

物理學實驗

交通大學物理教研室

一九五五 上海

物理學實驗



交通大學物理教研室

一九五五 上海

目 錄

物理實驗須知.....	i-iii
實驗一 有效數字及誤差的計算 長度的基本測量.....	1
實習 1 游標尺的應用.....	8
實習 2 螺旋測微計的應用	10
實驗二 數據之作圖處理法 等速直線運動之研究.....	13
實驗三 牛頓第二運動定律的驗證.....	18
實驗四 向心力.....	21
實驗五 復形係數的測定.....	23
實驗六 轉動慣量.....	26
實驗七 氣體及液體密度之測定.....	31
實習 1 氣體密度的測定.....	31
實習 2 液體密度的測定.....	36
實驗八 水的沸點.....	39
實驗九 諧振動.....	44
實驗十 虎克定律的驗證及表面張力係數之測定.....	49
實驗十一 熱功當量.....	54
實驗十二 測定空氣的兩種比熱的比(C_p/C_v).....	58
實驗十三 測定液體的內摩擦係數.....	62
實驗十四 波義耳——馬略特定律.....	65
實驗十五 扭轉係數之測定.....	68
實驗十六 弦線的振動定律.....	72
實習 1 駐波	72
實習 2 弦音計	75

實驗十七	等位線和電力線.....	78
實驗十八	電學基本儀器之運用.....	82
實習 1	基本電學儀器之認識.....	94
實習 2	歐姆定律之驗證.....	94
實驗十九	某些導體的伏特安培特性.....	97
實驗二十	靈敏電流計的研究.....	100
實驗二十一	電阻之測量.....	105
實驗二十二	電位計及其應用.....	109
實驗二十三	電流與磁場.....	114
實習 1	電流天平.....	111
實習 2	正切電流計.....	116
實驗二十四	衝擊電流計及電容的測定.....	121
實驗二十五	測定線圈的互感係數.....	126
實驗二十六	地磁感應儀.....	129
實驗二十七	線圈在磁場中轉動時產生的感應電動勢.....	133
實驗二十八	溫差電偶.....	136
實驗二十九	三極電子管的靜態特性.....	141
實驗三十	光電效應.....	149
實驗三十一	用分光計測定玻璃三稜鏡對各色光之折射率.....	154
實驗三十二	光柵.....	160
附錄		165

物理實驗須知

一、對物理實驗應有的認識

工業大學中任何一個專業所培養出來的學生都應該是具備獨立工作能力的，理論聯繫實際的工業建設人才。這樣一個培養目標決定了整個教學計劃，決定了作為整個計劃一部份的實驗和實習，並且也決定了課程內容以及教學方法。

物理實驗也不例外，為了滿足上述的要求，必須有一定的目的和一定的教學方法。

物理實驗的目的不僅在於認識一些物理現象以鞏固理論知識，有時用實驗方法來驗證某些定律，並且使同學們逐漸掌握科學研究的方法，掌握基本的實驗操作，培養獨立進行實驗的基礎能力，因此物理實驗課程有它的獨立性。

有些人認為理論課程重要，實驗課是次要的，特別對普通物理實驗缺乏興趣，因而不很重視，效果也就較差。這種看法顯然是不正確的。當然理論課是重要的，必須認真學習；但是要知道科學理論本身就是從實驗和實踐中總結出來的規律，而理論的正確性又必須通過實驗和實踐來證明。今天我們在學校裏學習正是為了將來能指導生產實踐，進一步提高生產實踐。假使在學校裏不重視實驗，沒有培養起獨立的工作能力，將來又怎麼能擔負起領導生產的任務呢？作為基礎課程的普通物理實驗對專業實驗更具有重要的意義，因為專業實驗需要一定的物理實驗基礎能力。明白了這一點，我們就應該在一開始的物理實驗中端正學習態度，逐步培養自己使具有獨立的實驗工作能力。

