

應用力學

(基本原理及習題詳解)

編譯者：張文

曉園出版社
世界圖書出版公司

038-44
26

373897

應用力學

(基本原理及習題詳解)

編譯者：張文



曉園出版社

世界圖書出版公司

应用力学 (基本原理及习题详解)

张 文 编 译

世界图书出版公司出版

北京朝阳门内大街137号

北京中西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1994年10月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1994年10月第一次印刷 印张: 14

印数: 0001—400 字数: 40万字

ISBN: 7-5062-1975-1/O·143

定价: 22.50元 (WB9405/4)

世界图书出版公司已向台湾晓园出版社购得重印权
限国内发行

序 言

本書是作為標準教科書而設計的，主要的目的在幫助理工科的同學研習，並透過此書獲得更充分的力學知識與熟練的分析及應用。在例題上，作者深信豐富的例題有助於基本定律的了解與觀念的加深。此書雖與其他教科書有類似之處，但如讀者能同時研習，定可收相輔相成的效果。

本書第一版問世時，即廣被採用，供不應求。此次再版在觀念，方法及專有名詞方面均作修改及增訂，以求更完善。作者希望以適合大學二年級學生的數學程度，作為研習的工具。如向量分析在書中廣泛的應用在原理和問題的解答上，並使式子顯得精簡與優美。另一方面，書中純量方法的使用也是舉目可見，因在大多數問題中，它提供完善的解答。由於向量的應用遍及全書，為了此書研習的方便，第一章乃是向量定義及運算的複習。

各章標題所列的教材都已涵蓋標準力學導論的課程，每章的開始均有關於定義，定律、定理的敘述。接著大量由簡而深的例題與附加習題。例題可視為原理的舉例與推廣，並提供常用的分析方法與實例的參考。透過上述對例題所提之優點，定能確保學生們在應用原理時的信心及正確的使用。至於數值性的定理證明及公式的推導亦包含在例題中。各章節後附有大量的習題，可供讀者複習之用。

對於第一版編寫期間 Paul B Eaton 及 J Warren Gillon 兩位教授助益性的建議和鼓勵，及在第二版 Charles L. Best 及 John W. McNabb 等教授建設性的批評及幫助，作者均由衷的感激。此外，Larry Freed 及 Paul Gray 對習題解答的審校令人讚賞。要感謝 Schaum，出版公司的工作人員，尤其是 Henry Hayden 與 Nicola Miracapillo 他們兩人寶貴的意見及充分的合作。最後也感謝負責打字的 Patricia Henthorn 太太。

W.G. MCLEAN
E.W. NELSON

應用力學原理及題解

目 錄

- 1 向量
定義 / 向量加法 / 零向量 / 向量之合成 / 純量對向量之乘法 / 內積或純量乘積 / 單位向量之正交三組合 / 外積或向量乘積 / 向量微積分 / 習題詳解 / 補充題及答案
- 2 力之作用 16
力矩 / 力偶 / 以力與力偶代表一力 / 共平面力系之作用 / 習題詳解 / 補充題及答案
- 3 共平面力系之合成 26
共平面力 / 共點力系 / 平行力系 / 非共點非平行力系 / 圖解法 / 習題詳解 / 補充題及答案
- 4 空間力 38
空間力 / 空間力系之合成 / 共點力系 / 平行力系 / 非共點非平行力系 / 習題詳解 / 補充題及答案
- 5 共平面力系之平衡 47
共平面力系之平衡 / 共點力系之純量方程式 / 平行力系之純量方程式 / 非共點、非平行力系之純量方程式 / 平衡之作圖條件 / 習題詳解 / 補充題及答案
- 6 桁架和纜線 66
桁架和纜線 / 桁架 / 纜線 / 習題詳解 / 補充題及答案

