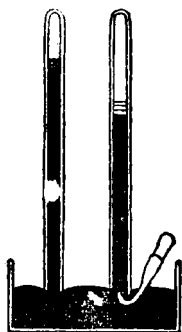


圖 153. 最大壓力

上述現象，可以分子運動說解釋之。液體分子不絕運動，其在表面者，尤為自由，其中動能較大，足以勝過四周液體分子之引力者，即脫離液體，飛出外方，但同時亦有汽之分子回入液中，當汽之壓力未達極大值時，飛出之分子多於回入之分子，故液量漸少，而汽量漸增，是即蒸發之現象也。待至壓力既達其極大值，則出入之分子數，彼此相等，汽量不再增加，故此時可視為停止蒸發，如加高溫度，則分子之動能增大，飛出之分子復加多，非至相當程度，蒸發決不停止，最大壓力與溫度共增者，即以此故。

151. 沸騰(Boiling)

加熱於液體，至一定溫度時，則不僅表面汽化，即其內部亦盛發氣泡，向上升起，此種現象，謂之沸騰，此時之溫度曰沸點(Boiling point)。在一定壓力之下，各種液體均有其一定之沸點，既達沸點以後，雖繼續加熱，祇能促進液體之汽化，而汽之溫度仍不變，但當液面上之壓力加大時，則沸點亦必升高，反之則沸點降低。蓋氣泡之壓力，適足以抵抗其四週液體之壓力，若液面上所受之壓力加大時，則氣泡本身亦須加大壓力，方能保持其原狀，欲達到此目的，必須升高溫度，使汽分子之動能增加，以與其四週液體之壓力相抗衡，蒸汽鍋內之水須至 120°C ，乃至 130°C ，方能沸騰者即因其壓力甚大之故，茲更舉一實驗以明之：

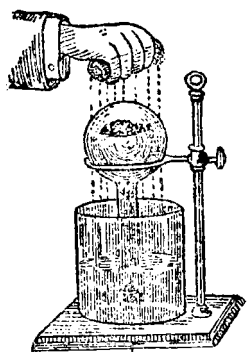


圖 154. 沸點與壓力之關係

如圖 154 所示,取一圓底燒瓶,盛水約及其半,熱之使沸,俟瓶中空氣盡被水汽驅出後,即將瓶口塞住,倒置於鐵架之上,並使瓶口浸於水中,以免空氣侵入,此時溫度已降至 100°C . 之下,故水當停止沸騰,但若以冷水淋瓶底,則水中又盛發氣泡,重行沸騰,因水汽遇冷,液化為水,於是壓力減小,隨之沸點降低也。

純潔之水,徐徐熱之,有時其溫度雖達沸點以上,而仍不發生沸騰之現象,是曰過熱(Super-heating),此時如投入炭粉或砂粒,則其周圍即生氣泡,而成沸騰。

152. 昇華(Sublimation)

嚴寒之時,冰雪溫度,常在 0°C . 以下,但亦能漸次消滅,可見其表面隨時汽化,成為水汽,逸散空中,此時溫度既在熔點之下,當然不經液體之一階級,而直接化為氣體,此種現象,謂之昇華,樟腦,碘,麝香等物質,亦皆具此種特性,反之,由氣體直接變為固體之現象,則謂之直接凝固(Direct condensation)。

153. 臨界溫度(Critical Temperature)

欲使氣體液化,可降低其溫度,或增加其壓力,或雙方並進,但各種氣體,若其溫度在某一定溫度以上時,則雖施以極大之壓力,亦不克使之液化,故必須先使氣體之溫度,降低至一定度數,然後施以相當之壓力,始能達到液化之目的,此一定之溫度,謂之臨界溫度,在臨界溫度時,應加之壓力,謂之臨界壓力(Critical pressure),其時之狀態,謂之臨界態(Critical state),數種物質之臨界溫度與臨界壓力如表 12。

表 12. 臨界溫度及臨界壓力

物 質	臨 界 溫 度 (°C.)	臨 界 壓 力 (大 氣 壓)
水 汽	365.0	200.0
二氧化碳	31.5	72.9
氧	-118.0	50.0
空 氣	-149.6	37.2
氮	-146.0	33.7
氫	-240.5	14.0
氦	<-268.0	2.3

154. 永久氣體之液化

由表 12 觀之,可知水汽之臨界溫度甚高,空氣之臨界溫度甚低,故在平常溫度時,加壓力於水汽,可以使之液化,而加壓力於空氣則否。吾人常稱溫度在臨界值以下之氣體曰汽 (Vapor), 而溫度高於臨界值者,則稱之曰氣體 (Gas)。昔人不知氫,氧等之臨界溫度甚低,僅加大壓力而欲使之液化,卒致徒勞無功,乃稱此等氣體曰永久氣體 (Permanent gas)。實則所謂永久氣體者,亦可使之化為液體,茲述其原理及方法如下:

氣體驟然膨脹時,其溫度常降低,因須反抗分子之引力作用故也。1895 年林得 (Linde) 始利用此理,造成液態空氣,如圖 155 所示, A 器內盛生石灰,用以吸去空氣中之碳酸氣。D 器內盛苛性鉀,用以吸去空氣中之水分。B 為唧筒, E 為螺旋管, C, G 均為導管。當唧筒 B 之活塞左右抽動時,由 A 通入之空氣,即受壓縮,經 C, D 而由 E 之管口噴出,體積突然

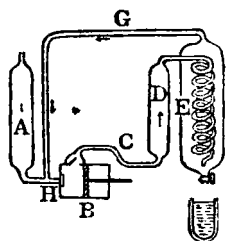


圖 155. 氣體之液化

膨脹近磅溫度，隨之降低，此冷空氣復由 G 管而至 H，與新入之空氣相合，同進於唧筒中，再受壓縮而由 E 管之口噴出，如是反覆行之，可使空氣溫度，漸次降低，終必成爲液體而噴出，滴入於貯器之中，液態之氫或氦等，亦可用此法製之。

155. 製冷設備

液體汽化時，溫度必降低，因其中動能最大之分子，化汽而飛出，故剩餘液體分子之平均動能，必當較前爲小，隨之熱量減少，而溫度降低也。試於蒸發皿中盛醚，置於方玻璃上，兩者之間，滴水少許，然後用玻管吹氣入醚中，使其迅速汽化，結果可使水滴結冰，足見其溫度已降低矣。又如令液態空氣汽化，並用唧筒隨時排去其所成之氣態空氣，則剩餘之液態空氣，其溫度必漸次降低，至 -218°C 。而成爲固態之空氣，此種現象，謂之真空汽化。由液態氫之真空汽化，可得固態之氫，其溫度爲 -259°C 。由液態氦之真空汽化，可得固態之氦，其溫度爲 -272°C 。與絕對零度相差僅 1 度，是爲現今溫度之最低記錄。

製冷設備，即係利用上述原理，使液態之氮汽化而成，主要部分有三，如圖 156 所示，中央爲壓縮器 (Compressor)，右方爲冷

凝器 (Condenser)，左方爲蒸發器 (Evaporator)。壓縮器係一唧筒 P，筒底有二活門，在左者向下

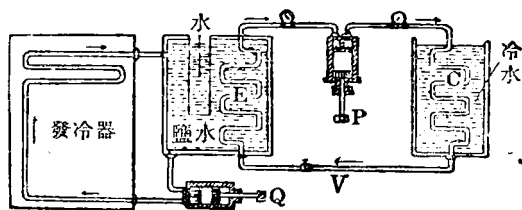


圖 156. 製冷設備

開，在右者向上開，當活塞壓上時，可將其中氣態之氨壓縮，使其壓力增加至 10 氣壓，此受壓之氨，即通過右方活門而入螺旋管 C 中，管之周圍，用川流不息之冷水，以除去熱量，於是 C 管中之氨，化爲液體，令此液態之氨，經過下方之節制活門 (Regulating valve) V，徐徐通入 E 管中，此時因壓力大減，故即行蒸發，其所需之汽化熱，則由周圍之鹽水中吸取之，於是鹽水溫度降低至 -10°C 以下，活塞抽下時，E 內之氨即由左方活門進入唧筒中，可供再行壓入冷凝器內之用，若盛水於薄銅容器內，而置之於冷鹽水中，則水即可結成冰塊，是爲人工造冰之法，又若將此冷鹽水用唧筒 Q 壓入發冷器 (Refrigerator) 之曲管中，則器內溫度下降，其中儲藏食物，可以不致腐敗，夏季炎熱之時，亦可利用此種冷鹽水，以減低室內溫度。

156. 濕度(Humidity)

江河海洋之水，繼續不絕蒸發，故空氣之中，常含有水汽，若水汽過多，則覺潮溼，易患感冒；水汽過少，則覺乾燥，易患喉痛，此種乾燥潮溼之程度，謂之大氣之濕度，表示濕度之大小，有兩種方法：(1) 設每立方米之空氣中，含有水汽 m 克，則其濕度即以 m 表之，是曰絕對濕度 (Absolute humidity)；(2) 設空氣之溫度爲 $t^{\circ}\text{C}$ ，1 立方米之空氣中實含水汽 m 克，其壓力爲 p ，此時水汽尙未飽和，若在此溫度時，欲達到飽和狀態，則 1 立方米之空氣中，應含水汽 M 克，其最大壓力爲 P ，以 $\frac{m}{M} \times 100$ 或 $\frac{p}{P} \times 100$ 表

此時之濕度，是曰相對濕度 (Relative humidity)。由此可知絕對濕度大時，空氣未必潮溼，而相對濕度大時，則吾

人必感潮濕，因其與飽和狀態相去甚近故也。因之通常所謂濕度，皆指相對濕度而言。衛生上最適宜之濕度為 50 至 60 之間。

常濕度為 100 時，即水汽已達飽和狀態，故有一部分之水汽，凝結而成細小之水滴。此大氣中水汽開始凝結時之溫度，謂之露點 (Dew point)。

計算相對濕度時，須知在各溫度時水汽之最大壓力，或最大密度，茲列表於下，以便檢查。

表 13. 水汽之最大壓力及最大密度

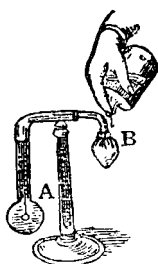
溫度 (°C.)	壓力 (mm.)	密度 (g./c.c.)	溫度 (°C.)	壓力 (mm.)	密度 (g./c.c.)	溫度 (°C.)	壓力 (mm.)	密度 (g./c.c.)
-10	2.2	23×10 ⁻⁷	4	6.1	64×10 ⁻⁷	18	15.3	152×10 ⁻⁷
-9	2.3	25×10 ⁻⁷	5	6.5	68×10 ⁻⁷	19	16.3	162×10 ⁻⁷
-8	2.5	27×10 ⁻⁷	6	7.0	73×10 ⁻⁷	20	17.4	172×10 ⁻⁷
-7	2.7	29×10 ⁻⁷	7	7.5	77×10 ⁻⁷	21	18.5	182×10 ⁻⁷
-6	2.9	32×10 ⁻⁷	8	8.0	82×10 ⁻⁷	22	19.6	193×10 ⁻⁷
-5	3.2	34×10 ⁻⁷	9	8.5	87×10 ⁻⁷	23	20.9	204×10 ⁻⁷
-4	3.4	37×10 ⁻⁷	10	9.1	93×10 ⁻⁷	24	22.2	216×10 ⁻⁷
-3	3.7	40×10 ⁻⁷	11	9.8	100×10 ⁻⁷	25	23.5	229×10 ⁻⁷
-2	3.9	42×10 ⁻⁷	12	10.4	106×10 ⁻⁷	26	25.0	242×10 ⁻⁷
-1	4.2	45×10 ⁻⁷	13	11.1	112×10 ⁻⁷	27	26.5	256×10 ⁻⁷
0	4.6	49×10 ⁻⁷	14	11.9	120×10 ⁻⁷	28	28.1	270×10 ⁻⁷
1	4.9	52×10 ⁻⁷	15	12.7	128×10 ⁻⁷	30	31.5	301×10 ⁻⁷
2	5.3	56×10 ⁻⁷	16	13.5	135×10 ⁻⁷	35	41.8	393×10 ⁻⁷
3	5.7	60×10 ⁻⁷	17	14.4	144×10 ⁻⁷	40	54.9	509×10 ⁻⁷

157. 濕度計 (Hygrometer)

測量濕度之器，曰濕度計。通常應用者，有下列三種：

1) 露點濕度計 (Dew point hygrometer) 如圖 157，為一露點濕度計，可用以測定露點，然後推算濕度。A, B

爲二玻璃泡，以一曲管連通之，其中盛醚少許，而將空氣抽出，加以密封。A 泡內有一溫度計，泡之外面塗有金帶。B 泡外包以紗布。因泡中空氣既經抽出，醚極易汽化，故液面以上，恆充滿醚之飽和汽。若取醚徐徐滴於紗布上，布上之醚，隨即蒸發，吸取熱量，B 泡內之汽，因之冷卻而液化，



壓力減小，於是 A 泡內之醚，開始汽化。溫度降低，空氣中之水汽，遂凝結於 A 泡之金帶上。此時 A 泡內溫度計所指之度數，即爲露點 ($t^{\circ}\text{C}.$)。支柱上亦有一溫度計，可以讀出室內溫度 ($T^{\circ}\text{C}.$)。由上節表 13 中，檢

得相當於溫度 t° 及 T° 之最大壓力 p 及 P ，則 $\frac{p}{P} \times 100$ 卽爲此時之相對濕度。

(2) 毛髮濕度計 (Hair hygrometer) 如圖 158，爲一毛髮濕度計，係利用毛髮遇濕則伸長，乾燥則縮短之性質而製成。毛髮之上端固定，他端繞過下方之滑輪，並懸一錘。滑輪上附一指針，毛髮伸縮時，指針即隨滑輪轉動。刻度板上所刻之標度，係與他種濕度計比較而定，故由指針所指之度數，可以直接讀出當時大氣之相對濕度，甚爲便利。



圖 158.

(3) 乾濕泡濕度計 (Wet and dry bulb hygrometer) 如圖 159，爲一乾濕泡濕度計，係並列二溫度計 A, B 而成。A 上所示之度數 (t)，爲室內溫度。B 之泡上，包以濕布，其所示之度數 (t')，恆較 t 爲小，因水蒸發時

毛髮濕度計

須吸收熱量故也。當大氣之濕度愈大時，則水分不易蒸發，故 t 與 t' 之差愈小。設 $t^{\circ}\text{C}$ 時水汽之最大壓力為 P ，其值可由表 13 中檢得；又此時空氣中實含水汽之壓力為 p ，其值可由下列實驗式求得之：

$$p = P - 0.5(t - t').$$

由 p 及 P 即可計算濕度為 $\frac{p}{P} \times 100$ 。通常為便利計，先就各種 t 及 $t - t'$ 之數值，計算其相當之濕度，列成一表，附於其傍，吾人祇須由兩溫度計上觀察 t 及 t' ，即可在表上檢閱其時之濕度，可免計算之勞。

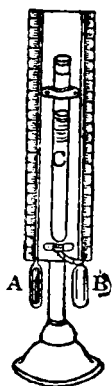


圖 159.

