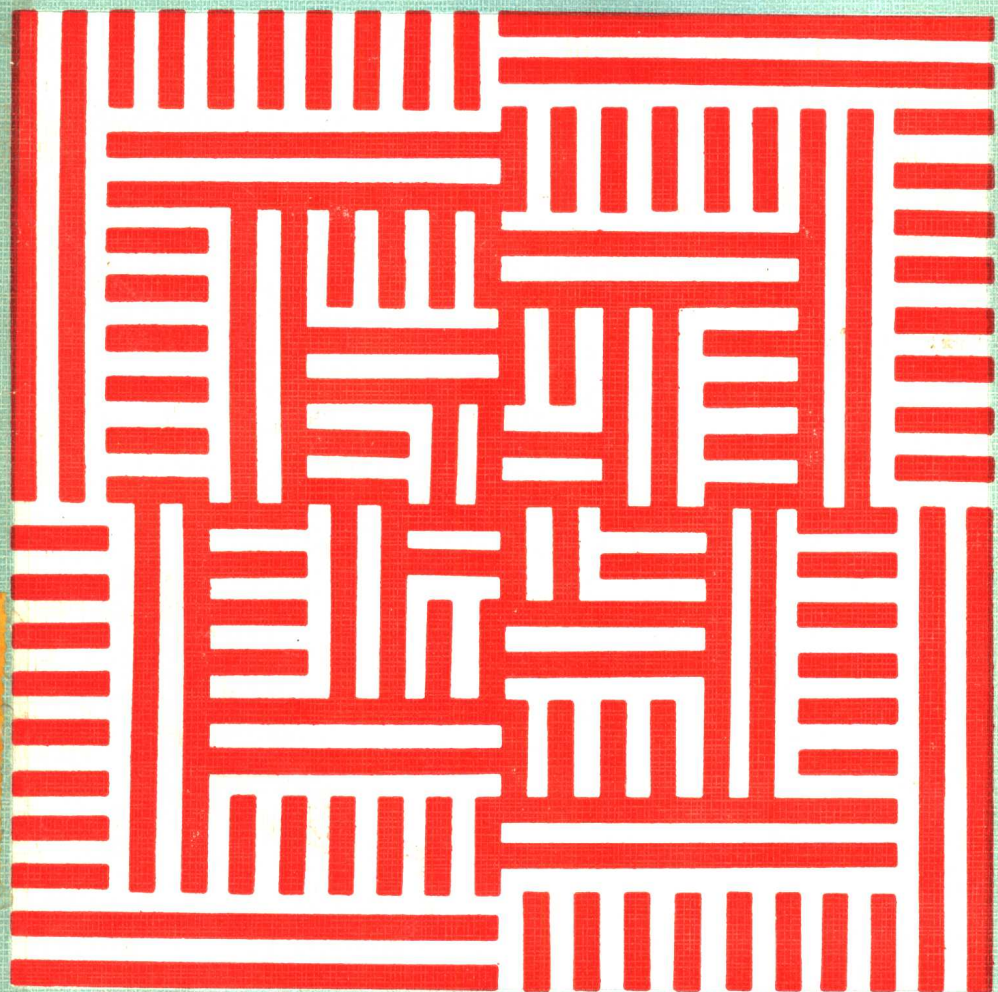


PHYSICS
ALONSO, FINN

物理學

第二冊

謝芳生譯



東華書局印行

物理學

第 二 冊

著 者

艾 隆 索 斐 恩
(MARCELO ALONSO) (EDWARD J. FINN)

譯 者

謝 芳 生 博 士

東 華 書 局 印 行



版權所有・翻印必究

中華民國六十年十月初版
中華民國六十八年三月四版

大學
用書 **物理學** (全四冊)

第二冊 定價新臺幣六十元整

(外埠酌加運費滙費)

著者	艾隆索斐恩
譯者	謝芳生
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	中臺印刷廠 臺中市公園路三十七號

