

科學圖書大庫

# 工 程 力 學

(上册・靜力學)

譯者 丁觀海

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

# 工 程 力 學

(上册·靜力學)

譯者 丁觀海

徐氏基金會出版

## 譯者序

力學在工程學院及技術學校內向爲主要課程，因各種設計如房屋，橋梁，機械，造船，航空與太空等均須以力學原理爲根據。近年來各種新興科學快速發展之結果，使大學工程課程大量修改，許多以往認爲重要科目者多經淘汰。然力學一科非但屹立，其教學反有須要加強之趨勢。

工程力學或應用力學一科，曾在數十年中內容無甚變更。多數教科書範圍均極狹窄，所討論者多僅限於剛體力學之一部。所偏重者則爲某些習見單純問題求解之技巧。近年來潮流所趨，已漸有所改革。此科範圍不但已逐漸擴大，對基本原理更加注重。此爲自然而合於教育原則者，設非如此，以今日生活環境變化之速，大學畢業之工程師將不足以面對未來之問題。

工程力學英文教本多至百數十種。台灣大學土木工程系於五年前試用內容及編排代表最新時代之本書原本。初時教學兩者均曾感不便，但今日已獲顯著之效果。任何進步之改革過程亦均如此。

本書之翻譯工作承台灣大學力學研究生賈文魁，蔡益超，汪蘇甦，林佑輔暨周茂雄碩士與鍾宏光碩士多所協助謹此致謝。

丁觀海 五十八年九月

# 著 者 原 序

## 第二版

下列各項爲本書第二版主要更改：

1. 多數習題重新編排以難易爲序。
2. 例題數目增加甚多。
3. 梁之部份重寫以使所用符號與彈性力學一致。
4. 鏈與索材料重寫作更合理及有力之介紹。
5. 面之性質一章擴大並納入巴波一哥聶定理。
6. 本版中增加數量三乘積及其應用。
7. 容納使用電子機算機之若干計劃。
8. 最後，根據在水牛城紐約大學多年之教學經驗，本人曾極爲慎重的將全書瀏覽一遍並在多處作局部之更改。另根據與國內各院校曾使用此書多年之權威人士通訊所獲寶貴意見亦會作必要之修訂。

本人相信，此教本之水準及精神並未變更，因此，第一版中對本書內容及其哲學之敘述仍可應用。

“本書爲用向量方法之力學。本人撰寫時特別注意基本觀念及嚴謹性，使學生讀後獲一基礎可面對今日工程師可能遭遇之各種問題。同時選擇教材時亦試行幫助讀者發展對普通力學問題解決之技巧。本書並容納其他力學部門若干初步材料，使大學本部學生有較寬廣之視界。

作者並未希冀讀者對向量代數及向量微積分已先有所瞭解。此等科目之綱要均爲本書教材之一部。此部教材對學生言並無時間上之浪費，因熟練向量運算方法後進度將大爲增速。另一方面，此種數學僅經常應用於具物理觀念之實際問題時始可充分瞭解。故對數學學生言亦至有益。

本書保持一般編排體制即分爲靜力學，運動學，及動力學。經多年教授力學經驗，本人以爲在靜力學中討論合力及平衡方程式時勿須自簡單之體系開始（如共點及共面系），然後逐漸進入一般情形之討論。實際上，當各向量與其運算方法經謹慎予以定義及對力體系之相當量意義充分瞭解後，一般問題即立可討論。較狹義情況所具之某些特性亦可由此推知。此種進行方法可增強學生推理能力，因對每一問題之求解均自一般定理及分類開始而非根據其當時正在究讀之章節。本人相信此種強迫性作法可使學生修完此課程後對靜力學問題具較佳之技能。因此本書強調廣義觀點之分析而非普通問題之速簡解法。

本書未包括圖解法，因本人相信學生熟習分析法後，如有興趣應可自行對某些問題設法圖解。本人可附加說明者，當修完此課程後，不論學生曾受若干作圖技巧之訓練，將爲首被遺忘。

在第八章中討論面之性質時，由換軸關係而謹慎介紹張量觀念。第九章中介紹應力張量並與面性質作一對比。此等學習可幫助學生在動力學中較易把握慣性張量之意義。

力學變分原理之介紹置於靜力學最後一章。虛功法及最小位能法對解某類問題時可任選其一。本書對此等原理之討論具足夠之謹嚴性，可對高級力學之研究奠定一基礎”。

本人對水牛城紐約大學同事們對此教本再版重編所表示之關切及幫助謹致謝意。勃魯克林工藝學院之毛得周博士（Dr. M. Morduchow）所予最有幫助之善意批評更爲感激。哥倫比亞大學之朱博士（Dr. C. K. Chu）對本書所花費之時間及無數有價值之建議極爲感謝。最後各校教授對此書各方面之通訊指教亦致謝忱。以上各位之協助使本人準備此書時極感愉快。

