

# 工程力學

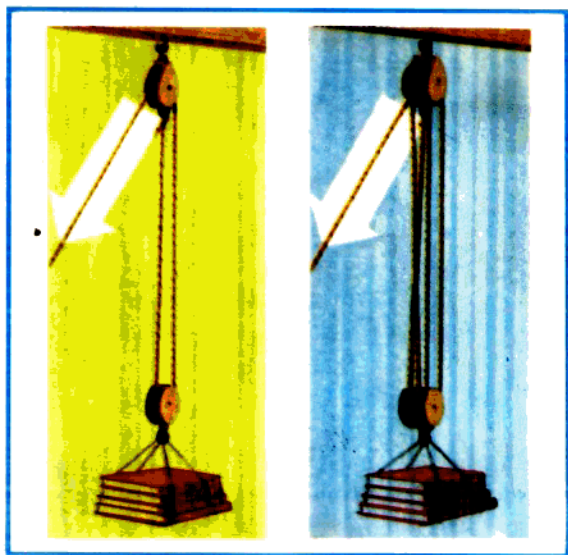
Engineering Mechanics

## 靜力學

第三版

原著者：I. H. Shames

譯述者：莊萬春



科技圖書股份有限公司

# 工 程 力 學

Engineering Mechanics

## 靜 力 學

原著者：I.H. Shames

譯述者：莊萬春

科技圖書股份有限公司

行政院新聞局登記證 局版台業字第 1123 號

---

版權所有 • 翻印必究

# 工程力學

Engineering Mechanics

## 靜力學

原著者：I.H. Shames

譯述者：莊萬春

發行人：趙國華

發行者：科技圖書股份有限公司

台北市重慶南路一段 49 號四樓之 1

電話：3118308 • 3118794

郵政劃撥帳號 0015697-3

---

79 年 9 月 4 版

特價新台幣 200 元

# 序 言

靜力學第三版的出版，最主要的貢獻是簡化問題的處理，使本書更爲實際而能向下紮根。除此以外，更尋求使本書更能適應目前工程計畫所涵蓋的範圍與深度。在從事講授大班（學生人數自 100 至 300 人，選課學生來自各系）力學的最近六年時間內，這些由第二版中的改變得以順利發展。

下列各項，爲本書在第三版中主要的更改：

- (1) 新的問題，超過 40%。都是我盡力搜集最有趣的、實際的與概括的題目，其餘則爲第二版中保留下來的最佳習題。另外，將每章後面的問題分開移到每章適當的所在。並在每章末，選擇約 10 個題目作爲代表一章中的最主要觀念與技巧。我稱這組題目爲“複習問題”。我期望老師們不要用這些問題當作課業，留給學生當作準備考試前的複習。這些複習問題的答案在本書後面均有列入。對各章中其他的問題，其中偶數題的答案，亦列在本書後面。靜力學與動力學在每章前半部的所有問題，使用的單位比率用國際制 (SI) 的佔 50%。在靜力學與動力學每章後半部的問題，用國際制單位的比率佔 65% 到 70%。
- (2) 由世界各地不同的使用者，所帶給我的注意，是學生未精通多重積分。同時亦不能假設他們在大二的秋季這學期中能完全熟悉這些技巧。因此，在例題中用到多重積分所建立的步驟，先用常數極限，然後再用變數極限。此一論證，主要是基於實質的理由；更嚴格的討論，則留作數學課程。
- (3) 將動力學中的慣性張量 (inertia tensor) 這一章移到靜力學中，如第八章所含的面積二次矩與乘積的表面性質。在此，慣性張量可更容易地與面積二次矩與乘積相關連。此外，在討論薄板時，

我們可擴張主軸 ( principal axes ) 觀念。先在第八章中提出，再移轉到第九章的慣性張量。同時，為使具有兩個對稱垂直平面的物體更為清楚，對這些對稱平面相交的主軸，可由觀察而得決定。對動力學問題大部份已足夠使用，故對授課老師若覺授課時間太短，則可刪去慣性分量的轉換方程式與慣性橢圓體的討論。

