

材料力學

朱紹銘譯



Introduction
to the Mechanics
of Solids

MARTIN A. EISENBERG

材料力學

原著者

MARTIN A. EISENBERG

University of Florida

譯者

朱紹鎔

國立臺灣大學教授

東華書局印行



版權所有·翻印必究

中華民國七十一年四月初版

大專
用書

材料力學

定價 新臺幣貳佰元整

(外埠酌加運費滙費)

譯者	朱	紹	鎔
發行人	卓	鑫	森
出版者	臺灣東華書局股份有限公司		
	臺北市博愛路一〇五號		
	電話：3819470 郵撥：6481		
印刷者	合	興	印 刷 廠

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零柒貳伍號
(71020)

原 著 序

編著本書之目的，主要乃是作為固體力學(mechanics of solids)，材料力學(mechanics of materials 或 strength of materials)之第一年課程教科用書。雖然本書亦包括有足夠且較深之材料，足夠使本書亦可作為兩學期之基本教材，且分量亦足供讀者採納作為參考用書。此等課程所應包括之內容及編排次序乃一引起甚多爭辯之事。著者認識了此一問題之真義，對本書內容及結構之選取，均經仔細研究，且作彈性安排，能使教師依照其學生背景，可用時間，課程目的等選用其最需要及最適宜之材料教授之。在內容及風格兩方面，本書主要仍遵循傳統格式，但亦有若干令讀者將會感到有益之革新。

就風格而言，本書仍遵照傳統敘述模式，但有下列之例外：(a)每章之前均列出該章應達到之目的，亦即是學生在完成該章學習後，應具有了解及運用該等目的之能力。(b)每節之前再將有關係的目的重新提示，(c)隨時提出簡明及不常在教科書中出現之問題，要求學生能主動回答，其正確答案係以數字註腳表出。為了增加此等問題之真實性，讀者在閱讀數字註腳之回答前，應對該一問題思索回答內容，再校核答案。數字註腳示出之正確答案係印在該問題下一左手頁欄下註。

例題及習題之提出及應用較之傳統教科書更是完整。本書包含有例題，習題及補充習題。例題是以練習演算形式表出，並有完整之註釋答案。如同一般習慣，這些例題在本書各章節均有，習題通常設置在例題之後，乃是提供給讀者作演算練習之用。習題解答，具有教師手冊中之標準完整程度，乃附於本書譯文之後。在大多數教科書中不會有之此等習題，提供了額外之練習亦能擔當了滿足上述討論之(c)項任

務。最後，適用於家庭作業練習之傳統性補充習題，在本書中設置於附錄後面之各節中，處理甚為方便。如同一般習慣，用星號標出部分補充習題之答案則置於本書之最後。

除了在目錄及課文中用粗黑星號標出之各節及目的，係供教師選擇之用外，前九章提供之材料，吾人可一致同意乃是材料力學第一年課程之核心。讀者可以跳過第十章至第十二章之全部或部分以及第一至第九章用星號標出之各節不讀，亦不損害本課文之連續性。有關於內容介紹次序，著者之偏愛已在目錄中反映出。然而，對於次序之安排，著者已煞費苦心的要使本書獲致教與學兩方面皆都方便及有利。

在第一章中，介紹了SI單位制之用法，復習了靜力學之基本原理，更強調了分離體圖所擔當之中心角色，在教師可選擇之連續各節中，亦討論了指標符號，張量之觀念，以及直角張量轉換法。雖然SI單位制之應用已日漸廣泛，但大多數補充習題則用兩種單位表出，教師可指導學生應用他選用之單位系統。吾人假定讀者已具有剛體力學之充分基礎及了解。如果沒有，1.3節靜力學之復習將證明極為有益，但補充材料應由教師準備及提供。平面面積性質之簡扼復習已在附錄D中表出。

在第二，三及四章中，分別介紹了應力，應變及應力-應變關係等觀念。在第二章所介紹者乃基本形式，應力及應變轉換，以及莫爾圓之詳細討論則在第五章中為之。使此一題目之討論延後，則轉換法則之統一處理乃屬可能，學生碰到使其感到混淆或不了解之題目應等到彼等能有充分準備時再予指導。雖然支持使應力轉換作為此等觀念之初步處理，但仍需作激烈討論。如果這樣獲得信服，你將發現閱讀5.1至5.3節對2.4節之完整，將不會損害其連續性。