I. H. SHAMES

# 目 錄

## 1

### 力學之基礎 ..... 1—20

|      |                 |    |
|------|-----------------|----|
| 1.1  | 緒論.....         | 1  |
| 1.2  | 力學之基本因次及單位..... | 1  |
| 1.3  | 次級因次 .....      | 4  |
| 1.4  | 因次齊次定律.....     | 5  |
| 1.5  | 力及質量因次關係.....   | 6  |
| 1.6  | 質量之各種單位.....    | 7  |
| 1.7  | 力學條件之理想化 .....  | 8  |
| 1.8  | 向量與數量.....      | 10 |
| 1.9  | 向量之相等與相當.....   | 12 |
| 1.10 | 力學定律.....       | 13 |
| 1.11 | 總結.....         | 15 |

## 2

### 向量代數綱要.....21—46

|     |                  |    |
|-----|------------------|----|
| 2.1 | 緒論 .....         | 21 |
| 2.2 | 值及向量與數量之乘積 ..... | 21 |
| 2.3 | 向量之加減 .....      | 22 |
| 2.4 | 向量分解；數量分值 .....  | 24 |
| 2.5 | 單位向量 .....       | 26 |

## VI

|      |              |    |
|------|--------------|----|
| 2.6  | 兩向量之數量乘積或點乘積 | 27 |
| 2.7  | 兩向量之叉乘積      | 30 |
| 2.8  | 三連數量積        | 32 |
| 2.9  | 向量符號釋義       | 34 |
| 2.10 | 總結           | 34 |

## 3

|      |         |
|------|---------|
| 重要向量 | 47 — 66 |
|------|---------|

|     |          |    |
|-----|----------|----|
| 3.1 | 位置向量     | 47 |
| 3.2 | 力對一點之力矩  | 48 |
| 3.3 | 力對一軸之力矩  | 49 |
| 3.4 | 力偶與偶矩    | 52 |
| 3.5 | 偶矩視為自由向量 | 54 |
| 3.6 | 力偶之加減    | 54 |
| 3.7 | 偶矩之數量分值  | 56 |
| 3.8 | 總結       | 56 |

## 4

|        |          |
|--------|----------|
| 力之相當體系 | 67 — 106 |
|--------|----------|

|     |         |    |
|-----|---------|----|
| 4.1 | 緒論      | 67 |
| 4.2 | 力之平行換位  | 68 |
| 4.3 | 扳鉗      | 70 |
| 4.4 | 力體系之和   | 74 |
| 4.5 | 特殊力體系之和 | 76 |
| 4.6 | 分佈之力體系  | 81 |
| 4.7 | 總結      | 88 |

## 5

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| <b>平衡方程式</b> .....   | 107 - 158 |
| 5.1 自由體 .....        | 107       |
| 5.2 含斷面之自由體 .....    | 109       |
| 5.3 平衡方程式 .....      | 112       |
| 5.4 平衡之特殊例 .....     | 114       |
| 5.5 平衡問題 .....       | 117       |
| 5.6 由平衡所得之簡單結論 ..... | 127       |
| 5.7 靜力不定問題 .....     | 132       |
| 5.8 剛體之完全牽制 .....    | 134       |
| 5.9 總結 .....         | 138       |

## 6

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| <b>結構力學緒論</b> ..... | 159 - 216 |
|---------------------|-----------|

|                     |     |
|---------------------|-----|
| <b>第一部 桁架</b> ..... | 159 |
|---------------------|-----|

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 6.1 結構模型 .....       | 159 |
| 6.2 正剛桁架及靜力決定性 ..... | 159 |
| 6.3 簡單桁架 .....       | 161 |
| 6.4 簡單桁架題解 .....     | 161 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| <b>第二部 梁</b> ..... | 169 |
|--------------------|-----|

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 6.5 梁之分析 .....         | 169 |
| 6.6 剪力與撓矩圖 .....       | 171 |
| 6.7 分佈荷力與剪力及撓矩關係 ..... | 175 |
| 6.8 三向荷力 .....         | 183 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>第三部 鏈索問題</b> ..... | 185 |
|-----------------------|-----|