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零貳伍號
(60008)

前 言

物理學是一門基本科學，它對其他一切科學都有深遠的影響，所以不只是以物理為主科和工程方面的學生必須對它的基本觀念有澈底的瞭解，而是任何一個準備以科學為職業的人（包括主修生物，化學，以及數學的學生們）都必須具有同樣的瞭解。

對理學院和工學院的學生而言，普通物理這門課的主要目的（同時也許是它之所以被列在課程中的唯一原因）是給學生們一個統一的物理觀念。這一點應當由分析各個基本原理和它們的涵意，以及它們的限度來辦到，所以這本書設計為理學院和工學院學生的一門二學期用的普通物理課——所介紹的是我們認為構成今日物理學核心的基本觀念。

直到最近為止，物理學被教得彷彿是由幾門科學聚積而成的，它們之間多少有些關係却又沒有一個真正統一的觀點。傳統式的分為力學、熱學、聲學、光學、電磁學，以及近代物理學（……“學”）不再合用。我們脫離了這種傳統的方法。採用一個較更合邏輯而統一的介紹法，強調各項不滅定律，場和波的觀念，以及物質的原子觀。特殊相對論的基本原則在全書中均被用來作為輔導原理之一，任何物理理論必須符合這點。

主要題材可分為三部份：(1) 質點，(2) 相互作用及場，(3) 波。在第一篇中我們由力學開始以便建立一些基本原理，這些原理在敘述我們所觀察到的在我們周圍的運動時是必須的。在這一篇中我們由統計力學的觀點，來討論熱力學；我們相信這種方法比較簡單而合理。然後，因為自然界的一切現象都是相互作用的結果，而這些作用又是以場的觀念來分析的，所以我們在第二篇內考慮現在所認出的各種作用和它們相關的場，重心吸引作用和電磁作用被討論得非常詳細，因為它們是

2 物理學 (二)

大多數所見的巨觀現象 (Macroscopic phenomena) 的起因; 和核子現象以及涉及基本質點的過程有關的各種強、弱作用則討論得很簡明。在第三篇中我們將波當作場的觀念的結果來討論。一般包括在聲學和光學內的材料我們都列在這部份內。但是重點則在電磁波方面。最後一章是量子力學的簡短介紹。在全書內我們一再地談到物質的構造, 即是原子, 分子, 原子核, 以及基本質點。

這本書很新穎, 不只是它的介紹方法不同, 它的觀念也特出, 因為我們加入了一些基本題材是一般普通物理教本中所沒有的; 同時也略去了一些傳統上所談到的問題。所用數學限於微積分內的非常基本的觀念。許多基本原理的應用以及一些特殊題材均以做好的例題形式出現。這樣, 教師可以趁方便的時候說明, 或者選擇地來討論, 是以在課程的編組方面伸縮性較大。證明以及限於物理涵義內的數學計算均和教本的主體分開(*用灰色的底) 以免讀者在閱讀時失去物理推理的主源。這樣安排同時又使教師在要略去某些證明時可以較為自由。

我們採用 IUPAP 的符號, 單位及名稱委員會的推薦。我們一直用的是 SI 單位, 以米, 千克, 秒, 以及庫侖為基本單位 (即 MKSC 制)。然而我們同時也介紹了一些 CGS 制和英制中常用的單位。

所有物理常數, 到小數第四位為止, 都是用 1964 年的值。自從本書付印之後又有一些常數被發表出來 (B. N. Taylor, W. H. Parker, 及 D. N. Langenberg, Rev. Mod. Phys. 41, 375, 1969), 它影響書中所列的幾項數值。

所有各項科學的課程都受到很大的壓力要將新近變得有關的各門課包括進去, 我們期望這本初級物理的書能減少一些這種壓力, 因為它在不需要不適當的努力下在學生們大學教育的早期提高了學生對物理觀念的瞭解以及運用它們的能力。

