

實驗 26-2：轉動慣量與圓周運動

編寫者：國立清華大學物理系戴明鳳，編寫日期：97.02.22

一、目的

圓周運動為自然界基本的運動模式之一，舉凡大自宇宙中星體的運轉、小自原子內電子的運動、車輛的轉彎運動、遊樂場中摩天輪系統的旋轉運動，皆是以圓周運動的方式進行。本實驗藉由物體的重力作用或以電動馬達的精確操控，帶動物體做旋轉運動。並以光電閘與光電計時器測量物體的運動速率和時間，以觀察不同物體的圓周運動，並探討旋轉體的質量、旋轉體半徑、轉動慣量、旋轉週期、和向心力等物理量之間的關係，並驗證轉動系統中牛頓第二運動定律的有效性，以及能量守恆、角動量守恆和線動量守恆等定律。本實驗包含下列兩項實驗和目的：

- A. 測量各種不同形狀之轉動體的轉動慣量：觀察物體受力矩作用而產生轉動的現象，並根據力矩所產生的角加速度求算物體的轉動慣量。
- B. 測量轉動體的向心力：觀察物體的等速率圓周運動，並探討物體進行圓周運動時，所受的向心力與物體質量、轉動半徑及轉動速率間的相互關係。

兩個實驗的操作台如圖 1 所示。



(a)



(b)

圖 1 (a)轉動慣量測量之實驗裝置圖，(b)向心力測量之實驗裝置圖

二、原理

(1)轉動運動和平移運動的比較

當物體的運動速度遠低於光速時，可用牛頓第二運動定律描述物體的運動情形，對於平移運動的牛頓第二運動定律可以方程式 $F = ma$ 描述物體的運動情形；但在轉動系統中，牛頓

第二定律對物體的運動方程式則必須以淨力矩(torque) τ 、轉動體的轉動慣量(moment of inertia) I 和角加速度(angular acceleration) α ，分別取代淨作用 F 、運動體質量 m 和線性加速度 a ，而改寫為下式：

$$\tau = I \alpha \quad (1)$$

而其轉動的角速度(angular velocity) $\omega =$ 轉動半徑 $r \times$ 切線加速度 a_t 。表一列出轉動和移動之運動方程式，表二則呈列物體做移動時的各種動力方程式，及物體對某一固定軸轉動時的轉動動力學方程式，請比較兩種不同運動的運動及動力學方程式間的比較。

表一

表 10.1 轉動和移動運動方程式之比較	
對固定軸轉動且 $\alpha =$ 常數 (變數為 θ_f 及 ω_f)	平移運動 $a =$ 常數 (變數為 x_f 及 v_f)
$\omega_f = \omega_i + \alpha t$	$v_f = v_i + at$
$\theta_f = \theta_i + \omega_i t + \frac{1}{2} \alpha t^2$	$x_f = x_i + v_i t + \frac{1}{2} at^2$
$\theta_f = \theta_i + \frac{1}{2} (\omega_i + \omega_f) t$	$x_f = x_i + \frac{1}{2} (v_i + v_f) t$
$\omega_f^2 = \omega_i^2 + 2\alpha(\theta_f - \theta_i)$	$v_f^2 = v_i^2 + 2a(x_f - x_i)$

表二

表 10.3 移動與轉動動力學方程式 ^a 的比較		
	對某一固定軸之轉動	平移運動
動能	$K_R = \frac{1}{2} I \omega^2$	$K = \frac{1}{2} m v^2$
平衡	$\Sigma \tau = 0$	$\Sigma \mathbf{F} = 0$
牛頓第二定律	$\Sigma \tau = I \alpha$	$\Sigma \mathbf{F} = m \mathbf{a}$
牛頓第二定律	$\Sigma \boldsymbol{\tau} = \frac{d\mathbf{L}}{dt}$	$\Sigma \mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$
動量	$L = I \omega$	$\mathbf{p} = m \mathbf{v}$
保守定理	$L_i = L_f$	$\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_f$
功率	$\mathcal{P} = \tau \omega$	$\mathcal{P} = F v$
^a 移動和轉動之方程式均以向量式表示，然而部分之轉動方程式只表成非向量之形式。		

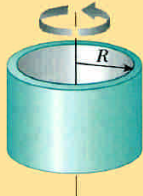
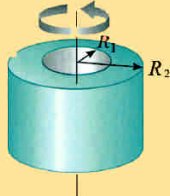
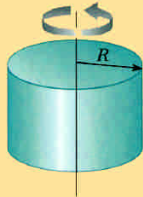
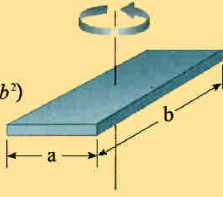
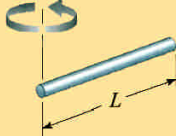
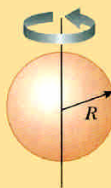
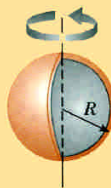
(2)轉動慣量

若不考慮摩擦力和空氣阻力等因素的話，則物體平移運動的難易程度僅取決於運動體的

質量，而通常和運動體的形狀和運動方向無關。但對於轉動運動則就複雜多了，決定物體轉動的難易程度，不僅取決於物體的質量，也取決於物體繞轉軸的位置和方向，通常以轉動慣量(rotational inertia)之物理量作為物體轉動的難易的指標。

對相同質量的物體，但若形狀不同、物體所繞轉的旋轉軸不同、質量密度分佈不同，則就呈現不同的轉動慣量。對於形狀較簡單或具高對稱性的物體，則其轉動慣量可以用積分求得。表三列出幾種不同幾何形狀的均勻剛體於繞不同軸旋轉時的轉動慣量。但對於對稱性、低形狀複雜、甚至具不均匀密度分佈的物體，則其轉動慣量很難以數學的積分方式求算出來。此時就必須透過實驗測量物體體的簡單轉動運動，在間接推導出轉動體的實際轉動慣量，此即本實驗的目的和內容之一。

表三

表 10.2 不同幾何形狀之均勻剛體的轉動慣量	
空心薄圓筒 $I_{CM} = MR^2$ 	中空圓柱 $I_{CM} = \frac{1}{2} M(R_1^2 + R_2^2)$ 
空心圓柱 或圓盤 $I_{CM} = \frac{1}{2} MR^2$ 	矩形板 $I_{CM} = \frac{1}{12} M(a^2 + b^2)$ 
細長棒以中 心為轉軸 $I_{CM} = \frac{1}{12} ML^2$ 	細長棒以一 端為轉軸 $I = \frac{1}{3} ML^2$ 
實心球 $I_{CM} = \frac{2}{5} MR^2$ 	薄球殼 $I_{CM} = \frac{2}{3} MR^2$ 