## VIII

|      |            |     |
|------|------------|-----|
| 6.9  | 緒論 .....   | 185 |
| 6.10 | 平面鏈索 ..... | 186 |
| 6.11 | 總結 .....   | 200 |

## 7

|           |           |
|-----------|-----------|
| 摩擦力 ..... | 217 - 266 |
|-----------|-----------|

|     |                           |     |
|-----|---------------------------|-----|
| 7.1 | 緒論 .....                  | 217 |
| 7.2 | 庫倫 ( Coulomb ) 摩擦定律 ..... | 217 |
| 7.3 | 乾摩擦問題 .....               | 221 |
| 7.4 | 特殊應用 .....                | 238 |
| 7.5 | 滾動阻力 .....                | 247 |
| 7.6 | 總結 .....                  | 249 |

## 8

|            |           |
|------------|-----------|
| 面之性質 ..... | 267 - 300 |
|------------|-----------|

|      |                                      |     |
|------|--------------------------------------|-----|
| 8.1  | 緒論 .....                             | 267 |
| 8.2  | 面積一次矩與形心 .....                       | 267 |
| 8.3  | 巴波—哥聶 ( Pappus - Guldinus ) 定理 ..... | 275 |
| 8.4  | 面積二次矩與慣性積 .....                      | 277 |
| 8.5  | 轉換定理 .....                           | 278 |
| 8.6  | 慣性矩與慣性積之計算 .....                     | 280 |
| 8.7  | 慣性矩與慣性積關係 .....                      | 282 |
| 8.8  | 極軸慣性矩 .....                          | 284 |
| 8.9  | 主軸 .....                             | 285 |
| 8.10 | 總結 .....                             | 288 |

## 9

## 聯體力學緒論 ..... 301 — 344

## 第一部 基本定義 ..... 301

9.1 應力觀念 ..... 301

9.2 應力符號 ..... 302

9.3 一般討論 ..... 303

## 第二部 應力關係 ..... 304

9.4 一點上之應力 ..... 305

9.5 應力張量之重要性質 ..... 308

## 第三部 流體靜力學及空氣靜力學 ..... 311

9.6 緒論 ..... 311

9.7 階變 ..... 312

9.8 不壓縮靜流體內之壓力變化 ..... 314

9.9 靜止之可壓縮流體 ..... 316

9.10 靜力可壓縮流體之壓力變化 ..... 317

9.11 靜止流體表面壓力效應 ..... 319

9.12 流體內沉面上靜壓力 ..... 320

9.13 浮力 ..... 324

## 第四部 黏性摩擦 ..... 325

9.14 黏性摩擦 ..... 325

## 10

## 變分靜力學緒論 ..... 345 — 384

10.1 緒論 ..... 345

## 第一部 虛功法

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 10.2 對一質點之虛功原理 .....     | 345 |
| 10.3 對一剛體之虛功原理 .....     | 347 |
| 10.4 理想聯結剛體體系之虛功原理 ..... | 349 |
| 10.5 力偶虛功 .....          | 350 |
| 10.6 自由度 .....           | 351 |
| 10.7 理想牽制問題 .....        | 351 |
| 10.8 虛功原理之引伸 .....       | 356 |

## 第二部 最小位能法 .....

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 10.9 保守體系 .....       | 359 |
| 10.10 保守體系之平衡條件 ..... | 361 |
| 10.11 穩定問題 .....      | 364 |
| 10.12 結論 .....        | 371 |

## 附錄 .....

385

# 1 力學之基礎

## 1.1 緒論

力學為一物理科學其所研究者為物體受干擾時之動力行為（別於化學，熱力學等行為）。工程師所面對之各種問題均與此等行為有關，故力學為工程分析之核心。事實上無其他物理科學在工程中較力學有更廣泛之應用，力學亦為歷史最為悠久之物理科學。亞幾默得關於浮力及槓桿之論述可溯自紀元前二百年。吾人今日對重力及運動之知識為牛頓（1642—1727）所建立，其定律建立牛頓力學亦即為本書主題。

本世紀初（1905），愛因斯坦發表相對論對牛頓體系之力學加以限制。此新理論對物體速度接近光速時（186,000 英哩/秒）與牛頓力學發生差異。此等速度可在大範圍之天體動力學及小範圍現象之基本粒子運動雖可達到，但在大部實際工程問題中牛頓力學仍足應用。

在量子力學領域中牛頓定律亦不能完全適應，量子力學奠定於卅年代。

## 1.2 力學之基本因次與單位

討論力學問題時吾人須先對物體之敘述建立一鑑別之體系稱為因次（dimensions）。凡選用之因次與其他因次無關聯者稱為基本因次。由基本因次所組成者稱為次級因次。可選用之基本因次甚多，吾人將暫擇長度，時間，及質量為一組基本因次。