7	空間力系之平衡	84
	空間力之平衡 / 共點力系之地量方程式 / 平行力系之地量方程式 / 歪斜力系之地量方程式 / 習題詳解 / 補充題及答案	
8	磨擦	98
	磨擦概念與定義 / 磨擦定律 / 螺旋起重機 / 帶磨擦及制動帶 / 滾動阻力(磨擦) / 習題詳解 / 補充題及答案	
9	第一矩及矩心	118
	組件之矩心 / 連續量之矩心 / 巴伯斯及高第納斯定理 / 壓力中心 / 習題詳解 / 補充題及答案	
10	質點運動學	145
	運動學 / 直線運動 / 曲線運動 / 直角分量 / 切線與法線分量 / 徑向及橫向分量 / 單位	
11	質點動力學	175
	牛頓運動定律 / 單位 / 加速度 / 動力學問題的討論 / 習題詳解 / 補充題及答案	
12	剛體平面運動學	203
	定義 / 移動 / 轉動 / 瞬時轉動軸 / Coriolis 定理 / Coriolis 定律及其證明 / 習題詳解 / 補充題及答案	
13	剛體移動動力學	238
	作用於質點上的有效力 / 達朗白原理 / 慣性力法 / 習題詳解 / 補充題及答案	
14	面積慣性矩	252

- 15 質量慣性矩 273
微分面積之軸慣性矩 / 微分面積之極慣性矩 / 微分面積之慣性積 / 面積之極慣性矩 / 面積之慣性積 / 平行軸原理 / 集成面積 / 旋轉軸組 / 莫爾圓 / 習題詳解 / 補充題及答案
- 16 剛體轉動動力學 285
微分質量之軸慣性矩 / 質量之軸慣性矩 / 平行軸原理 / 迴轉半徑 / 單位 / 幾何中心之質量慣性矩 / 習題詳解 / 補充題及答案
- 17 剛體平面運動動力學 307
運動方程式 / 慣性力法 / 撞擊中心 / 習題詳解 / 補充題及答案
- 18 功與能 331
定義 / 功率 / 效率 / 動能 / 作用於質點上之功 / 位能 / 功能原理 / 能量不減原理 / 習題詳解 / 補充題及答案
- 19 衡量與動量 360
線動量 G / 動量之矩 H_0 / 相對動量之矩 H'_0 / 相關之純量方程式 / 線動量之守恒 / 角動量之守恒 / 碰撞 / 可變質量 / 習題詳解 / 補充題及答案
- 20 機械振動 398
定義 / 自由度 / 簡諧運動 / 複合系統 / 線性自由振動 / 角弧自由振盪 / 含有黏性阻尼之自由振盪 / 軸樞之臨界速率 / 振盪振幅之測量裝置 / 習題詳解 / 補充題及答案
- 21 特殊論題：樑與虛功 428
 A 部份 - 樑 (Beams) / 樑之形式 / 剪力與力矩 / 符號 / 剪力 / 力矩 / 剪力與力矩圖 / 剪力圖的斜率 / 剪力

的變化 / 力矩圖的變化 / B 部份 - 虛功 (*Virtual Work*)
虛位移與虛功 / 平衡 / 穩定平衡 / 不穩定平衡 / 隨意平衡 / 結論 / 習題詳解 / 補充題及答案

第一章 向量

定義 (DEFINITIONS)

純量 (scalar) 僅含大小，如時間、體積、質量、能量、密度、功。純量以普通代數方法相加，如 2 秒 + 7 秒 = 9 秒。

向量 (Vector) 含大小與方向，如力、位移、速度、衝量 (impulse)。向量以箭號示之，其箭號指示方向，而其長度代表大小。印刷時，向量以粗字體表示，如向量 $\mathbf{P}$ ，此向量之大小以 $|\mathbf{P}|$ 或 P 表示。在書寫時，習慣上在字母上畫一箭頭代表向量，而其大小以字母表示。

自由向量 (Free Vector) 可在空間中任意移動，但方向和大小不變。

滑動向量 (Sliding Vector) 可應用於作用線上的任何點。由「可傳遞性原理」 (Principle of transmissibility) 知一個滑動向量之外效應保持不變。

