



ENGINEERING MECHANICS

THIRD EDITION



黎文龍 · 吳嘉祥 譯

DYNAMICS

BEDFORD

動力學

FOWLER

ENGINEERING MECHANICS
DYNAMICS

動力學

著者

Anthony Bedford
Wallace Fowler

譯者

黎文龍 吳嘉祥

東華書局

動力學／Anthony Bedford, Wallace Fowler 著；
黎文龍，吳嘉祥譯．-- 二版．-- 臺北市：
臺灣東華，民 92
面；公分
譯自：Engineering mechanics. Dynamics, 3rd ed.
ISBN 957-483-207-4（平裝）

1. 動力學

440.133

92010272

本書經原出版公司授權獨家翻譯，非經
出版者同意，本書任何部分或全部，不
得以任何方式抄錄發表或複印。



版權所有・翻印必究

中華民國九十二年七月二版

動力學

定價 新臺幣柒佰元整
（外埠酌加運費匯費）

著者 Anthony Bedford & Wallace Fowler
譯者 黎文龍 · 吳嘉祥
發行人 卓 鑫 森
出版者 臺灣東華書局股份有限公司
臺北市重慶南路一段一四七號三樓
電話：(02) 2311-4027
傳真：(02) 2311-6615
郵撥：0 0 0 6 4 8 1 3
網址：www.bookcake.com.tw

印刷者 廣 同 印 刷 廠

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零柒貳伍號

序 言

我們撰寫本書最初的目的是：以我們在課當中進行的方式，展示動力學的基礎及應用。我們使用許多序列的圖形，仿效教師解說觀念所使用的逐步發展的圖形。我們強調在瞭解的過程中，可看式分析的重要性，尤其是透過分離體圖的使用。由於啟發對於學習極具導引的效果，我們將它築基於多樣化之現代工程應用的範例與問題。以來自許多使用本書之學生及教師們的協助與鼓勵，在新的一版中，我們繼續並擴展此一基調。

教學範例

在大多數的範例中使用策略/解答/討論的架構，乃是設計來強調良好的問題求解技巧的極度重要性。我們的目的是教導學生如何處理問題及判斷結果的能力。

範例 16.11 得自質量流動的力

速度 v_0 、質量流率 dm_t/dt 的水流，水平衝擊一具使水流向改變 θ 角的板子（圖 16.23），如果水離開板子時的速度約略等於 v_0 ，試問由水流作用於板子的力量為若干？



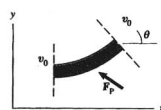
圖 16.23

策略

藉著將與板子接觸的水流看作是物體，以質量流進入、離開該物體來計算作用至板子的力量。

解

在圖(a)我們將與板子接觸部分的水流畫成物體的分離體圖，質量流以速度 v_0 進入及離開此“物體”，而 F_P 為由板子作用到水流的



(a) 水流之分離體圖。

$$\mathbf{v}_f = v_0 \cos \theta \mathbf{i} + v_0 \sin \theta \mathbf{j}.$$

令 F_D 為由離開的水流作用至.....

$$\mathbf{F}_D = -\frac{dm_t}{dt} \mathbf{v}_f = -\frac{dm_t}{dt} (v_0 \cos \theta \mathbf{i} + v_0 \sin \theta \mathbf{j}).$$

水流進入的速度為 $\mathbf{v}_i = v_0 \mathbf{i}$ ，由於水流是...

$$\mathbf{F}_E = \frac{dm_t}{dt} \mathbf{v}_i = \frac{dm_t}{dt} v_0 \mathbf{i}.$$

而作用到分離圖力的各力之和應為零，

$$\mathbf{F}_D + \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_P = 0.$$

故由水流作用至板子的力為（圖 b）

$$-\mathbf{F}_P = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_E = \frac{dm_t}{dt} v_0 [(1 - \cos \theta) \mathbf{i} - \sin \theta \mathbf{j}].$$



(b) 作用於板子的力。



(c) 流經機翼之流體型式。

討論

這個範例提供了渦輪機的葉片，或飛機的...