- (4) 首先兩章，我用 (†) 這個符號的各節，我相信在化學、物理與數學課程中均已涵蓋。對這些節目，在該章後面均包含一系列的簡單問題。老師可斟酌給學生分配作業，以便了解學生的程度。開學第一週，採用分攤閱讀步驟，可使各種不同的學生趨於一致，即使在第二週即進入第三章仍然能得到合理而且正確的發展本課程。對於希望在第二章的向量代數要化較多時間者，我所提出的問題排列，將有助於學生能迅速學到這些運算方法。
- (5) 本書已作較大的努力，使更能適應老師的各種習慣。對此，我所加的星號是本版所加的新材料。如果時間不夠而需跳過時亦不失其連續性。另外，使用較小字印刷的材料，為此類中包含較少，但可能是相當有趣而值得一讀的部份。
- (6) 就一般而言，我已澈底檢查第二版的全部內容，大部份將其重新編寫，使能達到更為明顯而簡單。很幸運，我的摯友，Robert M. Jones 博士 ( Southern Methodist University )，曾仔細檢查本書內容，並包括問題在內。

以下將更詳細地描述本書的內容，並另外說明本版中的若干改變。

第一章，開始介紹力學的一些基礎概念。如尺寸與單位觀念，然後討論應用力學上的某些共同理想化 ( idealization )。這是為了力學基本定律的簡單討論。接着第二章提出向量代數的處理，如學生已相當熟悉此種運算，本章可以略去。但本章亦可用來當作數學與物理的複習。第三章我們小心檢查位置向量、一力的力矩與力偶。這樣可使我們在第四章中提出剛體力學的等效系的完整討論。尤其是，最簡單的合力系，建立在一般、共面、平行與共點力系上。在第五章，建立前面所提過的力系平衡的必要條件，察看每一例，使其最簡單合成等於零的必要條件。在本章末，我們說明剛體平衡方程式，仍需滿足

在考慮靜不定問題時，要考慮其變形。

這些方程式繼續應用在第六章的簡單桁架、樑、鏈與索。在第七章作進一步地應用這些定律，連接到庫倫摩擦定律。第八章，接着提出面積、質量與體積一次矩的觀念，而後再進行面積二次矩。這裏謹慎地提出對旋轉軸的轉換性質。然後提出主軸的觀念。在第八章，首先考慮慣性矩與慣性積的定義。要考慮薄板，則可將面積的主軸觀念伸張到質量。這些計畫經過充分時間後，即可研究一般慣性分量與橢圓體的轉換方程式。在第十章中所發展的是虛功，又稱為變分力學（variational mechanics）。

寫成這第三版的新書，要感謝多人的幫忙。首先，謝謝 Robert M. Jones 博士（Southern Methodist University），與他的夫人 Donna。再者，Bob 與我將靜力學逐行檢查並提供 200 題最佳的靜力問題。很幸運承蒙喬治理工學院教授 David McGill 與 Wilton King 的審查。由於他們的聰明才智使本書得以改良。對以上各位先生在此特誌謝忱。海軍學校 William Lee 教授給我詳細校讀本書。我發現他的建議極為有用，並感謝他有用與有價值的貢獻。密西根大學教授 I. McIvor，匹茲堡大學教授 J. S. 陳與俄亥俄州立大學教授 W. E. Clausen 亦幫忙代為校稿。我要感激在水牛城住的我的同事們，P. Culkowski 教授，C. Fogel 教授，R. Mates 教授，S. Prawel 教授，T. Ranov 與 H. Reismann 教授等。當他們在不同班級講授力學課程時，他們持久的提供激勵與有價值的協助。謝謝我兒子 Bruce 在第六章所提供的像片。最後，感謝 K. Ward 與 G. Huck 太太的打字工作。

Irving H. Shames 休姆

## 編輯者言

這是一部厚逾千頁的大作。原書自 1958 年出版曾在 1966 年改版一次，其後經過十四年（1980）。才有第三版發行。本書即根據第三版本全部譯出。原著者 Shames（休姆）為美國紐約州立大學教授，第二版本曾由台大教授丁觀海先生領銜率其高足十一人合作翻譯成中文，出版迄今先後已經十三年矣。在此十三年中不但原書更改頗多新增又不少。且丁教授現已退休，當年的高足亦均躋身高位，欲求其再度合作重譯的盛事已不可能，但鑑於此書的新版仍風行全球如昔，若任其沿舊作不改未免落後。經購得新版原書詳細較比，其內容較第二版約增 25% 之多，其中優點則在其序文已分別說明不再重覆介紹，深感有重譯的必要。茲為避免由多人合譯單本鉅著常有的缺點，決定聘請一位具有毅力，學有專長的青年才俊獨自擔任，另由本部編輯主持人親任校核，兩者年歲相差兩代，忘年相交，各自敬愛，魚雁往返，不絕研討，自始至終一字不遺的譯，一筆不苟的校，專心從事凡一年半而告完成。值茲書成之日，略誌始末如上。