限制或固定向量 (Bound or Fixed Vector) 必須固定於相同的作用點。

單位向量 (Unit Vector) 乃長度為一單位之向量。

向量 $\mathbf{P}$ 之負向量 (Negative Vector) 為向量 $-\mathbf{P}$ ，二者大小相同方向相反。

向量系統之合成 (Resultant of a system of Vectors) 為能代表此系統之最少向量。

向量加法 (ADDITION of TWO VECTORS)

(a) 平行四邊形定律：二向量 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{Q}$ 之合向量 $\mathbf{R}$ 乃以 $\mathbf{P}$ ， $\mathbf{Q}$ 為鄰邊所作成之平行四邊形之對角線，如圖 1-1 所示。

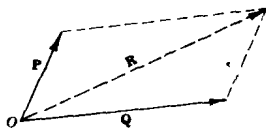


圖 1-1

(b) 三角形定律：將一向量之尾端置於另一向量之箭頭，從一向量之尾端至另一向量之箭頭劃一連線即得合向量。

三角形定律乃由平行四邊形定律而來，此乃平行四邊形之對邊為自由向量

2 應用力學原理及題解

之故，如圖 1-2 所示。

(c) 向量加法：是可交換的，即 $P + Q = Q + P$ 。

(d) 向量減法：乃加上此向量之負向量。即

$$P - Q = P + (-Q)$$

$$\text{而} -(P + Q) = -P - Q$$

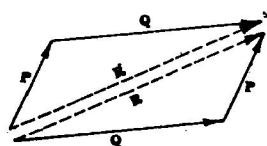


圖 1-2

零向量 (ZERO VECTOR)

零向量由一個向量減去自身而得。即 $P - P = 0$

向量之合成 (COMPOSITION of VECTORS)

向量之組合即求此諸向量之合向量之過程。作向量多邊形，乃將每一向量之尾端順次置於前向量之箭頭而得，如圖 1-3 所示。連接第一向量之尾端與最後向量之箭頭即得合向量。後面所述將顯示，並非所有向量系統皆可簡化為單一向量。作圖時與向量先後次序無關。故對三個向量 P ， Q 和 S 。

$$\begin{aligned} R &= P + Q + S = (P + Q) + S \\ &= P + (Q + S) = (P + S) + Q \end{aligned}$$

圖 1-3 上面方程式可擴充至無限向量數。

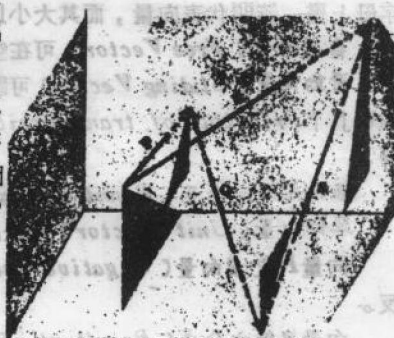


圖 1-3

純量對向量之乘法 (MULTIPLICATION of VECTORS by SCALARS)

(a) 向量 P 和純量 m 之乘積為向量 mP ，其大小為 $|m|$ 倍之 P 的大小，並由 m 之正負決定其應與 P 具相同或相反之方向。

(b) 以純量 m 和 n 的其他運算為

$$(m + n)P = mP + nP$$

$$m(P + Q) = mP + mQ$$

$$m(nP) = n(mP) = (mn)P$$

單位向量之正交三組合 (ORTHOGONAL TRIAD of UNIT VECTORS)

