

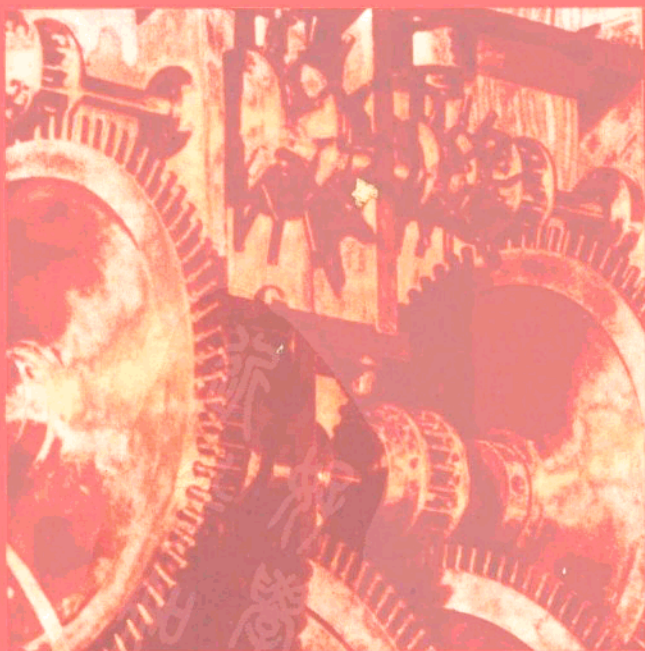
工程向量力學

(靜力學篇)

第四版

原著者：Beer/Johnston

譯述者：劉伯宏



科技圖書股份有限公司

原 序

工程學生修習力學第一堂課程的主要目的，必需要能發展具有以簡單而合乎邏輯的方式，分析任何問題的能力，並能將少數而徹底瞭解的基本原理，用於求解。希望經由設計供作大學二年級，研修靜力學第一堂課程用的教科書，緊接着下冊工程向量力學：動力篇將有助於教師們達成其目的*。

本書一開始就介紹向量代數，並用在提出並討論力學的基本原理中。向量法亦已用於求解許多問題中，尤其是三維問題。因向量的應用，使求解更形簡單而緊湊。但本書所強調的是對力學原理的正確認識，向量的提出，主要是作為一種方便的工具**。

本書採用方法的特徵之一，係將質點力學與剛體力學，作明確的分開。此種編排使在開始階段就能考慮較簡單的實際應用，繼即介紹比較複雜的概念。例如，本書首先處理質點靜力學（第二章），經由向量加法與減法法則，隨即將質點平衡原理用在僅包括交會力的實用情況。第三與第四兩章中，考慮剛體靜力學，第三章中的兩個向量的向量積與純量積；並用以確定一力對一點與對一軸的力矩。經所提出此等新概念後，隨即對力的平衡系統作徹底而嚴格的討論。然後導得第四章中包括在一般力系統下的有關剛體平衡方面的許多實際應用。在動力學中，亦可察得乃係用同樣的編排。先經介紹力、質量與加速度；功與能量、以及衝量與動量等概念後，首先應用於僅含質點的問題。如此，同學們本身在面臨有關剛體運動的困難問題以前，本身對動力學中所用的三種基本方法早已十分熟悉，並已學到其中各別的優

* 現已可購二書之合訂本，工程向量力學：靜力學與動力學（Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics），第四版。

** 本書之第三版僅限於採用向量加法與減法。

點。

本書經設計作為靜力學的第一門課程，故新的概念均用簡單方式提出，每一步驟均作細節說明。另一方面，在討論所考慮問題的較廣泛的概念時，即達成一種肯定而成熟的方法。例如，部分約束與靜不定等概念，在本書開始即行說明，並在全書中均加引用。

前已強調，力學；乃是一種根據少數基本原理而成的。基本是演繹科學。故按其邏輯順序提出推導，並將全部均嚴格的保證維持在此水準上。但學習過程，大部分為歸納法，首先考慮簡單的應用。如此，質點靜力學需置在剛體靜力學之前，包含內力的問題，直到第六章才開始提出。第四章中的內容也是一樣，首先考慮的是為同平面力系的平衡問題，且用普通代數法求解，含三維力系的問題，同時，要求完全用向量代數時，則放在該章的第二部分討論。

