物　理　學

編著者

梁樹根　張　鋌　王龍錫
董敏男　張啓陽　蔡繁仁

（上册）

興業圖書股份有限公司出版

中華民國六十三年九月一版

物　理　學

上冊　基本定價三元

編著者：	梁樹根　張　鋌　王龍錫 董敏男　張啓陽　蔡繁仁
發行人：	王　志　康
內政部登記證	內版台業字第一七九四號
出版者：	興業圖書股份有限公司
印刷者：	永紳彩色印刷廠 臺南市忠孝街五十九號
發行所：	興業圖書股份有限公司 臺南市勝利路一一八號

序

編著者任教大專物理多年，深感此科名著雖多，而對於初由中學升入大專就讀的同學們缺乏一本適當的物理，故編著者以多年來教學實際經驗，精細編寫，並參考國內外有關書籍，將其基本觀念，基本原理，重要定律與重要定理，擷英取華，編成本書，以供今日大專教學之用。

本書共分上，下兩册，上册內容包含力學，流體力學，熱學，波動與聲學；下册內容包含電磁學，光學與近代物理學等。本書教材足够兩學年教學之用，且適合大專各科系普遍採用。

本書多採用M.K.S.C制，有時也引用C.G.S.制或英制單位。專有名詞多採用教育部頒佈的物理學名詞。

編寫本書上册時，我們曾自下列參考書中，摘取部分精華資料與插圖，謹向各該書著者致最大謝意。

(1) D. Halliday and R. Resnick : Physics for Students Science and Engineering.

(2) M. Alonso and E.J. Finn Physics.

(3) J.A. Richards, Jr.F.W. Sears, M.R. Wehr, M.W. Zemanskey : Modern University Physics.

(4) J. Orear : Fundamental Physics.

(5) C. Kittel, W.D. Kniyht, M.A. Ruderman : Mechanics.

(6) F.S. Crawford, Jr. : Wares and oscillation.

(7) M.W. White, K.V. Manning, R,L, Weber : Basic Rhysics.

(8) Beiser : Modern Technical Rhysics.

(9) P.S.S.C. Physics.

(10) R.A. Becker : Introduction to Theorectical Mechanics.

(11) 李怡嚴：大學物理學。

(12) 吳友仁：物理學。

編著者對本書之編撰，雖已竭盡棉薄，猶恐未逮。欠妥，疏誤之處，尚希海內外賢達，隨時指正，俾於再版時更正，不半感幸。

編著者謹識

民國六十三年八月

×

物理學

目　　錄

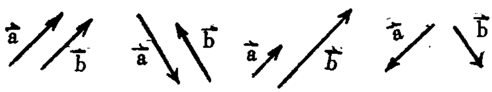
1

向　　量

1 - 1　向量與純量

在討論物理問題時，我們常常會遇到一些數量，如一物體之質量，電子之電量，水之比熱，電阻器之電阻，……等等，僅具有大小及單位便能表現它，這些量，我們稱之為純量（ Scalar ）；另外有一些物理量，如點的位移，作用力，速度，電場，磁場，……等等，不能單純地被一個數值及單位所確定之，必須另外再加以一個方向來描述它，這一類的物理量，我們稱之為向量（ Vector ）。

吾人以粗體字如 $\boldsymbol{A}$ ，$\boldsymbol{B}$ ，$\boldsymbol{C}$ ，$\boldsymbol{a}$ ，$\boldsymbol{b}$ ，等表示向量（ 手寫時，可用箭頭描述向量，如 $\vec{A}$，$\vec{B}$，$\vec{C}$，$\vec{a}$，$\vec{b}$，等）；在圖示法中，畫一箭頭代表其方向，而以長度表示其大小，如圖 1－1 所示；而向量 $\boldsymbol{a}$ 之大小（ magnitude ），則以｜$\boldsymbol{a}$｜表之，稱為 $\boldsymbol{a}$ 之絕對值。

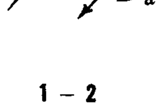


1 － 1　向量圖示法

若 $\boldsymbol{a}$ ，$\boldsymbol{b}$ 兩向量，方向及大小均相同，則 $\boldsymbol{a}$ 與 $\boldsymbol{b}$ 相等，記為