單位向量的正交三組合 i ， j 及 k 是由分別沿 x ， y 及 z 軸所畫的單位向量所組成，下圖 1-4 所示即為一右手系之軸。

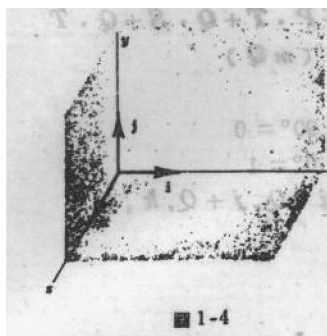


圖 1-4

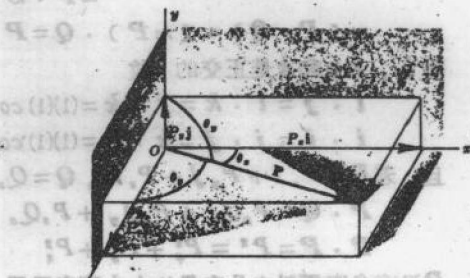


圖 1-5

一向量 P 可寫成

$$P = P_x i + P_y j + P_z k$$

此處 $P_x i, P_y j, P_z k$ 為 P 分別沿 x, y 及 z 軸之分向量。如上圖 1-5 所示。

位置向量 r 空間裏一點 (x, y, z) 之位置向量 r 表示為

$$r = x i + y j + z k$$

此處 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 如下圖 1-6 所示。

內積或純量乘積 (DOT or SCALAR PRODUCT)

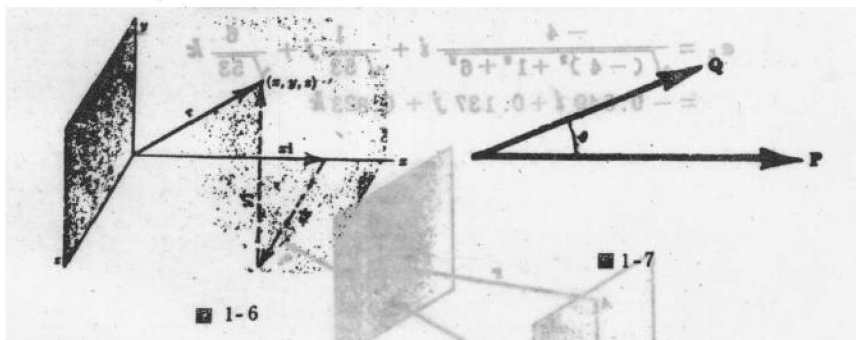


圖 1-6

兩向量 P 及 Q 的純量乘積，表示為 $P \cdot Q$ ，為一純量。定義為此二向量之大小及其夾角 θ 之餘弦的乘積（如上圖 1-7）。

$$P \cdot Q = PQ \cos \theta$$

下列規則可用於點乘積，在此 m 為純量。

$$P \cdot Q = Q \cdot P$$

$$P \cdot (Q + S) = P \cdot Q + P \cdot S$$

$$\begin{aligned}(P+Q) \cdot (S+T) &= P \cdot (S+T) + Q \cdot (S+T) \\ &= P \cdot S + P \cdot T + Q \cdot S + Q \cdot T\end{aligned}$$