我們要對某些人, 由於他們的鼓勵和協助才使此書得以完成的人,

譯註: * 在本書中用小號字體以示區分。

表示謝意。我們特別要感謝我們傑出的同事 D. Lazarus 教授,他是這本書的顧問編輯,他的批評和指教幫助我們修正並改進這書的許多地方。我們對 Addison-Wesley 工作人員的才能和努力也十分感激。末了,我們至少應該感謝我們的妻子們,她們一直非常耐心地陪着我們。

艾 隆 索 M. A.
斐 恩 E. J. F.

華 盛 頓
1969 十月

第二冊 目 錄

11. 剛體動力學341~376

- | | |
|--------------|-----------------|
| 11-1 引論 | 11-2 剛體的角動量 |
| 11-3 轉動慣量的計算 | 11-4 剛體轉動的運動方程式 |
| 11-5 物理擺 | 11-6 扭擺 |
| 11-7 轉動的動能 | 11-8 迴轉儀運動 |

12. 高能量動力學377~408

- | | |
|------------|-------------|
| 12-1 引論 | 12-2 古典式相對論 |
| 12-3 特殊相對論 | 12-4 動量 |
| 12-5 力 | 12-6 能量 |
| 12-7 質點系統 | 12-8 高能量過程 |

13. 統計力學409~457

- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| 13-1 引論 | 13-2 溫度 |
| 13-3 統計平衡：馬克士威爾-波茲曼分佈定律 | 13-4 氣體中分子的能量和速度的分佈 |
| 13-5 氣體的狀態方程式 | 13-6 多質點系統：功 |
| 13-7 多質點系統：熱 | 13-8 對多質點系統能量不滅原理之重述：熱力學第一定律 |
| 13-9 熱容量 | 13-10 可逆的和不可逆的過程 |
| 13-11 熵 | 13-12 熵和熱的關係 |
| 13-13 平衡的趨向：熱力學第二定律 | |

14. 遷移現象.....458~486

- | | | | |
|------|--------------------|------|---------------------|
| 14-1 | 引論 | 14-2 | 分子的擴散： <u>費克</u> 定律 |
| 14-3 | 熱傳導：傅立葉定律 | 14-4 | 粘滯性 |
| 14-5 | 平均自由路程、碰撞頻率、以及碰撞截面 | 14-6 | 遷移現象的分子說 |

第二篇 相互作用及場

15. 重力作用.....490~529

- | | | | |
|------|--------------|-------|-----------|
| 15-1 | 引論 | 15-2 | 重力定律 |
| 15-3 | 慣性和重力質量 | 15-4 | 重力位能 |
| 15-5 | 能量和軌道運動之間的關係 | 15-6 | 重力場 |
| 15-7 | 重力位 | 15-8 | 球體所產生的重力場 |
| 15-9 | 等效原理 | 15-10 | 重力和分子間的力 |

16. 電性作用.....530~568

- | | | | |
|-------|--------|-------|----------|
| 16-1 | 引論 | 16-2 | 電荷 |
| 16-3 | 庫侖定律 | 16-4 | 電荷的單位 |
| 16-5 | 電場 | 16-6 | 點電荷的電場 |
| 16-7 | 電荷的量子化 | 16-8 | 電荷不滅原理 |
| 16-9 | 電位 | 16-10 | 電場內的能量關係 |
| 16-11 | 電流 | | |

17. 磁性作用.....569~618

- | | | | |
|------|----|------|---------|
| 17-1 | 引論 | 17-2 | 動電荷上的磁力 |
|------|----|------|---------|

17-3	帶電質點在均勻磁場中的運動	17-4	帶電質點在不均勻磁場中的運動
17-5	帶電質點在磁場中運動的例子	17-6	電流上的磁力
17-7	電流上的磁矩	17-8	閉路電流所產生的磁場
17-9	直線電流的磁場	17-10	圓周電流的磁場
17-11	運動電荷的磁場	17-12	電磁學和相對論
17-13	電流間的力		