二、實驗室規則

(1) 凡參加本實驗室實驗的學生應遵守本室的一切制度及規則。

(2) 學生在實驗前應作好一切應作的準備工作，在排定時間內準時到達實驗室，否則不准參加實驗。

(3) 凡學生因特別事故不能參加實驗者，必須辦理請假手續，由班長向教師彙報。否則作曠課論，以後不得補做。

(4) 凡因請假或在課內未完成實驗者經教師同意後得在規定時間內補做。

(5) 參加實驗的學生應切實做到愛護本實驗室一切儀器設備，節約材料；並保持實驗室內清潔。

(6) 參加實驗的學生應切實注意實驗時的安全，遵守操作規則，防止發生意外。

(7) 實驗時應先掌握各儀器的性能及使用方法，才可以開始操作，如因操作不慎或其他原因損壞儀器者照章賠償（賠償條例另行公佈）。

(8) 實驗時應保持嚴肅認真態度，不得有妨礙他人工作的一切行為。

(9) 離實驗室時，應將使用儀器及另件等整理，安放於適當位置。

附：工作日誌和實驗報告的內容及格式。

甲、工作日誌

同學預習時，在初步掌握實驗的內容及操作的基礎上，必須做好工作日誌，一方面可以鞏固預習的收穫，更可以作實驗時的參考，工作日誌一般包括下列各點：

1. 實驗目的， 2. 用到的主要公式， 3. 要測量的物理量， 4. 各個量的測量方法， 5. 注意事項， 6. 數據表格。

工作日誌應力求簡單扼要，絕對不要抄書。工作日誌祇須寫在自己本子上，不必花時間謄清，但每次實驗時應帶來以備教師查閱（不必交）。

乙、實驗報告

(1) 報告格式 實驗報告一律用普通報告紙，用鋼筆寫。作圖一律用毫米方格紙，用鉛筆畫。每一報告的第一頁上端應寫成以下格式：

實驗.....，實驗名稱.....

實驗日期.....

姓名.....班級.....組別.....

指導教師.....老師

(2) 報告內容應包括以下各點：

1. 實驗目的，2. 簡單原理（應用的主要原理及公式，如何得到要測量的結果，儀器裝置的簡圖、說明等），3. 數據表格，4. 數據處理（計算及作圖等），5. 問題討論等。

實驗一 有效數字及誤差的計算

長度的基本測量

有效數字 在普通物理實驗中，掌握實驗的基本技術和測量方法是實驗的主要目的之一。

某一個物理量的測量，就是與一被選為單位的同類量來比較，求出它是單位量的多少倍，這就是我們所須要的量數。例如用尺來測量物體的長度等。

用任何儀器測量時，其結果不是所測之量的真實數值，而祇是它的近似值。隨着科學的發展，儀器的精密程度逐步地提高，所測得的近似值便愈接近於真實數值。

例如用刻有厘米的米尺來測量一棒的長度，如圖 1-1 所示。我們

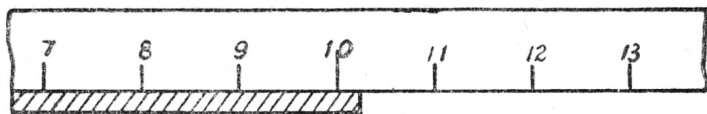


圖 1.1

很容易讀出這棒的長度是大於 10 厘米，小於 11 厘米。雖然米尺沒有刻到毫米，但我們可以估計到毫米（最小刻度的 $1/10$ ）。如圖上棒長可讀為 10.2 厘米，至於再想多讀一位小數，用這樣的米尺是不能測出的。因為任何一個讀數的估計數字一般不能超過一位。（即在通常情形，最多祇能估計到它最小刻度的 $1/10$ ）。如果用刻有毫米的米尺來測量，便可以直接讀到毫米，而且可以估計到毫米的 $1/10$ ，如 10.23 厘米。假使這棒的長度恰巧為 10.2 厘米時，我們應當寫做 10.20 厘米。

由上面的例子，因為測量儀器的精密程度不同，所得到的結果也不同。前者可估計到毫米，得到三位數字；後者可估計到 $1/10$ 毫米，得到四位數字。這些“1”，“0”，“2”，“3”的數字，都是從觀測得來的，並非臆造而具有特殊意義的，叫做有效數字。其中前面幾個數字是確定無誤的，而最後一位數字由估計所得，帶有一定的誤差。

實驗測得的數據中的有效數字與數學中的數值有區別，它不僅表示量的大小，還表示了測量該量的精確性。測定量的有效數字愈多，表示測量的精確性愈高，因此處理實驗數據時應注意以下幾點：

(1) 有效數字的多少由測量儀器的精密程度決定，不能隨便增減（參考上述例子）。“0”也是有效數字，如 10.20 厘米不能寫成 10.200 厘米。

(2) 表示小數點位置的“0”不是有效數字，如 0.00120 米前面的三個“0”，它們僅表示單位的大小，並不能表示測量時的精密程度，因此書寫時儘量避免，應寫成 1.20×10^{-3} 米（三個有效數字）。