$$m(P \cdot Q) = (mP) \cdot Q = P \cdot (mQ)$$

因 i, j , 和 k 是正交的, 故

$$i \cdot j = i \cdot k = j \cdot k = (1)(1) \cos 90^\circ = 0$$

$$i \cdot i = j \cdot j = k \cdot k = (1)(1) \cos 0^\circ = 1$$

且, 若 $P = P_x i + P_y j + P_z k$, $Q = Q_x i + Q_y j + Q_z k$, 則

$$P \cdot Q = P_x Q_x + P_y Q_y + P_z Q_z$$

$$P \cdot P = P^2 = P_x^2 + P_y^2 + P_z^2$$

P 沿直角座標軸之分向量的大小可表示為

$$P_x = P \cdot i, P_y = P \cdot j, P_z = P \cdot k$$

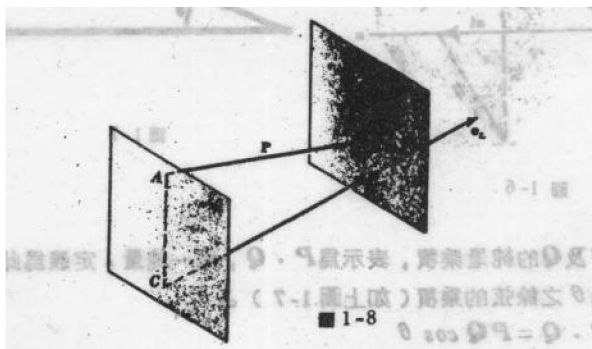
例如: $P \cdot i = (P_x i + P_y j + P_z k) \cdot i = P_x + 0 + 0 = P_x$

同理, P 沿任何線 L 之方向分量可表為 $P \cdot e_L$, 在此 e_L 為沿線 L 之單位向量。(有些作者以 u 表單位向量), 下圖 1-8 示, 一平面通過向量 P 之尾端 A 點, 及一平面通過端點 B , 二平面皆垂直線 L , 此二平面交線 L 於 C, D 二點, 向量 CD 為 P 沿 L 之方向分量, 其大小為 $P \cdot e_L$ 。

例: 決定一始點為 $(2, 3, 0)$ 並通過點 $(-2, 4, 6)$ 之線 L 的單位向量 e_L 並求向量 $P = 2i + 3j - k$ 沿線 L 之投影。

線 L 在 x 方向由 2 到 -2, 即變化 -4, 在 y 方向之變化為 4 - 3 = 1, z 方向之變化為 6 - 0 = 6, 其單位向量為

$$\begin{aligned}e_L &= \frac{-4}{\sqrt{(-4)^2 + 1^2 + 6^2}} i + \frac{1}{\sqrt{53}} j + \frac{6}{\sqrt{53}} k \\ &= -0.549 i + 0.137 j + 0.823 k\end{aligned}$$



P 之投影為

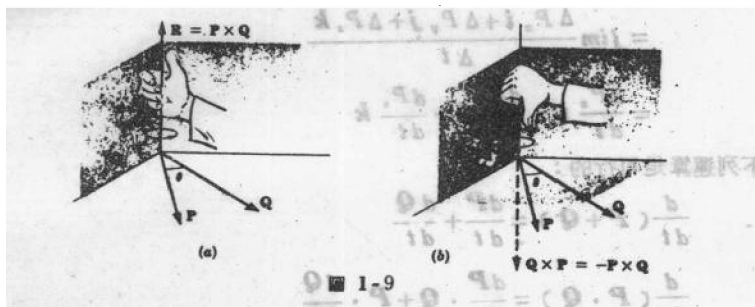
$$P \cdot e_L = 2(-0.549) + 3(0.137) - 1(0.823) = -1.41$$

外積或向量乘積 (The CROSS or VECTOR PRODUCT)

二向量 P 和 Q 之向量乘積，表示為 $P \times Q$ ，為一向量 R ，其大小為此二向量大小及其夾角 θ 之正弦的乘積，向量 $R = P \times Q$ 方向垂直於 P, Q 平面，並指向右手螺旋中，由 P 經較小夾角 θ 轉向 Q 時之上邊方向。故若 e 為向量 $R = P \times Q$ 方向上之單位向量，此乘積可表示為

$$R = P \times Q = (PQ \sin \theta) e, \quad 0 \leq \theta \leq 180^\circ$$

圖 1-9 表示 $P \times Q = -Q \times P$ (不可交換)。



下列諸規則可用於向量乘積，在此 m 為一純量。

$$P \times (Q + S) = P \times Q + P \times S$$

$$(P + Q) \times (S + T) = P \times (S + T) + Q \times (S + T) \\ = P \times S + P \times T + Q \times S + Q \times T$$

$$m(P \times Q) = (mP) \times Q = P \times (mQ)$$

因 i, j, k 為正交

$$i \times i = j \times j = k \times k = 0$$

$$i \times j = k, \quad j \times k = i, \quad k \times i = j$$

且若 $P = P_x i + P_y j + P_z k, Q = Q_x i + Q_y j + Q_z k$ ，則

$$P \times Q = (P_y Q_z - P_z Q_y) i + (P_z Q_x - P_x Q_z) j + (P_x Q_y - P_y Q_x) k$$

$$= \begin{vmatrix} i & j & k \\ P_x & P_y & P_z \\ Q_x & Q_y & Q_z \end{vmatrix}$$