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{b}$$

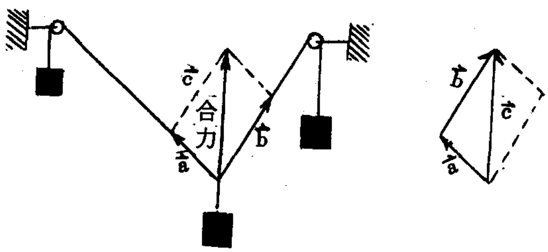
某一向量的大小與 $\boldsymbol{a}$ 相同，而方向與 $\boldsymbol{a}$ 相反時，記為 $-\boldsymbol{a}$ ，如圖 1－2 ，又長度為 1 之向量稱為單位向量（ Unit Vector ）。



1 － 2

1 - 2　向量加法—幾何法

由實驗可證明二力之合力可用平行四邊形定律決定之（圖 1－3 ），由是可引出向量加法之定義如下：



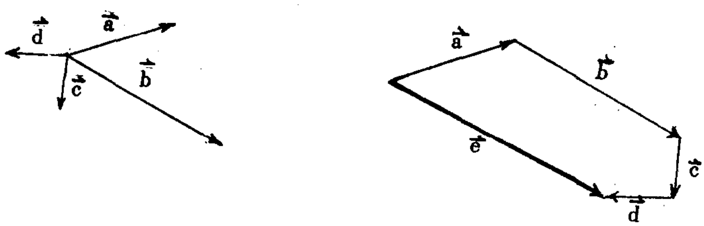
1 － 3 兩力之合成（平行四邊形定律）

設有兩向量 $\boldsymbol{a}$ 與 $\boldsymbol{b}$ ，如將 $\boldsymbol{b}$ 的起點接於 $\boldsymbol{a}$ 的終點，則以 $\boldsymbol{a}$ 的起點爲起點， $\boldsymbol{b}$ 的終點爲終點的向量，即爲 $\boldsymbol{a}$ 與 $\boldsymbol{b}$ 兩向量之和 $\boldsymbol{c}$ ，記爲

$$\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}=\boldsymbol{c}$$

或以 $\boldsymbol{a}$ ， $\boldsymbol{b}$ 爲兩鄰邊之平行四邊形之對角線即爲 $\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}$ 。

同理，我們亦可推廣至多個向量和，如圖 1－4 說明 $\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}+\boldsymbol{c}+\boldsymbol{d}=\boldsymbol{e}$

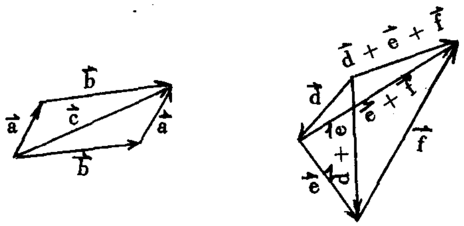


1 － 4　多個向量之和

由圖 1－5 ，我們可證得向量加法具有交換性（ commutative ）及結合性（ associative ）。

$$\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}=\boldsymbol{b}+\boldsymbol{a} \qquad \text{（加法交換律）}$$

$$\boldsymbol{d}+(\boldsymbol{e}+\boldsymbol{f})=(\boldsymbol{d}+\boldsymbol{e})+\boldsymbol{f} \qquad \text{（加法結合律）}$$



1－5 (a)向量加法之交換性
(b)向量加法之結合性

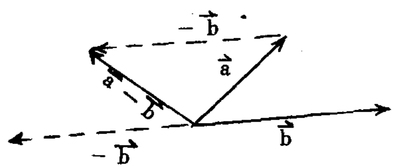
又設m，n為純量，則向量亦滿足乘法結合律及分配律

$$(mn)\boldsymbol{a}=m(n\boldsymbol{a}) \qquad \text{（乘法結合律）}$$

$$(m+n)\boldsymbol{a}=m\boldsymbol{a}+n\boldsymbol{a} \qquad \text{（乘法分配律）}$$

$$m(\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b})=m\boldsymbol{a}+n\boldsymbol{b} \qquad \text{（乘法分配律）}$$

兩向量相減，即兩向量之差，記為$\boldsymbol{a}-\boldsymbol{b}=\boldsymbol{c}$，可改寫成$\boldsymbol{a}+(-\boldsymbol{b})=\boldsymbol{c}$，由圖1－6 可知，先繪$-\boldsymbol{b}$，再求得$\boldsymbol{a}$與$-\boldsymbol{b}$之向量和。