第六章之內容乃是對在靜及疲勞載重條件下之延性及脆性材料的降伏及破壞準則作一廣泛之討論，亦討論了降伏及破壞準則之性質以及應力集中在設計中擔當之角色。很多教師喜歡將本章所述之材料擺在下述各章敘述邊界值問題解答技術發展以後來教授。因此第六章中

只有一節是例外，其它係暫時繞過來教授，亦不會損害本課文之連續性。對應力集中 6.4 節之此一例外乃有關梁及扭桿設計之先修知識。6.4 節可與第六章其它各節分開來閱讀。

分別處理扭轉及彎曲問題之第七章及第八章，那章先讀都可以。此兩章乃是第九章之先修科目，第九章之內容乃是詳細討論靜不定問題之解法。應予注意者，有關軸向載重構件及均勻平面應力及平面應變態靜不定問題之簡扼討論已在本書前面介紹，但此課目之系統化處理乃延至第九章中討論。因此第九章亦可當作技術理論復習之用，亦可應用它們作受熱及機械組合載重下之系統分析。喜歡訓練學生求解靜不定特殊問題之教師，將會發現在附錄後面本書提供出能適合他需要之充足補充問題。

雖然第一章至第五章中之非選擇節形成了材料力學第一年課程之共同基礎，但大多數課程都包括有研究前九章及第十，十一及十二章中可選擇節中之材料。可選用材料之擇定主要係根據傳統，適當課文之利用性，更重要者乃是學生之需要及興趣，例如，學習土木工程之學生應指定修習 7.2 節（薄壁斷面之扭轉），8.8 節（剪力中心）及十一章（柱之屈曲），而修習核能工程之學生則應研究第十二章中之厚壁圓筒。第十至十二節能獨立閱讀，其目的在於提供給有特殊需要學生作彈性課程研習之用。

有些不太屬傳統性之材料亦將在第十章介紹。利用卡氏定理（10.3 節）求解問題在傳統課文中常多有之，但構成該項計算之矩陣法介紹（10.4）却未曾有。此一題目之初步處理適用性及附錄 F 中之有限元素法的定性討論乃是第一次提供給教師，表出在現代之結構力學實用問題中，這種技術應用之重要性。在 10.2 節中，基本觀念之討論較之一般習慣是更為詳盡。如果使用卡氏定理之即時目標是限於該等定理之熟練精通，教師則可對 10.3 節作簡扼啓發式介紹以取代 10.2 節之介紹。

本書另值得注意之特色乃是在每一章之末設置“對更高深層次研

讀之建議”節。此節將指導學生對本課文所介紹之題目作更高層次研究時所應讀之參考資料。在很多情況，建議之讀物是在大學高年級或研究院讀物層次。本節對已修完固體力學初期課程數年後之學生，現意欲探索若干題目中之更高深問題，或對欲改變其事業專長之較成熟學生，應用本書自修時，以及對剛開始修習力學之學生，具有更高之求知欲望，而傳統課程無法滿足時，極有幫助。

並非所有讀物皆具有上面所述之要求性質，其中很多可由素質平均且優秀大學二年級生熟讀精通。吾人已經指出，該等參考資料需要具有較一般讀者有更高層次知識者，方能應用裕如。列舉之可讀之參考文獻係依字母順序集中載於第十二章之後。

最後，亦應注意者，包括在附錄中之廣泛資料擔當了使習題擴張之雙重目的，即是具有處理習題及增長本書作為參考書之價值。附錄A包含有常用材料之靜力及疲勞性質兩種，附錄B提供出標準形狀及載重時之應力集中計算圖表，附錄C提供出標準結構型狀之性質，附錄D則示出面積幾何性質理論之復習以及常見幾何形狀之性質表，以及如上所述者，附錄F乃是對有限元素法作其定性介紹。

著者以極度惶恐之心情，深為感謝對本書貢獻很多之人士。著者對無意忽略之人士，事先說聲抱歉。著者深為感謝佛洛里達大學及其它地方之朋友，家庭，同事以及學生，他們貢獻觀念，閱讀草稿，校核解答，隨時受到為本書發展之喜怒牽掛。

著者要特別感謝 Joel Abrams, Robert Jones 及 Lawrence Malvern 各教授，他們閱讀了整個原稿，提供了使本書獲得改進之很多有價值建議。著者亦衷心感激 Robert Cook, Thomas Lardner 及 Alan Wineman 各教授，Bruce Boan, Marshall Lounsberry, Robert Maier, Bruce Marschall, Joel Middlebrooks, Scott Newman 及 Christopher Wilt 諸夫人，他們閱讀及對全部或部分稿件提供建設性意見及 / 或證明習題之解答。