單號習題答案 i~vi

11

剛體的動力學

(Dynamics of Rigid Body)

引論

剛體的角動量

轉動慣量的計算

剛體轉動的運動方程式

物理擺

扭擺

轉動的動能

迴轉儀運動

11-1 引 論 (Introduction)

由許多質點組成的系統中的一個重要的特例是剛體(rigid body); 就是說這種物體的組成質點間的距離, 在外加的力或轉矩下恆保持一定。所以剛體在運動時保持它的形狀不變。

我們可以將剛體的運動分爲二類, 當所有質點循平行的路線進行, 於是聯接任何二點的連線總和它的最初位置平行(見圖 11-1a), 這種

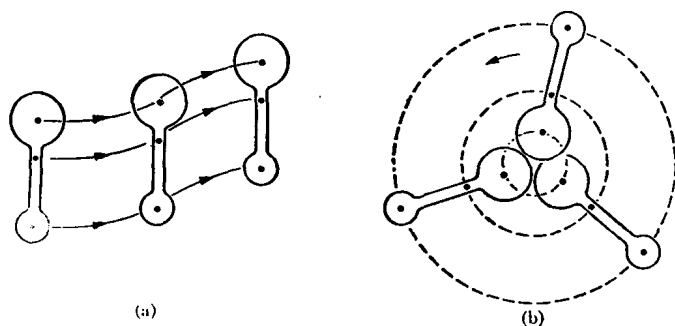


圖 11-1 (a) 剛體的移動, (b) 剛體的轉動

運動稱爲移動(translation)。當所有質點依照圍繞一條線的各圓周路線運動時, 這種運動稱爲繞一軸的轉動(rotation), 這條線被稱爲轉動軸(圖 11-1b), 軸本身可以是固定的, 也可以在運動時改變它對物體的方向。

一個剛體的最普通的運動總可以被認爲是一項轉動和一項移動的組合。舉例而言, 圖 11-2 中的物體由 1 的位置到 2 的位置的運動可以被認爲是由位移 CC' ——連接二質量中心的位置——所代表的移動和圍繞經過質量中心 C' 的軸的轉動所合成的。

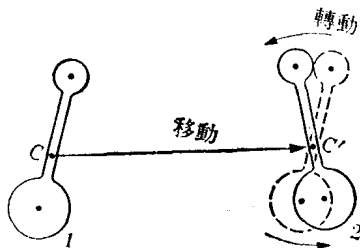


圖 11-2 剛體的一般運動

按照 (10-8) 式

$$M \frac{dv_{CM}}{dt} = F_{ext},$$

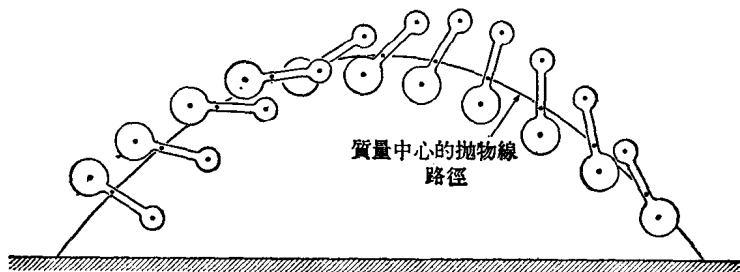


圖 11-3 剛體在重力作用下的運動，質量中心走的是拋物路線，相當於一個質量 M 的質點在 Mg 力的作用下，而物體繞質量中心轉。

質量中心的運動和一個質點的完全一樣，這質點的質量等於物體的質量，同時它受到一力的作用，此力等於加在物體上一切外力之和（圖 11-3）。這運動可以依照第七章內談到一質點的動力學時所解釋的方法來分析，所以並不涉及特殊技術。本章內我們將檢查剛體繞一軸的轉動，這軸可以經過一個慣性系統內的一個固定點，也可以經過物體的質量中心。