本書一開始就用自由體圖，全書均強調其重要性。力與自由體圖中的其他圖形，係用粗細線加以區分。如此可使讀者在討論例題與書中例題時，很易鑑別出作用在一質點或一剛體上的力。自由體圖不但用來說解平衡問題，且可用於表示兩個等效的力系統，或是更一般化的情形，用來表示兩個等效的向量系統。當準備研究剛體動力學時，此法特別有用。在動力學中所顯示的，是強調“自由體圖用方程式”，並不是標準的運動代數方程式，可達成對動力學的基本原理更為直覺而更為徹底的瞭解。

因為現今的趨勢，採用國際制單位(SI 單位)。故在第一章中介紹些力學中最常用到的 SI 單位。並用在全書中。大約有一半的例題與 60 % 的習題指定用 SI 單位，其餘部分仍採常用單位。著者相信，此法是提供讀者所需的最佳安排，因當其從事是項職業時，正值由原單位制轉變到另一單位制的轉變時期，必然會瞭解到自一制轉變為另一制，會遭遇到更需要採用換算因子的機會。因 SI 單位係根據時間、長度與質量而來的絕對單位，常用單位是根據時間、長度與力而來的引力單位制。故對許多問題求解需要不同的方法。例如，當採用 SI 單位時，一般均規定以 kg 表示一物體的質量；在大多數靜力學問題中，所需的單位為 N (new ton) 的物體重量，故在這方面需作較多

計算。另一方面，當採常用單位時，物體規定按 lb 計的重量，故在動力學問題中，需另加計算，以求用 slng 計的質量（或 $\text{lb}\cdot\text{sec}^2/\text{ft}$ ）。因之，著者深信指定的習題中必需包括此兩種單位制，但此兩種單位制之間，指定習題的實際分配量，留由教師們自行裁決。同時，每種類型均提供足夠數量的習題，使對四種類型的習題，可作完善的調配與採擇。任何情形中，用 SI 單位習題的比例，均在 50 到 75 % 之間。亦可自用 SI 單位的習題中分成兩組習題的指定，以及由常用單位習題，指定另外兩組習題。

本書中包含甚多可供採擇的章節。此等章節均加註星號。如此，易於與構成基本靜力學課程的章節間加以區分。此等章節可以刪除，不會妨礙對本書其餘部分的瞭解。此等章節的論題計包括：力系縮成一絞盤（wrench），流體靜力學的應用，樑的剪力與彎矩圖、纜索的平衡、慣性積與 Mohr 圓、三維物體的質量慣性積與主慣性軸，以及虛功法。當修完靜力學，緊接研修材料力學時，則有關樑的章節特別有用。同時，三維物體的慣性特性各章節，主要是供隨後尚需研修三維剛體運動的動力學用的。

本書的內容與大部分習題，並不需要在代數、三角與初等微積分以外的數學知識，同時，本書所需的初等向量代數，亦已審慎編列在第二與第三章中。就一般而言，強調對所包括的基本數學概念的正確瞭解，更勝於對數學公式的敏捷計算。有關這方面的情形必需說明的，是求合成面積的形心，係列在用積分計算形心之前，如此，可使在引用積分之前，便能穩固的建立一面積矩概念。對工程學生已能廣泛採用袖珍電算機作數值解的情形亦已提出，第二章中尚包括對袖珍電算機求解典型靜力學問題的正确使用情形，加以指導。

各章的第一節均係導論，設定該章的目的與目標，並以簡略方式描述所包括的內容，與其在求解工程問題的應用。本書的骨幹，經劃分成若干單元，每一單元包括一節或數節理論講述，舉一則或數則例題，以及供指定用的大量習題。每一單元，相當於一個確定的論題，一般情形，可作為一堂課的內容。但在許多情形中，教師可發現對某一已知論題，應在專注的章節，不但限於只是一堂課的內容。例題均

4 工程向量力學（靜力學篇）

經用與學生可用來求解指定習題的非常類似的形式加以編排，如此，可具雙重目的；即：擴充正文，與示例說明一種整齊清晰並依序求解的作業情形。同學們對於自己求解的作業，必要培養此種習慣。但其主要目的仍是經由設成示例，說明主文中所提的內容，將有助於瞭解力學的基本原理。諸習題已按示例內容加以分組，並按由易到難的順序編排。要特別注意習題註上的星號。書末附有雙號習題的答案。