“策略”階段顯示開始求解必須的基本計畫。將應用什麼原理與方程式？必須做什麼決定，及其順序？

然後於解答時做細節描述，當必須釐清步驟時，使用序列的圖形。

“討論”階段指出該解的性質，獲就不同的解法做評論，或提示驗算的方法。或提示核驗答案的方式。

工程設計

許多範例與問題中，我們引入簡單的設計考量，但並沒有對基本力學的強調做妥協。設計問題以 $\mathcal{D}$ 的圖徽標記之。具有選擇性的範例以“工程上的應用”標示，提供動力學於工程設計中使用的詳細討論。

範例 16.12 工程應用

噴射引擎

在噴射渦輪增壓引擎中（圖 16.24），入口處的空氣質量流率為 dm_c/dt ，以速度 v_i 進入壓縮機。在燃燒室中，空氣與燃料混合，點燃。燃燒後的混合物則流經供應壓縮機動力的渦輪機。排出氣體的質量流率為空氣加上燃料的質量率 $(dm_c/dt + dm_f/dt)$ ，並以高速 v_e 噴出引擎，於是對引擎產生強大的推力作用。若 $dm_c/dt = 13.5 \text{ kg/s}$ ， $dm_f/dt = 0.130 \text{ kg/s}$ ，入口空氣速度 $v_i = 120 \text{ m/s}$ ，而排氣速度 $v_e = 1480 \text{ m/s}$ 時，試求引擎推力大小？

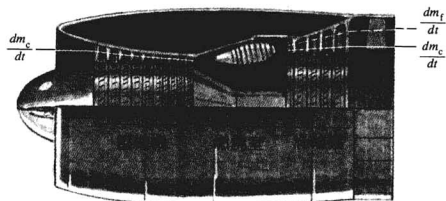


圖 16.24

策略

引擎的推力可以利用 (16.27) 式求得，我們必須考慮引擎噴出氣體所產生的力，同時也必須考慮空氣質量流進入壓縮機的作用力，才能求得引擎的淨推力。

解

引擎的噴氣產生向左的力，應等於燃料 - 空氣混合物的質量流率，乘上噴氣的速度；入口空氣產生向右的力，也應等於入口空氣質量流率，乘上入口的速度，故引擎向左的淨推力為

$$\begin{aligned} T &= \left(\frac{dm_c}{dt} + \frac{dm_f}{dt} \right) v_e - \frac{dm_c}{dt} v_i \\ &= (0.925 + 0.009)(1605) - (0.925)(400) \\ &= 1129 \text{ lb} \end{aligned}$$

 $\mathcal{D}$ 設計問題

噴射引擎是第二次世界大戰前幾年由歐洲所發展出來的，如圖 16.24 的噴射渦輪增壓引擎是很成功的一種設計，主宰了軍事及商業航空用途多年，不過其仍有燃料消耗量太大的缺憾。在過去 30 年間，如圖 16.25 所示之噴射風扇增壓引擎成為最常使用的設計，特別在商用飛機上最常見，這種引擎的一部分推力是由風扇加速的空氣所提供，進入風扇的空氣質量流率 (dm_b/dt) ，對進入壓縮機的空氣質量流率 (dm_c/dt) 之比，我們稱它作分流比 (bypass ratio)。

先描述並分析指定的工程應用。

然後於“設計說明”中討論該應用的設計涵意，並將它置於明白的工程意涵中。

計算力學

有些教師比較喜歡以不必使用計算機的方式，教授動力學。有些講師則將動力學視為介紹學生將計算機使用於工程中的機會，他們不是以較低階的程式語言，撰寫自己的程式，就是使用較高階的解題軟體 (problem-solving software)。本書對兩種處理方式都適用。我們提供了選擇性，含具有範例及需要藉可程式計算器或計算機求解之問題的自足式“計算力學”章節。此外，從本書的網站中，可取得在工程力學中使用 Mathcad 及 Matlab 的入門教材。