(3)如何以實驗測量物體的轉動慣量

依據圖 2 所示的實驗裝置，一質量為 m 的物體繫掛在實驗桌邊的滑輪上，當垂直物體下落時，將在繩子上產生一作用力，原為垂直向下的重力透過繩線和滑輪的力傳遞，使重力的作用被延伸到旋轉台的底座上，並使作用力的方向轉變為平行桌面，旋轉台因而獲得如(2)式所示的力矩，進而使旋轉台繞其中心垂直軸 OO' 旋轉。

$$\tau = \mathbf{T} \times \mathbf{r} = Tr \sin 90^\circ = Tr \quad (2)$$

由(1)和(2)式可得

$$I_0 = \frac{T \cdot r}{\alpha}, \quad T = \frac{\alpha}{r} I_0 \quad (3)$$

式中的 I_0 是整個旋轉台繞其中心垂直軸 OO' 旋轉時的總轉動慣量。

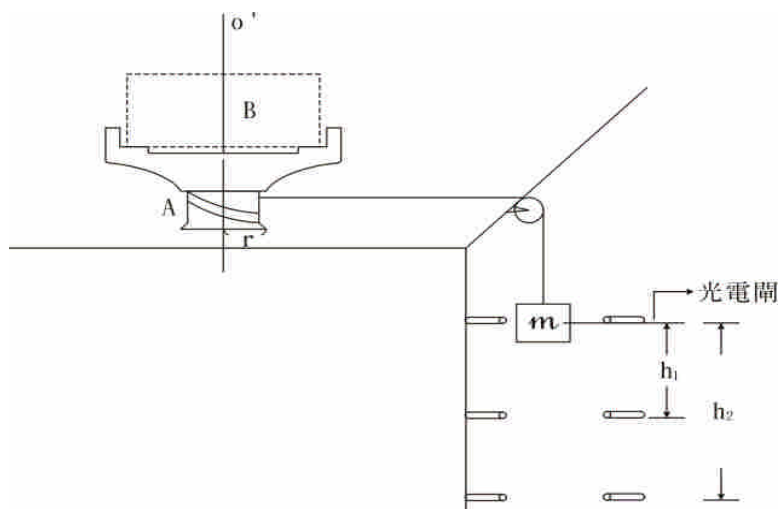


圖 2 轉動慣量實驗裝置的示意圖

當質量為 m 的物體下落時，因重力 mg 與繩子張力 T 的作用，物體 m 產生一加速度 a ，此加速度可透過力的平衡公式推算得：

$$mg - T = ma \quad (4)$$

而

$$a = r\alpha \quad (5)$$

由式(3)、(4)、(5)可解得整個旋轉台繞其中心垂直軸 OO' 旋轉時的總轉動慣量 I_0

$$I_0 = mr^2 \left(\frac{g}{a} - 1 \right) \quad (6)$$

可利用架設在物體下落路徑上的三個光電計時閘測得物體下落時的加速度 a 。

利用光電計時閘測得物體下落時之加速度 a 的程序如下：下落物體的速度 v 隨時間 t 的變化關係如圖 3 所示，是一斜率為加速度 a 的線性關係。所以，可假設物體通過第一個光電閘時的瞬間速度為 v_0 。則通過第二個光電閘時，可由光電計時器測得物體從第一個光電閘掉落至經過第二個光電閘時所需的時間為 t_1 ，並測量第一個和第二個光電閘之間的距離 h_1 ，由自由落體的運動公式得

$$h_1 = (v_0 + v_1) \frac{t_1}{2} \quad (7)$$

同理可知，當物體經過至第三個光電閘時，也可由光電計時器測得物體從第一個光電閘掉落至第三個光電閘時所經歷的時間 t_2 ，並經測量可得第一個和第三個光電閘之間的距離 h_2 ，由自由落體公式得

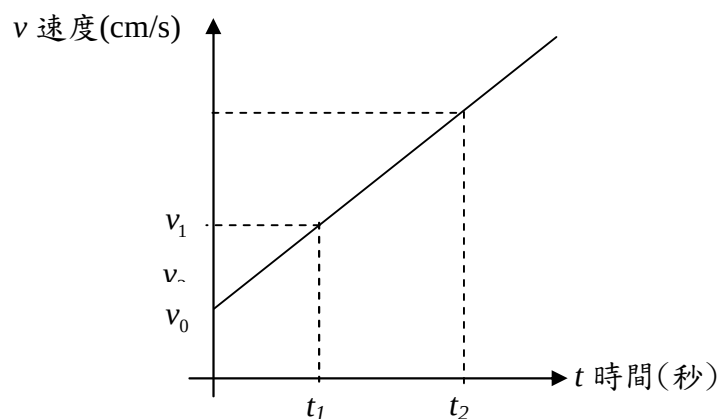


圖 3 下落物體的速度 v 隨時間 t 的變化關係圖。

$$h_2 = (v_0 + v_2) \frac{t_2^2}{2} \quad (8)$$

由公式(7)、(8)可推得公式(9)

$$v_2 - v_1 = \frac{2h_2}{t_2} - \frac{2h_1}{t_1} \quad (9)$$

由圖 3 和速度公式可知
$$v_2 = v_1 + a(t_2 - t_1) \quad (10)$$

由公式(9)、(10)可得公式(11)

$$a = \frac{2(h_2 t_1 - h_1 t_2)}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)} \quad (11)$$

(11)式的結果，代入(6)式，便可獲得旋轉台座的總轉動慣量。故利用三個光電閘，測量物體從第一個光電閘到經過第二個和第三個光電閘所需的時間 t_1 和 t_2 ，並測量第一個光電閘到經過第二個和第三個光電閘的距離 h_1 和 h_2 ，四個數據代入(11)式，即可獲得物體下落的加速度 a 。再將計算所得的 a 值，代入(6)式，即可獲得解得整個旋轉台繞其中心垂直軸 OO' 旋轉時的總轉動慣量 I_0 。

若欲測量其他物體的轉動慣量，則測量程序如下：

1. 先利用上述的步驟先測量旋轉座的 I_0 。
2. 然後再將待測物(DUT, device under test)放在轉盤上，利用上述相同的方式測出旋轉台和待測物體的總轉動慣量 I_{tot} 。
3. 因 $I_{\text{tot}} = I_{\text{DUT}} + I_0$ ，故可得待測物的轉動慣量 $I_{\text{DUT}} = I - I_0$ 。