著者對採用工程力學（Mechanics for Engineers），與工程向量力學（Vector Mechanics for Engineers）兩書以往各版本的讀者所提出的卓越批評與建議，均致由衷的感激。

Ferdinand P. Beer

E. Russell Johnston, Jr.

符號說明

a	常數、半徑、距離
$A, B, C, \dots$	支承與連接處的反作用
$A, B, C, \dots$	點
A	面積
b	寬度、距離
c	常數
C	形心
d	距離
e	自然對數的底
F	力、摩擦力
g	重力加速度
G	重心、重力常數
h	高度、索的垂度
i, j, k	沿座標軸的單位向量
$I, I_x, \dots$	慣性矩
$\bar{I}$	形心慣性矩
$I_{xy}, \dots$	慣性積
J	極慣性矩
k	彈簧常數
k_x, k_y, k_o	迴轉半徑
K	形心迴轉半徑
l	長度
L	長度、跨度
m	質量
M	力偶、質量

2 符號說明

M_o	對 O 點的力矩
M_o^R	對 O 點的合力矩
M	力偶或力矩的大小、地球質量
M_{oL}	對軸 OL 的力矩
N	反作用的垂直分量
O	座標原點
p	壓力
P	力、向量
Q	力、向量
r	位置向量
r	半徑、距離、極座標
R	合力、合成向量、反作用
R	地球半徑
s	位置向量
s	弧長、纜索長
S	力、向量
t	厚度
T	力
T	拉力
U	功
V	向量積、剪力
V	體積、位能、剪力
w	單位長度的載重
W, W	重量、載重
x, y, z	直角座標值、距離
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	形心或重心的直角座標值
α, β, γ	角度
γ	單位重
δ	伸長
$\delta \mathbf{r}$	虛變位

δU 虛功

λ 沿一線的單位向量

η 效率

θ 角座標值、角度、極座標

μ 摩擦係數

ρ 密度

ϕ 摩擦角、角度

工程向量力學(靜力學篇)

目 錄

原 序

目 錄

符號說明

第一章 緒 論

1.1 力學是什麼？	1
1.2 基本概念與原理	2
1.3 單位制	5
1.4 一制單位換算成另一制單位	12
1.5 問題求解方法	15
1.6 數值的精確度	16

第二章 質點靜力學

2.1 導 論	18
平面中的力	18
2.2 質點上的力・兩力的合力	18
2.3 向 量	20
2.4 向量加法	22
2.5 若干交會力的合力	25
2.6 一力分解成多分力	26
習題 1	31
2.7 力的直角分力・單位向量*	34

2 工程向量力學 (靜力學篇)

2.8 用求 x 與 y 諸分力的總和方式, 求諸力相加	39
習題 2	41
2.9 質點的平衡	44
2.10 Newton 運動第一定律	46
2.11 含質點平衡諸問題・自由體圖	46
習題 3	51
空間的力	55
2.12 空間的力的直角分力	55
2.13 用力的大小與作用線上的兩點確定一力	61
2.14 空間交會力的相加	62
習題 4	66
2.15 空間質點的平衡	70
習題 5	72
復習題 6	76

第三章 剛體：力的等效系

3.1 導 論	79
3.2 外力與內力	80
3.3 傳遞性原理、等效力	81
3.4 兩向量的向量積	83
3.5 用直角分量表示的向量積	87
3.6 一力對一點的力矩	89
3.7 Varignon 定理	92
3.8 一力的力矩的直角分量	92
習題 1	100
3.9 兩向量的純量積	104
應 用	106
3.10 三向量的混合三重積	108
3.11 一力對一已知軸的力矩	110
習題 2	115

3.12 力偶的力矩	120
3.13 等效力偶	122
3.14 力偶相加	125
3.15 力偶可用向量代表	126
3.16 一已知力分解成位在 O 的一力與一力偶	127
習題 3	132
3.17 力系簡化成一力與一力偶	137
3.18 力的等效系	139
3.19 向量的等值系	140
3.20 力系的進一步簡化	141
*3.21 力系簡化成一絞盤	144
習題 4	154
復習題 5	161