乾濕泡溫度計

158. 氣象問題

大氣之濕度，與氣象之關係，甚為密切。當濕度增大，至水汽飽和時，常生種種之氣象變化。茲略舉之如下：

露 (Dew) 夜間草木等物，散熱甚多，溫度降低，與之接觸之空氣，溫度亦隨之降低，至其中所含水汽，達於飽和狀態時，即有一部分之水汽，凝結而成水滴，附着於物體之表面上，即成為露。

霧 (Fog) 如夜間地面上散熱過甚，致使在地面附近之空氣層之溫度，亦降低至露點以下，於是其中過餘之水汽，凝結而成細小之水滴，附着於微塵周圍，而浮游於空中，即成為霧。

雲 (Cloud) 如大氣溫度之降下，不在地面而在高空，則由下方昇起之熱空氣，驟入其內，達於飽和，過餘水汽即行液化，聚而成雲。

雨 (Rain) 若溫度甚低,則凝出之水分加多,集成大滴,不復能浮於空中,於是降而爲雨。

霜 (Frost) 若草木溫度,因散熱而降至冰點以下,則與之接觸之水汽,即直接凝固而成霜。

雪 (Snow) 高空之水汽,開始凝結時之溫度,若在冰點以下,則結成雪花,飄飄落下。

霰 (Sleet) 當雨未達地面時,如中途遇冷,則其一部分即變成固體之小粒,一同降下,稱之曰霰。

雹 (Hail) 倘遇暴風,氣溫劇變,水汽凝成雨雪,東碰西撞,集成大塊,然後降下,是即爲雹,可成巨災。

溫習提要

[現象]

1. 熔解及凝固:
2. 過熔或過冷:
3. 復冰:
4. 汽化及液化:
5. 蒸發及沸騰:
6. 過熱:
7. 昇華及直接凝固:

[定 義]

1. 熔點及凝點:
2. 熔解熱及汽化熱:
3. 溶解熱:
4. 飽和汽之最大壓力及最大密度:
5. 沸點:
6. 臨界溫度與臨界壓力:
7. 絕對濕度與相對濕度:
8. 露點:

[原 理]

1. 永久氣體液化之原理:
2. 製冷設備之原理:

[儀 器]

1. 露點濕度計:
2. 毛髮濕度計:

3. 乾濕泡濕度計:

[其 他]

1. 熔解時體積之變化:
2. 熔點與壓力之關係:
3. 沸點與壓力之關係:
4. 汽化熱之測法:
5. 露霜雲霧等之成因:

問題十六

1. 將 0°C . 之冰 10 克, 投入 100°C . 之水 50 克中, 結果成爲 96.5°C . 之水. 試求冰之熔解熱.
2. 用火力均勻之燈, 加熱於 0°C ., 100 克之冰塊, 歷 4 分鐘全部熔解. 再歷 5 分鐘, 即開始沸騰. 求冰之熔解熱.
3. 將 0°C . 之冰 50 克, 投入 30°C . 之水 200 克中, 其結果之溫度若何?
4. 將 -10°C 之冰 3 克, 投入 40°C . 之水 9 克中, 其結果之溫度若何?
5. 欲使 -5°C . 之冰 10 克, 變爲溫度 100°C . 之水汽須

加熱若干。

6. 將 100°C . 之水汽 5 克, 通入 20°C . 之水 500 克中, 其結果之溫度若何?
7. 將 0°C . 之冰, 50°C . 之水, 100°C . 之水汽, 依重量 10:9:1 之比混合之, 其結果之溫度若何?
8. 被 100°C 之沸水與被 100°C . 之水汽燙傷, 何者較烈, 並言其故。
9. 如何可使濕衣易於乾燥?
10. 沐浴之後, 須用毛巾將全身擦乾, 否則易於着涼, 何故?
11. 冬日手冷, 用口吹氣, 可以取暖; 夏日茶熱, 用口吹氣, 可使冷卻, 何以同樣吹氣, 而效果不同?
12. 盛水於蒸發皿中, 而置之於抽氣機之鐘罩內, 將空氣抽去後, 即見有一部分之水凝結成冰, 試言其故。
13. 空氣之溫度雖相同, 但濕度較大時更覺溫暖, 何故?
14. 絕對濕度雖相同, 但溫度較高時更覺乾燥, 何故?
15. 使 30°C . 之空氣冷卻至 10°C . 時, 即生露珠, 求此時大氣之相對濕度。
16. 設在乾濕泡濕度計之兩溫度計上, 讀出乾者所示之度數為 20°C ., 濕者所示之度數為 8°C ., 問此時之濕度若何?
17. 晴天始能有露, 陰天及有風時則無之, 何故?
18. 夏日驟雨之前, 悶熱難堪, 雨後即覺涼爽, 何故?
19. 溶雪反較下雪時為冷, 何故?
20. 俗謂霜降二字是否合理, 試申言之。

第五章 熱之傳播

159. 熱之傳播(Transmission of Heat)

將溫度不同之兩物體,互相接觸時,則熱必由溫度較高之物體,移至溫度較低之物體上,至兩者之溫度相同而後止。又如於室之隅,生一火爐,則可使全室暖。此種熱由一物體移至他物體,或自一處移至他處之現象,曰熱之傳播。其方法共有三種,即傳導(Conduction),對流(Convection),及輻射(Radiation)是也,分述於下:

160. 傳導

凡熱由物體之高溫度部分,經過物質次第傳至其低溫度部分之方法,謂之傳導。易於傳熱之物體,謂之導體(Conductor),不易傳熱者,謂之非導體(Non-conductor)。

通常液體,皆爲非導體,可由下之實驗證明之:如圖 160 所示,取一大試驗管,內盛以水,並將冰塊投入水中,用鐵絲網使冰塊壓至水底。管之上部,用火熱之,直至沸騰,但管底之冰,仍未熔解,可見水傳熱之難也。

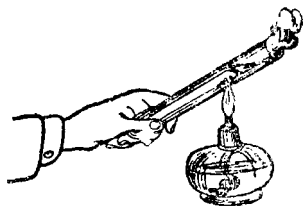


圖 160. 水爲非導體

氣體物質,傳熱尤難。羊毛棉花等物,內含多量空氣,因其不易傳熱,故常用以製成冬衣,抵禦寒冷。又滴水於紅熱(Red heat)之金屬板上,則與之接觸之水,立即化

而為汽，隔於水滴與板之間，因水汽為非導體，板上之熱不能立即傳至水滴，故水滴可暫時不致汽化，保持其扁球形之狀態，跳躍於板上，此種現象，謂之球騰態 (Spheroidal state)。裁縫以手指蘸唾液，觸於熱熨斗之底時，常有此種現象發生；又如將水驟然注入熱鍋內，每見水激搏跳動不已，是亦球騰態之一例。

固體中如毛，皮，木，石，玻璃，灰燼等類，均為非導體。金銀銅鐵等，則均為導體。惟各種導體，傳熱亦有難易之分。如圖 161 所示，取銅絲，黃銅絲，鐵絲各一條，將其一端絞合，各絲之粗細相同，且於等距離之點上，滴以白蠟少許，若於絞合之端，燃燈熱之，則見銅絲上之白蠟先行熔解而落下，鐵絲上之白蠟，熔化最遲。可知銅之傳熱最易，黃銅次之，鐵又次之。

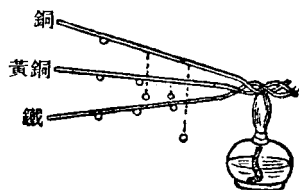


圖 161. 金屬之傳導

由實驗之結果，可知自物體之一面傳導於他面之熱量 (H)，與物體之面積 (A)，兩面之溫度差 ($T_1 - T_2$)，又傳導之時間 (t) 皆成正比，而與兩面間之距離 (l) 則成反比。此項關係，可以下式表之：

$$H = K \frac{A}{l} (T_1 - T_2) t$$

上式中之比例常數 K ，視物質之種類而異，稱為該物質之導熱係數 (Thermal conductivity)。設 $A = 1$ 平方厘米， $l = 1$ 厘米， $T_1 - T_2 = 1^\circ\text{C}$ ， $t = 1$ 秒，則 K 之值，即等於此時傳導熱量之卡數。各種物質之導熱係數如表 14。

表 14. 導熱係數

物 質	導熱係數	物 質	導熱係數
銀	0.974	冰	0.005
銅	0.918	地 層	0.004
金	0.700	瓷	0.0025
鋁	0.501	玻 璃	0.0024
黃 銅	0.280	水	0.0014
鉑	0.166	絲 布	0.0002
鉻	0.144	棉	0.00004
鐵	0.083	空 氣	0.00005

161. 對流

流體中熱之傳播，恆藉對流作用。加熱於容器之底，則下部流體，先受熱而膨脹，密度減小，向上升起；上部溫度較低而密度較大之流體，即移來補充，得熱則又上升。如是因流體之循環移動，熱亦隨之傳於全體者，即曰對流。

162 即示煮水時之對流現象。又如烟窗，為使空氣對流之設備，竈內之熱空氣，膨脹後經烟窗流出，新鮮空氣即由灶口流入，以助薪炭之燃燒。氣象上之貿易風 (Trade wind)，亦為空氣對流之現象。

空氣對流之情形，可用一簡單實驗示明之。如圖 163，下為一空箱，以木板或洋鐵製成，其一側面裝一玻璃，其上裝二燈罩。若置一燭於左方燈罩之下，而於右方燈罩之口上，

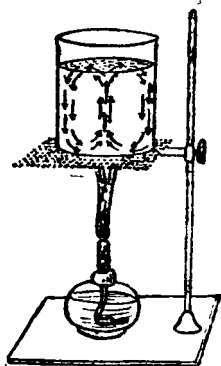


圖 162 水之對流

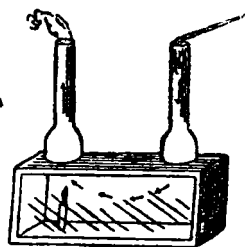


圖 163. 空氣之對流

置一燃着之香,則香烟即依箭頭所示之路徑,右入而左出,甚為明顯。

162. 輻射

熱源之熱,不藉尋常物質之媒介,而依直線方向,傳至四方者,謂之輻射。太陽之熱,射至地上,即其一例。為解釋此現象起見,科學家嘗假定有一種無重量而有彈性之介質,稱為以太 (Ether) 者,充滿於宇宙之間。當熱源之分子迅速振動時,周圍以太,次第相傳,遂及遠方。此種輻射之熱,性質與光相同,有反射,折射等現象。又如玻璃,空氣等物,能任輻射熱自由透過者,曰透輻射熱體 (Diatherman); 紙屏,鉛板等物,不能透過輻射熱者,曰不透輻射熱體 (Athorman)。

熱射於不透輻射熱體上時,則一部分反射而回,另一部分即被吸收。大凡表面光滑,及白色之物,易於反射,而不易吸收輻射熱。表面粗糙,及黑色之物,則吸熱甚易。

圖 164 所示之輻射計 (Radiometer), 即係根據此理製成,用以探測輻射熱之有無及熱量之多少。此器為一玻璃泡,中有鉛製之四葉板,裝於垂直軸上,可以自由轉動。各葉板之一面,塗有煤烟,他一面則有光澤。泡中空氣,抽出殆盡,故阻力極小。當有輻射熱射入時,葉板即生轉動。因塗黑之一面,吸熱較多,故其前方之空氣,振動亦必較速,他面前方之空氣分子,振動較緩,故塗黑之一面向後退動。旋轉之快慢,視輻射熱之多少而定。



圖 164.
輻射計

163. 冰箱及熱水瓶

夏季天氣炎熱，常致魚腐肉敗，故菜館及家庭中多備冰箱，以儲藏食物。冰箱中之冰塊，必須置於箱之上部，則與之接近之空氣，溫度降低，密度加大，沉至下部；同時溫度較高之空氣，向上升起；以作代替，即成對流之現象，使全箱空氣變冷。圖 165

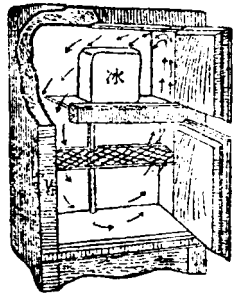


圖 165. 冰箱

中箭頭即示空氣流動之情形。若將冰塊置於下部，則上部空氣不能變冷，冰箱遂失其效用。

熱水瓶之應用，尤為普遍。圖 166 為熱水瓶之縱斷面，其主要部分，即為一兩重壁之真空玻璃瓶，瓶壁內面，鍍以銀之薄層。因兩重壁之間，既係真空，且玻璃為非導體，故熱不能由傳導或對流之作用外逸或進入。又由輻射作用以進出之熱，被銀面反射而回。故瓶中所盛之液體或冰塊等，雖歷時頗久，而溫度之改變甚少。

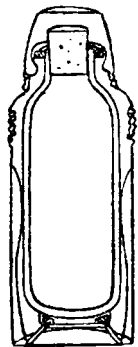


圖 166

熱水瓶

164. 暖室法

最普通之暖室法，即於室中生一火爐，藉對流之作用，可使全室空氣之溫度升高。通常於火爐上，擱一沸水器，使其繼續發出水汽，以保持適當之濕度。又須注意通風，供給新鮮空氣，使煤炭得以充分氧化。否則必生多量之一氧化碳氣，易中煤毒，甚至死亡，不可不慎也。

熱水暖室法 Hot water system of heating house, 比較安全且合衛生,其裝設之情形略如圖 167 所示。在地下室中之火爐,將水熱至幾達沸騰,此熱水及水汽即自爐頂經導管而上,入於鐵製之輻射器中,冷卻後之水,復經回水管而降入於爐底,左旁為一烟囪,爐內之熱空氣即由此處排出,冷空氣則由爐下之門,進入爐內,導管上常塗以石棉一層,使熱量不易散失,輻射器之面積頗大,故其中熱水所含之熱量,極易射出,傳與近傍之空氣,於是室內空氣即起對流現象,其情況如圖 168 箭頭所示。

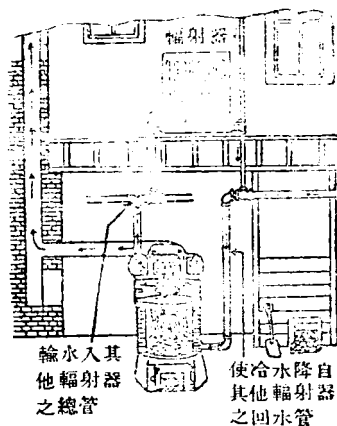


圖 167. 熱水暖室法

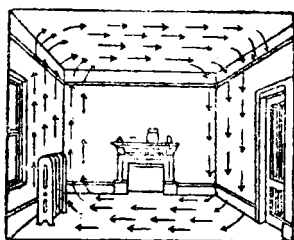


圖 168. 室內空氣之對流

溫習提要

[方法]

熱之傳播方法:

(1) 傳導:

(2) 對流:

(3) 輻射:

2. 夏令食物保藏法——冰箱：

3. 保熱保冷法——熱水瓶：

4. 暖室法：

[定 義]

1. 導體及非導體：

2. 導熱係數：

3. 透輻射熱體及不透輻射熱體：

[現 象]

球騰態：

[儀 器]

輻射計：

問題十七

1. 於室內金屬較木塊爲冷，於烈日中則金屬較木塊爲熱，試言其故。
2. 呢絨等物，可以禦寒，而覆於冰上，則可使冰不易熔解，何故？
3. 河水結冰，皆從表面結起，何故？待表面已結冰時，下部之水溫度若何？此事與水產動物之生命安全，有

何關係？

4. 毛織物之衣服，較棉織物者爲暖，何故？又冬季衣服宜黑，而夏季尙白，何故？
5. 大火禍作，必有風助火威，何故？
6. 張傘行於烈日之下，終較室內爲熱，何故？
7. 懸簾於窗，則室內涼爽，何故？
8. 冬季晴天之夜，寒氣特甚，何故？
9. 山野所積白雪，與路上所積之污雪，雖同受陽光照射，何以前者難熔，而後者易消？
10. 冰箱之壁，何以須甚厚？

第六章 熱與功

165. 熱功當量(Mechanical Equivalent of Heat)

熱爲能之一種，已於第三章 §140 中述之，故由機械能可以變而爲熱，反之亦然，二者恰成正比。設消費之功爲 W ，所得之熱爲 H ，則 $\frac{W}{H} = J$ ，其中 J 爲比例常數，稱爲熱之功當量。若令 $H=1$ 則 $J=W$ ，故熱功當量者，即相當於單位熱量之功也。

焦耳最先測定熱功當量，茲述焦耳實驗 (Joule's experiment) 於下：——如

圖 169 所示， c 爲量熱器，內盛清水中有數槳，裝於同一軸上。軸之上端纏線，跨過滑輪，下懸重錘。當錘下降時，軸即隨之旋轉，同時槳在水中攪動，結果可使水之溫度升高。所費之

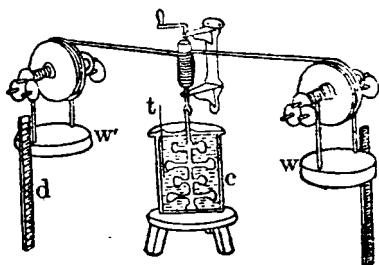


圖 169. 焦耳實驗

功 W ，可由錘之質量及其降下之距離計算之；所生之熱 H ，可由水之質量，量熱器之水當量，及升高之溫度計算之。既知 W 及 H ，即可求得 J 之數值。據焦耳及後之學者精密實測之結果，知熱功當量

$$J = 427 \text{ 克米/卡,}$$

或 $J = 4.2 \text{ 焦耳/卡,}$

或 $J = 778 \text{ 呎磅/B.T.U.,}$

166. 蒸汽機(Steam Engine)

利用熱能之原動機，通稱曰熱機(Heat engine)。發明最早，應用最廣之熱機，爲往復蒸汽機(Reciprocating steam engine)。其構造如圖 170 所示。F 爲火爐，B 爲汽

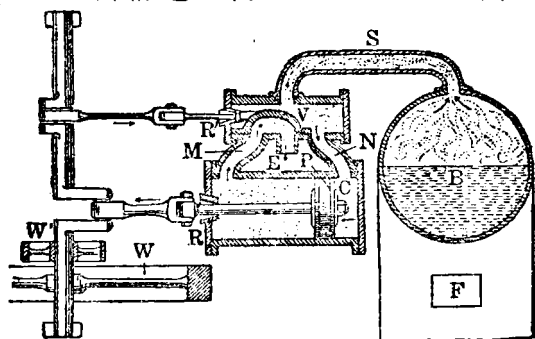


圖 170. 往復蒸汽機

鍋。蒸汽由導管 S 而入汽室。汽室與圓筒之間，有二通路 N 及 M。當圓筒中之活塞 P 在右時，則汽室中之滑動活門 (Slide valve) V 必在左。於是 N 通而 M 閉。蒸汽即由 N 進入圓筒中，推活塞向左。經推動棒 (Driving rod) R 之傳動，使曲柄軸 (Crank shaft) 轉動。同時因偏心棒 (Eccentric rod) R' 之作用，使滑動活門移至右方。於是 M 通而 N 閉。蒸汽即由 M 進入圓筒中，推活塞向右，廢汽則由排氣口 (Exhaust) E 排出筒外。如是活塞在圓筒中左右往復運動，可使曲柄軸轉動不已。