此向量乘積行列式的證明見問題 12。

向量微積分 (VECTOR CALCULUS)

(a) 向量 P 之微分，其相對於某一純量如時間 t 之變化表示如下：

6 應用力學原理及題解

令 $\mathbf{P} = \mathbf{P}(t)$ ，即 $\mathbf{P}$ 為時間 t 的函數，當時間由 t 到 $(t + \Delta t)$ 時 $\mathbf{P}$ 之變化 $\Delta \mathbf{P}$ 為 $\Delta \mathbf{P} = \mathbf{P}(t + \Delta t) - \mathbf{P}(t)$

$$\text{故 } \frac{d\mathbf{P}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{P}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{P}(t + \Delta t) - \mathbf{P}(t)}{\Delta t}$$

若 $\mathbf{P}(t) = P_x \mathbf{i} + P_y \mathbf{j} + P_z \mathbf{k}$ ，在此 P_x, P_y, P_z 為時間 t 的函數，則

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{P}}{dt} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(P_x + \Delta P_x) \mathbf{i} + (P_y + \Delta P_y) \mathbf{j} + (P_z + \Delta P_z) \mathbf{k} - P_x \mathbf{i} - P_y \mathbf{j} - P_z \mathbf{k}}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta P_x \mathbf{i} + \Delta P_y \mathbf{j} + \Delta P_z \mathbf{k}}{\Delta t} \\ &= \frac{dP_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dP_y}{dt} \mathbf{j} + \frac{dP_z}{dt} \mathbf{k} \end{aligned}$$

下列運算是可行的：

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{P} + \mathbf{Q}) = \frac{d\mathbf{P}}{dt} + \frac{d\mathbf{Q}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{P} \cdot \mathbf{Q}) = \frac{d\mathbf{P}}{dt} \cdot \mathbf{Q} + \mathbf{P} \cdot \frac{d\mathbf{Q}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{P} \times \mathbf{Q}) = \frac{d\mathbf{P}}{dt} \times \mathbf{Q} + \mathbf{P} \times \frac{d\mathbf{Q}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}(\phi \mathbf{P}) = \phi \frac{d\mathbf{P}}{dt} + \frac{d\phi}{dt} \mathbf{P} \text{ 在此 } \phi \text{ 為時間 } t \text{ 的純量函數。}$$

(b) 向量 $\mathbf{P}$ 之積分，其對某一純量如時間 t 之變化如下：

令 $\mathbf{P} = \mathbf{P}(t)$ ，即 $\mathbf{P}$ 為時間 t 的函數，則

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_1} \mathbf{P}(t) dt &= \int_{t_0}^{t_1} (P_x \mathbf{i} + P_y \mathbf{j} + P_z \mathbf{k}) dt \\ &= \mathbf{i} \int_{t_0}^{t_1} P_x dt + \mathbf{j} \int_{t_0}^{t_1} P_y dt + \mathbf{k} \int_{t_0}^{t_1} P_z dt \end{aligned}$$

補充題及解答

1. 於一平面，在 30° 方向加一 120 磅之力，及在 90° 方向加一 100 磅之力，以平行四邊形法求和，參考圖 1-10(a)。

圖 作一圖，不需按比例，負號表示 100 磅之力沿 90° 之線指向原點，即等於一正 100 磅之力沿 270° 之線作用。



如於圖 1-10(b) 中，置二向量之端點於同一點，以同一比例作圖，完成平行四邊形，其合力 R 以所用比例尺測得為 111 磅，以分度板量得其與 x 軸之夾角 $\theta_x = 339^\circ$ 。