科技圖書公司編輯部謹識

# 工程力學(靜力學篇)

## 目 錄

### 序 言

### 編輯者言

### 第一章 力學的基本

1.1 引 言.....	1
1.2 力學的基本因次與單位 .....	1
1.3 次級因次量.....	5
1.4 因次齊次性定律.....	6
1.5 力與質量間的因次關係 .....	7
1.6 質量單位.....	8
1.7 力學的理想化.....	10
1.8 向量與純量.....	12
1.9 相等性與等效的向量 .....	15
1.10 力學定律.....	17
1.11 結 論.....	20

### 第二章 向量代數原理

2.1 引 言.....	22
2.2 向量的大小與純量乘積 .....	22
2.3 向量的相加與相減 .....	23
2.4 向量的分解；純量的分量 .....	30
2.5 單位向量.....	36
2.6 兩向量的純量積或點乘積 .....	42
2.7 兩向量的交叉乘積 .....	50
2.8 三純量乘積.....	53



## 2 工程力學(靜力學篇)

2.9 向量符號釋義.....	57
2.10 結 論.....	61

## 第三章 重要向量

3.1 位置向量.....	65
3.2 一力對一點的力矩.....	67
3.3 一力對一軸的力矩 .....	77
3.4 力偶與偶矩.....	85
3.5 偶矩為一自由向量 .....	87
3.6 力偶的加減.....	88
3.7 一力偶對一線的力矩 .....	89
3.8 結 論.....	96

## 第四章 等效力系

4.1 引 言.....	99
4.2 平移一力至平行位置 .....	100
4.3 力系的合成.....	109
4.4 特殊力系的最簡單合成 .....	112
4.5 分佈力系.....	125
4.6 結 論.....	153

## 第五章 平衡方程式

5.1 引 言.....	157
5.2 自由體圖.....	158
5.3 含內截面的自由體.....	162
5.4 平衡方程式.....	171
5.5 平衡的特例.....	173
5.6 平衡問題.....	176
5.7 兩力構件.....	214
5.8 靜力不定性.....	217

5.9 結 論 .....	226
---------------	-----

## 第六章 結構力學導引

第一部份：桁架 .....	229
6.1 結構模式 .....	231
6.2 簡單桁架 .....	234
6.3 簡單桁架的解法 .....	236
6.4 接點法 .....	237
6.5 截面法 .....	250
第二部份：樑內截面力 .....	257
6.6 引 言 .....	257
6.7 剪力、軸力與彎矩 .....	257
6.8 平衡的微分關係 .....	270
第三部份：鏈與索 .....	278
6.9 引 言 .....	278
6.10 共面索 .....	278
6.11 結 論 .....	291

## 第七章 摩擦力

7.1 引 言 .....	295
7.2 Coulomb 摩擦定律 .....	296
7.3 簡單接觸摩擦問題 .....	298
7.4 複雜表面接觸摩擦問題 .....	317
7.5 皮帶摩擦 .....	319
7.6 方螺旋螺紋 .....	334
7.7 滾動阻力 .....	337
7.8 結 論 .....	342

## 第八章 表面諸性質

8.1 引 言 .....	347
---------------	-----

#### 4 工程力學 ( 靜力學篇 )

8.2	面積的一次矩與形心	347
8.3	其他中心	359
8.4	Pappus - Guldinus 定理	364
8.5	平面面積的二次矩與乘積	373
8.6	移軸定理	375
8.7	面積二次矩與乘積計算	377
8.8	面積二次矩與乘積間的關係	388
8.9	面積的極矩	390
8.10	主 軸	391
8.11	結 論	396

### 第九章 慣性矩與慣性積

9.1	引 言	399
9.2	慣量的正式定義	399
9.3	質量慣性項與面積慣性項間的關係	406
9.4	座標軸的平移	414
9.5	慣性項的轉換性質	418
9.6	慣性橢圓體與主慣性矩	431
9.7	結 論	434

### 第十章 虛功法與固定位能法

10.1	引 言	437
第一部份：虛功法		438
10.2	一質點的虛功原理	438
10.3	剛體的虛功原理	440
10.4	自由度與題解	443
第二部份：總位能法		459
10.5	保守系統	459
10.6	保守系統的平衡條件	462
10.7	穩定性	471