計算力學

下列範例及問題設計成須使用可程式計算器或計算機求解。

範例 18.8

如圖 18.20 的 18 kg 梯子，於 $t = 0$ 時由靜止釋放，忽略摩擦，試計算其角位置及角速度的時間函數。計算時，時間增量 Δt 分別為 0.1 s, 0.01 s 及 0.001 s 三種。

策略

開始的幾個步驟——畫出梯子的分離體圖、代入運動方程式及求出角加速度等——已經在範例 18.4 中討論過。梯子的角加速度為

$$\alpha = \frac{3g}{2l} \sin \theta$$

其中 θ 為梯子與牆壁間的夾角， l 為梯及 (18.28)、(18.29) 式就可以求出梯子



繼續以相同的方式進行，可以得到如下的前五步的數據：

時間, s	θ , rad	ω , rad/s
0.0	0.0873	0.0000
0.1	0.0873	0.0321
0.2	0.0905	0.0641
0.3	0.0969	0.0974
0.4	0.1066	0.1329
0.5	0.1199	0.1721

圖 18.21 及 18.22 分別表示梯子的角位置及角速度數值解，圖中同時有 $\Delta t = 0.1$ s, $\Delta t = 0.01$ s 及 $\Delta t = 0.001$ s 三種線圖，更小的增量 Δt 顯示 $\Delta t = 0.001$ s 相當接近正確解，我們以每隔 0.2 s 畫出下滑中的梯子，其位置圖如圖 18.23 所示。

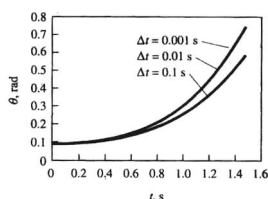


圖 18.21 梯子之角位置數值解。

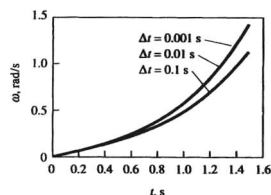


圖 18.22 梯子之角速度數值解。

第三版新增內容

來自使用者與書評家的正面回應，引導我們保留了第一版的基本組織、內容，及特性。在我們準備本版期間，我們檢視了我們如何展示每一項觀念、範例、圖形、摘要陳述，及問題。那些地方我們需要做改變，增補，或刪除以簡化並釐清展示的內容。為了反應這些要求，我們做了下列一些主要的改變：

- 具設計內涵的問題已經以新的標記圖徵  標示之。
- 已經於使用者指出需要更多範例處，增加新的範例。許多新增的範例，持續了我們對實際的及引起動機之應用，與工程設計的強調。
- 我們提供了超過300題新的及修訂過的問題，含一些從 U.S. 慣用單位轉換成 SI 單位的問題。和範例一樣，許多新的問題，持續了我們在工程實務脈絡中，對動力學應用的專注。
- 幾乎在每一節之後呈現了新的研習問題集，以協助學生核驗他們對關鍵觀念的記憶。
- 每題範例都清晰地標示其教學目標。
- 我們已經將課文重新設計，為了協助學生，也添加了相片，將實際狀況及應用與課文聯繫在一起。
- 有包含網基評估軟體，視覺化軟體，及其他更多的廣泛的補充軟體。
- 接受書評家的建議，我們已經藉提早介紹歐拉方程式，並將慣性矩與慣性積的內容移至該章章末的附錄，改善了第 20 章的組織。

對學生們與教師們的許諾

在修訂本教科書及題解時，我們採取了保證會有我們能力所及之最佳精確度的預防措施。我們已經各自解了新的問題，做確認其答案正確，及難易適中的努力。University of South Florida 的 Karim Nohra 也核對了課文，範例，問題及題解手冊。如果仍有任何錯誤，當為兩位作者的責任。我們歡迎來自學生及教師們有關錯誤及改進方面的聯繫。我們的郵寄地址是 Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, University of Texas at Austin, Austin, Texas 78712. 我們的電子郵箱是 abedford@mail.utexas.edu

補充教材

教師的補充教材 教師的題解手冊與展示 CD 含所有問題的完整解答，及許多樣本綱要，這些補充教材僅提供給教師。每個題目的題解都含問題的敘述與伴隨的插圖。隨書所附的 CD 中，含範例的插圖與課文中的文字敘述，還有所有取自書中及題解檔案中之插圖的 Pdf 檔案。