(4) 圓周運動與向心力

等速率圓周運動是一個物體以一定速率繞著圓形路徑運轉的運動。當一個質量為 m 的物

體在半徑 r 的圓形路徑上，以等速率 v 作水平圓周運動時，雖然物體的速率保持固定，但因速度的方向一直在改變，故此一質點實際上是在作變加速度運動，且加速度的方向恆指向圓周運動軌跡的圓心，故稱之為向心加速度 a 。其大小和速率 v 及圓周半徑 r 間的關係為

$$a = \frac{v^2}{r}$$

根據牛頓第二運動定律，物體有加速度，則必有一淨力作用在此物體質點上，此淨力 F 的方向與向心加速度 a 的方向相同。因在任何時刻此力恆指向圓心，故稱之為向心力。此向心力的大小與運動物體的質量 m 、速率 v 、旋轉週期 T 、旋轉半徑 r 及角速率 ω 間的關係如下所示：

$$F = \frac{mv^2}{r} = mr\omega^2 \quad (12)$$

式中切線速率 $v = \omega r$ ，可由物體圓周運動的週期 T 求得：

$$v = \frac{2\pi \cdot r}{T} = \omega \cdot r \quad (13)$$

由上(12)和(13)式可得到作用在物體的向心力 F 與繞行週期 T 的關係式如下：

$$F = \frac{4\pi^2 mr}{T^2} \quad (14)$$

本實驗即將藉著分別改變(1)旋轉物體的質量 m 、(2)向心力 F 、以及(3)圓周半徑 r 等三個物理量，使物體做各種不同的圓周運動。由量測物體在不同實驗條件下進行等速率圓周運動時的週期 T ，以探討圓周運動的基本關係式(14)。

三、實驗器材

A. 轉動慣量實驗所需之器材：見圖 4-6

- | | |
|--|-----|
| 1. 金屬製轉動慣量待測體：5 個，含圓盤、圓環、長金屬柱等各 1 個、短金屬柱 2 個 | |
| 2. 轉動慣量實驗台 | 1 座 |
| 3. 滑輪組 | 1 組 |
| 4. 轉動橫桿(附刻度尺) | 1 支 |
| 5. 光電計時器 | 1 台 |
| 6. 光電閘 | 3 支 |
| 7. 光電閘支架 | 1 座 |
| 8. 砝碼組 | 1 組 |
| 9. 細線 | 數條 |
| 10. 游標尺 | 1 支 |



圖 4 轉動慣量測量之儀器裝置圖



(a)轉動慣量測量基台



(b)光電閘架



(c)多功能光電計時器



(d)光電閘

圖 5 (a)轉動慣量實驗測量基台，(b)光電閘架，(c)多功能光電計時器，(d)光電閘。

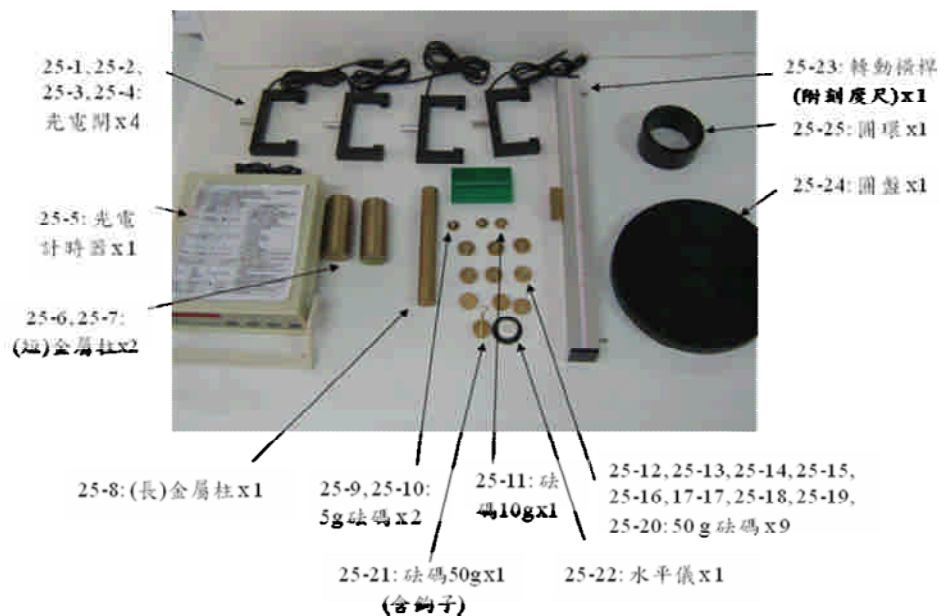


圖 6 轉動慣量實驗組件一覽表

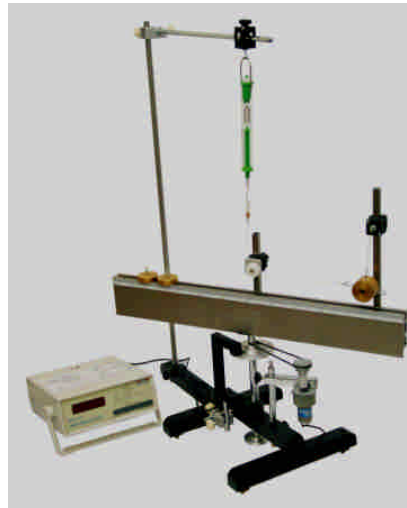
C. 圓周運動與向心力實驗器材：見圖 7 和圖 8 所示

- | | |
|-------------------|-----|
| 1. 向心力實驗操作基台(圖 7) | 1 座 |
| 2. 向心力旋轉橫桿 | 1 支 |
| 3. 中心軸固定架 | 1 支 |
| 4. 定滑輪 | 1 組 |
| 5. 12V 直流轉動馬達 | 1 組 |
| 6. 透明彈簧秤 | 1 支 |
| 7. 細線 | 數條 |
| 8. 重物(50g) | 6 個 |
| 9. 銅製平衡砝碼 | 2 個 |

- | | |
|-------------|-----|
| 10. 直流電源供應器 | 1 台 |
| 11. 光電計時器 | 1 台 |
| 12. 光電閘 | 1 支 |
| 13. 水平儀 | 1 個 |