曲柄軸上常附一質量甚大之飛輪 (Fly wheel) W，利用其慣性，使轉動之快慢均勻。又通入圓筒內之蒸汽多，則推動活塞之力大而飛輪之轉動加快，反之則慢。故

因蒸汽之多少，遂使轉動生或疾或徐之現象，欲免此弊，通常於蒸汽機上附一離心節速器 (Centrifugal governor)，其構造如圖 171 所示：F, F 爲兩重球，以 G 桿與 H 軸相連，H 貫穿於重錘 P 之孔中，而 P 復由 M 桿與 F 相連，P 之下部 N，附有曲桿 Q，經 S, E 兩桿，與汽管中央之節汽

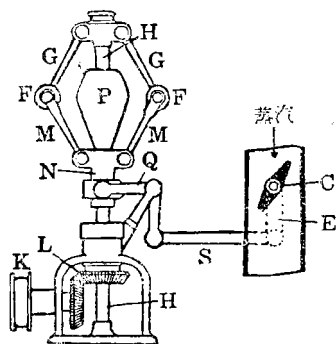


圖 171. 離心節速器

活門 C 連接，小輪 K 用皮帶連於轉軸，故軸轉動時，K 亦轉動，更由齒輪之傳遞，可使 H 發生轉動，重球 F 亦隨之轉動，若軸之轉動過速，則球之離心力加大，P 錘即被舉上，因而牽動 Q, S, E 諸桿，C 門遂橫，蒸汽通路，被其阻塞一部分，於是軸之轉動，爲之減慢，轉動既慢，錘復降下，蒸汽通路，隨之放大，轉動速度，又復增加，故用此種離心節速器，可以自動調準轉動之快慢。

167. 蒸汽輪機 (Steam Turbine)

圖 172 所示，爲一蒸汽輪機，其構造原理，與前 §80 中所述之水輪機相同，即於輪之周緣，裝若干葉片，高壓蒸汽，由射氣管口噴出，以適宜之方向，衝擊葉片，輪即轉動，惟蒸汽衝擊一組葉片後，其所含能量，尙屬甚大，若即行放棄，則殊不經濟，故通常於同一軸上，

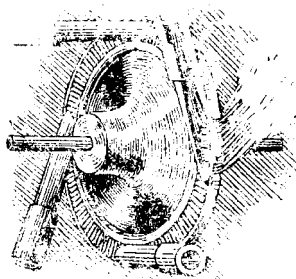


圖 172. 蒸汽輪機

裝若干圓盤，盤之周緣，各裝葉片，並於每二圓盤之間，另設一組葉片，固定於輪匣之內緣，有彎曲之方向，適與旋轉葉片相反，如圖 173 所示，B、D、F 等即為旋轉葉片，C、E 等則為固定葉片，蒸汽衝擊 B 組葉片後，由 C 組葉片之導引，再衝擊 D 組葉片，復由 E 之導引而衝擊 F，如是遞次相傳，直至最後一組葉片，始將蒸汽排出。

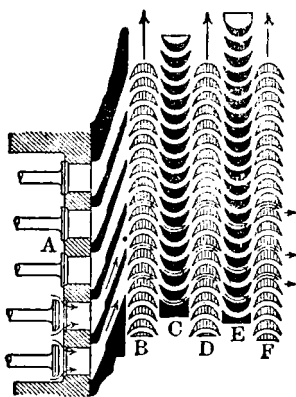


圖 178. 輪機之葉片

蒸汽衝擊輪機，則直接發生轉動，而上述之蒸汽機，則由活塞之往復運動，經種種傳動，而後改為轉動，其間常損失一部分之能量，故蒸汽輪機之效率，恆較蒸汽機之效率為大，又蒸汽機之軸，每因活塞之往復運動而生振動，而蒸汽輪機則無此弊，且輪機佔據地位，亦不及蒸汽機之大，因此，人多樂用之。

168. 內燃機(Internal Combustion Engine)

利用汽油等燃料與空氣之混合物，在圓筒內燃燒，因而推動活塞之熱機，曰內燃機，其構造如圖 174 所示。

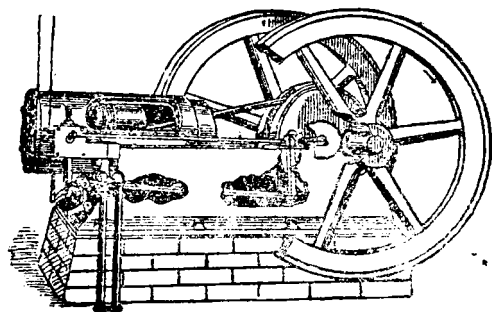


圖 174. 內燃機

內燃機之動作，分為四段，每段

動作，曰一動程 (Stroke)。合四動程，成一循環 (Cycle)。圖 175 即示四個動程，茲分述於下：

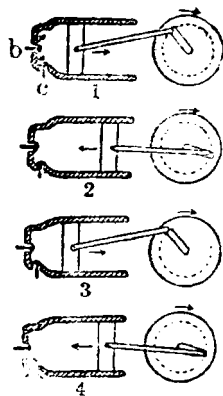


圖 175 四個動程

1) 吸氣動程 (Suction stroke) 飛輪轉動，活塞向右移時，進氣活門 (Inlet valve) b 開，混合氣體進入圓筒中。

2) 壓縮動程 (Compression stroke) 飛輪繼續轉動，活塞被推向左，筒內氣體，即受壓縮。

(3) 膨脹動程 (Expansion stroke) 通電使生火花，氣體即行燃燒，體積突然膨脹，以甚大之壓力，將活塞推至右方。

(4) 排氣動程 (Exhaust stroke) 活塞再向左移時，排氣活門 (Exhaust valve) c 開，廢氣即由此門排出筒外。

由上所述，可知欲完成一循環，飛輪必須轉動兩周，但每一循環中僅第三動程能對於活塞作功，此外三動程中，飛輪之轉動，全恃其慣性之作用，故內燃機上常須裝一質量甚大之飛輪也。

汽車
(參閱本編前面之插圖) 內所用之發動機，亦為內燃機，圓

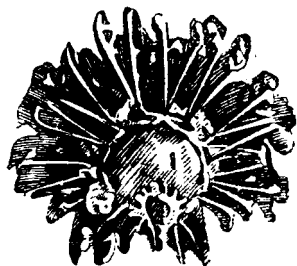
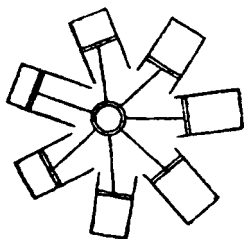


圖 176. 飛機上用輻射形發動機

筒周圍有水套 (Water jacket), 其中冷水, 周流不息, 以除去圓筒內所生之熱, 否則活寒膨脹, 塞住筒中, 不能移動矣。又飛機上之發動機, 常聯合數圓筒而成, 排列成輻射形, 使其順次爆發, 交互利用, 以轉動曲柄軸, 如是則笨重之飛輪, 可以省去, 其形狀如圖 176 所示, 左為其外形, 右為其剖面, 所有活寒之桿, 圍繞於曲柄軸上, 故各機內氣體爆發之時間, 可以參差不齊。

溫習提要

〔定 義〕

熱功當量:

〔熱 機〕

1. 蒸汽機:

2. 蒸汽輪機:

3. 內燃機:

問題十八

1. 機械能可以變為熱能, 熱能亦可變為機械能, 試各舉數例以明之。
2. 設水銀由 5 米高處落下, 與地面衝突, 所生之熱, 全

- 部吸收於水銀之自身內,問其溫度應上昇幾度?
3. 設鉛彈衝突於牆壁所生之熱量,能吸收其二分之一於體內,於是溫度增加 30°C ., 問此鉛彈應具之速度幾何?
 4. 設 0°C . 之冰塊由高處落下,衝突地面,所生之熱量悉數聚集於其本體上,而使之完全熔解,問此冰塊落下之高度應爲若干?
 5. 作焦耳實驗時,用質量 50 仟克之錘,從 30 米高處落下,可使 2 仟克之水,溫度昇高幾度?
 6. 10 仟克之物體,以 200 米/秒之速度落至地面,衝突之後,生熱若干?
 7. 某熱機加熱 10000 卡,作功 12000 焦耳,問此機之效率若干?
 8. 汽車,飛機上之發動機,何以不用蒸汽機而用內燃機?

第四編 聲學

第一章 波動

169. 波動(Wave Motion)

物質之一部分,發生振動時,其他各部分,亦以一定之週期,漸次起同樣之振動,此種現象,謂之波動。波形自近而遠,傳至四方,謂之波之傳播(Wave propagation)。傳播波動之物質,謂之介質(Medium)。表示傳播方向之線,謂之波射線(Wave ray)。

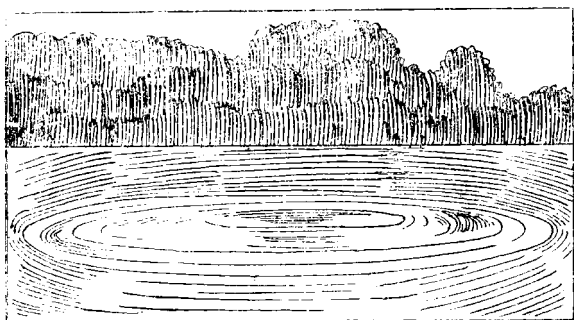


圖 177. 水波

投石於池中,則水面即起環狀之波紋,一高一低,由近及遠,如圖 177 所示。此種水波,雖孩提之輩,亦已見之,是爲波動最普通之一例。水波之傳播,以水爲介質,吾人常見浮於水面之樹葉,未嘗隨波逐流,可知波之傳播,乃爲波形之進行,而介質之分子,則僅在其平衡位置之近

傍，作往復振動而已。又水面之分子，既離開其平衡位置後，因重力之作用，使其回復原位。於是上下振動，遂成水波。此種由重力作用而生之波，謂之**重力波** (Gravitational wave)。

170. 橫波 (Transverse Wave)

取長繩一條，一端繫於柱上，用手曳平，上下振動，則繩上即現波形，自右向左進行，如圖 178 所示。此種波動，其介質各點振動之方向，與波射線垂直，謂之橫波，或曰高低波。波形上最高之點曰**波峯** (Crest)，如 c_1, c_2 等是。最低之點曰**波谷** (Trough)，如 t_1, t_2 等是。峯或谷與平衡位置之距離，曰**波幅** (Amplitude)。位置相似，振動方向相同之點，如 p_1 及 p_2 ； c_1 及 c_2 等，曰同一之**相** (Phase)。相鄰兩同相點間之距離，如 p_1p_2 ，或 c_1c_2 等，曰**波長** (Wave length)。

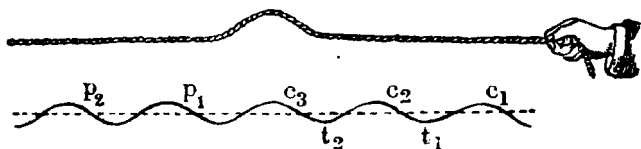


圖 178. 橫波

設 λ 爲波長， T 爲振動之週期， v 爲波之傳播速度，則

$$v = \frac{\lambda}{T},$$

或 $\lambda = vT.$

又設 n 爲質點之振動數，則

$$T = \frac{1}{n},$$

故
$$\lambda = \frac{v}{n}$$

由上式可知在同一介質中，波長與振數成反比例。

171. 縱波(Longitudinal Wave)

取一螺線彈簧，水平懸之，如圖 179 所示。將其右端向左驟壓之，則因彈性與慣性之作用，螺線上即生一疏一密之現象，漸次傳至左端。此種波動，其介質各點振動之方向，與波射線相一致，謂之縱波，或曰疏密波。波形上較密之處曰稠密(Condensation)，較

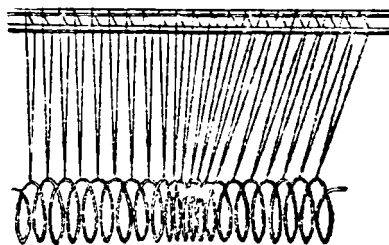


圖 179. 縱波

稀之處曰稀疏(Rarefaction)。縱波之波長、週期、振數及傳播速度之關係，與橫波完全相同，茲不贅述。

172. 波前(Wave Front)

介質中同相諸點之軌跡，謂之波前。投石於靜水中，其波前為圓形。發音體周圍所生之聲波，其波前為球面。由拋物面鏡反射之光波，其波前為平面。波前為圓形者，曰圓形波(Circular wave)，其為球面者，曰球面波(Spherical wave)，其為平面者，曰平面波(Plane wave)。

173. 波之反射及折射(Reflection and Refraction)

波由一介質中進行，至第二介質之境界面時，則一部分折回原介質中，其他部分改變方向而入第二介質

中前者稱爲波之反射，後者稱爲波之折射。例如水波與岸相觸時，即依反對方向而回，是爲反射之現象。又水波之速度，與水之深度成正比，而江河之水，岸旁較淺，故當水波行近岸旁時，其波前常漸次折與岸線平行，是爲折射之現象。聲波，光波等，均有反射及折射之現象，極關重要，後當詳述之。

174. 波之干涉(Interference)

波長相等，波幅相同之二組波，同時傳達於介質中之一處，若其相亦同，則互相增助，使振動加強一倍。若其相相反，則互相抵消，使振動爲零。此種現象，曰波之干涉。

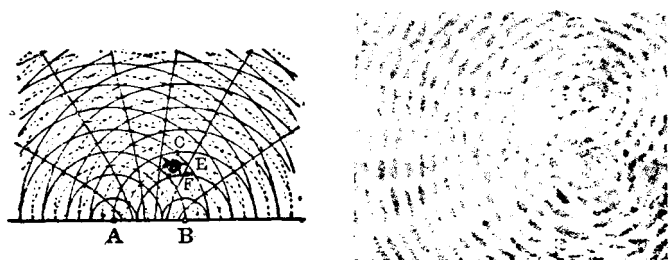


圖 180. 波之干涉

例如於靜止之水面上，同時投下兩小石，則兩組水波互相會合，而呈干涉之現象。如圖 180 之左方所示，A、B 兩點爲投石之處，實線表示波峯，虛線表示波谷。由 A、B 發出之水波，峯與峯相合於 C 點，谷與谷相合於 D 點，互相增助，於是峯益高，而谷益低。在 E 點，自 A 發出之波爲峯，自 B 發出之波爲谷，互相抵消。在 F 點亦爲谷與峯相合之處，故亦靜止不動。此種靜止之點，謂之節點 (Nodal point)。振動加倍之處，謂之波腹 (Loop)。若再經半週

期之時間後，則 C 點成爲兩谷相合之處，D 點成爲兩峯相合之處，振動仍常加強一倍。而 E, F 等點，仍爲峯與谷相合之處，故依然靜止。此等節點之軌跡，如圖中之放射線所示者，謂之節線 (Nodal line)。又右圖所示者，爲適當刺激水銀面上之二點，所發兩組波之合波照片，其中節線之分布，與左圖完全一致。

175. 駐波 (Stationary Wave)

波長相等之二等幅波，依反對方向互相會合時，因干涉之作用，其合波中常現若干節點，兩節點間之部分，振動不息，而波形並不前進者，謂之駐波，或曰定波。如圖

181 所示，(a) 之實線爲自左向右之波，虛線爲自右向左之波。此二波各向左右進行 $\frac{1}{4}\lambda$ (λ 爲波長) 時，

則其形狀如 (b)，在 n_2, n_3 兩點間，互相增助，故波峯加高一倍。若二波進行 $2 \times \frac{1}{4}\lambda$ 時，則其形狀如 (c)，會合之處，互相抵消，成一直線，故 n_2, n_3 仍爲靜止之節點。若二波進行 $3 \times \frac{1}{4}\lambda, 4 \times \frac{1}{4}\lambda, \dots$ 時，則其形狀各如 (d), (e), (f), (g)，所成合波，如粗線所示，或相增助，或相抵消，而 n_1, n_2, n_3

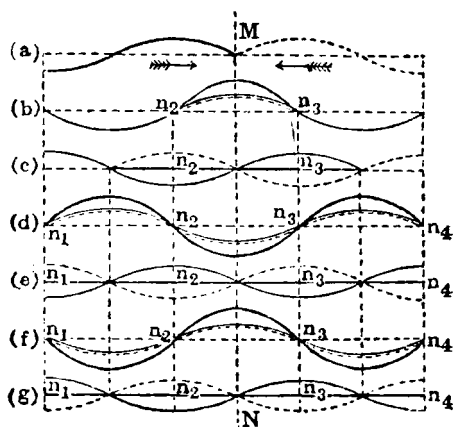


圖 181. 駐波

n_1 諸點恆成爲靜止不動之節點，合波即於節點間振動而不前進，相鄰兩節點或波腹間之距離，等於波長之半

$$\left(\frac{1}{2}\lambda\right).$$

溫習提要

[定 義]

1. 波動:
2. 重力波:
3. 橫波:
4. 波峯與波谷:
5. 波幅, 相, 波長:
6. 縱波:
7. 稠密與稀疏:
8. 波前:
9. 反射及折射:
10. 干涉:

11. 節點節線,波腹:

12. 駐波:

[公 式]

波長 λ , 波之傳播速度 v , 週期 T 及振數 n 之關係:

問題十九

1. 風吹過麥田時,麥穗即起伏而成波形,此種麥浪爲縱波,抑爲橫波,試說明之.
2. 設波之傳播速度爲 340 米/秒,振數爲 274, 求其波長.
3. 設波之傳播速度爲 340 米/秒,週期爲 $\frac{1}{200}$ 秒,求波長.
4. 設波長爲 50 厘米,速度爲 340 米/秒,求振數.
5. 設每秒之振數爲 600 次,波長爲 9 毫米,求速度及週期.