11-2 剛體的角動量

(Angular momentum of a rigid body)

讓我們考慮一個剛體以角速度 ω 在繞 Z 軸轉動（圖 11-4），它的每一質點在一個圓心在 Z 軸上的圓周上運動。舉例而言，質點 A_i 走的是半徑 $R_i = A_i B_i$ 的圓，速度是

$$\mathbf{v}_i = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i,$$

其中 $\mathbf{r}_i$ 是對 O 的位置向量（這 O 點可以被選在慣性坐標中的一個固定點處，或者在物體的質量中心處）。速度的大小是：

$$\mathbf{v}_i = \omega \mathbf{R}_i.$$

注意：我們寫的是 ω 而不是 ω_i ，因為剛體內各質點的角速度都是一樣的。質點 A_i 對原點 O 的角動量是：

$$\mathbf{L}_i = m_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{v}_i. \quad (11-1)$$

它的方向垂直於由向量 $\mathbf{r}_i$ 和 $\mathbf{v}_i$ 所定的平面，而在 $\mathbf{r}_i$ 和 Z 軸所定的平面內。物體的總角動量是：

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_1 + \mathbf{L}_2 + \mathbf{L}_3 + \cdots = \sum_i \mathbf{L}_i,$$

而一般說來並不平行於轉動軸，像圖 11-4 所畫的，總和中的各項 $\mathbf{L}_i$ 不和軸平行的。

我們現在要規定一量：

$$I = m_1 R_1^2 + m_2 R_2^2 + m_3 R_3^2 + \cdots = \sum_i m_i R_i^2, \quad (11-2)$$

稱為物體對轉動軸 Z 的**轉動慣量** (moment of inertia)。這量的求法是先將各個質點的質量與它到軸的距離的平方二者相乘，再將所有各質點的這項乘積相加而得到的。轉動慣量是一個非常重要的量，在許多和剛體的轉動有關的式子中都會出現，它必須以質量的單位和距離單位平方的乘積來表示。在 $MKSC$ 制中轉動慣量是以米² 仟克作單位來表示的。

在下面將證明沿轉動軸 Z 的總角動量是：

$$L_z = I\omega. \quad (11-3)$$

不論質點系統是不是剛體，這式子都是正確的。然而在系統不是剛體的情形下轉動慣量 I 就不是一個固定的量，是以失去了它大部份的用處。

(11-3) 式的證明 利用圖 11-4，我們注意質點 A_i 的角動量 $\mathbf{L}_i$ 和轉動軸 Z 成

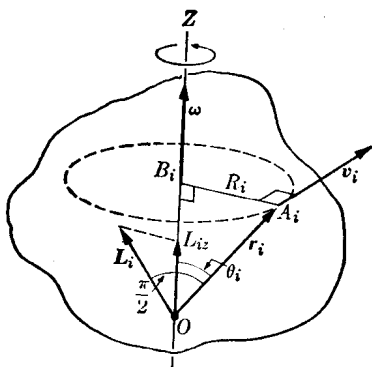


圖 11-4 轉動剛體的角動量

$\pi/2 - \theta$ 的角度。按照(11-1)式 L_i 的大小是 $m_i r_i v_i$ ；如果再利用

$$R_i = r_i \sin \theta_i \quad \text{及} \quad v_i = \omega R_i,$$

則平行於 Z 軸的 L_i 的分量是：

$$\begin{aligned} L_{iz} &= (m_i r_i v_i) \cos(\pi/2 - \theta_i) \\ &= m_i (r_i \sin \theta_i) (\omega R_i) = m_i R_i^2 \omega, \end{aligned}$$