長度一對說明大小之一觀念。欲決定物體之大小時吾人須取另一已知大小之物體置其附近。在機器圖片中，設有一人立於機器旁邊。如無此人則對此不太熟稔之機器無法生一大小觀念。雖此人可供某些標準之比較但吾人僅能對機器之大小有粗淺之認識。人之長度不一，外形過於複雜對機器精確之度量難有幫助。吾人所需者應為固定簡單形狀之物體以測物體之大小並可以數學形式表示其結果。在金屬桿上劃一直線置於常溫及其他不易之物理條件下(如法國所藏之標準米達尺)可用為簡單不變之標準。吾人現可計算記錄物體沿某方向之長度為此標準之若干倍。對大小之其他觀念如面積及體積等亦可由此標準長度及幾何學規定之。每一個採用之標準稱為長度之單位。世界上有多種實際應用之單位，本書中採取英尺為長度之單位。本章末附各常用長度單位。

時間一對事件出現次序之觀念。當視察機器與旁立一人之圖片時，如注意此人之衣着形式有時可以約略知曉其攝製之年代。因吾人或回憶：“當吾讀中學時代，此人所戴之草帽為流行者。換言之，此“當”字與觀察者對某事項之經驗發生聯繫。對此“當”作較精確之敘述時，吾人應選擇一可完全重複出現之動作，如此則對事件次序之討論時可用若干次標準動作之重複及分數重複以表明其時間。地球之自轉即為事件適當之時間度量。在工程上吾人需較小之單位“秒”，亦即每日重複 86,400 次者。

質量一物體之一性質。一般初學者對長度及時間觀念因視覺及日常生活觀係極易接受，但對質量之觀念因其與日常生活無直接關係較難瞭解其意義。

物體質量之意義可由其兩種不同作用決定之。第一種作用設兩硬性物體其大小形式色澤成分均異，各懸於完全相同之彈簧上如圖 1.1 所示。因物體重力關係每一彈簧均將拉長若干。將拉長較大彈簧上之物體磨去部分材料可使兩彈簧之拉長相等。如將兩彈簧提昇至地面上某一高度時使兩彈簧拉長減少時其總拉長仍相同。故吾人可作一結論

即兩物體必有相同之內在性質。此與重力相關之性質稱為質量 (mass)。

此兩物體之相當可由另一作用示證之。如吾人將兩物體拉下同等距離然後同時釋放兩物將作完全相同之運動。事實上吾人對兩物給予同等機械干擾而得相同之動力反應。

因此雖兩物體許多顯著之分別但對此等效應仍屬相當。質量之性質，對物體言，係由重力及對機械干擾之反應所定。

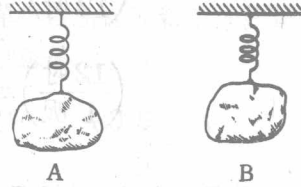


圖 1.1

對此性質作量的敘述時，吾人可選一適當物體並比較其與另一物體對上述兩種作用之反應。最簡單之手續當為比較其對一彈簧在同一地點之拉長度。普通美國工程師對質量所用之單位為磅質量 (pound mass)，其定義係由某標準物體在標準地點之地心吸力而定，及斯勒 (slug) 係由標準物體對標準之機械干擾所之反應而定。此等單位將在下節中繼續討論之。

吾人現已建立三種獨立基本因次用以敘述物理現象。此等因次常用以下諸字母表示之：

長度 ( $L$ )

時間 ( $t$ )

質量 ( $M$ )

此等基本因次之表示法與下節所述之次級因次表示法統稱為因次代表法。

在計算過程中有時常須更換單位。例如將呎換為吋或公分。更換時應用完全相當之新單位數目。一英呎可換為 12 吋或 30.5 公分。本章末附常用之單位體係 (表 A) 及其相當之轉換 (表 B)。此等單位間之關係可如下表示之：

$$1 \text{ 呎} \equiv 12 \text{ 吋} \equiv 30.5 \text{ 公分}$$

此不能視為代數關係而僅表示為物理相當。以上關係亦可寫為

$$\begin{aligned} \left(\frac{1 \text{ 呎}}{12 \text{ 吋}}\right) &\equiv 1 & \left(\frac{1 \text{ 呎}}{30.5 \text{ 公分}}\right) &\equiv 1 \\ \left(\frac{12 \text{ 吋}}{1 \text{ 呎}}\right) &\equiv 1 & \left(\frac{30.5 \text{ 公分}}{1 \text{ 呎}}\right) &\equiv 1 \end{aligned} \quad 1.1$$