第二章 聲波

176. 聲波(Sound Wave)

取一音叉 (Tuning fork), 以錘擊之, 則發聲音輕觸商上, 頗感麻木, 插入水中, 水即四濺, 若於其旁懸一通草球 (Pith-ball), 則球即跳動不已, 如圖 182 所示, 由此種種試驗, 可知音叉發聲時, 振動甚為激烈, 其他發聲體 (Sounding body), 亦莫不皆然, 故音之生成, 乃由物體之振動所致, 其理甚明。

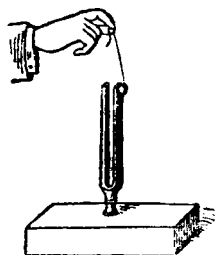


圖 182. 音之生成

音叉振動時, 因其振幅甚小, 故人目不易察見, 若於其一叉股 (Prong) 上附一小針, 令針尖與塗有煤煙之玻璃板面相觸, 擊叉使發聲音, 並將音叉迅速移動, 則板上即現出一波形曲線 (Wavy line), 如圖 183 所示, 可以表示叉股左右振動之情況。

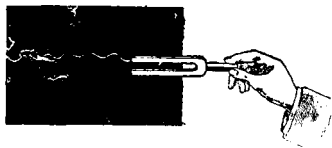


圖 183. 音叉之振動

如圖 184 (1) 所示, 將一細螺線彈簧之一端, 懸於音叉之叉股上, 他端固着於薄膜之中央, 當音叉左右振動時, 螺線即生稀疏稠密相間之現象, 自左而右, 傳至薄膜, 引起其同樣之振動, 若以空氣代替彈簧, 以耳代替薄膜, 則當叉股由其平衡位置向右振動時, 其鄰接之空氣, 受壓而成稠密, 空氣亦略具彈性, 既密之後, 又必膨脹, 故稠

密部分 c ，及稀疏部分 r ，依次向右推進。同理，當叉股由其平衡位置向左振動時，空氣亦呈一疏一密之現象，向右傳播。故音叉振動時，空氣中常生成縱波，即聲波是也。此種聲波，傳至耳中，引起鼓膜之振動，遂成聲音之感覺。又如(3)所示之曲線，用以表示聲波之狀況。波峯相當於稠密，波谷相當於稀疏， AC 即為波長，距離 ab 為波幅，亦即各質點離開其平衡位置而移動之距離也。

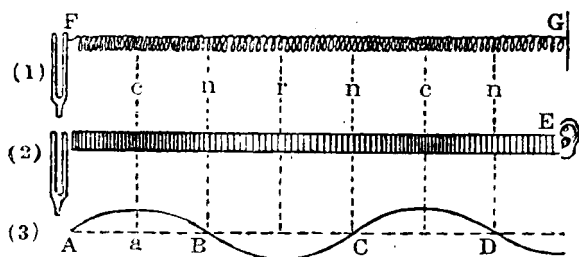


圖 184. 聲波

發聲體振動時，聲波即向四方傳出，初不限於一定方向。故如圖 185 所示，當振鈴作聲時，苟無物體阻隔，則吾人在任何方向，均可聞其聲音。



圖 185 聲波之傳播

發聲體之周圍，若無介質存在時，則無由發生聲波，故物體雖激烈振動，但吾人仍不能聞其聲音。如圖 186 所示，懸電鈴於抽氣機之鐘罩內，通電使錘擊鈴而將空

氣逐漸抽去，則鈴聲漸次減弱，終至寂然無聞。若將空氣重行放入，則鈴聲復響亮如初。故介質之存在，為傳播聲波必要之條件。

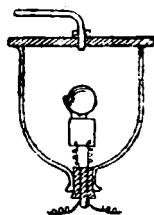


圖 186.

真空不能傳聲

177. 聲波之速度

傳播聲波，必需介質，已如上述。介質之最重要者，則為空氣。據實測之結果，知空氣傳聲之速度，與溫度之高低有關。在 0°C . 時之速度為

$$v_0 = 331 \text{ 米/秒,}$$

溫度每升高 1°C ., 則聲波傳播之速度，約增加 0.6 米/秒，故當 $t^{\circ}\text{C}$. 時，其速度應為

$$v_t = 331 + 0.6t \text{ 米/秒,}$$

通常空氣之溫度，約為 15°C ., 故聲波傳播之速度約為 340 米/秒。

傳播聲波之介質，不限於空氣，其他氣體及液體固體物質，亦均能傳聲。且在液體固體中，傳聲之速度，較在空氣中為大，其值如表 15 所示。

表 15. 聲波之速度(在 0°C . 時)

介	質	速度(米/秒)	介	質	速度(米/秒)
玻	璃	5600	水		1450
	鋁	5100	氫		1280
	鐵	4900	空	氣	331
	鉛	1300	碳	酸	259

178. 聲波之反射

聲波傳出時，如遇其他介質之境界面，則亦呈反射之現象。如圖 187 所示，M 為一凹面鏡，F 為其焦點。於焦

點前 W 處置一錶。吾人可在 FW 線上覓得一點 E，置耳於此點，所聞錶聲較他處為明晰。若將凹面鏡取去，則 E 處幾不能聞

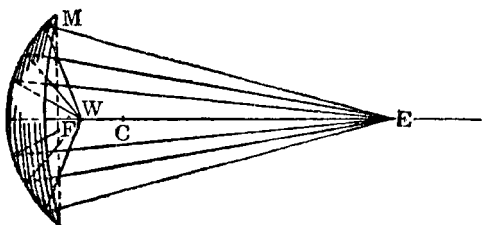


圖 187. 聲波之反射

細弱之錶聲。此蓋因自 W 發出之聲波，遇鏡面而反射，此種反射之聲波，聚集於 E 處，故聞之較為明晰也。

吾人在山谷之中，大聲高呼，每聞回聲 (Echo)，即因聲波遇障礙物而反射之故。室內談話時，牆壁上亦反射回聲，惟因距離甚近，故反射之聲波與發出之聲波，幾於同時傳入耳中，使聲音加強。室內談話，不聞回聲，且較曠野之處更為清晰而省力者，即以此故。但在大會堂內，回聲傳來較遲，反與原聲互相混雜，通常為免除上述缺點起見，建築大會堂，多用圓頂。

179. 聲波之折射

聲波遇第二介質時，一部分反射而回，另一部分折射而入第二介質中。如圖 188 所示中為一橡皮袋，形如凸透鏡，內盛碳酸氣。於 W 處懸一錶，則可於 E 處聞得擺動之聲，甚為清晰。此即由於碳酸氣之密度較空氣為大，而傳聲之速度則較空氣為小，故聲波射至袋而，

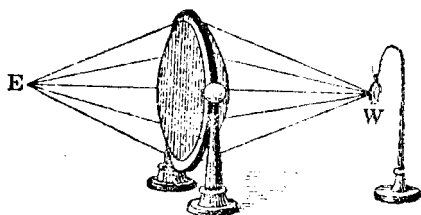


圖 188. 聲波之折射 (一)

即起折射現象。又因周緣較薄，中央較厚，故折射波之速度，周緣較中央為大，得以聚集於一點。

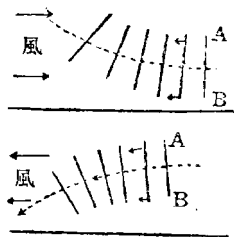


圖 189. 聲波之折射 (二)

由一處發出之聲波，若遇順風，則能傳至遠方。若遇逆風，則遠處之人，不易聽得聲音，是亦折射之作用所致。因近地面處，障礙較多，故風之速度，高處較低處為大，如圖 189，波前 AB 向左進行，其上部所受之風力，較下部為大，故逆風時，漸次折而向上，順風時，漸次折而向下，此時立於遠方之人，易聞傳來之聲。

又空氣之密度，各層不同，日間下層空氣之溫度，較上層為高，而密度則較小，故聲波傳播之速度，下層較上層為大，於是折而向上，夜間則反之，故聲音傳送之路程，夜間恆較日間為遠。

180. 聲波之干涉

空氣之中，如有兩組聲波同時傳來，則生干涉之現象。實驗聲波之干涉，常用干涉管。其構造如圖 190 所示。D、E 兩曲管以管套 K、K' 連接之，且能在套內自由進退，使 CDP 之長得以任意變更。於管口 A 處，置一發聲之音叉，而於管口 B

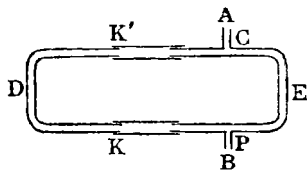


圖 190. 干涉管

處附耳聽之。由 A 傳入之聲波，至 C 處即分為 CDP 及 CEP 兩路進行，至 P 處又合而為一。若此兩路程之差，適等於半波長之偶數倍時，則兩波傳至 P 處，其相一致，故振幅

加大，聲亦加強，若兩路程之差為半波長之奇數倍時，則兩波之相恰相反對，故在 B 處無聲可聞。

又如圖 191 所示， f, f 為音叉兩股之端，當其向內振動時，則 a 處成為稠密，b 處成為稀疏，兩叉股向外振動時則反之，故由 a, b 發出之波，其相恆相反，因之凡

在曲線上之諸點，均因干涉而成無聲，此曲線即所謂節線是也。以手執音叉之柄，擊叉股使其振動，置於耳傍，徐徐旋轉，所聞之聲，時強時弱，干涉現象，極易察知。

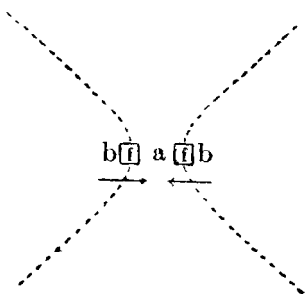


圖 191. 干涉之例

181. 拍(Beat)

振數相差甚少之二發聲體，同時振動時，因干涉之作用，使聲音時而加強，時而減弱，此種現象，稱之曰拍。

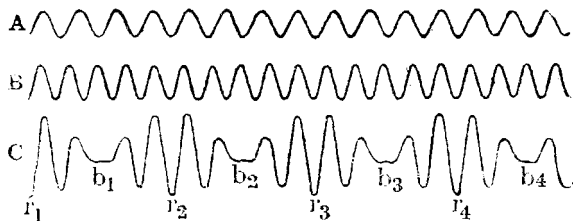


圖 192. 拍之成因

如圖 19 所示，A, B 兩正弦曲線，各表由振數不同之二發聲體所發出之聲波，曲線 C 表合成之聲波。在 r_1 處兩波同相，故音加強，過此則漸弱，至 b_1 處，A, B 相差半波，故其相適相反對，音亦最為弱小，過此則聲又漸強，至 r_2 處，A, B 相差一波，其相又同，音復最強，依此類推，凡在

r_3, r_4 等處,聲音最強,在 b_2, b_3, b_4 等處,聲音最弱,一強一弱相間而生,遂成爲拍。

設 n_1, n_2 各爲甲乙兩發聲體之振數, (假定 $n_1 > n_2$)
 x 爲 1 秒內所生之拍數, (稱爲拍頻 Beat frequency)

則 $\frac{1}{x}$ 秒爲一次拍所需之時間,

$\frac{n_1}{x}$ 爲在 $\frac{1}{x}$ 秒內由甲送出之波數,

$\frac{n_2}{x}$ 爲在 $\frac{1}{x}$ 秒內由乙送出之波數。

由上所述,可知生拍一次,必須相差一波,

$$\text{即 } \frac{n_1}{x} = \frac{n_2}{x} + 1,$$

$$\text{故 } x = n_1 - n_2.$$

此式即表示拍頻等於兩發聲體振數之差,例如振數爲 256 及 261 之兩音叉,同時發音時,則每秒內生 5 次之拍若拍頻過大,則強弱之聲,反致混淆,拍之現象,不易察知。

182. 共鳴(Resonance)

發聲體遇有振數相同之聲波傳來時,能漸行振動而發聲音,此種現象,謂之共鳴或曰共振,茲舉數實驗以明之:

(1) 如圖 193 所示, A, B 爲振數相同之兩音叉,並置桌上,相距甚近,以橡皮錘猛擊 A 叉,使之振動,送出聲波,

此種聲波，推動 B 叉，其力雖微，但以相等之週期繼續推動多次後，則振幅逐漸擴大，可以發出聲音，故按住 A 叉，即可聞 B 叉之聲，惟甚微弱已耳。

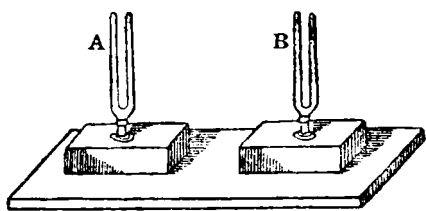


圖 193. 音叉之共鳴

(2) 如圖 194 所示，為一弦音計 (Sonometer)。上張同粗同長之兩弦，調準之使發同樣之音，將紙剪成八形，跨於一弦之中

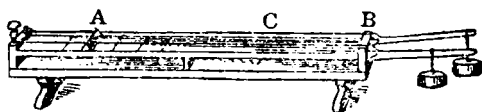
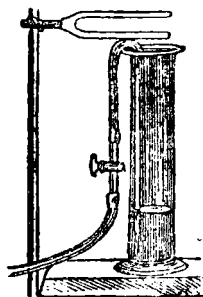


圖 194. 弦之共鳴

央，以指撥動其他一弦時，則見此弦上之紙片，跳動不已，甚至躍出弦外，按住他弦，亦可聽得此弦所發微弱之聲，但若將此弦略略放鬆時，則紙片之跳動，遠不及先前之劇烈，蓋此時兩弦之振數不相等故也。

(3) 如圖 195 所示，在長玻璃筒中插入一玻璃管，更用橡皮管使與水槽相連通，將水槽移上或移下時，可以任意改變筒內水面之高低，於筒口上置一振動之音叉，初則聲音微弱，至水面升至一定之高處，換言之，即當筒內空氣柱達於一定之長度時，聲音特別宏大，過此又漸減弱，此即由於空氣柱與音叉起共振之作用所致。



通常音叉均須插於空箱之上，多種樂器亦皆附有空箱者，咸係利用空氣之共振，使聲音格外增強，此種空箱，

圖 195. 空氣柱之共振

稱爲共鳴箱(Resonance box).吾人耳中之鼓膜能與振數在16次至36000次內之音起共鳴之作用,故能聽種種之音,若所發之音,其振數在此範圍以外,則雖傳入耳中,亦不能發生音之感覺.

183. 聲波速度之測法

聲波速度之測法頗多,茲所舉者,爲利用共鳴作用以測空氣傳聲速度之方法,其原理如次:

圖196之裝置與上圖195所示者大同小異,設水面漸次降下,至A處發生第一次共鳴,則A面上空氣柱之長(l_1),當等於波

長之四分之一 ($\frac{1}{4}\lambda$). 因音叉之一股

由平衡位置a,動至b時,則有一密部傳入筒內,經水面反射後,復出至筒口,若此時適當叉股已回至a而開始向上運動,則反射之密部與a上所生之密部相重合,同樣,叉股由a動至c時,則有一疏部傳入筒內,經水面反射後,復出至筒口,若此時適當叉股已回至a而開始向下運動,則反射之疏部與a上所生之疏部相重合,其結果均足

以使音加強,而成共鳴,但叉股由a至b,復由b至a,或由a至c,復由c至a,皆爲半個振動,波動進行之路程,常爲半波長,而在此半週期之時間內,聲波由筒口至水面,復由水面回至筒口,故

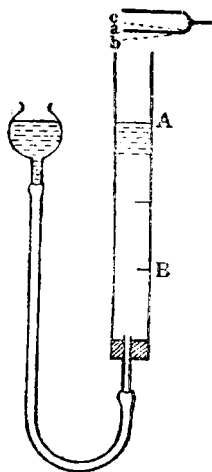


圖 196.