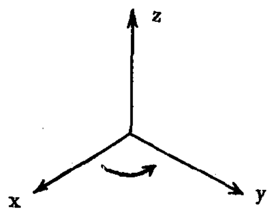
1－6 向量差

當$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{b}$時，$\boldsymbol{a}-\boldsymbol{b}$稱為零向量（ Zero Vector ），記成$\boldsymbol{0}$，其大小為零，沒有方向。

1－3 向量之分量

我們引用空間中三條互相垂直之直線為軸之坐標系統，如無特別

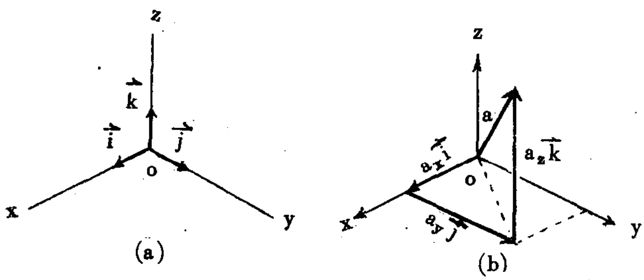
聲明，皆指右旋直角坐標（ right－handed rectangular coor－dinates ），此坐標系統因其 x，y，z 軸之正向恰可藉右手之拇指，食指，中指等所指之方向代表之，圖1－7 表示右旋直角坐標系。



1－7 右旋直角坐標系

在 x，y，z 三軸上各取三點（ 1 ，0 ，0 ），（ 0 ，1 ，0 ）及（ 0 ，0 ，1 ），由原點至此三點之向量爲單位向量（圖1－8 a ）

自原點至（ 1 ，0 ，0 ）之單位向量稱爲 $\boldsymbol{i}$
自原點至（ 0 ，1 ，0 ）之單位向量稱爲 $\boldsymbol{j}$
自原點至（ 0 ，0 ，1 ）之單位向量稱爲 $\boldsymbol{k}$



1－8 (a)單位向量 $\vec{i}$，$\vec{j}$，$\vec{k}$ (b)$\vec{a}$之三分量表示法

在圖1－8 b中，向量 $\boldsymbol{a}$ 可以三個平行於座標軸之分量和表之，

即

$$\boldsymbol{a}=a_x\boldsymbol{i}+a_y\boldsymbol{j}+a_z\boldsymbol{k}$$

1-4 向量之分解與合成—解析法

由上節知一向量可利用坐標方法分解爲三分量;

$$\boldsymbol{a} = a_x\boldsymbol{i} + a_y\boldsymbol{j} + a_z\boldsymbol{k}$$

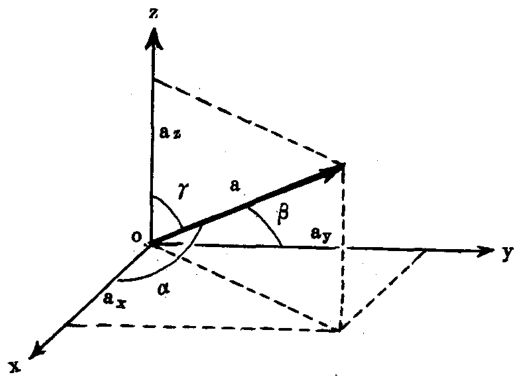
另外，我們可利用三角法分解向量，設向量$\boldsymbol{a}$與x軸之交角爲α，與y軸之交角爲β，與z軸之交角爲γ，則:

$$a_x = |\boldsymbol{a}| \cos \alpha$$

$$a_y = |\boldsymbol{a}| \cos \beta$$

$$a_z = |\boldsymbol{a}| \cos \gamma$$

$\cos \alpha$，$\cos \beta$及$\cos \gamma$ 稱爲$\boldsymbol{a}$之方向餘弦(direction cosines)，因$|\boldsymbol{a}| \cos\alpha$，$|\boldsymbol{a}| \cos\beta$，$|\boldsymbol{a}| \cos\gamma$爲$\boldsymbol{a}$在$x$，$y$，$z$軸之投影，故爲所求之三分量(圖1－9)。