式內右首爲一表示左方分子與分母爲物理相當量。下節討論次級因次時此等表示法頗爲適用。

### 1.3 次級因次

當物理現象由其定義用數種基本因次說明時（例如速度之定義\*爲距離被時間除之）稱爲次級因次。次級量之因次代表法爲由其物理概念所需之基本因次構成之。例如速度之度量代表爲：

$$\text{速度} \equiv (L)/(t)$$

次級量之單位亦由其組成之基本因次表示之。例如：

$$\text{單位速度} \equiv (\text{呎})/(\text{秒})$$

自一體系單位更換至另一體系時常包括更換次因次之尺度。例如英制速度每單位爲每秒一呎，公制爲每秒一公分。此等每單位在較繁複之次級量中之正確關係須加注意。例如最簡單之問題每秒若干公分相當於每秒一呎？對此等計算可利用正式因次代表法，其步驟爲：寫出因次式後代入基本因次之單位；用相當數目之新體系單位（表B, 16頁）換原用單位。所得結果爲新體係單位數目相當於原體係一單位之方程式。對速度言吾人應得

$$1 \text{ 呎/秒} \equiv 30.5 \text{ 公分/秒}$$

\* 較嚴謹之定義將在動力學中提出

即在公制中 30.5 單位之速度相當於英制中一單位。

另一轉換次級度量單位方法爲用 1.1 式所示之步驟。更換某式之單位時用相當於一之比率乘之，消除舊單位後所餘即新單位及其應有之數字係數。對上述速度言由英制變公制應爲：

$$\frac{1 \text{ 呎}}{\text{秒}} \equiv \frac{1 \text{ 呎} (30.5 \text{ 公分} / 1 \text{ 呎})}{\text{秒}} \equiv \frac{30.5 \text{ 公分}}{\text{秒}}$$

當吾人乘此等比率改換單位時對式內所示之物理量絕無更動。初學者應習用此種方法，非正式之簡化方法常導致錯誤。

## 1.4 因次齊次定律

對自然界某些問題可經由基本及次級因次敘述之，吾人可作細心之觀察及實驗將各量間之關係以方程式表達之。對此等方程式之製定，受一重要定律限制，即齊次定律。因自然現象之演變與人造之單位無關。代表自然現象之方程式在任何單位體系內應均適用。如單擺之週期  $t = 2\pi\sqrt{L/g}$ ，必需適用於所有單位制度，並因此稱爲因次齊次。所有物理學中基本方程式均必因次齊次，由分析方法自基本方程式所導致之方程式亦必均齊次。

試取下列方程式：

$$x = ydg + k$$

如此式爲齊次兩端數值用任何單位體系均需相等。每一組之尺度比例更換時對任何單位體系均須一致。例如  $ydg$  在新單位體系中數值增加一倍時， $x$  及  $k$  亦須增加一倍。欲適合此條件方程式各組必需均代表相同因次。

如一方程式之度量代表爲：

$$(L) = (t)^2 + (t)$$

此式非齊次者。如自英制單位換爲公制，英呎數目變爲公分數目，但時

間單位無變更故方程式左方數字更改而右方不變。此方程式不能適用於新單位體系故不可能為導自基本物理定律者。

## 1.5 力與質量之因次關係

吾人現可用因次齊次定律建立一新次級度量。試暫用牛頓定律，後節中再對此定律作較詳盡之探討。此時只用質點加速度受某作用時與其質量成反比即可。用算式表示，即：

$$a \propto 1/m \quad 1.2$$

式內 $\propto$ 代表比例符號。由 $F$ 代表比例常數則得：

$$F = ma \quad 1.3$$

此作用，亦即由 $F$ 代表者稱為力。其因次代表應為：

$$(F) = (M) \frac{(L)}{(t)^2} \quad 1.4$$

力多由兩物體接觸所產生。但磁場、靜電場、及重力場作用亦均可適用牛頓定律。

在力學中吾人亦可選擇力為一基本因次，其觀念可由一標準彈簧之拉長決定之。如此則實驗結果將為物體加速度與作用力成正比。由算式表示為

$$F \propto a \quad \therefore F = ma$$

式內由質量代表比例常數。如此則質量成為一次級度量其因次為：

$$(M) = (F) \frac{(t)^2}{(L)} \quad 1.5$$

因此吾人可任用兩種基本單位— $MLt$ ，或  $FLt$ 。物理學者多用前者工程師則多用後者。