(a)實驗裝置組裝圖



(b)圓周運動工作台



(c)光電計時器及光電



(d)直流電源供應器

圖 7 圓周運動與向心力實驗所需之器材和實驗組裝圖。



圖 8 向心力實驗所需之器材

四、實驗步驟

A. 轉動慣量測量

1. 依圖 9(a)所示架設轉動慣量量測之操作基台。並使用游標尺測量旋轉台腰部繞線處之軸承的直徑，即圖 9(a)中箭頭所指之處的直徑，記錄其半徑。



(a) 轉動慣量測量基台



(b) 圓柱體之轉動慣量測量之裝置圖

圖 9 轉動慣量測量實驗之旋轉台

2. 取一段細線，如圖 9(a)所示，一端繞旋轉台的腰部纏繞數圈，細線的另一端經過滑輪裝置，轉成如圖 10 所示垂直懸吊，在垂懸的終端繫上可置放砝碼的小鉤盤。
3. 調整測量基台和光電閘架的位置，使細線和砝碼受重力作用下落時，能準確地經過光電閘的感測端。



圖 10 轉動慣量測量裝置圖

4. 調整底座四周的四個旋鈕，使操作機基台上端的圓形平盤達水平狀態。
5. 在掛鉤上放置足夠質量的砝碼，以使掛鉤和砝碼可以快速落下，記錄掛鉤和砝碼的總質量。相較於砝碼的質量而言，細線的質量可以忽略。
6. 調整第一支光電閘的高度，使其離砝碼開始下落的位置有一小段距離。第二支和第三支光電閘分別安置在離第一支光電閘 20 cm 和 40 cm 的位置，意即 $h_1 = 20 \text{ cm}$ 和 $h_2 = 40 \text{ cm}$ 。

7. 將三個光電閘上的信號線依序接到位於光電計時器後面板 P1、P2 和 P3 的插座上。
8. 將光電計時器的測量功能鍵設定在"Gravity Acceleration"模式(重力加速度的模式)時，按下標示 electromagnet 的藍色按鍵，使光電計時器左方的數字顯示面板上的資料歸零，此時 electromagnet 按鍵上方的紅色 LED 燈會亮起來。
9. 實驗擬開始前，再按一次 electromagnet 的藍色切換開關，使切換開關鍵上方的紅色 LED 燈變暗，表示光電閘被啟動準備開始感應。當砝碼與鈞盤開始下落時，會帶動圓盤繞中心軸旋轉。以光電計時器測出砝碼落下過程中，經過第一道光電閘和第二道光電閘時所經歷的時間 t_1 ，以及第一道光電閘至第三道光電閘的時間間距 t_2 。
10. 將所得的數據代入公式(11) $a = \frac{2(h_2 t_1 - h_1 t_2)}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)}$ ，求出 a 值。並將 a 值代入公式(6)，計算出旋轉台的轉動慣量 I_0 。
11. 重複步驟 8-10 共十次，求出旋轉基台之轉動慣量 I_0 的平均值及標準偏差值。
12. 改變砝碼質量五次，每次改變，均重複步驟 8-11 共十次，計算旋轉基台之轉動慣量 I_0 的平均值及偏差值。
13. 根據 11 和 12 的所有數據，找出旋轉基台的轉動慣量 I_0 的統計平均值和標準偏差值。
14. 取圓盤狀的待測物，量取圓盤的半徑、厚度，並秤量圓盤的質量。將待測物如圖 11(a)所示的擺放方式，固定於圖 9(a)的轉動圓盤上，重複 8-13 的實驗步驟。可得待測物和旋轉基台的總轉動慣量 I_{tot} 。
15. 由 $I = I_{\text{tot}} - I_0$ 求得待測物的實驗值，和圓盤之轉動慣量的理論值作比較，計算誤差百分率。
16. 取圓柱環，測量其內、外直徑和高度，並以天平秤量其質量。將圓柱環如圖 11(b)所示置放在圓盤上，重複 8-15 的實驗步驟。求算出圓柱環狀體繞其圓心軸旋轉的轉動慣量。
17. 改變圓盤的置放方式如圖 11(c)和圖 12 所示，重複步驟 14 和步驟 15。
18. 取長條圓棒，測量圓棒的直徑、長度和質量之後，將之如圖 11(d)所示固定於旋轉基台上，重複 8-15 的實驗步驟。
19. 如圖 13 所示將附有刻度尺的轉動橫桿安裝於旋轉基台上。取兩根長度相同的圓棒，測量圓棒的直徑、長度和質量。以轉動橫桿的中心點為準，將兩圓棒對稱地分固定於在轉動橫桿中心點的兩側。紀錄兩圓棒的重量和位置，重複 8-15 的實驗步驟。
20. 改變兩圓棒的位置，重複 19 的實驗步驟。選擇五個不同的位置，重複本步驟之測量。觀察轉動慣量的大小與物體位置間的關係式。