1－9

兩個以上之向量相加時，只要將同方向之分量相加即可，例如:

$$\boldsymbol{a} = a_x\boldsymbol{i} + a_y\boldsymbol{j} + a_z\boldsymbol{k}$$

$$\boldsymbol{b} = b_x\boldsymbol{i} + b_y\boldsymbol{j} + b_z\boldsymbol{k}$$

$$\boldsymbol{c} = c_x\boldsymbol{i} + c_y\boldsymbol{j} + c_z\boldsymbol{k}$$

其合向量爲

$$\boldsymbol{R}=R_x\boldsymbol{i}+R_y\boldsymbol{j}+R_z\boldsymbol{k}$$

其中
$$R_x=a_x+b_x+c_x$$
$$R_y=a_y+b_y+c_y$$
$$R_z=a_z+b_z+c_z$$

又由畢氏定理：

$$|\boldsymbol{R}|=\sqrt{R_x{}^2+R_y{}^2+R_z{}^2}$$

$\boldsymbol{R}$與 x，y，z 軸之夾角，可由下列三式求得

$$\cos\alpha=\frac{R_x}{|\boldsymbol{R}|}$$

$$\cos\beta=\frac{R_y}{|\boldsymbol{R}|}$$

$$\cos\gamma=\frac{R_z}{|\boldsymbol{R}|}$$

例*1*. 已知 $\boldsymbol{a}=3\boldsymbol{i}-2\boldsymbol{j}+\boldsymbol{k}$，$\boldsymbol{b}=2\boldsymbol{i}-4\boldsymbol{j}-3\boldsymbol{k}$，$\boldsymbol{c}=-\boldsymbol{i}+2\boldsymbol{j}+2\boldsymbol{k}$ 求(a) $|\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}+\boldsymbol{c}|$ (b) $|2\boldsymbol{a}-3\boldsymbol{b}-5\boldsymbol{c}|$

解: (a)
$$\begin{aligned}\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}+\boldsymbol{c}&=(3\boldsymbol{i}-2\boldsymbol{j}+\boldsymbol{k})+(2\boldsymbol{i}-4\boldsymbol{j}-3\boldsymbol{k})\\&\quad+(-\boldsymbol{i}+2\boldsymbol{j}+2\boldsymbol{k})\\&=4\boldsymbol{i}-4\boldsymbol{j}+0\boldsymbol{k}\\&=4\boldsymbol{i}-4\boldsymbol{j}\end{aligned}$$

則
$$\begin{aligned}|\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}+\boldsymbol{c}|&=|4\boldsymbol{i}-4\boldsymbol{j}+0\boldsymbol{k}|\\&=\sqrt{(4)^2+(-4)^2+(0)^2}\\&=\sqrt{32}\\&=4\sqrt{2}\end{aligned}$$

(b)
$$\begin{aligned}2\boldsymbol{a}-3\boldsymbol{b}-5\boldsymbol{c}&=2(3\boldsymbol{i}-2\boldsymbol{j}+\boldsymbol{k})-3(2\boldsymbol{i}-4\boldsymbol{j}\\&\quad-3\boldsymbol{k})-5(-\boldsymbol{i}+2\boldsymbol{j}+2\boldsymbol{k})\\&=6\boldsymbol{i}-4\boldsymbol{j}+2\boldsymbol{k}-6\boldsymbol{i}+12\boldsymbol{j}+9\boldsymbol{k}\\&\quad+5\boldsymbol{i}-10\boldsymbol{j}-10\boldsymbol{k}\\&=5\boldsymbol{i}-2\boldsymbol{j}+\boldsymbol{k}\end{aligned}$$

則 $|2\boldsymbol{a}-3\boldsymbol{b}-5\boldsymbol{c}|=|5\boldsymbol{i}-2\boldsymbol{j}+\boldsymbol{k}|$

$$=\sqrt{(5)^2+(-2)^2+(1)^2}$$

$$=\sqrt{30}$$

在二度空間（ x 軸與 y 軸平面內），則更簡單，圖 1－10 說明兩度空間情形，$\boldsymbol{a}$ 的分量 a_x 與 a_y 可由下式求出

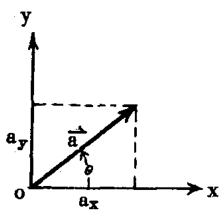
$$a_x=|\boldsymbol{a}|\cos\theta$$

$$a_y=|\boldsymbol{a}|\sin\theta$$

式中 θ 為向量 $\boldsymbol{a}$ 與正 x 軸所夾的角度，是由正 x 軸沿反時針方向測量的。反之，如已知兩個分量 a_x 及 a_y ，則由圖 1－10得