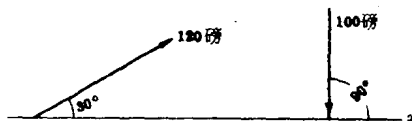


圖 1-10(a)

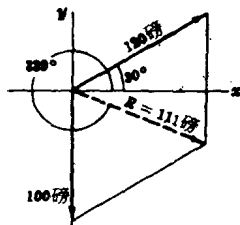


圖 1-10(b)

2 於上題，應用三角形法解之。（圖 1-11）

- 解 那一個向量先畫並無關係，在此選 120 磅之力，於此向量之箭頭端接上 100 磅力的尾端，由 120 磅力之尾端至 100 磅力之箭頭，即為合成向量，其大小及角度均與上題相同。

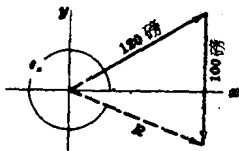


圖 1-11

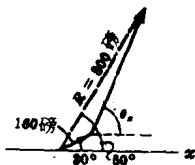


圖 1-12

3 於一平面，二力之合成為 800 磅作用於 60° 方向，其中一力為 160 磅作用於 30° 方向，求另一力，視圖 1-12。

- 解 以適當比例，過一點作出合力及已知之一力。連結二力之箭頭端，加一箭頭於靠近合力之一端，此線即表示另一力，以比例求出此力為 667 磅，角度 $\theta_x = 67^\circ$ 。

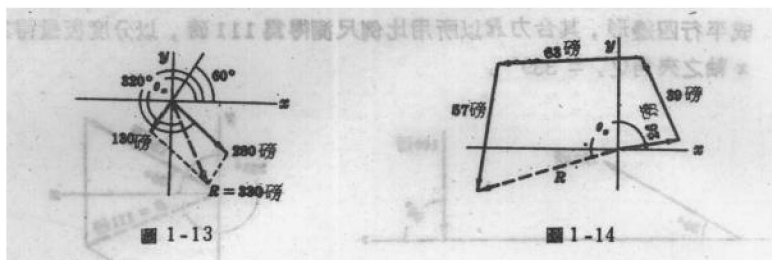
4 平面上，求一向量 280 磅 320° 方向減去一向量 130 磅 60° 方向之值。見圖 1-13。

- 解 於 280 磅， 320° 力，加上一負的 130 磅 60° 之力，得到 330 磅， 297° 之合力，所有角度皆相同對於 x -軸求得。

5 求下列共平面力系之合成：26 磅， 10° ；39 磅， 114° ；63 磅， 183° ；57 磅， 261° 。

- 解 以多邊形法，置每一向量之尾端於前一向量之頭端，且合力為由第一向

8 應用力學原理及題解



量之尾端至最後向量之頭端。圖 1-14。

測得為 $R = 65$ 磅， $\theta_s = 197^\circ$ 。

6. 一 35 磅之力與 x 軸成 140° 角，求其在沿 x 軸成 30° 及 240° 之二線上的分量。圖 1-15。

解 以適當比例作 35 磅之力 OB ，過 O 點作 30° 及 240° 之線 OC 及 OD ，過 B 點作 BE 及 BF 分別平行於 OC 及 OD ，延長 OC ， OD 交 BF 於 G ，交 BE 於 H ，則 OG (— 68.9 磅) 為所求沿 30° 線之分量， OH (— 65.8 磅) 為所求沿 240° 線之分量。