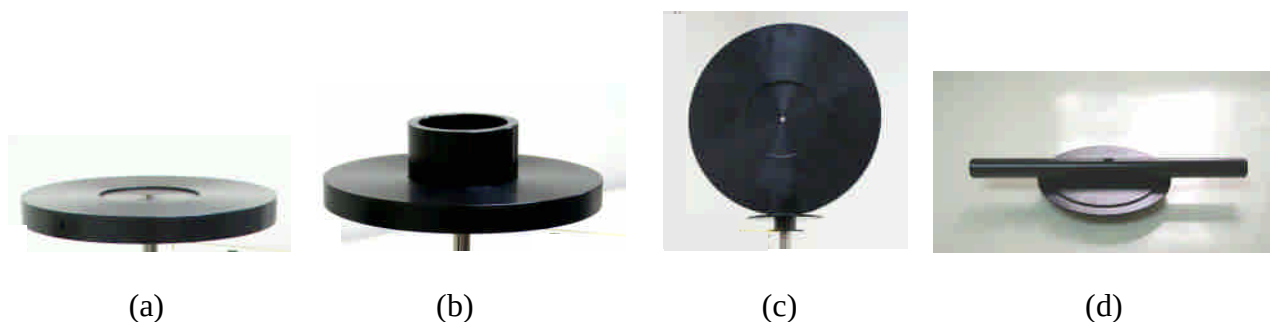


圖 11 各種待測物體固定於旋動基台上的置放方式。



圖 12 圓盤之轉動慣量測量裝置圖之一

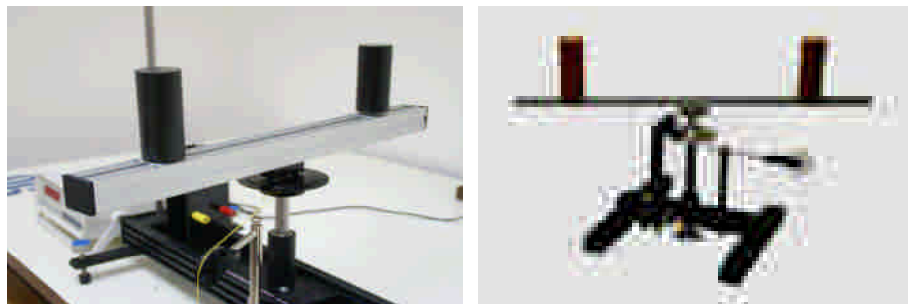


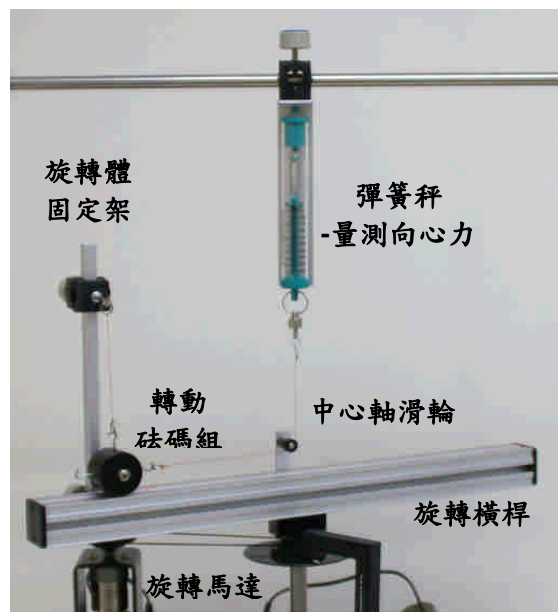
圖 13 兩圓棒之轉動慣量測量裝置圖。

B. 圓周運動與向心力實驗

1. 實驗儀器的架設如圖 14(a)所示，先使用水平儀檢查向心力實驗操作台上的鋁製旋轉橫桿是否為水平，若沒有水平，可調整底座四周的四個藍色旋鈕。
2. 先秤量擬將進行圓周運動之砝碼組的質量。



(a)



(b)

圖 14 圓周運動和向心力實驗測量裝置

3. 轉動砝碼組上附有三個鉤子。取一段細繩線，如圖 14(b)所示，線的一端繫於砝碼組的其中一個鉤子；繩線的另一端使經中心軸之滑輪，懸繫到彈簧秤上。另取一段繩線，連接砝碼組上的另一鉤子，並將之垂直繫掛在旋轉體之固定架上。此固定架可透過側邊的螺絲水平調整砝碼組距離中心轉動軸的距離。
4. 掛上待轉動物體(砝碼組)後，記錄彈簧秤上的讀值，並記錄從中心軸滑輪到轉動砝碼組之間的距離，此距離即為轉動半徑。
5. 將低壓直流電源供應器的輸出連接至 12V 直流轉動馬達的信號輸入端，以直流電壓量控制馬達的轉速，應避免轉速過快發生危險，建議電壓不宜超過 7.5V。電源供應器的按鈕壓下去轉為粗調，普通轉時為微調。設定一固定的電壓值，則轉動馬達應會提供一固定週期的轉動。但由於本實驗所用之電源供應器的輸出電壓並不是非常穩，所以即使給定固定電壓值，但轉動運動的週期並不保持完全相同，所以量測圓周運動的週期，最好多取 15 次以上，再求其平均值。
6. 將光電閘的信號接線連接至光電計時器后面板的 P1 插座上。



注意事項

- (1)實驗過程中，若出現彈簧秤上下晃動的情況，導致彈力數據讀取不易時，可調整平衡砝碼，使彈簧秤穩定，以易於讀取數據。
 - (2)實驗過程中，切勿將電源供應器的輸出電壓調得過大，以免實驗台座上的零件因旋轉太快而突然飛脫出去，造成嚴重的危險和傷害。
7. 調整直流電壓源的電壓輸出至一適當的電壓值，使直流電動馬達啟動，並帶動轉動橫桿開始旋轉。待轉速穩定後，打開光電計時器並選擇測量功能(function)為 Timing II，光電計時器所測得的數值即為橫桿旋轉一圈的週期。光電計時器若要歸零重新測量，可再按一次 Timing II 即可。記錄彈簧秤和光電計時器所測得的數據，彈簧秤讀到的數值即為實驗中旋轉體所承受的向心力。但由於本實驗所用之電源供應器的輸出電壓並不是非常穩定，所以即使給定固定電壓值，但轉動運動的週期並不保持完全相同，所以量測圓周運動的週期，最好多取 15 次以上，再求其平均值。
 8. 測量砝碼的質量，根據質量、轉動半徑和週期計算向心力的理論值，並和彈簧秤所量得的實驗值做比較。

9. 固定物體質量、旋轉半徑，改變轉動馬達的輸入電壓和轉動頻率，重覆步驟 7~8。至少取十組不同的輸入電壓。由實驗所得的數值，探討週期改變時，向心力與週期之間的變化關係。
10. 固定旋轉半徑及週期(即固定電壓)，改變物體質量，重複步驟 7 和 8，觀察向心力和物體質量間的關係。
11. 固定物體質量及週期(即固定一電壓)，改變旋轉半徑，重複步驟 7 到 8，觀察向心力和旋轉半徑間的關係。

五、問題與討論

1. 此實驗中可能引起誤差的因素有哪些？
2. 轉動慣量越大時，其物理意義為何？
3. 轉動慣量和旋轉軸的方向及位置是否有關？
4. 如果尼龍繩在輪軸上滑動，對本實驗將產生何種影響？
5. 如果待測物為不規則物體，是否可由本實驗測其轉動慣量？
6. 請說明本實驗中測量轉動慣量的方法和上學期所使用之方法間的差異和優缺點比較。