第四章 剛體平衡

4.1 導 論	165
4.2 自由體圖	166
二維的平衡	166
4.3 二維結構支承與連接的反作用	167
4.4 二維剛體的平衡	169
4.5 靜不定反作用·部分約束	171
習題 1	181
4.6 兩力體的平衡	191
4.7 三力體的平衡	192
習題 2	194
三維之平衡	198
4.8 三維結構的支承與連接的反作用	198
4.9 三維剛體的平衡	200
習題 3	207
復習題 4	217

第五章 分佈力：形心與重心

5.1 導 論	221
面積與線	221
5.2 二維體的重心	221
5.3 面積與線的形心	223
5.4 面積與線的一次矩	225
5.5 合成版與線	227
習題 1	234
5.6 用積分法求形心	240
5.7 Pappus-Guldinus 定理	242
習題 2	248
*5.8 樑的分佈載重	253
*5.9 水中的面上力	255
習題 3	259
體 積	264
5.10 三維體的重心・體積的形心	264
5.11 合成體	266
5.12 用積分法求體積形心	268
習題 4	273
復習題 5	279

第六章 結構分析

6.1 導 論	282
桁 架	283
6.2 桁架定義	283
6.3 單式桁架	285
6.4 桁架分析用節點法	287
*6.5 特殊載重條件下的節點	291
*6.6 立體桁架	293

習題 1	296
6.7 桁架分析用斷面法	300
*6.8 由數個單式桁架構成的桁架	301
習題 2	306
構架與機器	310
6.9 含多力構材的結構	310
6.10 構架分析	311
6.11 與支承分離後不為剛性的構架	313
習題 3	320
6.12 機 器	331
習題 4	334
復習題 5	346

第七章 樑與索中的力

*7.1 導 論	351
*7.2 構材中的內力	351
習題 1	355
樑	358
*7.3 各種不同類型的載重與支承	358
*7.4 樑的剪力與彎矩	360
*7.5 剪力與彎矩圖	362
習題 2	367
*7.6 載重、剪力與彎矩間的關係	370
習題 3	378
纜 索	381
*7.7 承受集中載重的纜索	381
*7.8 承受分佈載重的纜索	383
*7.9 拋物線形的纜索	384
習題 4	389
*7.10 懸索線	393

6 工程向量力學 (靜力學篇)

習題 5	397
復習題 6	399

第八章 摩 擦

8.1 導 論	402
8.2 乾摩擦定律、摩擦係數	403
8.3 摩擦角	406
8.4 含乾摩擦的問題	408
習題 1	413
8.5 楔	424
8.6 方絲螺旋	425
習題 2	430
*8.7 軸頸承座・軸摩擦	436
*8.8 推力軸承・圓盤摩擦	438
*8.9 輪摩擦・滾動阻力	439
習題 3	443
8.10 皮帶摩擦	447
習題 4	452
復習題 5	457

第九章 分佈力：慣性矩

9.1 導 論	460
面積慣性矩	461
9.2 面積的二次矩或慣性矩	461
9.3 用積分求面積慣性矩	463
9.4 極慣性矩	465
9.5 面積的迴轉半徑	466
習題 1	470
9.6 平行軸定理	472
9.7 合成面積的慣性矩	474

習題 2	483
*9.8 慣性積	489
*9.9 主軸與主慣性矩	490
*9.10 慣性矩與慣性積用 Mohr 圓	494
習題 3	501
質量慣性矩	504
9.11 質量慣性矩	504
9.12 平行軸定理	507
9.13 薄版慣性矩	509
9.14 用積分法求三維物體的慣性矩	511
9.15 合成體的慣性矩	513
習題 4	519
*9.16 一物體對通過 O 的任意軸的慣性矩・質量慣性積	525
*9.17 慣性橢圓面・主慣性軸	527
習題 5	532
復習題 6	535

第十章 虛功法

*10.1 導 論	538
*10.2 力的功	538
*10.3 虛功原理	542
*10.4 虛功原理的應用	543
*10.5 實際機械・機械效率	546
習題 1	551
*10.6 有限位移中的力的功	559
*10.7 位 能	562
*10.8 位能與平衡	563
*10.9 平衡的穩定	565
習題 2	569
復習題 3	574
部分習題答案	578