著者深深感謝 Robert Stern 先生，由於他的鼓勵及熱心，擔負起

此計劃之動機引發，亦要感謝 Addison-Wesley 編審部同仁，他們之編排專長建議以及密切合作使得本書不僅品質上達到優異同時也使準備工作非常明快。更要特別感謝 Herbert Bowes, Mary Loiko, Herbert Merritt, Richard Morton 及 Thomas Robbins。著者對於 Edna Larrich 夫人之原稿優異打字工作，敬致衷心謝意。

著者亦要謝謝 Banesh Hoffmann，美國鋼鐵製造學會，John Wiley 公司，由於他們之善意許可，使得本書得到許多複印資料。特別謝謝 C.C. Perry 博士及 Vishay Intertechnology 公司，由於他們慷慨，提供圖片，更使本書增色不少。

最後著者要謝謝內子 Myra，她將其閒暇時間全部用以協助編排本書，更重要者，她乃是著者編著本書時之勇氣及支持的源泉。

Gainesville, Florida

M. A. E.

November 1979

目 錄

第一章 緒論

1.1	固體力學	1
1.2	國際單位制 (SI) (1.1) [†]	2
1.3	靜力學之復習 (1.2)	12
* 1.4	指標符號 (1.2)	31
* 1.5	純量, 向量及張量 (1.2)	36
* 1.6	純量, 向量及張量之轉換法則 (1.5)	41

第二章 應力態：應力分析緒論

2.1	軸向載重構件中之應力 (第一章)	49
2.2	簡單軸向載重結構之分析 (2.1)	56
2.3	平均剪應力 (2.2)	61
2.4	在一點之應力態 (2.3)	64
* 2.5	平衡微分方程式 (2.4)	77

第三章 應變之觀念

3.1	變形幾何 (第一章)	85
-----	------------	----

*用粗黑星號表出之章節係供教授或閱讀者選擇。除非有明確提
該章節之內容對其後各章之研習並非必要。

[†]對每節之研習之必要先修章節乃用斜體示出。(或在每節後用
其章節號示出)。

3.2	應變-位移關係 (3.1)	91
* 3.3	從應變數據求位移 (3.2)	99
* 3.4	圓柱坐標中之應變-位移關係 (3.2)	101

第四章 應力 - 應變關係及彈性緒介

4.1	材料行為之模式 (第二, 三章)	111
4.2	應力 - 應變 - 溫度關係 (4.1)	117
4.3	應變能 (4.2)	133
4.4	簡單系統中之應力及變形 (4.3)	139
* 4.5	非線性應力 - 應變曲線 (4.2)	145

第五章 應力及應變之轉換

5.1	應力轉換 (第二章)	149
5.2	平面應力中之莫爾圓 (5.1)	156
5.3	極大剪應力 (5.2)	163
5.4	應變轉換 (第四章, 5.2)	167
* 5.5	應變觀測 (5.4)	172
* 5.6	莫爾圓對彈性材料之應用 (5.5)	184
* 5.7	三向應力及應變態之轉換 (1.6, 5.3, 5.4)	188

第六章 降伏及破壞準則

6.1	概述 (第五章)	200
6.2	延性金屬之降伏準則 (6.1)	202
6.3	脆性材料之破壞 (6.2)	219
6.4	應力集中 (第四章)	222
6.5	疲勞 (6.4)	227

第七章 扭轉

7.1	圓軸之扭轉 (第四章)	244
* 7.2	薄壁非圓形軸 (7.1)	257
* 7.3	塑性扭轉 (7.1)	263
* 7.4	扭轉桿件及圓軸之設計 (6.4, 7.1)	269

第八章 梁之彎曲

8.1	梁 (第一章)	275
8.2	載重, 剪力及彎曲力矩 (第二章, 8.1)	280
8.3	梁中縱向應力 (第四章, 8.2)	296
8.4	梁之撓度 (8.3)	309
8.5	梁中剪應力 (8.4)	317
8.6	梁之設計 (8.5)	332
8.7	奇性函數 (8.4)	346
8.8	剪力中心 (8.5)	358

第九章 靜不定系統

9.1	概述 (第七, 八章)	366
9.2	靜不定彈性系統之分析 (9.1)	372
9.3	熱應力及組合載重下之系統 (9.2)	381
* 9.4	非線性超靜定系統之載重 - 撓度及極限分析 (9.3)	390