附錄 A：多功能光電計時器操作說明簡表與使用說明書



圖 A-1 MUJ-5C 多功能光電計時器

一、儀器工作原理及特點

使用精密的紅外線光電感應器所製作的光電閘，搭配高速微處理運算器測量運動體的運動時間、速率和加速度，具特定實驗模組化的測量功能。本機採用國際流行的薄膜式按鍵開關面設計，並含微處理機單元及智能化的測量技術讀取、處理暨儲存數據。以微秒級為時基的時間測量裝置，可提供精確位數高達五位元的時間測量，並具有存儲功能。操作簡單，只需使用四個操作鍵即可完成各種不同的測量功能。可作為計時器、計數器、信號源和 6V 直流穩壓電源使用。本機除了具有一般計時器的功能外，並可用以測量運動物體的加速度、重力加速度、周期等物理量，可直接顯示物體的移動速率和加速度值。經常運用在大學院校普物實驗課程中有關運動的實驗中，如與氣墊導軌、斜槽軌道、自由落體和碰撞等各種運動實驗系統的儀器配合使用。

二、儀器規格

- (1) 以美國 INTEL 公司的 MCS-51 數位微處理單元(CPU)為自動測量及數據處理的主控系統。
- (2) 採用 12MHz 的石英晶體振盪器最為時基單元，時基精度為 $2 \text{ MHz} \pm 20 \text{ Hz}$ (10 ppm)。
- (3) 使用 0.56" 高亮度的 LED 數碼顯示裝置，具有五位元的顯示單元，分別為四個 LED 單位顯示和八個 LED 功能指示。
- (4) 溢出指示“0.0.0.0.”。
- (5) 含小數點和單位顯示，具有量程自動定位、自動換檔及自動進行四捨五入的智能化數據處理功能。
- (6) 各項物理量的測量範圍

- (a) 速度範圍為：0.00~1000.0 cm/s
- (b) 加速度範圍為：±0.00~1200.0 cm/s²
- (c) 計數範圍為：0~99999
- (d) 計時範圍為：0.00 ms~999.99 s
- (e) 0.01 ms 數量級以上確保五位有效數字顯示。
- (7) 可存儲 20 個時間數據，在周期測量中存儲 21 個時間數據(前 20 個振動周期和一個 n 次(最多 9999 周期)振動的累加時間總和。
- (8) 脈沖信號源有 1 Hz、10 Hz、100 Hz、1000 Hz、10000 Hz 等五檔，輸出幅度近 5V。
- (9) 提供 6V 直流電壓及 0.5A 的直流穩壓電源輸出
- (10) 提供兩個紅外光電傳感器
- (11) 配有可供氣墊導軌和自由落體儀器使用的四個光電開信號輸入插座。
- (12) 配有供斜槽軌道和自由落體儀實驗系統之電磁鐵控制插座。
- (13) 工作條件：
 - 電源：AC 110V ± 10%，50 Hz~60 Hz。
 - 環境溫度：-10°C~40°C
 - 相對濕度：在 40°C 時，低於 85%。
 - 工作時間：連續工作
- (14) 外形尺寸：約 230 mm × 210 mm × 100 mm
- (15) 重量：約 1.5 Kg

三、面板說明

(1)前面板說明：見圖 A-2，③、⑤、⑥和⑧等所有按鍵均為循環式的切換開關。

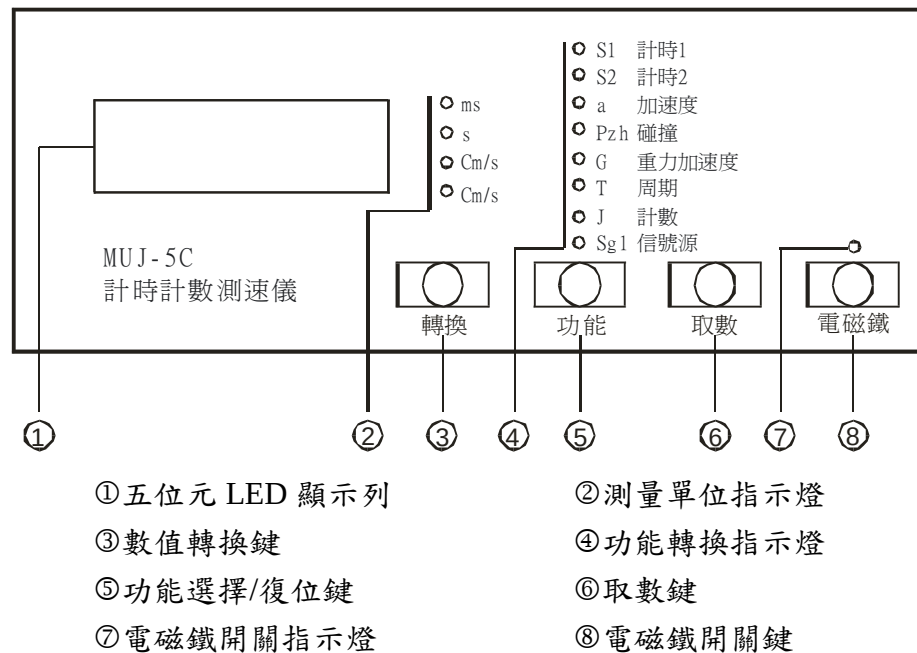


圖 A-2 MUJ-5C 多功能光電計時器面板說明

①五位元 LED 顯示列：顯示測量的結果

②測量單位指示燈：依所選定的測量功能，顯示所測得之數據的單位，如 ms, s, cm/s, cm/s 等四個時間和速率的單位。

③轉換鍵(Changeover)：當選擇計時、加速度和碰撞等測量功能時，在 1 秒內迅速按轉換鍵，可交替地選擇測量各種不同物理量。

光電閘的檔光片寬度有 1.0 cm、3.0cm、5.0cm、10.0cm 等四個不同的寬度選擇，可經由轉換鍵的切換選擇所需的寬度。使轉換鍵的切換時間超過 1 sec，即可選擇檔光片的寬度設定。

⑤功能鍵(Function)：如按下功能鍵前，光電閘若遮過光，則可先按一次功能鍵進行歸零。若光電閘沒遮過光，請按功能鍵選擇擬測量的功能。

⑥取數鍵(Data Fetch)：在計時 1 (S_1)、計時 2 (S_2)、周期(T)功能時，儀器可自動存入前 20 個測量值，按下取數鍵，可顯示存入的紀錄值。當顯示「En」表示將顯示存入的第 n 值。

⑦電磁鐵開/關指示燈：顯示電磁鐵處於吸合或鬆離的狀態，當紅色 LED 亮時，表示電磁鐵為開啟的吸合狀態；LED 不亮時，則表示電磁鐵為關閉狀態。

⑧電磁鐵開關鍵(Electromagnet)：控制電磁鐵的吸合和鬆離(鍵上⑦LED 顯示暗)的切換鍵，當按鍵上的⑦電磁鐵開/關紅色 LED 指示燈亮時，表示有電磁鐵為開啟的吸合狀態；LED 不亮時，則表示電磁鐵為關閉，處於無電磁力的狀態。