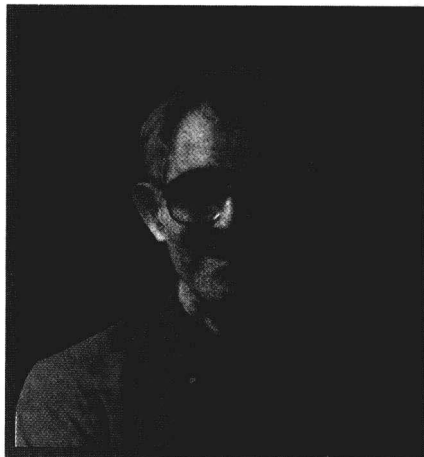
課程管理 Prentice Hall 將支援 Bedford/Fowler 許多課程管理的選擇。關於含價格，供應日期及如何使用課程管理與我們的網站評估軟體之完整資訊，請與業務代表或 engineering@prenhall.com 聯繫。

Anthony Bedford 及 Wallace Fowler Austin, Texas

作者小傳

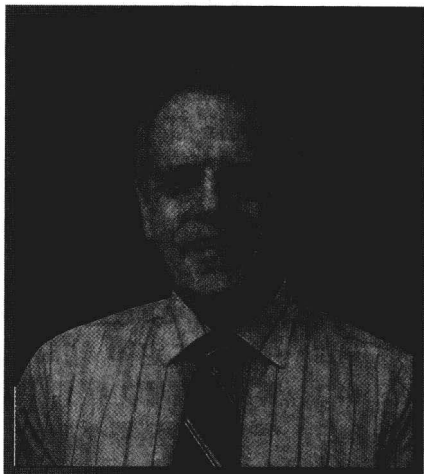
Anthony Bedford 為德州大學 Austin 校區航空工程與工程力學系的教授。他自 University of Texas at Austin 獲得學士學位，自 California Institute of Technology 獲得碩士學位，於 1967 年得自 Rice University 取得博士學位。具有 Douglas 航空公司及 TRW 的工業界經歷。自 1968 年起，執教於 University of Texas at Austin。他是 University of Texas 學術傑出教授組織的成員，多年來榮獲許多教學獎勵。

Bedford 博士的主要職業活動偏重於教育與力學方面的研究。他已經是 National Science Foundation 及 Office Naval Research 補助經費的主要研究員。而且自 1973 至 1983 年是 Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 的顧問。他的其他著作有 Hamilton's Principle in Continuum Mechanics, Introduction to Elastic Wave Propagation (與 D.S. Drumheller 合著)，及 Mechanics of Materials (與 K.M. Liechti 合著) 等書。



Wallace T. Fowler 在 University of Texas at Austin 的航空工程與工程力學系擁有 Paul D. 及 Betty Roberson Meek 的講座。Fowler 博士的學士，碩士，與博士學位都得自 University of Texas at Austin，並且從 1965 年起執教於 University of Texas at Austin。在 1976 年秋期間，他執教於加州，Edwards 空軍基地，空軍試飛員學校，在 1981–1982 年間，他是美國空軍學院的訪問教授。自 1991 年起，他成為 Texas 太空計畫補助財團的副首腦。

Fowler 博士主要的職業活動著重於動力學，軌道力學，及太空船任務設計。他是許多軌跡最佳化，姿態動力學 (attitude dynamics)，及太空任務規劃等技術論文的作者與共同作者，並且也發表有關工程教學理論與實務的論文。他受頒 Chancellor's Council 教學傑出獎，Halliburton 教育基金的教學卓越獎，ASEE Fred Merryfield 設計獎，及 AIAA-ASEE 傑出太空教育人員獎在內的許多教學獎勵。他是 University of Texas at Austin 學術傑出教授組織的成員。他是位擁有證照的工程師，許多專業學會的會員，及美國航空與航太研究院，及美國工程教育學會的會員。他於 2000–2001 年間，擔任美國工程教育學會的主席。