*第十章 結構分析能量及矩陣法之簡介

10.1	概述 (第九章)	406
10.2	基本觀念 (10.1)	408
10.3	卡氏定理之應用 (10.2)	418
10.4	結構分析矩陣法之導論 (10.3)	433

*第十一章 柱之屈曲

11.1 長細柱之彈性屈曲 (第八章)	455
11.2 柱之塑性屈曲 (4.5, 11.1)	470
11.3 經驗柱公式 (11.2)	478

* 第十二章 厚壁圓筒

12.1 概述 (第四章)	485
12.2 受壓之厚壁圓筒 (12.1)	491
12.3 厚壁圓筒中之熱應力 (12.2)	498
12.4 熱及機械誘生厚壁圓筒應力之分析 (12.3)	501

參考文獻	510
------------	-----

習題解答	513
------------	-----

附錄	555
----------	-----

A 材料性質	555
B 應力集中圖表	559
C 結構型式	567
D 面積性質	580
E 梁撓度及斜度	590
F 有限元素法 (FEM) 簡介	594

補充習題	606
------------	-----

補充習題部分答案	695
----------------	-----

第一章

緒論

目的：當你已完成本章研析後，你應能夠

1. 運用SI單位，作習題解答時使用慣用符號，且深切了解SI單位及傳統英制單位間之關係。
2. 畫出正確及有用之分離體圖（FBDs），且熟悉應用其解答靜力學問題。
- * 3. 使用適當指標記號以表示方程式之排置及系統。
- * 4. 對純量，向量及張量予以定義及鑑別。
- * 5. 依照純量、向量、張量及其分量等在坐標轉動下之轉換定律定出純量、向量及張量的定義。

1.1 固體力學

固體力學（mechanics of solid）乃是研析作用在固體或固體系上之力與該等固體受力作用而產生運動，形狀及大小改變間之關係。此一論題已在很多不同推理層次中研究，並已應用至結構分析及設計，機械設計，製造方法，開礦，地球物理研究，生物醫學研究以及鑲牙技術等。力學是否為物理學，數學或工程學之附屬學科有一相當大之爭論。所有這些學科的確是研習力學之基礎。好多世紀以來，固體及變形體力學已吸引了甚多數學家之研究興趣，且引出所有新分析領域（如微積分及張量分析）之發展，並導出甚多有關材料性質之公理。

*全書中，數字項前之星號表示該論題或章節係可選擇者。

2 第一章 緒 論

然而就該等公理而言，如為近似真實，則需輔以物理觀察來作根據。固體力學是物理學之一主支是不成問題的，此並不意指其為物理學者之主要研究興趣。現代物理研究之主流乃是在研究量子力學等微小領域以及天文方面之巨大或銀河領域。

人類日常生活所碰到物體以及人類現今所能遭遇到之速率，牛頓力學 (newtonian mechanics) 之舊有法則皆都適用。是以對工程師而言，因固體力學擔負了幾乎每一種物件之設計基礎，故為一極重要之學科。

早期，固體性質之分析研究並不常用於該等物體之設計。當時只用經驗方式即可滿足。現在可不能再該等方法來作設計。安全要求 (如用於核能反應爐之設計)，重量限制 (太空應用)，經濟要求 (自動化及大規模生產) 以及天然有限資源不停消耗中之節約使用等，皆都需要工程師具有更大智慧，更強能力來實施。是以固體力學乃是今日之一主要工程規律。

本書編著之目的乃是介紹固體力學之領域，此一領域乃為物理學，數學及工程學之匯合點。

1.2 國際單位制 (SI)

當你完成本節研析後，你應能運用 SI 單位，作習題解答時使用慣用符號，且能深切了解 SI 單位及傳統英制單位間之關係。

著者最近去落磯山國家公園遊玩時，管理人員給予我一遊覽手冊上面記載，至雙珠峰之路長為 5.6 公里，落河鞍部之標高為 3596 公尺。因此使著者感到美國要使用國際單位制 (The system international D'unités, SI) 已成為必然之趨勢。國家公園服務處為減緩此一文化衝擊，乃將哩及呎之相當單位並列，其服務可謂週到。

因此本書所用之單位係以 SI 單位為主。不過，傳統之英制單位亦隨時會使用。補充習題係用 SI 及其相當英制單位兩種表出。讀者解習

題時可用任一種單位為之，但著者鼓勵你儘可能使用 SI 單位制，因習題是用兩種單位制敘述，是以你將逐漸了解此兩單位制中尺度之物理意義。最後你終將學會並能熟練運用 SI 單位制。