(2)後面板

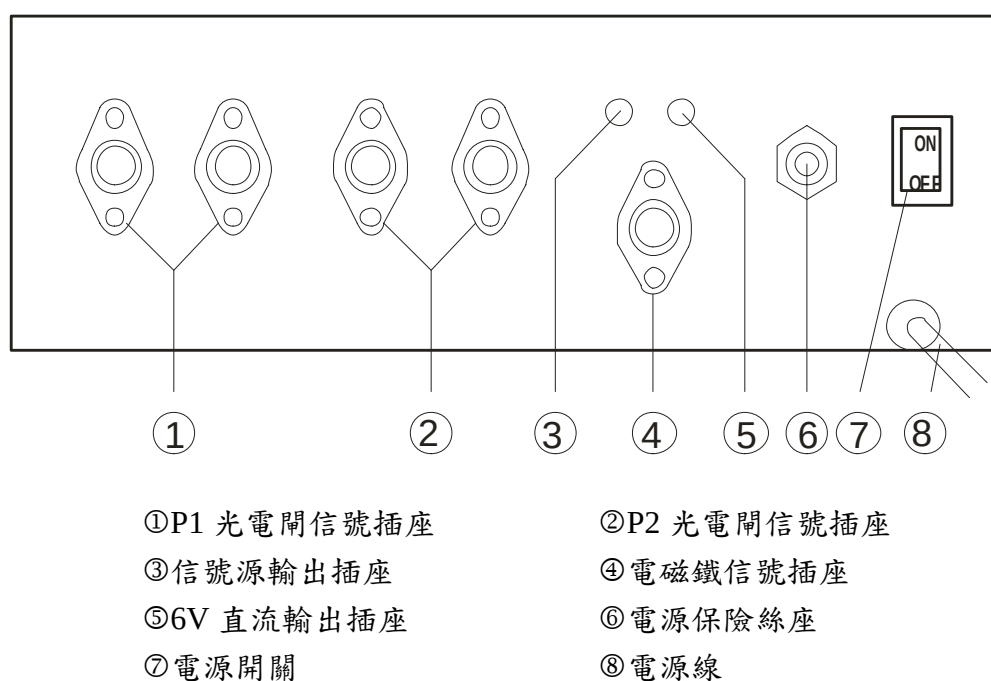


圖 A-2 MUJ-5C 多功能光電計時器背面板說明

四、多功能光電計時器使用說明簡表

多功能光電計時器使用簡表(永原科學儀器公司製造,型號 A04-153)				
- 測量前先按下 Changeover (> 1 sec), 選擇檔光片寬度 - 測量後可迅速(< 1 sec) 按下 Changeover, 可使顯示器的顯示值切換為時間或速度 - 數據顯示後, 可按 Function 鍵歸零重新實驗。歸零後再按一次 Function 鍵, 可跳入下一功能選擇				
功能	應用例	擋光板	光電閘	時間數據顯示(秒/毫秒)
Timing I	拋體初速 轉動週期	■	P1 或 P2	- 同一光電門擋光時程/速度 - 按 Data Fetch 顯示 20 組記錄
Timing II	重物下落 已知高度 時間	■ ┌	P1 或 P2	- 以■擋光片得同一光電門兩次擋光的時距 - 以┌擋光片得同一光電門一次擋光的時程--- Changeover 選擇時間 速度--- Changeover 選擇速度 - 可按 Data Fetch 顯示 20 組記錄
Acceleration	直線等加 速度運動	┌	由 P1 至 P2	Changeover 選擇時間 P1 的擋光時程 P2 的擋光時程 P1 至 P2 的擋光時程 Changeover 選擇速度 P1 的擋光速度 P2 的擋光速度 P1 至 P2 的加速度
Collision	碰撞運動	┌	P1 或 P2	Changeover 選擇速度 顯示各光電門各來回 1 至 3 次擋光片之速度 Changeover 選擇時間 顯示各光電門各來回 1 至 3 次擋光片之時間
Gravity Acceleration	自由落體	●	由電磁鐵至 P1~P4	準備好後, 按下 Electromagnet 顯示電磁鐵下端至 P1/P2/P3/P4 的時程
Cycle	單擺 複擺 簡諧運動	● ■	P1 或 P2	Changeover 預設週期數 100 以內。 實驗完顯示總時間, 再按 Data Fetch 顯示最後 20 週期時間。 - 不預設週期數而直接測量直到結束 可顯示測量週期序直到結束。按 Changeover 顯示總時間, 再按 Data Fetch 顯示最後 20 週期時間實
Count	轉動次數	■	P1 或 P2	顯示遮光次數
Signal Source	信號源		輸出插座	按 Changeover 可輸出頻率為: 1、10、100、1000、10000 的方波信號, 單位為 Hz
DC Power	DC6V		輸出插座	任何時間可輸出

五、測量功能

1. **Timing I**：一般遮光時程測量
2. **Timing II**：二次遮光時距
3. **Acceleration**：直線運動體單點瞬時速度測量及雙點間加速度值的計算
4. **Collision**：碰撞實驗中，兩運動體碰撞前後的瞬時速度測量
5. **Gravity Acceleration**：自由落體下落至不同高度的時間測量
6. **Cycle**：單擺計次、累計時間、單次擺動週期記錄及顯示
7. **Count**：計數遮光次數
8. **Signal Source**：信號產生器，可供其它實驗使用。

六、操作方法

(1)測量單位：

- (a) ms：1/1000 秒，計時單位
- (b) s：秒，計時單位
- (c) m/s：公分/秒，速度單位
- (d) cm/s^2 ：公分/秒平方，加速度單位

(2)各種物理量的測量

1. **Timing I (計時 1, S_1)：遮光時程測量**

測量光電閘的擋光時間，可連續測量，並自動存入前 20 個所測得的數據。按下取數鍵可查看儲存於計數器內的數據。

2. **Time II (計時 2, S_2)：二次遮光時間間距測量**

測量光電閘兩次擋光的間隔時間，可連續測量。並自動存入前 20 個數據，按下取數鍵可查看所量得的數據。

3. **Acceleration (加速度, a)測量**

測量帶有凹形擋光片的滑行器通過相鄰兩個光電閘的速度，以及通過此兩光電閘間之段路程所需的時間，可連接 2 至 4 個光電閘。在此測量模態時，本計時器的顯示面板上會循環顯示下列數據：