目次

序言 iii

作者小傳 vii

12 緒論 1

12.1 工程及力學 2

12.2 研習力學 2

求解方法 2/ 計算器及計算機 3/ 工程應用 3/ 本書後續的用途 3

12.3 基本觀念 3

數字 4/ 空間與時間 4/ 牛頓定律 5

12.4 單位 6

SI 單位系統 7/ U.S. 慣用單位 7/ 角的單位 8/ 單位轉換 8

12.5 牛頓重力場 11

13 點的運動 19

13.1 位置，速度，及加速度 20

13.2 直線運動 22

運動的描述 23/ 運動的分析 24

13.3 曲線運動 48

直角座標 48/ 角速度 61/ 法向與切向分量 68/ 工程應用：離心機設計 78/ 極座標與圓柱座標 86/ 計算力學 99

本章摘要 106

複習題 109

14 力量、質量及加速度 113

14.1 牛頓第二定律 114

14.2 質心的運動方程式 114

14.3 慣性參考座標 116

14.4 應用 117

直角座標及直線運動 118/ 法向及切向分量 141/ 工程應用：汽車動力學 144/ 極座標與圓柱座標 152

14.5 軌道力學 160

確定軌道 160/ 軌道的型式 163

14.6 數值解 166

計算力學 168

本章摘要 174

複習題 176

15 能量法 183

功與動能

15.1 功與能原理 184

15.2 功及功率 185

功的計算 185/ 功率 186

15.3 特殊力做的功 196

重量 197/ 彈簧 198/ 工程應用：自動加工 202

勢能

15.4 能量不滅 214

15.5 保守力 215

特殊力的勢能 216

15.6 力與勢能的關係 232

計算力學 236

本章摘要 240

複習題 243

16 動量法 251

16.1 衝量與動量原理 252

16.2 線動量守恆 266

16.3 衝擊 269

直接中心衝擊 270/ 斜中心衝擊 272

16.4 角動量 284

角衝量和角動量原理 284/ 中心力運動 285

16.5 質流量 291

工程應用：噴射引擎 295

本章摘要 302

複習題 305

17 剛體的平面運動 313

17.1 剛體與運動的型式 314

17.2 對固定軸旋轉 317

17.3 一般運動：速度 322

相對速度 322/ 角速度向量 324/ 瞬心 342

17.4 一般運動：加速度 349

x 動力學

- 17.5 滑動接觸 365
- 17.6 動參考系 381
 - 點相對於動參考系的運動 382/ 慣性參考系 388
 - 本章摘要 399
 - 複習題 401

18 剛體的平面運動力學 409

- 18.1 預習運動方程式 410
- 18.2 質點系統的動量原理 410
 - 力 - 線動量原理 411/ 力矩 - 角動量原理 412
- 18.3 推導運動方程式 414
 - 對固定軸的旋轉 414/ 一般平面運動 415
- 18.4 應用 417
 - 平移 417/ 對固定軸的旋轉 419/ 一般平面運動 423/ 工程應用：樑之內力及內力矩 429
- 18.5 數值解 450
 - 計算力學 451
- 附錄：慣性矩 454
- 形狀單純體 455/ 平行軸定理 459
- 本章摘要 470
- 複習題 472

19 剛體動力學中的能量與動量 481

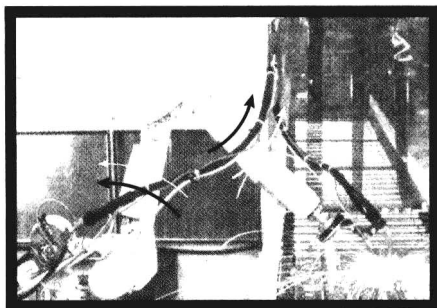
- 19.1 功與能原理 482
- 19.2 動能 484
 - 一般平面運動 484/ 對固定軸旋轉的動能 485
- 19.3 功與勢能 486
- 19.4 功率 495
- 19.5 衡量與動量法 506
 - 線性動量 506/ 角動量 507
- 19.6 衝擊 518
 - 動量守恒 518/ 恢復係數 519
 - 本章摘要 535
 - 複習題 539