利用共鳴以測音速

$$2l_1 = \frac{1}{2}\lambda,$$

即
$$l_1 = \frac{1}{4}\lambda.$$

設音叉之振數爲 n (通常音叉之振數,均刻於其底部)

則速度

$$v = n\lambda = 4nl_1.$$

同理,如將水面降至 B 處,發生第二次共鳴,則 B 面上之空氣柱之長

$$l_2 = \frac{3}{4}\lambda,$$

故
$$v = \frac{4}{3}nl_2$$

餘類推,故若測得 l_1, l_2 等長度,即可求出 v 之數值,此諸 v 之平均值,即表空氣傳聲之速度,又若 v 爲已知,則可求出 n ,故用此法,亦可測定音叉之振數。

溫習提要

[定 義]

1. 聲波:
2. 回聲:
3. 拍:
4. 拍頻

5. 共鳴:

[方 法]

1. 聲波反射之試驗法:
2. 聲波折射之試驗法:
3. 聲波干涉之試驗法:
4. 共鳴之試驗法:
5. 聲波速度之測法:

問題二十

1. 蚊蠅飛過時,常聞嗡嗡之聲,此聲由何而來?
2. 設有一手鎗,一停錶,一溫度計,如何測量湖面之寬?
3. 一人以耳伏於鐵軌上,另由一人於遠處打擊鐵軌時,則此人可聞兩次聲音,何故?又設此兩聲音先後傳入耳中,其間相隔一秒,問打擊處與此人之距離若干?(假定此時之溫度為 0°C .)
4. 一人遠望輪船放出白煙後,再經 2.6 秒始聞汽笛之聲,求輪船與此人之距離。(假定空氣之溫度為 25°C .)
5. 一人向牆壁發聲,經 $\frac{1}{2}$ 秒後聞得回聲,求牆壁與此人之距離。(假定空氣之溫度為 15°C .)

6. 一人在船上放礮,於 6 秒後聞得由對山傳來之回聲,求對山與船之距離.(假定空氣之溫度為 62°F .)
7. 雷聲殷殷不絕,何故?
8. 用圖 190 之干涉管檢查振數為 425 之音叉,欲聽得最強之聲,兩路程應相差幾何?
9. 設當干涉管之兩路程相差 20 厘米時,聲音消滅,問音叉之振數若干?(假定此時之溫度為 0°C .)
10. 用振數為 250 之音叉,作干涉管實驗,測得兩路程相差 60 厘米時,聲音消滅,求聲之速度.
11. 設有振數為 512 及 515 之二音叉,同時發音時,求其拍頻.
12. 設有甲乙丙三音叉,甲之振數為 465,乙之振數為 472,當甲丙兩叉同時振動時,每秒生拍 3 次,乙丙兩叉同時振動時,每秒生拍 4 次,求丙叉之振數.
13. 用圖 196 之儀器,設空氣柱之長為 11.5 英寸時,生第一次共鳴,管中空氣之溫度為 20°C ., 問音叉之振數為若干?

第三章 樂音

184 樂音(Musical Sound)

聲音可分兩種，如鼓瑟操琴，燕語鶯聲，聞之令人欣然色喜者，曰樂音。又如礮聲隆隆，機聲軋軋，聞之令人疾首蹙額者，則曰噪聲(Noise)。如圖 197 所示，於金屬或厚紙圓板上，鑽直徑約 $1/4$ 英寸之小孔 48 個，各孔之距離一組相等，他組則無一定之距離。以手搖之，使其轉動，並以口徑約 $1/8$ 英寸之管吹氣於板面。若管口正對距離相等之一組小孔時，則可聞得樂音，若管口正對他組小孔時，則生噪聲。可知發聲體之振動，有一定之規律時，則生樂音，否則即成噪聲。其情形可用圖 198 之曲線表示之：不規則之曲線 A 代表噪聲，正弦曲線 B 代表樂音。

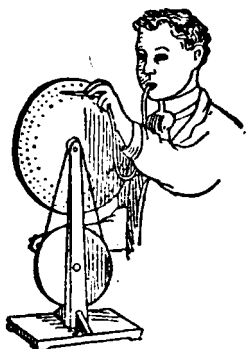


圖 197. 樂音與噪聲之成因

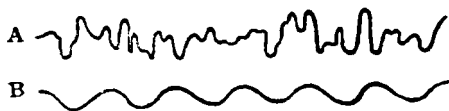


圖 198. 樂音與噪聲之代表曲線

噪聲無關重要，故物理學上專就樂音研究之。樂音有三特性，即響度，音調及音品是也。茲分述於次：

185. 響度(Loudness)

聲音之強弱，曰響度。撞鐘播鼓，用力愈大，則聲音亦愈強，可知響度隨振幅之大小而異。申言之，即振幅大，聲音強，振幅小，聲音弱。

又聲波爲球面波，雖音源愈遠，則波前之面積愈大。以一定之振動能量，分布於較大之球面上，則單位面積上所有之振動能量必較少，因之波幅減小，聲亦減弱。由幾何定理，球之面積，與半徑之平方成正比例，故球面上每單位面積所有之振動能量，與音源距離之平方成反比例，即響度之大小，與音源距離之平方成反比例也。若令聲波沿一細管進行，而不向四方發射，則響度可不改變。醫生所用之聽診器，即係利用此理製成。

186. 音調(Pitch)

聲音之高低，曰音調。音調之高低，由振數之多少而定。即振數多，則音調高，振數少，則音調低。欲測發聲體之振數，常用測音器(Siren)，其構造如圖 199 所示。A 爲一

圓筒，筒蓋上有若干小孔，以等距離排列於同一圓周上，筒上覆一金屬圓盤，可繞 B 軸轉動，盤上亦有小孔，其數與蓋上相同，所有之孔，均非鉛直，而稍傾斜，且蓋上之孔如向右傾斜，則盤上之孔必向左傾斜，兩者之方向，恰相反對。

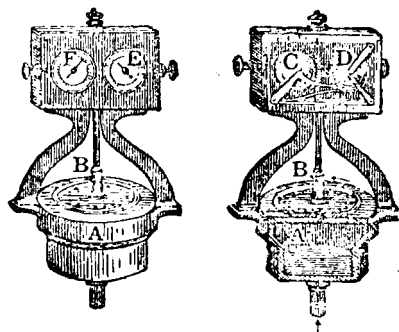


圖 199. 測音器

由下管送氣流入筒內，經孔道而向上噴出，可使圓盤轉動，B 軸亦隨之旋轉。軸之上端有螺旋，與齒輪 C 相連，於是 C 及其上所裝之指針亦起轉動。C 旋轉一周時，可使齒輪 D 轉過一齒，指針 F 附裝於 D 上，故 F 所指者為 C 輪旋轉之次數。當圓盤與筒蓋上之孔相對時，則氣體通過，空氣壓縮，成為稠密。不對時則氣流塞斷，空氣膨脹，成為稀疏。如孔數為 n ，則轉動一周，送出 n 個疏密波。若在 t 秒內圓盤轉動 N 周，則所發之聲音振數為 $\frac{nN}{t}$ 。調準送氣量，使其音與欲測之發聲體所發之音同高，則此發聲體之振數，可由指針讀出之。

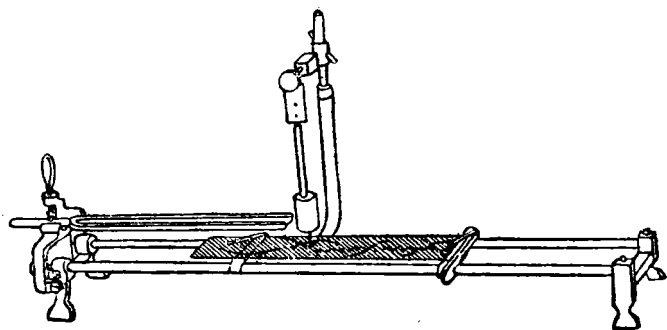


圖 200. 振數記錄器

又用圖 200 之振數記錄器，亦可測音叉之振數。其結果較上法更易正確。此器中央懸一擺，下附一針。針之尖端適與塗有煤煙之玻璃板相觸。當擺前後振動時，若令玻璃板向右滑動，則針尖即在板上劃成一曲線。左方為欲測之音叉，叉股上附有一針，其尖端亦與板面相觸。故振動時亦劃成一曲線。圖中粗者即為擺錘下之針所畫，細者即為叉股上之針所畫，兩者相並而立。設擺之週

期爲 t ，在粗線上相鄰兩峯之間數出細線上之波數爲 n ，則 $\frac{n}{t}$ 卽爲音叉之振數。

187. 音品(Timber)

聲音之差別，曰音品，或曰音色。各種發聲體所發之音，雖響度及音調皆相同，但吾人仍能一一辨別者，卽因其音品不同之故。

緊張一弦，若撥其中點，則全弦作整個之振動，如圖 201 (1) 所示。此時所發之聲，音調最低，稱爲基音(Fundamental tone)。若輕按弦之某點，而於他點撥之，則弦分數區振動，如圖 (2), (3) 所示。此時所發之聲，音調較高，稱爲泛音(Overtone)。設基音之振數爲 n ，則振數爲 $2n$ 之音，曰第一泛音，振數爲 $3n$ 之音，曰第二泛音，餘依此類推。

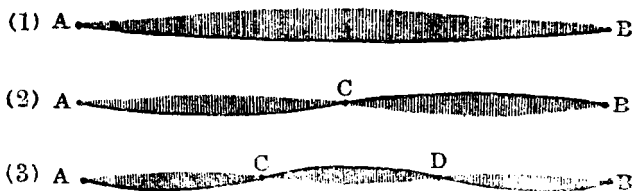


圖 201. 基音與泛音

考各種發聲體振動時，不僅發出基音，同時恆有若干泛音混雜其中。如圖 202 所示者，卽爲一弦同時發出基音及第一泛音之情況。如祇有基音而不雜泛音時，謂之單音(Simple tone)，其雜有泛音者，則成爲複音(Compound tone)。通常樂器，均發複音，故其基音之響度及音調雖相同，而其中所含



圖 202. 一弦同時發出基音與第一泛音

之泛音則互異，音品之別，即由於此。

上述音品之原因，爲德人赫爾姆霍斯 (Helmholtz) 所最先發見，渠用如圖 203 之共鳴器 (Resonator)，將複音中之各成分單音分析而出。此器爲球形，其上有一大口 A，以備接收傳來之聲波，並有一小口 B，可插入耳中，以察其由共鳴而生之音。赫氏共鳴器有大小種種，各能與一定音調之音起共鳴，若音調不同，則寂然無聲。故樂音中與基音混合之泛音，可用此種共鳴器分析之，實爲研究音品之利器。

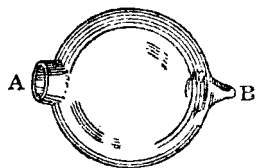


圖 203.

赫爾姆霍斯共鳴器

188. 都卜勒原理 (Doppler's Principle)

火車進站時，立於月臺之人，所聞汽笛之聲，音調漸次增高；離站時則汽笛聲漸低。如是因發聲體與觀察者之相對運動，而所聞之聲，音調改變之現象，曰都卜勒效應 (Doppler effect)。蓋音調之高低，由振數之多寡而定，當人與發聲體之間，有一定之距離時，則每秒內送入耳中之波數，即等於發聲體之振數。若人向發聲體進行，或發聲體向人移近時，則每秒內耳中所接收之波數增加，故音調變高。反之，如人與發聲體間之距離，因運動而增大時，則每秒內耳中所接收之波數減少，故音調漸低。是謂都卜勒原理。

189. 音階 (Musical Scale)

二音振數之比，曰音程 (Musical interval)。音程若爲 1:2, 2:3 等簡單整數之比，則同時並奏，聞之悅耳，謂之諧

和(Consonance).音樂上將能諧和之音,按其振數之多少依次排列之,即成音階,列表如下:

表 16. 音階

文 字	C	D	E	F	G	A	B	C'	D'
西 音	do	re	mi	fa	sol	la	ti	do'	re'
中 音	合	四	乙	上	尺	工	凡	六	fi
音 程	9 8	10 9	16 15	9 8	10 9	9 8	16 15	9 8	
相對振數	24	27	36	32	36	40	45	48	54
振 數	256	288	320	341 $\frac{1}{3}$	384	426 $\frac{2}{3}$	480	512	576

茲將關於音階之數事,說明如下:

(1)由上表可知

$$C:E:G = 24:30:36 = 4:5:6,$$

$$G:B:D' = 36:45:54 = 4:5:6,$$

$$F:A:C' = 32:40:48 = 4:5:6.$$

凡振數之比為 4:5:6 之三音,最能諧和,通稱為大三和弦(Major triad). 共有三種:C, E, G 稱為主和弦(Tonic triad); G, B, D' 稱為屬和弦(Dominant); F, A, C' 稱為次屬和弦(Subdominant). 大音階(Major scale)即由此種三和弦組合而成.

(2)振數之比為 1:2 之二音,如 C 及 C', D 及 D' 等,謂之相差八度(Octave),或謂相差一均(此字讀如韻). 例如 C' (512) 較 C (256) 高一均, C₁ (128) 較 C (256) 低一均.

(3)科學上定 C 之振數為 256, 相鄰兩音振數之比僅有 $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$, $\frac{16}{15}$ 三種,連續各音振數之比為

24:27:30:32:36:40:45:48, 故若一音之振數爲已知時,其他各音之振數,即可算出。例如 $256 \times \frac{9}{8} = 288$, 爲第二音之振數; $288 \times \frac{10}{9} = 320$, 爲第三音之振數。餘仿此。

(4) 任何一音,皆可作爲**主音**(Keynote),以某音爲主音之樂譜,即稱爲某調。例如以 C 唱作 do,則稱爲 C 調;以 B 唱作 do,則稱爲 B 調。

(5) 在 C 調中,下列各音之振數爲:

G	A	B	C'	D'	E'	F'	G'
sol	la	ti	do'	re'	mi'	fa'	sol'
384	$426\frac{2}{3}$	480	512	576	640	$682\frac{2}{3}$	768

在 G 調中,如照同一之比推算,(算法見第(4)條,則各音之振數爲:

G	A	B	C'	D'	E'	F'	G'
do	re	mi	fa	sol	la	ti	do'
384	432	480	512	576	640	720	768

與上比較,知 A, F' 兩音之振數,不相符合,故依 C 調所製成之樂器在 G 調中,僅有六音可以通用,此外尚須另加二個新音,以補其缺。同理,在其他調中,亦各須增加若干新音,方能準確。因之同一樂器欲奏各調之曲,所增新音,爲數甚多(約 50 至 6)。對於製造樂器,殊感困難。貝區(Bach)乃創**等程音階**(Equal-tempered scale)以補救之,其

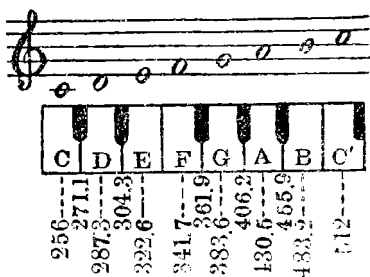


圖 201 等程音階

法即以十二個音組成一全音階，相鄰兩音之音程皆等於 $\sqrt[12]{2}=1.059$ ，鋼琴即根據此理製成，如圖 204 所示。黑鍵 (Black key) 即為新增之音，自 C 至 B 黑白鍵共有十二個，其振數即於鍵下註明。此種樂器，因其各音之振數多為近似值，故所奏之音樂，自當較為遜色耳。

溫習提要

[定 義]

1. 樂音及噪聲：

2. 樂音之三特性：

(1) 響度：

(2) 音調：

(3) 音品：

3. 基音及泛音：

4. 單音及複音：

5. 音程及音階：

6. 大三和弦：

(1) 主和弦：

(2) 屬和弦：

(3) 次屬和弦：

7. 八度或均:

8. 等程音階:

[方 法]

1. 振數之測法:

2. 複音之分析:

[原 理]

都卜勒原理:

問題二十一

1. 遠處喚人時常合兩掌於嘴旁,用意何在?
2. 試舉例說明響度與音調之區別.
3. 設測音器所發之音與某發聲體之音同高,其圓盤上之小孔數為20,於50秒內共轉動1500次,求此發聲體之振數.
4. 設測音器之圓盤有42小孔,其所發之音與C音於1秒內生4次拍音,問盤之轉動速度每秒若干次?
5. 與友人通電話時,雖不見其面,亦可知其人,何故?
6. 在大音階中,第二,第三,……,及第八諸音對於第一音之音程各為若干?
7. 試以B為主音,計算自B至B[♯]各音之振數,又其中應增加新音若干?
8. 試以C=261為基礎,製一大音階.

第四章 樂器

190. 樂器(Musical Instrument)

樂器名目繁多，大別之可分三類：凡利用弦之振動而發聲者，曰**弦樂器** (String instrument)，胡琴，琵琶等均屬之。利用氣柱之振動而發聲者，曰**吹奏樂器** (Wind instrument)，笙，簫，管，笛等均屬之。打擊板狀之物，或緊張之膜而成音者，曰**擊奏樂器** (Percussion instrument)，鑼，鼓，鐘，鈴等均屬之。茲將各種樂器發音部分之振動情形，分節論之如下：

191. 弦之振動(Vibration of String)

胡琴，鋼琴等之弦，大都為獸腸或金屬所製成。緊張之後，以弓拉之，或以指彈之，或以錘擊之，皆可使之發音。弦之振動情形，常用弦音計（參閱239頁，圖194）研究之。弦音計之下部為一共鳴箱，其上可張粗細不同之弦線。弦之一端連於槓桿，桿上懸砝碼，可以改變弦之張力。A為弦柱 (Bridge)，可以左右移動，故弦之長短，亦得任意變更。應用此器，可試得弦愈細，則音調愈高，張力加大，或弦長縮短時亦然。由精密之實驗，知：

弦之振數與

(1) 弦之長度成反比例，

(2) 弦之張力之平方根成正比例，

(3) 單位長之弦所有質量之平方根成

反比例。

設 弦之振數爲每秒 n 次,
 弦之長度爲 l 厘米,
 弦之張力爲 t 達因,
 1 厘米長之弦所有之質量爲 m 克,
 則上述定律,可用下式表之:

$$n = K \cdot \frac{1}{l} \sqrt{\frac{t}{m}}$$

其中 K 爲比例常數,據實測之結果,知 $K = \frac{1}{2}$,故

$$n = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{t}{m}}$$

又設弦之半徑爲 r 厘米,其密度爲 d 克/立方厘米,
 則 $m = \pi r^2 d$,

代入上式,即得

$$n = \frac{1}{2rl} \sqrt{\frac{t}{\pi d}}$$

192. 氣柱之振動(Vibration of Air Column)

研究氣柱之振動,常用風琴管(Organ pipe).其構造如圖 205 所示.自吹氣之口,送入氣流,與管旁尖稜之唇(Lip)衝突後,引起管內氣柱之共振,生成駐波,而發樂音.管之他端,或開或閉,其開放者,曰開管(Open pipe),如洞簫等是也.閉塞者,曰閉管(Closed pipe),如警笛等是也.