附錄一	積分公式	481
附錄二	主慣性矩的計算	483
附錄三	習題答案	485

# 第一章 力學的基本

## †1.1 引言

力學 (Mechanics) 為物理科學的一支，為研究物體受力干擾時的動力行爲 (與化學與熱學的行爲有別)。工程師，事實上將面對此類行爲所包含的種種情形。故力學為許多工程分析上的核心。事實上，其他的物理科學沒有比力學在工程上所扮演的角色來得重要，力學，為歷史最古老的物理科學。Archimedes 所作的浮力與槓桿，可回溯自紀元前二百年。近代有關重力與運動的知識，為 Newton (1642—1727) 所建立，其所創立的 Newton 力學 (Newtonian mechanics)，是本書的主題。

1905 年 Einstein 所發表的相對論，限制了 Newton 體系的公式，且進一步發展相對論力學 (relativistic mechanics)。此新的理論只對當物體速率接近光速時 (186,000 miles/sec) 才與 Newton 公式發生差別。這些速率在大範圍的天體動力學 (dynamical astronomy) 中，與小範圍的次原子粒 (subatomic particles) 中。在實際的大量工程問題中，其速率離光速尚遠，故 Newton 力學，仍可應用。

## †1.2 力學的基本因次與單位

欲研究力學，我們必需建立描述物體特性的體系 (abstraction)。這些體系稱為因次 (dimensions)。凡選用的因次與其他無關者稱為主級或基本因次 (primary or basic dimensions)，由基本因次所發展出來的因次，稱為次級因次 (secondary dimensions)。所使用的

## 2 工程力學（靜力學篇）

基本因次為數甚多，目前我們先選用長度，時間與質量。其他的因次將留待以後再說明。

### 1.2.1 長度——描述大小量的觀念：

為決定一物體的大小，我們必需置另一已知大小的物體在其附近。如在機器圖中，通常在機器旁站立一人。若沒有此人，我們將很難估計此機器的大小。此人雖為量測的一標準，但此時只需得到機器大小的近似值。人的高度不一，且其複雜的形狀無法用來精確的量測機器。很明顯，我們需要一固定形狀且外形簡單的物體來量測另一物體的大小。因此，取代三維因次（three-dimension）的物體，選用一維因次（one-dimension）的物體。然後；我們可使用已知幾何學的觀念將一維因次的大小量測，推廣到三維因次。刻有細線的金屬桿，保持等溫與不變的物理條件下（如，保存在法國 Sèvres 處的公尺）用作一維因次的標準。現可很容易計算一物體沿某方向的距離，標出沿此方向為標準尺的若干倍與分數。通常指此距離為長度（length）。其它大小的觀念，如體積與面積，亦可用平面，球與固體幾何的方法將其變以標準尺寸為項的公式。

單位（unit），為我們所接受量測一因次的名稱。在世界上使用許多單位制（systems of unit），但在本書僅使用兩種主要單位制，一為美制，一為國際制（SI system）。美制的長度單位為呎（ft），國際制的長度單位為公尺（m）。

### 1.2.2 時間 - 事件出現次序的觀念

在觀測機器圖片中在旁站立的人時，從此人所穿的衣服形式，我們可推算其拍攝的年代。但如何來決定？我們回憶起：“在三十年代，人們流行戴草帽”。換句話說，“當”其聯繫某一事件為觀察者的經驗或其他已知事件。對於更正確的描述“當”，則必需找出一個可完全重複出現的動作。然後，我們可用這些重複動作的倍數與分數來算出所欲表明的事件。地球的自轉，為事件量測的最佳時間量測一天。但在工程上需用較小的單位，一般為“秒”，為每天重複 86,400 次。

### 1.2.3 質量——物質的性質

初學者對長度與時間的觀念，因日常的視覺與觸覺關係極易接受，而且總覺得歲月如流。但質量 (mass) 的觀念並不容易地領悟，因它與我們日常生活上較少直接關係。

質量，為物質的一種性質，可由兩種不同作用的物體來決定。欲研究第一種作用，若考慮兩個硬物體，其成分、大小、形狀與顏色等全不相同。若將此兩物體吊在相同的彈簧下，如圖 1.1。因受物體重力的結果，使各個彈簧伸張若干距離。將伸張較長的物體磨去一些，即可使兩個彈簧的伸長相等。甚至將兩個彈簧升到地球表面上某新的高度以減少其伸長量，但因兩物體的重力而使彈簧拉長的量仍為相等。由此可以判斷兩物體有等效的天生性質。每一物體所顯示重力引力量 (amount of gravitational attraction) 的性質，就稱為質量 (mass)。