所以轉動物體的總角動量沿轉動軸 Z 的分量是：

$$\begin{aligned} L_z &= L_{1z} + L_{2z} + L_{3z} + \cdots \\ &= (m_1 R_1^2 + m_2 R_2^2 + m_3 R_3^2 + \cdots) \omega \\ &= (\sum_i m_i R_i^2) \omega = I \omega. \end{aligned}$$

主軸 我們可以證明每一個物體不論它的形狀如何都(至少)有三個互相垂直的方向, 在這方向的角動量和轉動軸平行, 這些軸被稱為慣性的主軸 (principle axes of inertia), 而它們的轉動慣量就被稱為主要轉動慣量 (principle moment of inertia), 以 I_1, I_2 , 和 I_3 來代表, 令 $X_0 Y_0 Z_0$ 代表主軸, 它們就形成一個聯在物體上的參考坐標, 所以一般而言是在對觀察者作轉動的。當物體具有某些對稱性的時候主軸就會和一些對稱軸相重合。舉例而言, 在圓球中任何經過圓心的軸就是一個主軸。就柱體來說, 一般上凡是具有柱形對稱性的物體它的對稱軸和垂直於對稱軸的任一軸都是主軸。長方形塊狀的三個主軸是垂直於表面而通過中心的, 這些軸都畫在圖 11-5 上。

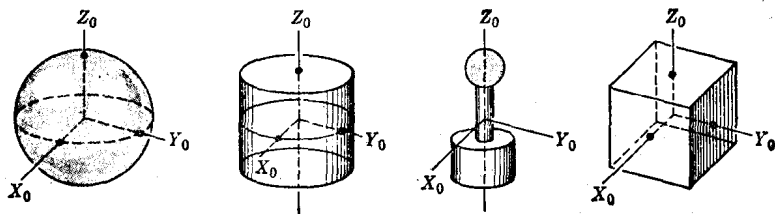


圖 11-5 對稱物體的主軸

當物體繞慣性主軸轉動時, 總角動量 L 和角速度 ω 平行, 而後者總是沿轉動軸的, 所以我們可以不用(11-3)的無向量式——此式對於

沿轉動軸的 Z 分量永遠成立——而寫成向量關係：

$$L = I\omega \quad (\text{只可用於主軸}), \quad (11-4)$$

其中 I 是對這主軸的主要轉動慣量。我們必須強調這向量式只能在對慣性主軸轉動時才成立。

例11-1 圖 11-6 所畫的系統的角動量，這系統是由二個一樣的球組成的，球的質量為 m ，裝在聯到軸承而繞軸轉的二臂上。臂的質量可以略去不計。

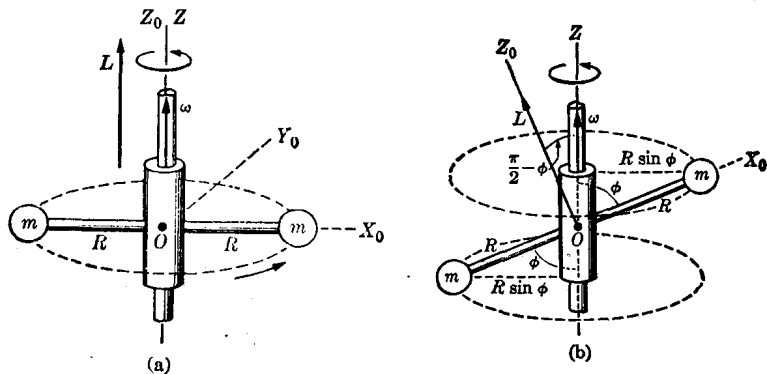


圖 11-6

解：在圖 11-6(a) 中二臂是垂直於轉動軸 Z 的。每個球以速度 $v = \omega R$ 在半徑為 R 的圓圈上運行，於是各球對 O 的角動量是

$$mRv = mR^2\omega,$$

方向是沿 Z 軸的。系統的總角動量是

$$L = 2mR^2\omega,$$

且是沿 Z 軸的這就表示這系統是繞一主軸在轉。

注意： $I = 2mR^2$ 是繞 Z 軸的轉動慣量。

在圖 11-6(b) 中二臂和轉動軸 Z 成 ϕ 角，所以 ω 不是和主軸平行的。各球所行圓圈的半徑是 $R \sin \phi$ ，所以它們速度的大小是 $(R \sin \phi)\omega$ 。於是各球對 O 的角動量是