開管發音時,兩端均成爲腹,圖中曲線,即表示節與腹之位置.故開管之

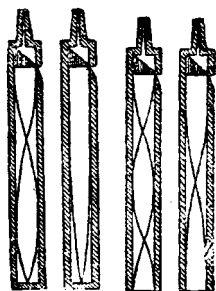


圖205. 風琴管

長，等於基音波長之半，即 $\frac{1}{4}$ 波長之二倍；或等於第一泛音之全波長，即 $\frac{1}{4}$ 波長之四倍。由此推之，開管之長 (l)，等於 $\frac{1}{4}$ 波長 (λ) 之偶數倍。以式表之，即

$$l = 2m \cdot \frac{\lambda}{4}, \quad (m \text{ 表 } 1, 2, 3, \dots \text{ 任意正整數})$$

又由音速、波長、及振數之關係，知

$$\lambda = \frac{v}{n},$$

代入上式，則得

$$n = 2m \cdot \frac{v}{4l} \dots \dots \dots (1)$$

故其基音與泛音之振數比當為

$$n_1 : n_2 : n_3 : \dots = 1 : 2 : 3 : \dots$$

即等於連續整數之比。

閉管發音時，閉塞之一端恆成為節，故閉管之長，等於 $\frac{1}{4}$ 波長之奇數倍，以式表之，即

$$l = (2m - 1) \frac{\lambda}{4}, \quad (m \text{ 表 } 1, 2, 3, \dots \text{ 任意正整數})$$

又由 $\lambda = \frac{v}{n}$ 之關係，得

$$n' = (2m - 1) \frac{v}{4l} \dots \dots \dots (2)$$

故其基音與泛音之振數比當為

$$n_1 : n_2' : n_3' : \dots = 1 : 3 : 5 : \dots$$

即等於連續奇數之比

由上(1),(2)兩式，可知開管或閉管所發音調之高低，與管長成反比例。又同長之開管及閉管發基音時，

$$n_1 = 2 \cdot \frac{v}{4l}, \quad n_1' = \frac{v}{4l}$$

故 $n = 2n_1'$,

即開管之基音較同長閉管之基音高一均。若兩管發同調之基音，即開管之長必較閉管增加一倍。

193. 板及膜之振動(Vibration of Plate and Membrane)

取金屬薄板一塊，固定其中央，以指按板邊，而以胡弓擦之，則板起極複雜之振動，而發聲音。若鋪細砂於板上，則發音時，沙即分布成有規則之花紋，如圖 206 所示。細沙集合之處，即示節線之位置。因按指及擦弓之地位不同，故細沙之分布亦異。此種圖形，謂之克拉德泥圖形 (Chladni's figure)。如取圓板試之，則所成圖形為數條直徑或同心圓周。

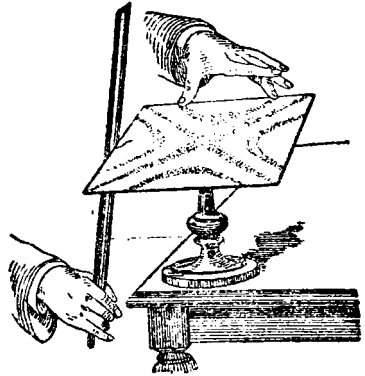


圖 206. 板之振動

取橡皮膜緊張於玻璃筒口，上鋪細砂，以槌擊其中央，則膜起振動，其振動狀況與板相同，惟其周圍恆成節線，如圖 207 所示。又鐘之振動，亦與板相同，設於鐘內盛水，以槌擊之，使其振動，則節

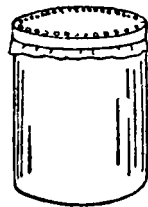


圖 207.

膜之振動

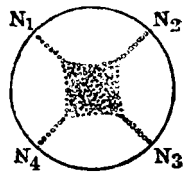


圖 208.

鐘之振動

線之分布，頗易察知，其最簡單者，如圖 208 所示。

194. 昆忒管(Kundt's Tube)

取金屬棒一條，用鉗夾住其中央，撒松香粉於皮上，以之裹棒而擦之，即可發出聲音，以線懸木髓球，令其觸於棒之他端，則可見球左右跳動不已，如圖 209 所示。

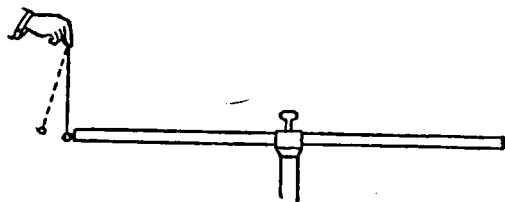


圖 209. 棒之縱振動

此即表示棒內發生縱振動，兩端振動最烈，成爲腹，中央寂然不動，成爲節。

圖 210 所示者，爲昆忒管，C 爲長玻璃管，AB 爲金屬棒，於其中點 M 用鉗夾住，B 端貼一厚紙圓板，恰能嵌入 C 管內，管之他端 D 處，有一活塞 P，可以左右移動，以改變管內氣柱之長度，以沾有松香之皮，沿 MA 方向擦



圖 210. 昆忒管

棒，則棒生縱振動，管內氣柱，受其強制，亦生振動，移動活塞，使氣柱之長，適爲 $\frac{1}{4}$ 波長之偶數倍，則氣柱之振動最盛，若於管內預鋪木屑，振動時，均集於各質點上，測量相鄰兩節間之距離，即爲波長之半。

應用昆忒管，可以測定各種物質傳聲之速度，因氣柱隨棒之振動而振動，故其振數與棒之振數相同。

設此振數為 n

空氣及棒傳聲之速度各為 v 及 v' ,

空氣及棒中之波長各為 λ 及 λ' ,

管中木屑所示兩節點間之距離為 l ,

棒長 AB 為 l' ,

$$\begin{aligned} \text{則} \quad \lambda &= 2l, \quad \lambda' = 2l' \\ v &= n\lambda = 2nl \dots\dots\dots(1) \\ v' &= n\lambda' = 2l'n \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

(1),(2) 兩式相除,即得

$$v = \frac{vl'}{l}$$

故由上實驗測得 l 及 l' 並已知 v 之數值時即可求出棒中聲波之速度 v' . 如以各種物質製成之棒行此實驗,則可測得此種物質中傳聲之速度. 又管內空氣如易以他種氣體,則聲波在該氣體中之傳播速度,亦可用此法測定之.

195. 聲帶(Vocal Cord)

吾人喉頭有薄膜二片,名曰**聲帶**,如圖 211 所示. 空氣經過其間細隙,使起激烈振動時,即可發出聲音. 更由口腔及唇舌等形狀之改變,遂成種種之音品. 男子聲帶約長 1.8 厘米,音調較低,通常談話時,其振數約為每秒 90 次至 140 次. 女子聲帶約長 1.2 厘米,音調較高,通常談話時,其振數約為每秒 250 次至 550 次.

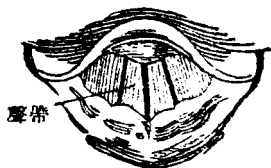


圖 211. 聲帶

196. 留聲機(Phonograph)

留聲機爲美人愛迪生所發明，對於娛樂及教育，均極關重要。收音時，聲音由喇叭傳至收音盒（如圖212），使其中雲母薄板發生振動，板之中央，固着一槓桿，桿之他端，連一小針。故薄板之振動，得由槓桿之傳遞，使針亦起振動。置針於轉動不息之蠟盤上，則可刻成彎曲之溝紋。然後將此蠟盤置於電鍍器中以鍍銅，製成陰陽相反之銅版。再將銅版壓於硬橡皮圓板上，即成記音盤，即通俗所謂唱片是也。

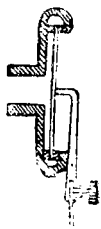


圖 212.

欲使所收聲音重行放出時，常用發音器，收音盒其構造與收音盒相似。先將唱片置於旋轉臺上，使之轉動，次將發音器置於唱片上，使針尖沿溝紋進行。因溝紋有曲折，故針即起振動，復由槓桿之傳遞，使雲母薄板亦生振動，遂成爲音，可用喇叭或其鳴箱擴大之，與所收之音，完全相同。

溫習提要

[樂器之種類]

1. 弦樂器:
2. 吹奏樂器:
3. 擊奏樂器:

[發聲體之振動]

1. 弦之振動:

2. 氣柱之振動:
3. 板及膜之振動:

儀 器]

1. 昆忒管:
2. 留聲機

問題二十二

1. 設有長 33 厘米之弦,其全體之質量為 0.125 克,今欲使其所發之音,振數為每秒 640 次,問須加幾仟克重之張力!
2. 用同一張力,緊張直徑 1 毫米,長 1 米之銀線與直徑 2 毫米之鐵線,欲使兩者音調相同,則鐵線應長幾何?
3. 拉胡琴者,皆用弓擦弦之下端,而不擦其中央,何故?
4. 設有長 50 厘米之開管,當 15°C . 時,其基音及第一泛音之振數各若干?如用同長之閉管,其振數為若干?
5. 使長 40 厘米之開管,與音叉同時發聲時,一秒內生拍 5 次,問音叉之振數幾何?
6. 注水於熱水瓶中,水愈多則音愈高,何故?
7. 吹簫時如何可發高低不同之音.
8. 燃紙烘鼓皮,可使其聲琴琴,更為悅耳,其故若何?
9. 小孩聲音,較成人為高,何故?
10. 留聲機之唱片,若轉動愈快,則音調愈高,何故?

英漢名詞對照表

A

Absolute humidity 絕對濕度	202
Absolute temperature 絕對溫度	179
Absolute unit of force 力之絕對單位	128
Absolute units 絕對單位	91
Absolute zero 絕對零度	17
Absorption 吸收	22
Accelerated motion 加速運動	114
Acceleration 加速度	114
Acceleration of gravity 重力加速度	113
Acoustics 聲學	2
Action 主動力	130
Active carbon 活性炭素	23
Adhesion 附力	18
Absorption 吸附作用	23
Aeroplane 飛機	164
Air chamber 氣室	67
Air pump 抽水機, 空氣唧筒	65
Air ship 飛艇	62
Alcohol thermometer 酒精溫度計	164
Amorphous body 非晶體	22
Amplitude 振幅, 波幅	140, 226
Aneroïd barometer 無液氣壓計	61
Angle of amplitude 幅角	142
Angle of repose 休止角	153
Angular acceleration 角加速度	145
Angular displacement 角移	144
Angular velocity 角速度	144
Apparent expansion 視膨脹	176
Apparent weight 視重量	44

Archimedes' principle 阿基米得原理	44
Arm of couple 力偶臂	80
Arm of force 力臂	78
Atherman 不透隔射熱體	213
Atmosphere 大氣	58
Atmospheric pressure 大氣壓	58
Atom 原子	17

B

Bach 貝區	250
Bacon 培根	17
Balance 天平	9
Ball bearing 球軸承	154
Balloon 氣球	62
Barograph 氣壓記錄器	61
Barometer 氣壓計	60
Barometric height 氣壓高度	60
Beam 橫梁	9
Beat 拍	237
Beat frequency 拍頻	238
Bending 彎曲	33
Black key 黑鍵	251
Blade 葉板	105
Bob 擺錘	141
Boiling 沸騰	198
Boiling point 沸點	198
Boyle's law 波義耳定律	63
Bridge 弦柱	253
British Thermal Unit 英國熱量單位 (B.T.U.)	187
Bulb 玻璃泡	163

Bunsen's absorption coefficient 本生之吸收係數	23	Closed pipe 閉管	254
Buoyancy 浮力	44	Cloud 雲	205
Buoyancy of gas 氣體之浮力	62	Coefficient of cubical expansion 體脹係數	173
C		Coefficient of friction 摩擦係數	152
Caloric 熱質	186	Coefficient of linear expansion 線 脹係數	171
Caloric theory of heat 熱質說	186	Coefficient of superficial expansion 面脹係數	172
Caloric 卡路里	187	Cohesion 內聚力	18
Calorimeter 卡計	188	Colloid 膠體	21
Capillary phenomena 毛細現象	25	Combination of pulleys 複滑輪	46
Capillary tube 毛細管	25	Communicating tubes 連通管	40
Cartesian diver 浮沉子	46	Compensated pendulum 補償擺	174
Celsius' thermometric scale 攝氏 溫度標	165	Component displacements 分位移	112
Center of buoyancy 浮力中心	84	Component of force 分力	73
Center of gravity 重心	81	Composition of forces 力之合成	73
Centigrade thermometric scale 百 分溫度標	165	Composition of parallel forces 平 行力之合成	78
Centimeter-gram-second system 厘米克秒單位制	6	Compound tone 複音	217
Centimeter per second 每秒若干厘 米	112	Compressed air 受壓空氣	66
Centimeter per second per second 每秒每秒若干厘米	114	Compressibility 壓縮性	1
Centrifugal force 離心力	138	Compression pump 氣筒	66
Centrifugal governor 離心節速器	220	Compression stroke 壓縮動程	22
Centripetal force 向心力	137	Compressor 壓縮器	201
C.G.S. system and F.P.S. system C.G.S. 制及 F.P.S. 制	6	Concentration 濃度	21
Change of states 物態之變化	1	Condensation 稠密	227
Charles' law 查理定律	179	Condenser 冷凝器	291
Chladni's figure 克拉德泥圖形	253	Condition of equilibrium 平衡之 條件	81
Circle of reference 參考圓	140	Conduction 傳導	210
Circular motion 圓周運動	136	Conductor 導體	210
Circular wave 圓形波	227	Conservation of energy 能量不滅	159
City water supply 自來水	42	Conservation of mass 質量不滅	17
Clinical thermometer 醫用溫度計	168	Consonance 諧和	249
Closed manometer 閉管流體壓力 計	65	Constant volume hydrogen ther- mometer 定容氫溫度計	181
		Convection 對流	210
		Coulomb 庫倫	152
		Couple 力偶	80

Crank shaft 曲柄軸 21
 Crest 波峯 226
 Critical pressure 臨界壓力 199
 Critical state 臨界 199
 Critical temperature 臨界溫度 199
 Crystal 晶體 22
 Crystalloid 晶質 21
 Curvilinear motion 曲線運動 111
 Cycle 循環 222

D

Dalton's molecular hypothesis 道
 頓之分子說 17
 Data 數據 189
 Density and specific gravity 密度
 及比重 10
 Derived unit 導出單位 4
 Dew 露 205
 Dew point 露點 203
 Dew point hygrometer 露點濕度
 計 203
 Dialysis 滲透分析法 21
 Diatherman 透輻射熱體 213
 Differential pulley 差動滑輪 99
 Diffusion 擴散 19
 Direct condensation 直接凝固 199
 Direction 方向 73
 Displacement 位移 111
 Dissolution 溶解 21
 Diving bell 潛水鐘 66
 Diving suit 潛水衣 66
 Divisibility 可分性 17
 Dominant 屬和弦 249
 Doppler effect 都卜勒效應 248
 Doppler's principle 都卜勒原理 248
 Double weighing 複權法 95
 Downward pressure 向下壓力 37
 Drift 後推力 146
 Driving rod 推動棒 219
 Ductility and malleability 延性及

展性 34
 Dyne 達因 129

E

Eccentric rod 偏心棒 219
 Echo 回聲 235
 Effort 動力 92
 Elastic after-effect 彈性後效 31
 Elastic body 彈性體 31
 Elastic fatigue 彈性疲勞 31
 Elastic force 彈力 31
 Elasticity 彈性 31
 Elastic limit 彈性限度 31
 Electricity 電學 2
 Elongation 伸長 33
 Energy 能 157
 Equilibrium of a body 物體之平
 衡 83
 Equilibrium of concurrent forces
 同點力之平衡 77
 Equilibrium of floating body 浮體
 之平衡 84
 Equitemperal scale 等程音階 250
 Erg 爾格 157
 Ether 以太 213
 Evaporation 蒸發 196
 Evaporator 蒸發器 201
 Exhaust 排氣口 219
 Exhaust stroke 排氣動程 222
 Exhaust valve 排氣活門 222
 Expansion of gases 氣體之膨脹 178
 Expansion of liquids 液體之膨脹 175
 Expansion of solids 固體之膨脹 171
 Expansion of water 水之膨脹 177
 Expansion stroke 膨脹動程 222
 Explanation 說明 3
 Extension 廣延 15
 External force 外力 131