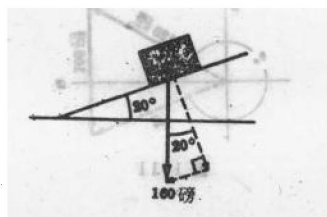
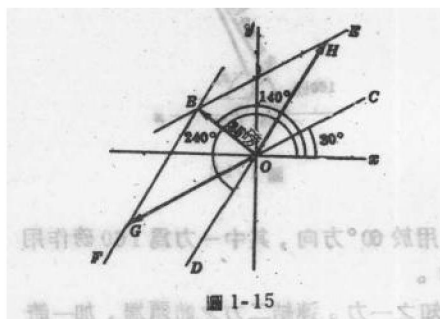


圖 1-16

7. 一個 160 磅重之人站於與地面成 20° 木板上，求 (a) 垂直於木板 (b) 平行於木板之此人重量之分量。(圖 1-16)。

解 法線分量與重量成 20° 角，由重量向量之箭頭作垂線垂直於法線。由比例求出法線分量為 150 磅，平行分量為 55 磅。由三角關係：

$$\text{法線分量} = 160 \cos 20^\circ = 155 \text{ 磅。}$$

$$\text{平行分量} = 160 \sin 20^\circ = 55 \text{ 磅。}$$

8. 一 235 磅之力與水平成 30° 角，作用於一置於 22° 傾斜平面之木塊，求 (a) P 之水平及垂直分量 (b) P 沿傾斜面之平行與垂直分量。圖 1-17。

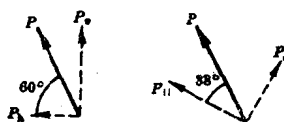


圖 1-17

- 解 (a) 水平分量 P_h 向左作用，其大小等於 $235 \cos 60^\circ = 118$ 磅。
 垂直分量 P_v 向上作用，大小等於 $235 \sin 60^\circ = 204$ 磅。
 (b) 平行此平面之分量 $P_{\parallel} = 235 \cos (60^\circ - 22^\circ) = 185$ 磅沿平面向上作用。
 垂直平面之分量 $P_{\perp} = 235 \sin 38^\circ = 145$ 磅，如圖所示。

9. 分解 20 磅之力成二分量，其一與 10 磅之水平力相均衡，如圖 1-18 所示。

- 解 下方水平虛線為所求之分量，因其為 10 磅之平衡力，故必與 10 磅之已知力知力，大小相等而方向相反，另一分量與此二已知力共存於 O 點，故平行於 20 磅力及平衡力之端點的連線，以平行四邊形法，其比例為 26.5 磅， 41° 。

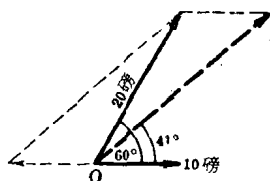


圖 1-18

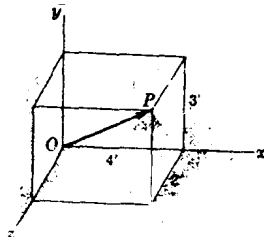


圖 1-19

10. 參考圖 1-19，直角四方體之 x ， y ， z 邊長分別為 4，3 及 2 呎，若對角線 OP 代表 50 磅之力，求其 x ， y ， z 邊之分力，以單位向量 i ， j ， k 表示。

- 解 令 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分別為 OP 對 x ， y ， z 軸之夾角則：

$$P_x = P \cos \theta_x, P_y = P \cos \theta_y, P_z = P \cos \theta_z.$$

$$OP \text{ 之長為 } \sqrt{4^2 + 3^2 + 2^2} = 5.38 \text{ 呎}.$$

故 $\cos \theta_x = 4 / 5.38$ ， $\cos \theta_y = 3 / 5.38$ ， $\cos \theta_z = 2 / 5.38$
 其分量為

$$P_x = 50 \cos \theta_x = 37.2 \text{ 磅}, P_y = 50 \cos \theta_y = 27.9 \text{ 磅},$$

$$P_z = 50 \cos \theta_z = 18.6 \text{ 磅}.$$

$$\text{向量 } P = P_x i + P_y j + P_z k = 37.2i + 27.9j + 18.6k \text{ 磅}.$$