(3) 有效數字與小數點的位置無關。當某量的單位改變時，有效數字的位數不能有所增減，例如 10.23 厘米（四個有效數字）化成微米時，不能寫成 102300 微米，應寫成 1.023×10^5 微米，化成千米時應寫成 1.023×10^{-4} 千米（仍為四個有效數字）。

使用有效數字的目的：可以避免繁複的運算，並能使實驗的結果配合測量儀器的精密程度；同時便於選擇適當精密程度的儀器，達到實驗所需要的結果。

測量中的誤差

上面已經提到，任何一種測量都不會是絕對準確的，換句話講，測量的結果總有誤差。為了正確地表示出量數的可靠程度，應該寫出誤差的大小，例如 $l = 12.3 \pm 0.2$ 毫米， ± 0.2 毫米是測量的誤差，這表示

量數的真值 l_0 是在 12.1 毫米 $< l_0 < 12.5$ 毫米範圍之內。誤差一般取一位有效數字。

量度的誤差可由兩種原因產生（由於讀錯數據而產生的過失誤差不在討論之內）：

(1) 系統誤差 由於測量儀器的缺點以及實驗理論的不完善而產生的。

(2) 偶然誤差 由於我們的視覺，聽覺等的缺點以及其它意外的情況而引起的，這種誤差與實驗者以及實驗者的技術有關。

系統誤差多半是使測量結果總是偏於一邊，或是過大或是過小，增加測量次數並不能減少這種誤差的影響。我們下面不討論這種誤差，只討論偶然誤差。偶然誤差是由於讀數不準確而產生的，有時使讀數比真值為大，有時比真值為小。要減小偶然誤差的影響，任何量度都必須重複若干次，在多次重複的測量中，沒有任何根據認為量度的偏差向一方面（偏大或偏小）比另一方面更為可能。無疑的，由多次個別量度結果而得到的算術平均值比所有各次量數更接近於真值。

例如設 $N_1, N_2, \dots, N_k$ 是各次測量的結果， k 是測量的總次數，則算術平均值 N 更接近於真值。

$$N = \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_k}{k}$$

絕對誤差和相對誤差

(1) 絕對誤差是各次測量與這平均值之差 ΔN_i 。即

$$N - N_1 = \pm \Delta N_1, N - N_2 = \pm \Delta N_2, \dots, N - N_k = \pm \Delta N_k$$

稱為各次測量的絕對誤差。（誤差祇算他的數值，不管正負）。

各次絕對誤差的算術平均值稱為平均絕對誤差。

$$\Delta N = \frac{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \dots + \Delta N_k}{k}$$

(2) 相對誤差

比值 $\frac{\Delta N_1}{N_1}, \frac{\Delta N_2}{N_2}, \dots$ 稱為各次測量的相對誤差。

比值 $\frac{\Delta N}{N}$ 稱為結果 N 的平均相對誤差。

$$E = \pm \frac{\Delta N}{N}$$

相對誤差通常以百分數表示。

在計算實驗結果時，我們經常要確定結果的平均絕對誤差及平均相對誤差，上述的定義在實驗室中是普遍採用的，至於在其他研究工作及精密測量場合則用其它更嚴格的方法來計算誤差。

例：量度棒的長度 l ，重複五次，各次的結果為：

$l_1 = 2.32$ 厘米， $l_2 = 2.34$ 厘米， $l_3 = 2.36$ 厘米， $l_4 = 2.33$ 厘米， $l_5 = 2.35$ 厘米。

$$\text{算術平均值 } l = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}{5} = 2.34 \text{ 厘米。}$$

各次測量的絕對誤差：

$$\Delta l_1 = l - l_1 = 0.02 \text{ 厘米}, \Delta l_2 = l - l_2 = 0.00 \text{ 厘米}, \Delta l_3 = l - l_3 = -0.02 \text{ 厘米},$$

$$\Delta l_4 = l - l_4 = 0.01 \text{ 厘米}, \Delta l_5 = l - l_5 = -0.01 \text{ 厘米}。$$

結果的平均絕對誤差

$$\begin{aligned} \Delta l &= \frac{|\Delta l_1| + |\Delta l_2| + |\Delta l_3| + |\Delta l_4| + |\Delta l_5|}{5} = \frac{0.02 + 0.00 + 0.02 + 0.01 + 0.01}{5} \\ &= 0.012 \approx 0.01 \text{ 厘米} \end{aligned}$$