F

I

Ice point 冰點 164
 Impenetrability 不可入性 16
 Impulse 衝量 127
 inch 英寸 7
 Inclined plane 斜面 101
 Index 指器 167
 Induction and deduction 歸納與
 演繹 3
 Inertia 慣性 15
 Initial velocity 初速度 114
 Inlet valve 進氣活門 222
 In-put 輸入 101
 Instantaneous velocity 瞬時速度 114
 Intensity of pressure 壓力強度 37
 Interference 波之干涉 228
 Intermittent siphon 斷續虹吸 68
 Internal combustion engine 內燃
 機 221
 Internal force 內力 131
 International standard meter 國
 際米原器 5
 Invar 鋼 174
 Isochronism 等時性 143

J

Jack screw 起重螺旋 103
 Joule 焦耳 157
 Joule's experiment 焦耳實驗 218
 Jurin's law 久恰定律 26

K

Keynote 基音 250
 Kilogram me e 仟克米 91
 Kilowatt 仟瓦特 158
 Kinetic energy 動能 158
 Kinetic friction 動摩擦 151
 Knife edge 刀口 9
 Knütt's tube 昆武管 257

L

Large cal'rie 仟卡 187
 Latent heat 潛熱 192
 Latent heat of fusion 熔解熱 192
 Lateral pressure 旁壓力 37
 Law of conservation of energy
 能量不減律 160
 Law of friction 摩擦之定律 152
 Law of inertia 慣性定律 126
 Law of parallelogram of forces
 力之平行四邊形定律 74
 Law of reaction 反作用定律 130
 Law of sines 正弦定律 120
 Law of universal gravitation 萬有
 引力定律 131
 Length 長度 4
 Length of pendulum 擺長 141
 Lever 槓桿 92
 Lift 舉揚力 146
 Limiting angle of friction 摩擦最
 角 153
 Linear velocity 線速度 144
 Linde 林得 230
 Lip 唇 254
 Liquid 液體 1
 Liquid pressure 液體中之壓力 37
 Liter 升 7
 Longitudinal wave 縱波 227
 Loop 波腹 228
 Loudness 響度 245
 Lubricator 滑料 154

M

Magdeburg hemisphere 馬德堡半
 球 59
 Magnetism 磁學 2
 Magnitude 大小 4, 73
 Main scale 主尺 8
 Major scale 大音階 213

Major triad 大三和弦	249
Male screw 陽螺旋	102
Manometer 流體壓力計	64
Mass 質量	4
Matter and body 物質與物體	1
Maximum and minimum thermometer 最高及最低溫度計	167
Maximum density 最大密度	197
Maximum friction 最大摩擦	151
Maximum pressure 最大壓力	197
Mean solar day 平均太陽日	6
Mean velocity 平均速度	113
Mechanical advantage 機械利益	92
Mechanical efficiency 機械效率	104
Mechanical energy 機械能	159
Mechanical equivalent of heat 熱功當量	218
Mechanical theory of heat 熱之動力說	187
Mechanics 力學	2
Medium 介質	225
Melting 熔解	192
Melting point 熔點	192
Mercurial thermometer 水銀溫度計	164
Metacenter 定傾中心	85
Method of mixture 混合法	188
Method of substitution 代替法	95
Micrometer 測微計	102
Mile 英里	7
Modulus of elasticity 彈性係數	32
Molecular force 分子力	18
Molecular motion 分子運動	18
Molecule 分子	17
Moment of couple 力偶矩	81
Moment of force 力矩	78
Moment of force about point O 力對於O點之力矩	78
Momentum 動量	126
Morin 摩梭	152

Motion and rest 運動與靜止	111
Movable pulley 動滑輪	16
Musical instrument 樂器	253
Musical interval 音程	248
Musical scale 音階	248
Musical sound 樂音	244

N

Natural law 自然律	2
Natural phenomena 自然現象	2
Natural sciences and physics 自然科學與物理學	1
Natural world 自然界	2
Nature of heat 熱之本性	186
Neutral equilibrium 隨遇平衡	83
Newton's first law of motion 牛頓之運動第一定律	126
Newton's second law of motion 牛頓之運動第二定律	127
Newton's third law of motion 牛頓之運動第三定律	130
Newton's three laws of motion 牛頓之運動三定律	126
Niagara Falls 尼加拉瀑布	106
Nodal line 節線	229
Nodal point 節點	228
Noise 噪聲	241
Non-conductor 非導體	210
Normal acceleration 法線加速度	146
Normal pressure 直壓力	151
Number of vibration 振數	140
Numerical value 數值	4

O

Observation and experiment 觀察與實驗	2
Occlusion 吸留	23
Octave 八度	249
Oil air pump 油唧筒	66
One atmosphere 1 大氣壓	60

One gram centime e 1 克厘米 91
 One gram pe cubic centia.ete 每
 立方厘米 克 11
 One foot pound 1 呎磅 91
 Open manometer 開管流體壓力計 64
 Open pipe 開管 254
 Optics 光學 2
 Organ pipe 風琴管 254
 Osmose 滲透 20
 Osmotic pressure 滲透壓力 21
 Ounce 英兩 7
 Out-put 輸出 104
 Overshot wheel 上擊水車 104
 Overtones 泛音 247
 Overturning 傾覆 83

P

Pan 盤 9
 Parabola 拋物線 118
 Parachute 降落傘 155
 Particle 質點 111
 Path 路線 111
 Pascal's principle 巴斯噶原理 42
 Pelton 拍爾吞式 105
 Percussion instrument 擊奏樂器 253
 Period 週期 139
 Periodic motion 週期運動 139
 Permanent gas 永久氣體 200
 Permanent set 永久應變 31
 Perpetual motion 永久運動 160
 Phase 相 226
 Phonograph 留聲機 250
 Physical quantity 物理量 3
 Piston 活塞 65
 Pitch 螺距, 音調 102, 245
 Pitch-ball 通草球 232
 Plane of couple 力偶面 80
 Plane wave 平面波 227
 Plumb line 鉛直線 39
 Printer 指針 9

Point of application 作用點, 力
 點 73, 92
 Point of exertion 重點 93
 Polygon of forces 力之多邊形 75
 Porosity 多孔性 17
 Position 位置 111
 Potential energy 位能 158
 Pound 磅 7
 Poundal 磅達 129
 Power 功率 91
 Practical units 實用單位 91
 Pressure 壓力 15
 Pressure coefficient 壓力係數 179
 Pressure of gas 氣體之壓力 58
 Prime mover 原動機 91
 Prime power 原動力 92
 Principle of work 功之原理 98
 Projectile 拋射體 118
 Projectile motion 拋體運動 118
 Prong 叉股 232
 Propeller 推進機 146
 Properties of gas 氣體之性質 57
 Properties of matter 物性 2
 Pulley 滑輪 96
 Pump 唧筒 65

Q

Qualitative 定量的 4
 Quantitative 定量的 4
 Quart 夸脫 7

R

Radian 弧度 144
 Radiation 輻射 210
 Radiometer 輻射計 213
 Rain 雨 205
 Rarefaction 稀疏 227
 Reaction 反動力 130
 Real expansion 實膨脹 177
 Réaumur thermometric scale 列

氏溫度標	165
Reciprocating steam engine 往復 蒸汽機	219
Rectilinear motion 直線運動	111
Red heat 紅熱	200
Reflection and refraction 波之反 射及折射	227
Refrigerator 發冷器	202
Regelation 復冰	193
Regulating valve 節制活門	202
Relative 相對的	111
Relative humidity 相對濕度	202
Resistance 阻力	92
Resolution of force 力之分解	73
Resonance 共鳴	238
Resonance box 共鳴箱	240
Resonator 共鳴器	248
Resultant displacement 合位移	112
Resultant of forces 合力	73
Retardation 減速度	111
Retarded motion 減速運動	114
Rider 游碼	10
Rigid body 剛體	78
Roller 滾子	154
Rolling friction 滾動摩擦	151
Rotation 轉動	81, 143
Rudder 舵	147

S

Saturated solution 飽和溶液	21
Saturated vapor 飽和汽	197
Scalar quantity 無向量	73
Screw 螺旋	102
Screw press 螺旋壓機	103
Screw thread 螺紋	102
Sea level 海平面	39
Second 秒	6, 7
Simple harmonic motion 簡諧運 動	104
Simple machines 簡單機械	91

Simple pendulum 單擺	141
Simple tone 單音	247
Sink 沉	46
Sinker 重錘	47
Siphon 虹吸管	67
Siren 測音器	245
Six's maximum and minimum thermometer 息克斯最高最低溫 度計	168
Slat 震	206
Slide valve 滑動活門	210
Sliding friction 滑動摩擦	51
Small calorie 小卡	187
Snow 雪	206
Solar day 太陽日	6
Solid 固體	1
Solidification 凝固	192
Solidifying point 凝點	192
Solubility 溶解度	21
Solute 被溶質	21
Solution 溶液	21
Solvent 溶劑	21
Sonometer 弦音計	234
Sounding body 發聲體	232
Sound wave 聲波	232
Sources of heat 熱之來源	186
Specific gravity bottle 比重瓶	47
Specific gravity of gas 氣體之比重	7
Specific heat 比熱	187
Specific heat at constant pressure 定壓比熱	188
Specific heat at constant volume 定容比熱	188
Specific volume 容度	177
Spheroidal state 球騰態	211
Spherical wave 球面波	227
Spirit level 氣泡水準	49
Spring balance 彈簧秤	32
Stability 穩度	83
Stable equilibrium 穩定平衡	83

Standard kilogram 公斤原器..... 5
 Static friction 靜摩擦.....151
 Stationary wave 駐波.....220
 Steam engine 蒸汽機.....219
 Steam point 蒸汽點.....161
 Steam turbine 蒸汽輪機.....220
 Steelyard 秤..... 94
 Stirrer 攪動器.....189
 Stop watch 停錶..... 10
 Strain 應變..... 31
 Stress 應力..... 31
 String instrument 弦樂器.....253
 Stroke 動程.....222
 Sub dominant 次屬和弦.....249
 Sublimation 昇華.....119
 Submarine 潛水艇..... 46
 Suction pump 吸取唧筒..... 67
 Suction stroke 吸氣動程.....222
 Super-cooling 過冷.....193
 Super-fusion 過熔.....193
 Super-heating 超熱.....199
 Supersaturated solution 過飽和溶
 液..... 22
 Surface tension 表面張力..... 24
 Suspend 懸..... 46

T

Tangential acceleration 切線加速
 度.....145
 Tangential velocity 切線速度.....145
 Temperature 溫度.....163
 Tension 張力..... 15
 The fixed points of thermometer
 溫度計之固定點.....164
 Thermal conductivity 導熱係數.....211
 The thermograph 溫度記錄器.....171
 Thermometer 溫度計.....163
 Thermometric scale 溫度標.....165
 Three elements of force 力之三要
 項..... 73

Three states of matter 物質之三
 態..... 1
 Timber 音品.....217
 Time 時間..... 4
 Tm 噸..... 7
 Tonic triad 主和弦.....249
 Torricellian vacuum 托里拆利真空 60
 Torricelli's experiment 托里拆利
 實驗..... 59
 Tortion 扭轉..... 34
 Total pressure 全壓力..... 37
 Trade wind 貿易風.....212
 Train of gear wheels 運動齒輪.....100
 Transformation of energy 能之變
 化.....159
 Translation 移動..... 81
 Transmission of heat 熱之傳播.....210
 Transverse wave 橫波.....226
 Triangle of forces 力之三角形..... 75
 Trough 波谷..... 226
 True weight 實重..... 44
 Tuning fork 音叉.....232

U

Under hot wheel 下擊水車.....104
 Uniformly accelerated motion 等
 加速運動.....114
 Uniformly accelerated rotation 等
 角加速轉動.....145
 Uniform motion 等速運動.....112
 Uniform rotation 等角速轉動.....144
 Uniform velocity 等速度.....112
 Unit 單位..... 4
 Unit of length 長度之單位..... 4
 Unit of mass 質量之單位..... 5
 Unit of time 時間之單位..... 6
 Units of heat 熱量之單位.....187
 Unstable equilibrium 不穩平衡..... 83
 Upward pressure 向上壓力..... 37
 Useful work 有用工作..... 101

V

Valve 活門	65
Vapor 汽	195, 200
Vaporization and liquefaction 汽化及液化	195
Variable motion 變速運動	113
Variable velocity 變速度	113
Vector quantity 向量	73
Velocity and speed 速度與快慢	112
Vernier 游標尺	8
Vibration of air column 氣柱之振動	254
Vibration of plate and membrane 板及膜之振動	256
Vibration of string 弦之振動	253
Viscosity 黏滯性	23
Vocal cord 聲帶	258
Volatile liquid 揮發性之液體	196

W

Water equivalent 水當量	189
Water jacket 水套	223
Water pump 水唧筒	65
Water turbine 水輪機	105
Water wheel 水車	104

Watt 瓦特	91, 158
Wave front 波前	227
Wave length 波長	226
Wave motion 波動	225
Wave propagation 波之傳播	225
Wave ray 波射線	225
Wavy line 波形曲線	232
Wedge 劈	103
Weight 重量	16, 12
Weights 砝碼	9
Wet and dry bulb hygrometer 乾濕泡濕度計	204
Wheel and axle 輪軸	98
Wind instrument 吹奏樂器	253
Work 功	90
Work done against a force by a body 物體反抗力之作用所作之功	90
Work done by a force on a body 力對於物體作功	10

Y

Yard 碼	7
Young's modulus 楊氏係數	32

Z

Zigzag 迂迴曲折	102
-------------	-----

漢英名詞對照表

一 畫

一大氣壓 One atmosphere	60
一克厘米 One gram centimeter	91
一呎磅 One foot pound	91

二 畫

八度 Octave	249
刃口 Knife-edge	9
力 Force	15
力之三角形 Triangle of forces	75
力之三要素 Three elements of force	73
力之分解 Resolution of force	73
力之平行四邊形定律 Law of parallelogram of forces	74
力之合成 Composition of forces	73
力之多邊形 Polygon of forces	75
力之重力單位 Gravitational unit of force	16
力之絕對單位 Absolute unit of force	128
力之圖示 Graphic representation of force	73
力矩 Moment of force	78
力對於 O 點之力矩 Moment of force about point O	78
力對於物體作功 Work done by a force on a body	90
力偶 Couple	80
力偶面 Plane of couple	80
力偶矩 Moment of couple	81
力偶臂 Arm of couple	80
力學 Mechanics	2

力點 Point of application	92
力臂 Arm of force	78

三 畫

上擊水車 Overshot wheel	104
下擊水車 Undershot wheel	104
久倫定律 Jurin's law	26
叉股 Prong	232
大三和弦 Major triad	249
大小 Magnitude	4, 73
大音階 Major scale	249
大氣 Atmosphere	58
大氣壓 Atmospheric pressure	58
小卡 Small calorie	187

四 畫

不可入性 Impenetrability	16
不透輻射熱體 Atherman	213
不穩平衡 Unstable equilibrium	83
介質 Medium	225
內力 Internal force	131
內聚力 Cohesion	18
內燃機 Internal combustion engine	221
公斤原器 Standard kilogram	5
分力 Component of force	73
分子 Molecule	17
分子力 Molecular force	18
分子運動 Molecular motion	78
分位移 Component displacement	112
切線加速度 Tangential acceleration	145
切線速度 Tangential velocity	145
升 Liter	7

反作用定律 Law of reaction 130
 反動力 Reaction 130
 天平 Balance 9
 太陽日 Solar day 6
 巴斯噶原理 Pascal's principle 42
 支點 Fulcrum 92
 方向 Direction 73
 比重計 Hydrometer 48
 比重瓶 Specific gravity bottle 47
 比熱 Specific heat 187
 毛細現象 Capillary phenomena 25
 毛細管 Capillary tube 25
 毛髮濕度計 Hair hygrometer 204
 水之膨脹 Expansion of water 177
 水平面 Horizontal plane 39
 水平射程 Horizontal range 119
 水車 Water wheel 104
 水套 Water jacket 223
 水唧筒 Water pump 65
 水當量 Water equivalent 189
 水銀溫度計 Mercurial thermometer 164
 水輪機 Water turbine 105
 水頭 Head 105
 水壓機 Hydraulic press 43
 牛頓之運動三定律 Newton's three laws of motion 126
 牛頓之運動第一定律 Newton's first law of motion 126
 牛頓之運動第二定律 Newton's second law of motion 127
 牛頓之運動三定律 Newton's third law of motion 130

五 畫

主尺 Main scale 8
 主和弦 Tonic triad 249
 主音 Key-note 250
 主動力 Action 130
 仟卡 Large calorie 187