20 剛體的三維運動與運動力學 547

- 20.1 運動學 548

	速度與加速度	548/ 運動參考系	549
20.2	歐拉方程式	562	
	對固定點旋轉	563/ 一般三維運動	566/ 平面運動方程式 568
20.3	歐拉角	582	
	具對稱軸的物體	583/ 任意物體	588
	附錄：慣性矩與慣性積	596	
	簡單形狀體	596/ 平行軸定理	600/ 對任意軸的慣性矩 601/ 主軸 602
	本章摘要	613	
	複習題	616	
21	振 動	623	
21.1	保守系統	624	
	範例	624/ 解	626
21.2	阻滯振動	640	
	次臨界阻滯現象	641/ 臨界與超臨界阻滯	642
21.3	強迫振動	650	
	振盪的強迫函數	651/ 多項式強迫函數	653/
	工程應用：位移轉換器	658	
	本章摘要	664	
	複習題	666	
附錄 A	數學複習	672	
A.1	代數	672	
A.2	三角數	672	
A.3	導數式	673	
A.4	積分式	673	
A.5	泰勒級數	674	
A.6	向量分析	674	
附錄 B	面積與線的性質	675	
B.1	面積	675	
B.2	線	676	
附錄 C	體積與均質物體的性質	677	
附錄 D	球座標系	679	
附錄 E	D'Alembert 原理	680	
	偶數題解答	683	

緒論



工程師負責我們使用裝置的設計，構成，及測試，從最單純的椅子，削鉛筆器，以至於像水壩，車輛，飛機，及太空車等複雜的物件。它們必須對做為這些裝置之基礎知識的物理學，有深入的瞭解，而且必須熟悉利用數學模式以預測系統的行為。工程學系的學生們，經由研習力學，開始學習如何分析與預測物理系統的行為。

12.1 工程及力學

工程師們如何於複雜的系統建造完成前設計、並預測該系統的特性呢？通常它們所倚賴的是過去之設計、實驗、巧思，及創新力累積的知識，以設計它們的新產品。而現代的工程師更添加了一項有力的技巧：基於它們設計之裝置的物理特性，發展數學方程式。以這些數學模型，工程師們預測他們的設計之行為。在實際建造它們之前，改良並測試它們。航太工程師利用數學模型以預測太空梭飛行將依循的路徑。土木工程師利用數學模型以分析負荷作用於建築物及基礎上的效應。

最基本的力學是研習力及其效應。基本力學分為靜力學 (statics)，研習平衡中的物體，及動力學 (dynamics)，研習運動中的物體。基本力學所到的結果，可以直接應用於許多工程領域。設計結構的機械及土木工程師，利用導自靜力學的平衡方程式。分析建築物對地震之響應的土木工程師，與決定人造衛星軌道的航太工程師，利用導自動力學的運動方程式。

力學是最早的分析科學；得自力學的基本概念，分析法幾乎應用到工程的每個領域上。例如，化工及電機工程的學生，也能由他們最初的力學課程學習中，對其領域之平衡、能量，及穩定性等基本概念，獲得更深入的瞭解。經由力學研習，他們能夠追溯這些觀念進展的痕跡。

12.2 研習力學

力學含廣泛的支配物體行為的原理。本書將描述這些原理，並提供範例展示一些它們的應用。本書中包含許多與範例類似的問題，然而，重要的是你實際演習這類問題，我們的目的是協助你瞭解這些原理，到足以將它們應用至對你而言是新的狀況。因為每一世代的工程師，都將面對新的問題。

求解方法

研習力學時，你學到的解題程序，將可應用至後續的許多課程，甚至於你整個生涯。雖然，不同的問題需要不同的處理法，下列的步驟則可應用於許多這類問題。

- 確認那些資訊是屬於已知的，那些資訊是答案，或是必須求得的。以自己的語言重述問題，經常會有助益。在適當的時候，確認你瞭解該物理系統，或涉及的模型。
- 訂定解題的策略。這表示確認要應用的原理及方程式，以及你如何使用它們來解