$$mRv = mR(R\omega \sin \phi),$$

方向是沿 Z_0 軸的，垂直於連接二球的線而在由 Z 和 X_0 軸所定的平面

內。系統的總角動量是

$$L = (2mR^2 \sin \phi) \omega$$

而與轉動軸成 $\pi/2 - \phi$ 的夾角。所以在這情形下之系統，並不是繞一主軸轉動的，這一點由系統的幾何形狀上也可以看出來。向量 L 以和系統同樣的時率在繞 Z 軸轉動〔或者，有的時候說在進動 (precessing)〕。

沿轉動軸的 L 的分量是

$$L_z = L \cos (\pi/2 - \phi) = (2mR^2 \sin^2 \phi) \omega = I\omega,$$

這和 (11-3) 式相符合因為

$$I = 2m (R \sin \phi)^2$$

是系統對 Z 軸的轉動慣量。

11-3 轉動慣量的計算

(Calculation of the moment of inertia)

一個剛體是由許多很近地在一起的質點所組成的，所以 (11-2) 式中的和也可以用積分來代替

$$I = \sum_i m_i R_i^2 = \int R^2 dm,$$

如果 ρ 是物體的密度，

$$dm = \rho dV$$

$$I = \int \rho R^2 dV \quad (11-5)$$

物體若是均勻的話，密度是一定值，於是我們可以不用 (11-5) 式而寫為

$$I = \rho \int R^2 dV.$$

這積分就簡化為一個幾何因數，凡是形狀和尺寸相同的物體，這因數都

一樣，由圖 11-7 可知，

$$R^2 = x^2 + y^2,$$

所以繞 Z 軸的轉動慣量是

$$I_z = \int \rho(x^2 + y^2) dV, \quad (11-6)$$

I_x 和 I_y 的關係式是和上式相似的。

如果物體是一薄片，如圖 11-8 所示，對 X 和對 Y 軸的轉動慣量可以寫為

$$I_x = \int \rho y^2 dV \quad \text{和} \quad I_y = \int \rho x^2 dV$$

因為 Z 坐標原則是零。將上式和 (11-6) 式相比較可得

$$I_z = I_x + I_y,$$

這項結果只有在薄片時成立。

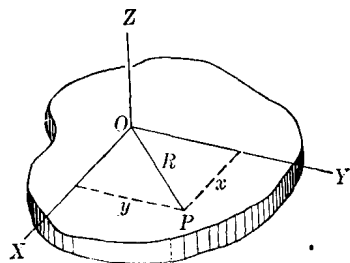


圖 11-8

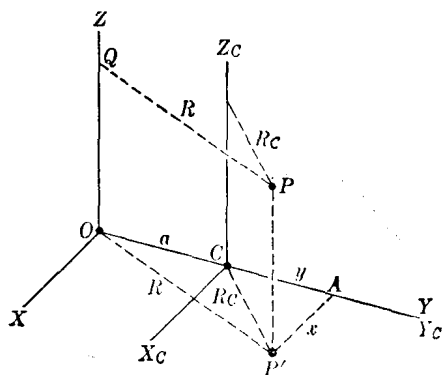


圖 11-9

對於二平行軸的轉動慣量之間的關係可以用一個很簡單的式子來表示，令 Z 為一任意軸， Z_c 為平行於 Z 而經過物體的質量中心的一軸（圖 11-9）。如果 a 是二軸之間間隔則下述關係稱為史但納定理 (Steiner's theorem) 成立：