仟瓦特 Kilowatt 158
 仟克米 Kilogram meter 91
 代替法 Method of substitution 95
 以太 Ether 213
 功 Work 90
 功之原理 Principle of work 98
 功率 Power 91
 加倫 Gallon 7
 加速度 Acceleration 114
 加速運動 Accelerated motion 114
 卡計 Calorimeter 188
 卡路里 Calorie 187
 可分性 Divisibility 17
 外力 External force 131
 尼加拉瀑布 Niagara Falls 106
 平行力之合成 Composition of parallel forces 78
 平均太陽日 Mean solar day 6
 平均速度 Mean velocity 115
 平面波 Plane wave 227
 平衡之條件 Condition of equilibrium 81
 打氣筒 Compression pump 66
 末速度 Final velocity 115
 本生之吸收係數 Bunsen's absorption coefficient 23
 正弦定律 Law of sines 120
 永久氣體 Permanent gas 200
 永久運動 Perpetual motion 160
 永久應變 Permanent set 31
 瓦特 Watt 91, 158

六 畫

光學 Optics 2
 全壓力 Total pressure 37
 共鳴 Resonance 238
 共鳴箱 Resonance box 240
 共鳴器 Resonator 248
 冰點 Ice point 164
 列氏溫度標 Réaumur thermo-

metric scale.....	165
合力 Resultant of forces.....	73
合位移 Resultant displacement.....	112
同點力之平衡 Equilibrium of concurrent forces.....	77
向上壓力 Upward pressure.....	37
向下壓力 Downward pressure.....	37
向心力 Centripetal force.....	137
向量 Vector quantity.....	73
回聲 Echo.....	235
因鋼 Invar.....	174
多孔性 Porosity.....	17
多腕 Quart.....	7
托里拆利真空 Torricellian vacu- um.....	60
托里拆利實驗 Torricelli's experi- ment.....	59
曲柄軸 Crank shaft.....	219
曲線運動 Curvilinear motion.....	111
有用工作 Useful work.....	104
次屬和弦 Subdominant.....	249
百分溫度標 Centigrade thermo- metric scale.....	165
自由落體 Freely falling body.....	115
自來水 City water supply.....	42
自然界 Natural world.....	2
自然律 Natural law.....	2
自然科學與物理學 Natural scienc- es and physics.....	1
自然現象 Natural phenomena.....	2
七 畫	
伸長 Elongation.....	33
伽利略 Galileo.....	2
伽利略之空氣溫度計 Galileo's air thermometer.....	163
位能 Potential energy.....	158
位移 Displacement.....	111
位置 Position.....	111
作用點 Point of application.....	73

克拉德泥圖形 Chladni's figure.....	256
克重 Gram weight.....	16
每立方厘米一克 One gram per cubic centimeter.....	11
每秒每秒若干厘米 Centimeter per second per second.....	114
每秒若干厘米 Centimeter per second.....	112
冷凝器 Condenser.....	201
冷劑 Freezing mixture.....	194
初速度 Initial velocity.....	114
吸收 Absorption.....	22
吸取唧筒 Suction pump.....	67
吸附作用 Adsorption.....	23
吸氣動程 Suction stroke.....	222
吸閉 Occlusion.....	23
吹奏樂器 Wind instrument.....	253
呎磅達 Foot poundal.....	157
延性及展性 Ductility and mallea- bility.....	34
扭轉 Torsion.....	34
汽 Vapor.....	195, 200
汽化及液化 Vaporization and liquefaction.....	195
汽化熱 Heat of vaporization.....	195
沉 Sink.....	46
角加速度 Angular acceleration.....	145
角移 Angular displacement.....	144
角速度 Angular velocity.....	144
迂迴曲折 Zigzag.....	102
貝瓦 Bach.....	250

八 畫

事實 Facts.....	3
受壓空氣 Compressed air.....	66
固體 Solid.....	1
固體之膨脹 Expansion of solids.....	171
定性的 Qualitative.....	4
定容比熱 Specific heat at con- stant volume.....	188

流體壓力計 Manometer.....	64	剛體 Rigid body.....	78
活性炭素 Active carbon.....	23	原子 Atom.....	17
活門 Valve.....	65	原動力 Prime power.....	92
活塞 Piston.....	65	原動機 Prime mover.....	91
玻璃泡 Bulb.....	163	唇 Lip.....	251
相 Phase.....	226	容度 Specific volume.....	177
相對的 Relative.....	111	差動滑輪 Differential pulley.....	99
相對濕度 Relative humidity.....	202	庫倫 Coulomb.....	152
秒 Second.....	6, 7	息克司最高最低溫度計 Six's maximum and minimum thermometer.....	168
紅熱 Red heat.....	210	振幅 Amplitude.....	140
英寸 Inch.....	7	振數 Number of vibration.....	140
英尺 Foot.....	7	旁壓力 Lateral pressure.....	37
英兩 Ounce.....	7	時間 Time.....	4
英里 Mile.....	7	時間之單位 Unit of time.....	6
英國熱量單位 British Thermal Unit (B.T.U.).....	187	氣泡水準 Spirit level.....	40
虹吸管 Siphon.....	67	氣室 Air chamber.....	67
表面張力 Surface tension.....	24	氣柱之振動 Vibration of air column.....	254
重力 Gravity.....	16	氣球 Balloon.....	62
重力加速度 Acceleration of gravity.....	116	氣體 Gas.....	1, 200
重力波 Gravitational wave.....	226	氣體之比重 Specific gravity of gas.....	57
重心 Center of gravity.....	81	氣體之性質 Properties of gas.....	57
重量 Weight.....	16, 92	氣體之浮力 Buoyancy of gas.....	62
重點 Point of exertion.....	93	氣體之膨脹 Expansion of gases.....	178
重錘 Sinkers.....	47	氣體之壓力 Pressure of gas.....	58
降落傘 Parachute.....	155	氣體定律 Gas law.....	180
面積係數 Coefficient of superficial expansion.....	172	氣壓計 Barometer.....	60
音叉 Tuning fork.....	232	氣壓記錄器 Barograph.....	61
音品 Timber.....	247	氣壓高度 Barometric height.....	60
音程 Musical interval.....	248	浮 Float.....	46
音階 Musical scale.....	248	浮力 Buoyancy.....	44
音調 Pitch.....	245	浮力中心 Center of buoyancy.....	84
風琴管 Organ pipe.....	254	沉子 Cartesian diver.....	46
飛艇 Air ship.....	62	浮體 Floating body.....	46
飛輪 Fly wheel.....	219	浮體之平衡 Equilibrium of floating body.....	84
飛機 Aeroplane.....	146	海平面 Sea level.....	29

消防唧筒 Fire pump	67
留聲機 Phonograph	259
高斯法 Gauss method	95
砝碼 Weights	9
秤 Steelyard	94
能 Energy	157
能之變化 Transformation of energy	159
能量不滅 Conservation of energy	159
能量不滅律 Law of conservation of energy	160
起重螺旋 Jack screw	103
酒精溫度計 Alcohol thermometer	164
馬力 Horse power	91
馬德堡半球 Magdeburg hemispheres	59

十 畫

乾濕泡溫度計 Wet and dry bulb hygrometer	204
假說與理論 Hypothesis and theory	3
偏心棒 Eccentric rod	219
停錶 Stop watch	10
動力 Effort	92
動能 Kinetic energy	158
動程 Stroke	222
動量 Momentum	126
動滑輪 Movable pulley	96
動摩擦 Kinetic friction	151
參考圓 Circle of reference	140
國際米原器 International standard meter	5
培根 Bacon	17
基本單位 Fundamental unit	4
基本間隔 Fundamental interval	164
基音 Fundamental tone	247
密度及比重 Density and specific gravity	10
動力 Tension	15

排氣口 Exhaust	219
排氣活門 Exhaust valve	222
排氣動程 Exhaust stroke	222
推動棒 Driving rod	219
推進機 Propeller	146
斜面 Inclined plane	101
液體 Liquid	1
液體之膨脹 Expansion of liquids	175
液體中之壓力 Liquid pressure	37
混合法 Method of mixture	188
球面波 Spherical wave	227
球軸承 Ball bearing	154
球臙態 Spheroidal state	211
移動 Translation	81
粘滯性 Viscosity	23
舵 Rudder	147
被溶質 Solute	21
透輻射熱體 Diatherman	213
通草球 Pith-ball	232
速度與快慢 Velocity and speed	112
連動齒輪 Train of gear wheels	100
連通管 Communicating tubes	40
閉管 Closed pipe	254
閉管流體壓力計 Closed manometer	65
陰螺旋 Female screw	102
雪 Snow	206

十二 畫

唧筒 Pump	65
單位 Unit	4
單音 Simple tone	247
單擺 Simple pendulum	141
幅角 Angle of amplitude	142
復冰 Regelation	193
循環 Cycle	222
晶質 Crystalloid	21
晶體 Crystal	22
最大密度 Maximum density	197
最大摩擦 Maximum friction	151

最大壓力 Maximum pressure	197
最高及最低溫度計 Maximum and minimum thermometer	167
減速度 Retardation	114
減速運動 Retarded motion	114
溫度 Temperature	163
溫度計 Thermometer	163
溫度計之固定點 The fixed points of thermometer	164
溫度記錄器 Thermograph	174
溫度標 Thermometric scale	165
測音器 Siren	245
測微計 Micrometer	102
泥碼 Rider	10
游標尺 Vernier	8
無向量 Scalar quantity	73
無液氣壓計 Aneroid barometer	61
焦耳 Joule	157
焦耳實驗 Joule's experiment	218
發冷器 Refrigerator	202
發聲體 Sounding body	232
稀薄 Rarefaction	227
等加速運動 Uniformly accelerated motion	114
等角加速轉動 Uniformly accelerated rotation	145
等角速轉動 Uniform rotation	144
等時性 Isochronism	143
等程音階 Equitempered scale	250
等速度 Uniform velocity	112
等速運動 Uniform motion	112
絕對單位 Absolute units	91
絕對溫度 Absolute temperature	179
絕對零度 Absolute zero	179
絕對濕度 Absolute humidity	202
給呂薩克定律 Gay-Lussac's law	178
華氏溫度標 Fahrenheit's thermometric scale	165
週期 Period	139
週期運動 Periodic motion	139

進氣活門 Inlet valve	222
都卜勒效應 Doppler effect	248
都卜勒原理 Doppler's principle	248
開管 Open pipe	254
開管流氣壓力計 Open manometer	64
圓螺旋 Male screw	102
雲 Cloud	205
視重量 Apparent weight	44
視膨脹 Apparent expansion	176
貿易風 Trade wind	212
黑鍵 Black key	251

十三畫

傳導 Conduction	210
傾覆 Overturning	83
圓形波 Circular wave	227
圓周運動 Circular motion	136
楊氏係數 Young's modulus	33
溶液 Solution	21
溶解 Dissolution	21
溶解度 Solubility	21
溶解熱 Heat of solution	194
溶劑 Solvent	21
滑料 Lubricator	154
滑動活門 Slide valve	219
滑動摩擦 Sliding friction	151
滑輪 Pulley	96
稠密 Condensation	227
萬有引力定律 Law of universal gravitation	131
萬有引力常數 Gravitational constant	132
葉板 Blade	105
葛利克 Otto von Guericke	59
補償擺 Compensated pendulum	174
路線 Path	111
運動與靜止 Motion and rest	111
過冷 Super-cooling	193
過熔 Super-fusion	193

過飽和溶液 Supersaturated solution	22
過熱 Super-heating	199
道爾頓之分子說 Dalton's molecular hypothesis	17
達因 Dyne	129
鉛直線 Plumb line	39
電學 Electricity	2
電 Hail	203

十四畫

實用單位 Practical units	91
實重 True weight	44
實膨脹 Real expansion	177
對流 Convection	210
慣性 Inertia	15
慣性定律 Law of inertia	126
槓桿 Lever	92
滲透 Osmosis	20
滲透壓力 Osmotic pressure	21
滲透分析法 Dialysis	21
滾子 Roller	154
滾動摩擦 Rolling friction	151
埃埃方法 Hare's method	48
熔解 Melting	192
熔解熱 Latent heat of fusion	192
熔點 Melting point	192
爾格 Erg	157
福廷氣壓計 Fortin's barometer	60
蒸汽點 Steam point	164
蒸汽輪機 Steam turbine	220
蒸汽機 Steam engine	219
蒸發 Evaporation	196
蒸餾器 Evaporator	201
說明 Explanation	3
赫爾姆霍耳茨 Helmholtz	248
飽和汽 Saturated vapor	197
飽和溶液 Saturated solution	21

十五畫

劈 Wedge	103
廣延 Extension	15
彈力 Elastic force	31
彈性 Elasticity	31
彈性係數 Modulus of elasticity	32
彈性後效 Elastic after effect	31
彈性限度 Elastic limit	31
彈性疲勞 Elastic fatigue	31
彈性體 Elastic body	31
彈簧秤 Spring balance	32
摩陵 Morin	152
摩擦 Friction	151
摩擦之定律 Law of friction	152
摩擦係數 Coefficient of friction	152
摩擦限角 Limiting angle of friction	153
摩擦輪 Friction wheel	154
數值 Numerical value	4
數據 Data	189
樂音 Musical sound	244
樂器 Musical instrument	253
潛水衣 Diving suit	66
潛水艇 Submarine	46
潛鐘 Diving bell	66
潛熱 Latent heat	192
熱之本性 Nature of heat	186
熱之來源 Source of heat	186
熱之動力說 Mechanical theory of heat	187
熱之傳播 Transmission of heat	210
熱水暖室法 Hot water system of heating house	215
熱功當量 Mechanical equivalent of heat	218
熱容量 Heat capacity	187
熱量之單位 Units of heat	187
熱量 Heat	2
熱質 Caloric	186
熱質說 Caloric theory of heat	186
熱機 Heat engine	219

磅 Pound 7
 磅達 Pomdal 129
 節制活門 Regulating valve 202
 節點 Nodal Line 229
 節點 Nodal point 228
 線速度 Linear velocity 144
 擴張係數 Coefficient of linear expansion 171
 膠體 Colloid 21
 衝量 Impulse 127
 複音 Compound tone 247
 複滑輪 Combination of pulleys 96
 復稱法 Double weighing 95
 質量 Mass 4
 質量之單位 Unit of mass 5
 質量不減 Conservation of mass 17
 質點 Particle 111
 輪軸 Wheel and axle 98
 駐波 Stationary wave 229
 齒輪 Gear wheel 100

十 六 畫

凝固 Solidification 192
 凝點 Solidifying point 192
 雜聲 Noise 244
 噸 Ton 7
 导出單位 Derived unit 1
 熱導數 Thermal conductivity 211
 熱導率 Thermal conductivity 105
 導體 Conductor 210
 機械利益 Mechanical advantage 102
 機械效率 Mechanical efficiency 101
 機械能 Mechanical energy 159
 橫波 Transverse wave 226
 核變 Fission 9
 濃度 Concentration 21
 衝動行程 Extension stroke 222

諧和 Consonance 249
 輸入 In-put 104
 輸出 Out-put 104
 輻射 Radiation 210
 輻射計 Radiometer 213
 隨遇平衡 Neutral equilibrium 83
 靜正角 Angle of repose 153
 靜液之自由面 Free surface of liquid at rest 39
 靜液之悖事 Hydrostatic paradox 38
 靜摩擦 Static friction 151
 頻率 Frequency 140

十 七 畫

壓力 Pressure 15
 壓力係數 Pressure coefficient 179
 壓力強度 Intensity of pressure 37
 壓縮動程 Compression stroke 222
 壓力唧筒 Force pump 67
 壓縮性 Compressibility 17
 壓縮器 Compressor 201
 應力 Stress 31
 應變 Strain 31
 擊樂器 Percussion instrument 253
 溼度 Humidity 202
 溼度計 Hygrometer 202
 瞬時速度 Instantaneous velocity 111
 縱波 Longitudinal wave 227
 音波 Sound wave 232
 音帶 Vocal cord 258
 聲學 Acoustics 2
 臨界溫度 Critical temperature 199
 臨界態 Critical state 199
 臨界壓力 Critical pressure 199
 舉揚力 Lift 196
 螺紋 Screw thread 102
 螺旋 Screw 101
 螺旋螺絲 screw pre 101
 螺釘 Bolt 101
 霜 Frost 101

十八畫

擴散 Diffusion.....	19
擺長 Length of pendulum.....	141
擺錘 Bob	141
斷續虹吸 Intermittent siphon ..	68
歸納與演繹 Induction and deduc- tion.....	3
簡單機械 Simple machines.....	91
簡諧運動 Simple harmonic mo- tion.....	140
轉動 Rotation.....	81, 143
醫用溫度計 Clinical thermometer	168

十九畫

穩定平衡 Stable equilibrium.....	83
穩度 Stability	83
離心力 Centrifugal force.....	138
離心節速器 Centrifugal governor	220
霧 Fog	205

二十畫

懸 Suspend	46
霰 Sleet.....	206

露 Dew	205
露點 Dew Point.....	203
露點濕度計 Dew point hygro- meter.....	203

二十一畫

優和弦 Dominant	249
攝氏溫度標 Celsius' thermome- tric scale	165

二十二畫

彎曲 Pending	33
響度 Loudness	245

二十三畫

攪動器 Stirrer.....	189
變速度 Variable velocity.....	113
變速運動 Variable motion	113
體脹係數 Coefficient of cubical expansion.....	173

二十五畫

觀察與實驗 Observation and ex- periment	2
---	---

420,79

8022