如果你已詳細閱讀上文，將會發現本書尚未提及“公制 (metric system) ”此一字眼。目前已無“公制”之專有名詞。現有很多公制，其一為國際單位制或寫作 SI。SI 是由 1960 年國際度量衡大會 (General Conference on Weights and Measures (CGPM)) 正式選用之名稱，目前已由各主要工業國家選用作為各該國之單位，但美國除外。國際單位制中已詳細定出各單位之基本規範，同時對各種單位之簡寫法則，以及在表出數量，間距，大寫等之書寫樣式等，皆有詳細規定。本書只就 SI 單位制中對固體力學研究有需要者，方作詳細敘述。

七個基本單位 SI 是根據七個基本尺度定出，其基本單位名稱及簡寫載於表 1.1 中。

表 1.1

長度	公尺 (meter) [†]	m
質量	公斤 (kilogram)	kg
時間	秒 (second)	s
熱力溫度	凱 (kelvin)	K
電流	安培 (ampere)	A
光強度	燭光 (candela)	cd
分子數	摩爾 (mole)	mol

[†] SI 基本長度單位英文可拼作 meter 或 metre。美國較普通之拼法是用 meter。中文可名為公尺或米，本譯本選用公尺，係工程界常用者，同理 kilogram 譯作公斤而不用仟克。

4 第一章 緒 論

上述七個基本單位中，固體力學一書中只用前四個。

補充及導出單位 SI 制中，已對兩種補充單位及十六個導出單位定出特別名稱。與本書有關之量，其單位，簡寫以及與前述基本單位之關係乃示於表 1.2 中。

表 1.2

平面角	弧	rad
力	牛頓 (newton)	$N = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
壓力，應力	巴斯卡 (pascal)	$\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$
功，能	焦耳 (joule)	$J = \text{N} \cdot \text{m}$
功率	瓦 (watt)	$W = J/\text{s}$
頻率	赫茲 (hertz)	$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$
常用溫度	攝氏度	$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.15$

其他可接受的單位 用表 1.3 所載單位表出之量亦是可接受的。

表 1.3

時間 (time)	日 (day)	$d = 86400\text{s}$
	小時 (hour)	$h = 3600\text{s}$
	分 (minute)	$\text{min} = 60\text{s}$
質量 (mass)	公克 (gram)	$g = 10^{-3}\text{kg}$
	公噸 (metric ton)	$t = 10^3\text{kg}$
角	度 (degree)	$^{\circ}$
壓力	巴 (bar)	$\text{bar} = 10^5 \text{Pa}$
體積	公升 (liter)	$\ell = 10^{-3}\text{m}^3$

單位之英文字首 一般而言，量之數值應避免使用太小或太大之值。爲達到此一目的，乃在基本單位或導出單位前面加添英文字首 (

prefixes, 亦稱前標或冠字), 字首之意即表用因子 10^N 去乘以單位。

表 1.4 中示出某些乘單位值因子字首的名稱, 符號及因子值。在表 1.4 所示出之英文字首中, (分) (deci), (十) (deca), 百 (hecto) 用得很少, 而厘 (centi) 使用得很普遍, 乃公尺之主要修正值。

表 1.4

micro (微米)	μ	$10^{-6} = 0.000001$
milli (毫)	m	$10^{-3} = 0.001$
centi (厘)	c	$10^{-2} = 0.01$
deci (分)	d	$10^{-1} = 0.1$
		$10^0 = 1$
deca (十)	da	$10^1 = 10$
hecto (百)	h	$10^2 = 100$
kilo (仟)	k	$10^3 = 1000$
mega (百萬)	M	$10^6 = 1000000$
giga (百萬公里)	G	$10^9 = 1000000000$

SI 及其他單位制間之基本差異 SI 之基本尺度是質量, 長度及時間。力是一導出量。質點運動之牛頓第二定理說, 作用於一質點上之力, 使該質點產生加速度, 則力與加速度之關係為

$$F = ma. \quad (1.2.1)$$

力之標準 SI 單位稱為牛頓, 其定義為使一公斤質量之物體產生 1 m/s^2 加速度所需之力。在單位系中, 將質量, 長度及時間取作基本尺度, 而力之單位係用式 (1.2.1) 導出者, 此種單位制稱為絕對動力單位制 (absolute, dynamically consistent systems of unit)。在單位系中, 將力, 長度及時間取作基本尺度, 而質量單位係用式 (1.2.1) 導出者, 該一單位制稱為重力動力單位制 (gravitational, dynamically