決問題。可能的話，繪圖予以視覺化而有助於求解問題。

- 只要你能夠，預估一下答案。這將擴展你的直覺，而且常有助於認出不正確的答案。
- 解這些方程式，可能的話，解釋一下你的結果，並與你的預估值比較。此一最終步驟為事實驗證 (reality check)。檢視答案是否合理？

計算器及計算機

本書中的問題，大多設計成須先導出代數式，然後以指定的量值計算答案。因此，具有三角及對數函數的計算器，即足以求得此類問題的答案。可程式計算器及具有問題求解軟體，例如 *Mathcad* 或 *MATLAB* 之計算機的使用非常方便，但應小心使用，以免過度依賴這些測驗時不會有的工具。

本書中，標示“計算力學”的各個章節，所含的範例與問題，則適合以可程式計算器及計算機求解。

工程應用

雖然問題是設計用來協助你學習力學，然而，許多問題也說明了力學在工程上的應用。標示“工程應用”的各章節，描述力學在各種工程領域的應用。

我們的問題也包括了強調工程兩要項：

- 設計：有些題目會要求你去選擇一些參數的值，以滿足所陳述的設計準則。
- 安全性：有些問題要求你評估裝置的安全性，並選擇一些參數的值，以滿足所陳述的安全性。

本書後續的用途

你將發現，本書所含的數表及資訊，對你以後讀的工程課程與你整個工程生涯，都非常有用。此外，在你剩餘的正式教育，及你成為具實際經驗的工程師期間，你將會常常需要複習基本的工程主題。其最有效的方法是利用你熟悉的教科書。你的工程方面的教科書，將構成你的專業書庫的核心。

12.3 基本觀念

你將從日常生活經驗中熟悉力學的一些論題，或在先前的數學或物理課程中經歷它們。本節中我們將簡短地複習基本力學的基礎。

數 字

工程量度，計算，及結果都以數字表示。你必須瞭解在範例及問題中，我們如何表示數字，以及如何表示你自己計算的結果。

有效數字 這個名詞表示在一個數字中有意義的數位（就是精確的數位）數，由非零的數字開始向右計算。例如兩個數目 7.630 與 0.007630 的有效數位都是四。如果 7,630,000 這個數只有前面四位數字是精確的，則可以 7.630×10^6 的科學標記法表示之。

如果是量測所得的數字，則其所含的有效數位，受到該量測之精確度的限制。如果量測所得以 2.43 陳述，這表示 2.43 較 2.42 或 2.44 或更接近實際值。

各數值可能遭到截尾成為某有效位數的數字，例如我們可將 π 值表示成三位有效數字的 3.14，或六位有效數字的 3.14159。當你使用計算記或計算機時，數字的有效數位，受到該機器設計所能儲存之數位的限制。

本書使用之數 你可以將問題中的數值視為真確值，無須關切它究竟含多少有效數位。如果問題中陳述一個量為 32.2，你可以假設它的值為 32.200…。在範例中，我們維持中間所得及答案的值，至少有三個有效位數。如果你使用計算器，則你的所得應該夠精確。當你作一系列的計算，對中間的數值作了截尾時，為確認已避免了截尾誤差的發生，應代之以在你的計算器中所能保留的最大精度來執行整個運算。

空間與時間

空間指的是我們生活的三維宇宙。日常生活的經驗，提供了我們點在空間中之空間與處所 (location)，或位置 (position) 的直覺概念。空間中兩個點的距離是連接它們的直線長度。

量度空間中兩點間的距離需要長度的單位。我們同時使用國際單位系統，或 SI 單位，及 U.S. 慣用單位。在 SI 單位中，長度的單位為米 (m)，而 U.S. 慣用單位的長度單位為呎 (ft)。

時間，我們當然也熟悉，我們的壽命就是以它來量度。每日的晝夜循環，以及以鐘與錶量度時，分，秒，提供了我們對時間的直覺概念。時間是以會重複出現事件間的時間來量度，像是鐘擺擺盪或錶中石英晶體的震盪。SI 單位與 U.S. 慣用單位兩系統都以秒 (s) 作為時間單位。分，小時，及日也常使用。