$$|\boldsymbol{a}|=\sqrt{a_x^2+a_y^2}$$

$$\tan\theta=a_y/a_x$$



1－10 二度空間向量之分解

例 2. 一輛汽車在一平路上向東行駛 30 哩至一交叉點，然後轉向北行駛 40 哩後停車，求該車的合成位移。

我們選擇一平面參考坐標系統，其原點置於汽車起始點，正 x 軸方向指向東方，正 y 軸方向指向北方，兩個連續的位移，$\boldsymbol{a}$ 和 $\boldsymbol{b}$ ，繪示如圖 1－11，合成位移 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}$ ，因 $\boldsymbol{a}$ 沒有 y－分量，$\boldsymbol{b}$ 沒有 x－分量，故

$$R_x=a_x+b_x=30\text{哩}+0=30\text{哩}$$

$$R_y=a_y+b_y=0+40\text{哩}=40\text{哩}$$

$\boldsymbol{R}$ 之大小和方向為

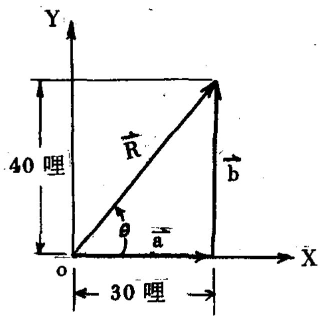
$$|\boldsymbol{R}|=\sqrt{R_x^2+R_y^2}$$

$$= \sqrt{(30\text{哩})^2 + (40\text{哩})^2}$$
$$= 50\text{哩}$$

$$\tan\theta = R_y / R_x = \frac{40\text{哩}}{30\text{哩}} = 1.33$$

$$\theta = \tan^{-1}(1.33) = 53°$$

合成位移$\boldsymbol{R}$的大小爲 50哩，方向爲東偏北53°



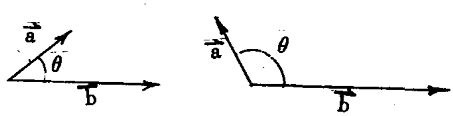
1－11

1－5　純量積

純量積（ scalar product ）又稱內積（ inner product ）或點積（ dot product ）；兩向量$\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$之純量積記爲$\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}$，其定義爲

$$\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b} = |\boldsymbol{a}|\,|\boldsymbol{b}|\cos\theta \tag{1}$$

θ爲$\boldsymbol{a}$與$\boldsymbol{b}$間之夾角，如圖1－12　所示。



1 － 12　向量間之夾角

由此定義知兩向量之純量積爲一純量，亦即爲一實數。又因(1)式

中之 $\cos\theta$ 可正可負，故純量積可爲正或負，視兩向量間之夾角而定。

兩非零向量互相垂直之充要條件爲其內積等於零；設 $\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$ 爲兩非零向量，如

$$\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}=|\boldsymbol{a}|\,|\boldsymbol{b}|\cos\theta$$

則因 $|\boldsymbol{a}|\neq 0$，$|\boldsymbol{b}|\neq 0$，故必 $\cos\theta=0$，$\therefore\ \theta=90^\circ$

反之，如 $\theta=90^\circ$，則 $\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}=|\boldsymbol{a}|\,|\boldsymbol{b}|\cos 90^\circ=0$

例3. 設 θ 爲向量 $\boldsymbol{a}$ 與 $\boldsymbol{b}$ 之夾角，試證 $\cos\theta=\dfrac{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}}{\sqrt{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{a}}\sqrt{\boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{b}}}$

證：於(1)式中，令 $\boldsymbol{a}=\boldsymbol{b}$，則

$$\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{a}=|\boldsymbol{a}|\,|\boldsymbol{a}|\cos 0^\circ=|\boldsymbol{a}|^2$$

及 $\boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{b}=|\boldsymbol{b}|\,|\boldsymbol{b}|\cos 0^\circ=|\boldsymbol{b}|^2$