結果的平均相對誤差

$$E = \frac{\Delta l}{l} = \frac{0.01}{2.34} = 0.0043 \approx 0.4\%$$

則棒的長度應寫為 $l = 2.34 \pm 0.01$ 厘米。 $E = 0.4\%$

有效數字及誤差的計算

上面我們敘述了在測量中如何取適當的有效數字，如何從多次測量中求得測量結果的誤差。但在實驗中，只量度一個物理量就能得出

結果是不常見的。大都是進行許多次量度，並進行各種運算，最後間接算出結果，因此有必要來討論在運算中如何適當地取用有效數字，並且如何計算結果的絕對誤差和相對誤差。

實驗數據的運算與數學上運算的區別在於必須考慮到各量的有效數字位數，使計算結果不超過也不少於應有的有效數字位數，同時可以避免徒勞無益的多餘運算。

(1) 加減法

設 $N = A + B$ 而測得 $A = A_0 \pm \Delta A$, $B = B_0 \pm \Delta B$

$$\begin{aligned} \text{則 } N &= N_0 \pm \Delta N = (A_0 \pm \Delta A) + (B_0 \pm \Delta B) \\ &= (A_0 + B_0) \pm (\Delta A + \Delta B) \end{aligned}$$

故 $\pm \Delta N = \pm (\Delta A + \Delta B)$,

$$\text{相對誤差 } E = \pm \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A + \Delta B}{A + B}$$

即兩數相加時，總的誤差為兩者之和，這是代表可能的最大誤差範圍，兩數相減時，相同。

為了說明計算時取有效數字的規律，舉一實例來說明：

$$\begin{array}{rcl} 10.1 & \text{設有三數據相加：} & 10.1 \pm 0.1, \quad 4.178 \pm 0.003, \\ 4.178 & & 2.31 \pm 0.02; \\ +) \quad 2.31 & & \\ \hline 16.588 & \text{則所得結果的最大誤差} & = 0.1 + 0.003 + 0.02 \\ & & = 0.123 \approx 0.1. \end{array}$$

因此在結果 16.588 中小數點後面一位數字“5”已是帶有誤差的可疑數字，再下面兩位更無意義了，故用四捨五入法，得結果為 16.6。

因此：諸數相加（減）時，其所得結果的有效數字應以各數中最大可疑數字作為標準。

(2) 乘除法

$N = A \cdot B$ 而測得 $A = A_0 \pm \Delta A$, $B = B_0 \pm \Delta B$

$$N = A \cdot B = (A_0 \pm \Delta A)(B_0 \pm \Delta B) \\ = A_0 \cdot B_0 + A_0 \cdot \Delta B + B_0 \cdot \Delta A + \Delta A \cdot \Delta B$$

式中 $\Delta A \cdot \Delta B$ 是高級微量，可略去不計，則絕對誤差

$$\Delta N = A_0 \cdot \Delta B + B_0 \cdot \Delta A \quad \text{相對誤差爲} \quad \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$$

所以，兩數相乘時，乘積的絕對誤差等於第一乘數乘第二乘數的絕對誤差加第二乘數乘第一乘數的絕對誤差。

(三位)

(四位)

$$\text{例：} \quad A = 10.1 \pm 0.1, \quad B = 4.178 \pm .003$$

$$= A_0 \pm \Delta A \quad = B_0 \pm \Delta B。$$

$$\begin{array}{r} 4.178 \\ \times) 10.1 \\ \hline 4178 \\ 4178 \\ \hline 421978 \end{array} \quad \begin{aligned} \Delta N &= \pm (A_0 \cdot \Delta B + B_0 \cdot \Delta A) \\ &= \pm (10.1 \times .003 + 4.178 \times 0.1) \approx 0.4 \\ \therefore N &= A \cdot B = 42.2 \pm 0.4 \text{ (三位有效數字)} \end{aligned}$$

由此可見：諸數相乘時，乘積的有效數字位數與各數中有效數字最少的位數相同。諸數相除時也同。例如：

$$10.1 \div 4.178 = 2.42$$

(三位) (四位) (三位)

下面我們列出一般運算中的誤差計算，不作推導。

絕對誤差 ($\pm \Delta N$)