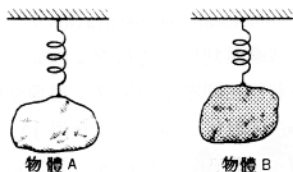


圖 1.1 被相同彈簧所限制的物體

這些等效的物體，亦可由第二種作用來指出。若將兩物體往下移動等量距離，然後同時釋放。因彈簧的拉長而使兩物體以相同方式往復運動（除了因風摩擦，與物體局部變形的差異而產生微小變化外）。事實上，我們已強制每一物體有相同的機械干擾，且引出相同的動力反應。因此，不管有許多明顯的差別，但此物體所顯示的仍然等效。

“質量的性質，顯示一物體的特徵，在重力引力作用與一力干擾的反應。”

欲敘述此性質的量，選擇一些方便的物體並與其他物體比較上述

#### 4 工程力學 (靜力學篇)

兩種作用的反應。工程師量測質量，最常用的兩種單位為，磅質量 (pound mass)，被定義為一標準物體在標準位置的重力引力，另一為 slug 被定義為一標準物體對一標準力干擾的動力反應。在國際制中的質量單位只有一種用公斤 (kilogram, kg) 來量測質量。公斤，為量測一物體受力干擾的反應。此兩種制的單位，將在以後各章節中再加討論。

現在，我們建立三個基本獨立因次來描述某一物理的現象。習慣上將這些因次用下列的字母來表示：

長度	[L]
時間	[t]
質量	[M]

這些所表明的基本因次，與 1.3 節所指出更複雜組合的次因次，統稱為“因次代表” (dimensional representation)。

在計算中，我們常遭遇到單位的折換。例如，希望將 ft 折換成 mm。此時，我們必需將在問題中的單位，用等效物理 (physically equivalent) 的新單位來取代。因此，1 ft 用 12 in 或 305 mm 取代。表 1.1 列出一般的單位。且在封面內的表，列出這些單位的等效值。

表 1.1 一般系統的單位

cgs		SI	
質量	克	質量	公斤
長度	厘米	長度	公尺
時間	秒	時間	秒
力量	達因	力量	牛頓
	英制		實用美制
質量	磅質量	質量	斯拉格或磅質量
長度	呎	長度	呎
時間	秒	時間	秒
力量	磅達	力量	磅力

這些單位間的關係，將用此下列方法來表示。

$$1 \text{ ft} = 12 \text{ in.} = 305 \text{ mm}$$



三條水平短線後的數不是用來指示其代數等效 ( algebraic equivalence )。只是指示其物理量等效 ( physical equivalence )。上式的其他表示法為：

$$\begin{aligned} \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in.}}\right) &\equiv 1, & \left(\frac{1 \text{ ft}}{305 \text{ mm}}\right) &\equiv 1 \\ \left(\frac{12 \text{ in.}}{1 \text{ ft}}\right) &\equiv 1, & \left(\frac{305 \text{ mm}}{1 \text{ ft}}\right) &\equiv 1 \end{aligned} \quad (1.1)$$

等式右邊的 1，指示左邊的分數與分母的物理量為相等，且有 1 : 1 的關係。當考慮下一節次因次單位改換時，將可證明這些表示法相當方便。

### 1.3 次級因次量

用適當的定義 ( 如，速度被定義為距離除以時間 ) 來描述物理特性為基本因次的關係，此量就稱為次級因次量 ( secondary dimensional quantities )。在 1.4 節中，可看出這些量可建立一自然定律的結果。用量為項所代表的因次，為基本因次的函數，故其進入公式  $F$  的觀念。例如，速度所代表的因次為

$$[\text{速度}] \equiv \frac{[L]}{[t]}$$

速度所代表的因次，為長度因次除以時間因次。則次級量的單位，為基本因次的單位為項所組成。故，

$$\text{速度單位} \equiv \frac{[\text{ft}]}{[\text{sec}]}$$

從一種單位制改變成另一種單位制，通常包含該問題所含次級量的量測尺度 ( scale of measure )。在美制的速度尺度單位為 1 ft / sec，在國際制為 1 m / sec。此複雜次級量的正確尺度單位關係為何？亦即，多少 m / sec 等於 1 ft / sec？此項計算的較佳方法為使用因次表示式來表達。其過程如下：表示相依量的因次，使用所存在的基本因次單位；最後，改換這些單位成等效的新制數值。此新制單位所