故 $|\boldsymbol{a}|=\sqrt{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{a}}$，$|\boldsymbol{b}|=\sqrt{\boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{b}}$ (2)

將(2)代入(1)，得

$$\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}=\sqrt{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{a}}\sqrt{\boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{b}}\cos\theta$$

$$\therefore\ \cos\theta=\frac{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}}{\sqrt{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{a}}\sqrt{\boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{b}}} \qquad (3)$$

由定義得知純量積具有交換律及分配律，即

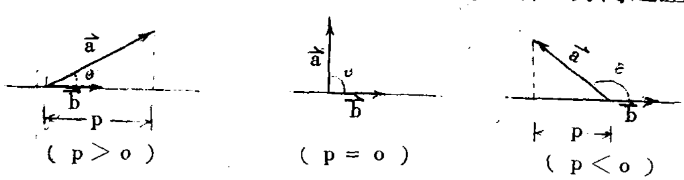
$$\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}=\boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{a} \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{a}\cdot(\boldsymbol{b}+\boldsymbol{c})=\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}+\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{c} \qquad (5)$$

設 $\boldsymbol{a}$ 及 $\boldsymbol{b}$（$\neq 0$）爲已知向量，θ 爲其夾角，則實數

$$P=|\boldsymbol{a}|\cos\theta$$

爲 $\boldsymbol{a}$ 在 $\boldsymbol{b}$ 方向之分量（圖 1－13）。即 P 爲 $\boldsymbol{a}$ 沿 $\boldsymbol{b}$ 方向之正投影長度



1－13 向量 $\vec{a}$ 在沿向量 $\vec{b}$ 方向之分量

。若 $\boldsymbol{a}=0$，則 θ 無意義，此時 $P=0$

由(3)式得

$$P=|\boldsymbol{a}|\cos\theta=\frac{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}}{|\boldsymbol{b}|}\quad \boldsymbol{b}\neq 0 \tag{6}$$

若兩向量 $\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$ 表之如下：

$$\boldsymbol{a}=a_x\boldsymbol{i}+a_y\boldsymbol{j}+a_z\boldsymbol{k}$$

$$\boldsymbol{b}=b_x\boldsymbol{i}+b_y\boldsymbol{j}+b_z\boldsymbol{k}$$

則 $\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}=a_xb_x+a_yb_y+a_zb_z$ (7)

因 $\boldsymbol{i}$，$\boldsymbol{j}$，$\boldsymbol{k}$ 爲互相垂直之單位向量，故

$$\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{i}=1,\ \boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{j}=1,\ \boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{k}=1$$

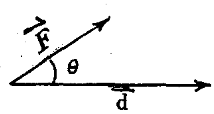
$$\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{j}=0,\ \boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{k}=0,\ \boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{i}=0$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}&=a_xb_x\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{i}+a_xb_y\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{j}+a_xb_z\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{k}\\&\quad+a_yb_x\boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{i}+a_yb_y\boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{j}+a_yb_z\boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{k}\\&\quad+a_zb_x\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{i}+a_zb_y\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{j}+a_zb_z\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{k}\\&=a_xb_x+a_yb_y+a_zb_z\end{aligned}$$

例4. （一力所作之功），一質點受一定力 $\boldsymbol{F}$ 之作用，設質點之位移爲 $\boldsymbol{d}$，按照力學定義，所作之功 W 爲

$$W=\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{d}=|\boldsymbol{F}|\,|\boldsymbol{d}|\cos\theta$$

式中 θ 爲 $\boldsymbol{F}$ 與 $\boldsymbol{d}$ 之夾角。



1－14　力所作之功

例5. 求向量 $\boldsymbol{A}=2\boldsymbol{i}+2\boldsymbol{j}-\boldsymbol{k}$ 及 $\boldsymbol{B}=6\boldsymbol{i}-3\boldsymbol{j}+2\boldsymbol{k}$ 間之夾角

解： $|\boldsymbol{A}|=\sqrt{(2)^2+(2)^2+(-1)^2}=3$

$|\boldsymbol{B}|=\sqrt{(6)^2+(-3)^2+(2)^2}=7$

$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}=(2)(6)+(2)(-3)+(-1)(2)=4$