相對誤差 $E = \frac{\Delta N}{N}$

- | | | |
|----------------------------|--|---|
| 1. $N = A + B + C + \dots$ | $\pm (\Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots)$ | $\pm \frac{\Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots}{A + B + C + \dots}$ |
| 2. $N = A - B$ | $\pm (\Delta A + \Delta B)$ | $\pm \frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}$ |
| 3. $N = aA$ | $\pm a\Delta A$ | $\pm \frac{\Delta A}{A}$ |
| 4. $N = A \cdot B$ | $\pm (A\Delta B + B\Delta A)$ | $\pm \left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} \right)$ |
| 5. $N = A \cdot B \cdot C$ | $\pm (BC\Delta A + CA\Delta B + AB\Delta C)$ | $\pm \left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C} \right)$ |

6. $N = A^n$	$\pm n A^{n-1} \Delta A$	$\pm n \frac{\Delta A}{A}$
7. $N = \sqrt[n]{A}$	$\pm \frac{1}{n} A^{\frac{1}{n}-1} \Delta A$	$\pm \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta A}{A}$
8. $N = \frac{A}{B}$	$\pm \frac{B \Delta A + A \Delta B}{B^2}$	$\pm \left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} \right)$
9. $N = \sin A$	$\pm \cos A \Delta A$	$\pm \cot A \Delta A$
10. $N = \cos A$	$\pm \sin A \Delta A$	$\pm \tan A \Delta A$
11. $N = \tan A$	$\pm \frac{\Delta A}{\cos^2 A}$	$\pm \frac{2 \Delta A}{\sin 2A}$
12. $N = \cot A$	$\pm \frac{\Delta A}{\sin^2 A}$	$\pm \frac{2 \Delta A}{\sin 2A}$

這些誤差公式很容易應用高等數學的理論推導，這裏從略。

在實際應用中，遇到最多的是加、減、乘、除的運算，祇要記住：加減法是絕對誤差相加；乘除法是相對誤差相加。

數據處理應注意之點

1. 注意數據的有效數字。

2. 數據乘除時先考慮到結果應該是幾位有效數字，以免不必要的繁複演算。

3. 運算中的已知值(如 π, g 等)取用與測量數據相適應的有效數字位數，但常數、指定數不須按照處理有效數字的方法來處理。

4. 在有效數字不超過三位時，計算可以用計算尺，否則應該用對數表；筆算是不恰當的。

例 測得圓柱體的高度 $h = 13.32 \pm 0.01$ 厘米，

直徑 $d = 1.54 \pm 0.01$ 厘米

求圓柱體之體積 V 。

(取三位) (三位) (四位) (三位)

$$V = \frac{1}{4} \pi d^2 h = \frac{1}{4} \times 3.14 \times (1.54)^2 \times (13.32) = 24.8 \text{ 厘米}^3.$$

$$\Delta V = \frac{1}{4} \times \pi \times \left[d^2 \Delta h + 2dh \Delta d \right]$$

$$= \frac{1}{4} \times 3.14 \times \left[(1.54)^2 (0.01) + 2 \times 1.54 \times 13.32 \times (0.01) \right] \approx 0.3$$