第一章 緒 論

1.1 力學是什麼？

力學 (mechanics) 被定義為：一種描述及預測物體在力作用下，其靜的或動的情況的科學。可分為三部門，即：剛體 (rigid body) 力學、變形體 (deformable body) 力學與流體 (fluid) 力學。

剛體力學又可劃分為靜力學 (statics) 與動力學 (dynamics)。前者專論物體處於靜止狀態的情形，後者的物體會發生運動。研究該部門的力學中，假設物體為完全剛性。但實際的結構與機械，永遠不是絕對剛性的，當其承受載重時，會發生變形。但此種變形通常均甚小，不會顯着影響到所考慮的結構的平衡與運動情形。雖然如此，此等變形卻甚重要，會涉及結構對破壞的抵抗力，在材料力學 (mechanics of materials) 中將加研究。材料力學，是變形體力學中的一部門。力學的第三部門為流體力學，可劃分成不可壓縮流體 (incompressible fluid) 與可壓縮流體 (compressible fluid) 的研究。對不可壓縮流體的研究中的一個重要部門是水力學 (hydraulics)，將涉及包括液體在內的問題。

力學，為物理科學 (physical science)，因其對有關物理現象的研究。但有些人談到力學便會聯想到數學，而許多人多認為是工程課題 (engineering subject)。這兩種觀點一部分允稱公正。力學是大部分工程科學 (engineering science) 的基礎，且是研究中的一項不可或缺的先修課程。但未具在某些工程科學中常可見到的經驗論 (empiricism)，亦即：不單獨依賴經驗與觀察；根據其對演繹推斷的嚴格態度與鄭重，又酷似數學。但需再度說明，它不是抽象的或是純科學的；力學是一種應用科學 (applied science)。力學的目的是說明並預測物理現象，並因此而奠定工程應用的基礎。

1.2 基本概念與原理

雖然對力學的研究，可回溯到 Aristotle (384 – 322 B.C.) 與 Archimèdès (287 – 212 B.C.)，但卻一直到 Newton (1642 – 1727) 始求得適合基本原理的公式。此等原理，隨後由 D'Alembert、Lagrange 與 Hamilton 等以修正形式的公式予以表示。但在 Einstein 未寫出相對論 (theory of relativity, 1905) 公式以前，此項原理的真確性從未面臨挑戰，而維持不變。現今雖已瞭解其限度，不過 Newton 力學 (newtonian mechanics) 在今日仍是工程力學的基礎。

力學中所用的基本概念為空間 (space)、時間 (time)、質量 (mass) 與力 (force)。此等概念，不能實在訂定其定義；必需用吾人的直覺與經驗來接受，並用來研究力學時，所參照的心靈骨幹。

空間的概念，與一點 P 的位置觀念相關。 P 的位置可參考某一點，亦即原點 (origin)，按三個已知方向量得的三個長度，加以確定。此等長度稱謂 P 的座標 (coordinates)。

確定一個事件，指出其在空間的位置尚不夠充分，尚需知道發生該事件的時間。

質量的概念，係用於以某種基本力學經驗為基礎，對各物體加以比較，並加描述。例如，相同質量的兩個物體，會以同樣的狀態，受到地心引力，對其平移運動的改變，具有相同的抵抗力。

力，代表一個物體對另一物體的作用，可用實際相接觸，或相隔一段距離，施以力，有如重力與磁力的情形一樣。可分別用其作用點 (point of application)、大小 (magnitude) 與方向 (direction) 來描述一個力的特徵；力，可用向量 (vector) 來代表 (2.3 節)。

在 Newton 力學中，空間、時間與質量均係絕對概念，互不相關〔在相對論力學 (relativistic mechanics) 中，此情形並不真確，其中時間，為與其位置相關的事件，同時，一物體的質量，會隨其速度而不同〕。另一方面，力的概念不能與其他三項脫離關係。的確，下文將會列出 Newton 力學基本原理之一，指出作用在物體上的力，便與其物體的質量相關，且與其速度隨時間改變的情形相關。