若空間中某個點相對於某個參考點的位置會隨時間改變，則其位置的變化率稱為速度，而其速度的變化率稱為加速度。在 SI 單位中，速度以每秒米 (m/s) 表示，加速度以每秒每秒米，或每秒平方米 (m/s^2) 表示。在 U.S. 慣用單位中，速度以每秒

呎 (ft/s) 表示，加速度以每秒每秒呎，或每秒平方呎 (ft/s²) 表示。

牛頓定律

基本力學建立於牛頓 (Isaac Newton) 在 1687 年發表的自然哲學之數學理論 (Philosophiae naturalis principia mathematica) 的堅實基礎上。雖然非常原始，但它

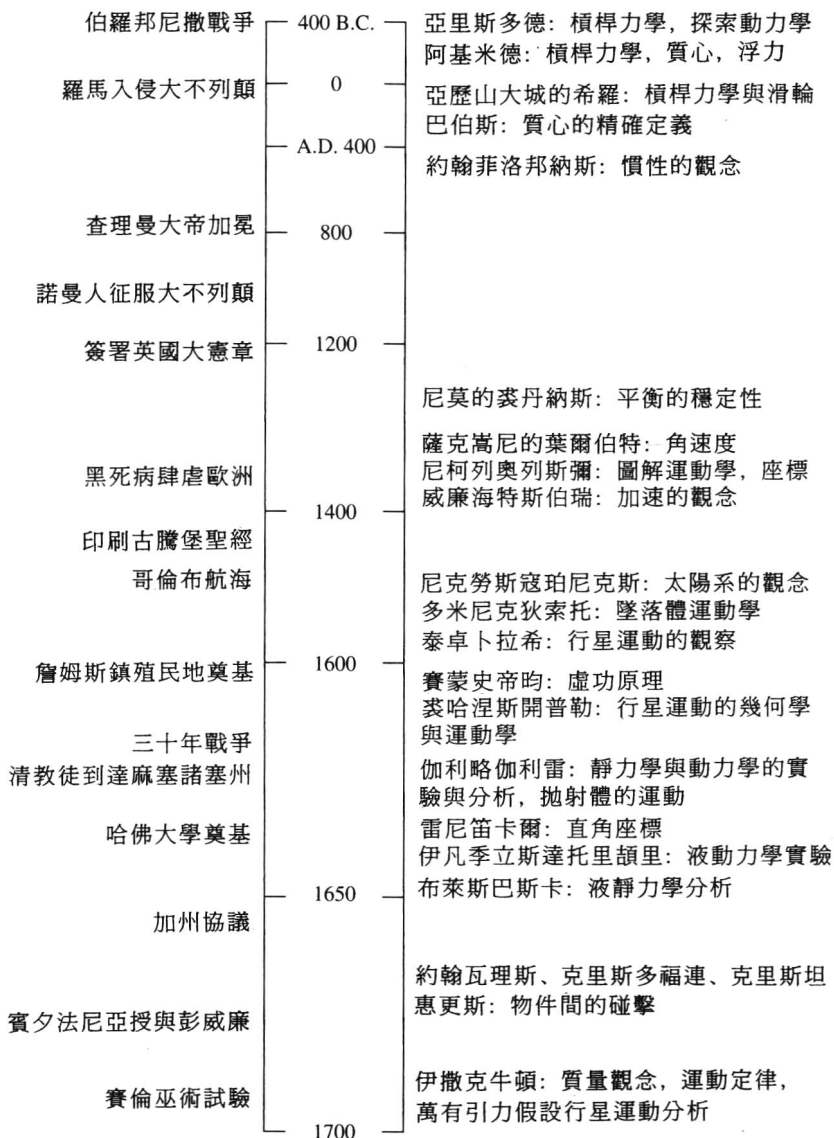


圖 12.1 牛頓的自然哲學數學理論發表前力學的發展與其他歷史事件對照的編年表