故 圓柱體之體積 $V = 24.8 \pm 0.3$ [厘米]³

註：誤差祇取一位有效數字，故在計算時不必詳細演算，祇需粗略的算一下，如上例中 $\Delta V \approx 0.3$ 不必要將三位有效數字平方以及相乘等。

實習 1 游標尺的應用

1. 目的 測定一圓柱體的體積。

要求 學習使用游標尺。

熟悉有效數字的運算。

2. 儀器 游標尺，銅圓柱體。

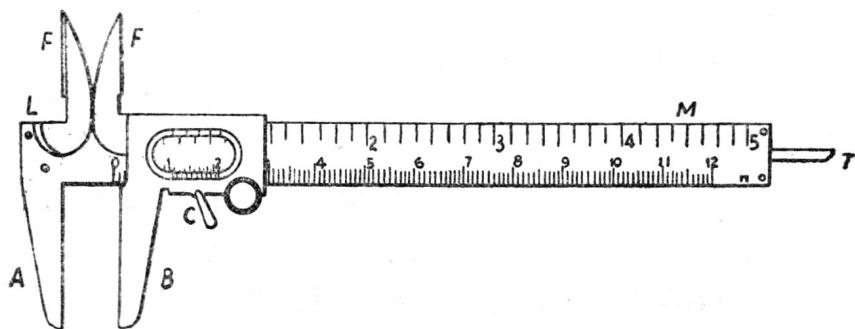


圖 1.2 游 標 尺

游標尺(圖 1-2)由刻有毫米的主尺 LM 構成，有一垂直於主尺長度的鉗口 B ，可以在主尺上滑動，套面上對着主尺刻度有一窗口，窗口旁邊與主尺相並處，刻有游標。另有鉗口 A ，也垂直於主尺的長度，固定於主尺的一端。當二鉗口互相靠緊時，游標上的零度線與主尺上的零度線相齊。被量的物體夾於二鉗口間，另有二鉗口 FF 用以測量物

體的內部尺寸，如環的內徑等，伸出尾 T 是用以測量深度的。

3. 原理 我們用尺來測量物體的長度時，可以估計到最小刻度的 $1/10$ ，但是這個估計數字是不十分可靠的。如果在普通的尺上裝一副尺，可使準確性提高，這樣的副尺叫做游標。

普通用的游標，其長度為 9 毫米，平均分為 10 格，那麼游標上每格長為 0.9 毫米。主尺上每格長與游標上每格長的差 $\Delta x = 0.1$ 毫米。

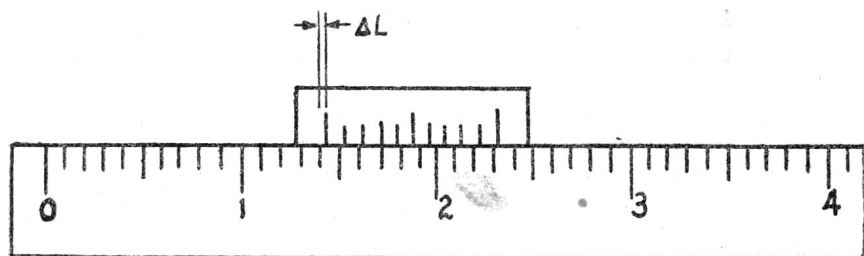


圖 1.3

如果用游標尺測量一物體長度時(如圖 1-3)，在主尺上可先讀出游標零度線以前的整數 1.4 厘米，物體的長度 $L = 1.4 + \Delta L$ [厘米]，

這裏不滿 1 毫米的餘數 ΔL 要靠游標來測定。

因為游標上的刻度和主尺上的刻度不同，所以游標上的刻度線總有一條和主尺的刻度線最接近，這兩線可以說是相齊。從圖上可以看出游標上的第三條刻度線和主尺的刻度線相齊，所以

$$\Delta L = 3\Delta x = 0.3 \text{ 毫米},$$

物體的總長 $L = 1.43$ 厘米。

4. 實驗步驟 要測定一圓柱體的體積，必須要測量這柱的長度和直徑。

測量柱的長度：分開游標尺的二鉗口，使被测的柱放在二鉗口間，移動鉗口 B ，使二鉗口輕輕夾緊，然後從主尺上把游標零度線前的整數讀出，再從游標上那個刻度線與主尺上的刻度線相齊而讀出不滿 1

毫米的餘數。

如此重複地測量四次。

用相似的方法測量柱的直徑。

5. 數據及其處理

實驗次數	柱的高度 h (毫米)	柱的直徑 d (毫米)
1		
2		
3		
4		
平 均		

柱的體積 = 毫米³ (寫出逐步計算步驟)
= 厘米³

6. 問題

(1) 一物體作等加速直線運動, 在 20 秒鐘內測得運動的距離為 200.0 厘米, 求其加速度。(注意有效數字)。

(2) 如果主尺的最小刻度為 1 毫米, 游標的總長為 19 毫米, 平均分為 20 格, 問此游標尺的最小讀數是多少?

實習 2 螺旋測微計的應用

1. 目的 測量一圓球之直徑, 並算出其體積。

要求 學習使用螺旋測微計

熟悉誤差的計算。

2. 儀器 螺旋測微計, 圓球。

螺旋測微計常用來測量金屬導線的直徑, 金屬片的厚度, 小球的直徑等, 是一種比較精密的量度工具。它是利用旋轉螺旋時螺旋前進或後退的距離來量度距離的。圖 (1-4) 是螺旋測微計的外形, 其中 D 稱為主尺, B 為螺旋, 轉柄 C 和螺絲相連, 一起轉動, 當旋轉螺旋時, C 即在