1	第一個光電管
×××××	第一個光電管測量值(T_1/V_1)
2	第二個光電管
×××××	第二個光電管測量值(T_2/V_2)
1~2	第一至第二光電管
×××××	第一至第二光電管測量($T_{1\sim 2}/a$)

如接有第 3、4 個光電閘，則除顯示上測量數據外，並繼續顯示第 3 個光電管、第 4 個光電管及 2~3、3~4 段的測量值，如下所列。

3	第三個光電管
×××××	第三個光電管測量值(T3/V3)
2~3	第二至第三光電管
×××××	第二至第三光電管測量(T2~3/a)
4	第四個光電管
×××××	第四個光電管測量值(T4/V4)
3~4	第三至第四光電管
×××××	第三至第四光電管測量(T3~4/a)

按功能鍵清“0”，可進行另一系列新的測量。

4. Collision (碰撞, Pzh)：等質量與不等質量間的碰撞實驗測量

在計時器后面板的 P1、P2 接頭各接一只光電管，兩只滑行器上裝好相同寬度的凹形擋光片和碰撞彈簧，讓滑行器從氣軌兩端向中間運動，各自通過一個光電閘後相撞。做完實驗，會循環顯示下列數據：

P1.1	第一次通過 P1 光電管
×××××	第一次通過 P1 光電管的遮光時間測量值
P1.2	第二次通過 P1 光電管
×××××	第二次通過 P1 光電管的遮光時間測量值
P2.1	第一次通過 P2 光電管
×××××	第一次通過 P2 光電管的遮光時間測量值
P2.2	第二次通過 P2 光電管
×××××	第二次通過 P2 光電管的遮光時間測量值

(1) 如滑塊通過 P1 光電管三次，但僅通過 P2 光電管一次，則計時器將不顯示 P2.2 而顯示 P1.3，表示物體第三次通過 P1 光電管的第三次遮光時間

(2) 如滑塊通過 P2 光電管三次，通過 P1 光電管一次，本機將不顯示 P1.2 而顯示 P2.3，表示第三次通過 P2 光電管的第三次遮光時間。

按功能鍵歸零後，可進行另一系列新的測量。

5. Gravity Acceleration (重力加速, g)：

將電磁鐵插入電磁鐵插口，2~4 個光電閘插入光電閘插口，電磁鐵開關鍵上方發光管亮時，吸上小鋼球(待測物體)；按電磁鐵開關鍵，小鋼球下落(同步計時)，到小鋼球前沿遮住光電閘(計錄時間)，計時器陸續顯示物體從開始下落至通過第 n 個光電閘所經歷的時間：

1	第一個光電管
×××××	t_1 值(物體開始下落至通過第一個光電閘所經歷的時間)
2	第二個光電管
×××××	t_2 值(物體開始下落至通過第二個光電閘所經歷的時間)
3	第三個光電管
×××××	t_3 值(物體開始下落至通過第三個光電閘所經歷的時間)
4	第四個光電管

×××××

t_4 值(物體開始下落至通過第四個光電閘所經歷的時間)

因 $h_1 = \frac{1}{2}gt_1^2$, $h_2 = \frac{1}{2}gt_2^2$, 故有 $g_1 = \frac{2(h_2 - h_1)}{t_2^2 - t_1^2}$, $(h_2 - h_1)$ 為第一個和第二個光電閘之間的距離。

$$g_3 = \frac{2(h_4 - h_1)}{t_4^2 - t_1^2}, \quad g_2 = \frac{2(h_3 - h_1)}{t_3^2 - t_1^2}$$

兩光電閘間的設定距離愈大，則測量誤差越小。按功能鍵或按電磁鐵開關鍵，儀器可自動歸零，使電磁鐵重新吸合。重力加速度的測量方法，也可用計時 2 (S_2) 的功能測量。

6. Cycle (周期, T):

測量單擺振子或彈簧振子 1~9999 周期的時間。一只光電閘插入光電閘插口，可選用以下二種方法。

- (1) 不設定周期數：在週期數顯示為 0 時，每完成一個周期，顯示周期數會加 1。按下轉換鍵即停止測量。在顯示最後一個周期數約 1 秒後，將接著顯示累計時間值。
- (2) 設定周期數：按下轉換鍵不放，確認到您所需周期數時放開此鍵即可。(只能設定 100 以內的周期數。) 每完成一個周期，顯示周期數會自動減 1，當最後一次遮光完成，顯示累計時間值。

按取數鍵可顯示本次實驗(最多前 20 個周期)每個周期的測量值，如顯示 E2(表示第二個周期)，××××× (第二個周期的時間)...。

7. Count (計數, J): 測量光電閘的遮光次數

8. Source Signal (信號源, $Sg1$): 將信號源輸出插頭，插入信號源輸出插口，可輸出頻率為：1 Hz、10 Hz、100 Hz、1000 Hz、10000 Hz 的信號，按轉換鍵可切換信號的頻率選擇。

七、光電閘結構

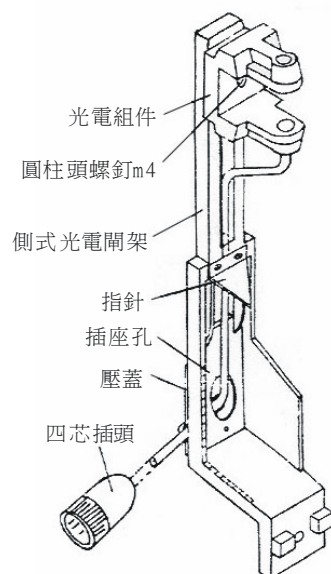


圖 A-4 側式光電閘結構圖

八、自動檢測、調整和維護

1. 本機具有自動檢測功能，按住取數鍵不放，再開啟電源開關，數碼管顯示“22222”、“55555”，發光二極管全亮，顯示 20.47 ms，說明儀器程序，光電閘輸入工作正常。若出現無計時功能，請檢查光電閘是否正常。
2. 存放時間滿 6 個月，應拿出通電 1 小時。

九、注意事項

1. 測量時間小於 1 ms 或大於 99.999 s，按轉換鍵將之轉換為速度時。顯示 0.0.0.0.表示超出範圍測量。
2. 做完實驗後，請關閉儀器電源開關。
3. 避免使儀器接近陽光和高溫熱源，以免影響儀器的性能。
4. 儀器出現故障，請找專業技術人員修理。