

專科物理實驗

陳文一 編著

興業圖書股份有限公司印行

專科物理實驗

陳文一 編著

興業圖書股份有限公司印行

中華民國六十四年七月修訂二版

專 科 物 理 實 驗

全一冊 基本定價三元 90-

編 著：陳 文

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 印 刷 廠

發 行 所：興業圖書股份有限公司

臺南市勝利路一一八號

電 話：五 三 二 五 三

劉 序

陳君文一，是南榮工專的物理教師，平日管教認真，循循善誘，在教學之餘，能孜孜研究，教學相長，目擊五專物理課程，尚缺乏實驗教本，教者讀者，多有不便。因此他下了決心，編著了「專科物理實驗」一書。

六十一年春，陳君特將原稿壹冊，請我作序。閱覽一遍，頗覺內容充實，注重實用，在每篇實驗之前，能作有關理論的簡略介紹，足為學生研求理論和實際融匯引證的張本，可收「學以致用」的效果。

綜觀全書共有六十個實驗，所分(一)基本量度實驗(二)力學(三)光學(四)熱學(五)聲學(六)電磁學(七)原子物理及應用實驗等七篇，對於電子、電機、化工、機械、土木等工程科，皆頗適用。

次觀該書篇幅的編排，是取最新的方式，由理論的開始介紹，導致學生的接受實驗。程序清晰簡潔，可使學生易於了解，然後達於實驗的進行。不愧是五專物理實驗的適用教材。特誌數語，以為之序。

中華民國六十一年七月杪 劉兆璜 序於

南榮工專校長室

原 序

物理實驗之目的，係訓練學生學習以合乎邏輯之程序去應用物理學上的基本定義和觀念。更進一步地培養學生熟練的實驗技能，以配合理論解決工程上及科學測度上的問題。

近代科學及工業迅速發展，為培育足夠技術人員，以應社會需要，五年專科學校紛紛設立。編者執教五專物理課程，深感課程介於高中和大學之程度中間，迄今尚未有一本較適用於五專之實驗教本，故編著此書以應教學之需要。

本書內容係採理論和實驗並重方式編成，以實用為主，供五專（二專）物理實驗一學年之用。全書實驗略多，教師可依科別酌量選擇。

諸論一章，說明實驗事宜及有關之應用數學，宜使學生先行研讀瞭解。每次實驗之前務必明白該實驗之原理部份，以便清楚實驗之理論根據及其觀念。然後再行操作實驗，始能收到「學以致用」之效。

編者非常感激本校校長劉兆濱教授之惠于贈序，張良謙副教授之鼓勵及電子科三年級潘榮坤，邱世芬兩同學之幫忙整理資料，此書始能順利完成。

本書編著係參考下列書籍，特于列出以誌謝意：

- (1) P. S. S. C Physics
- (2) Bernard Cioffari : Experiments in College Physics 3rd
- (3) Sears & Zemansky : College Physics 3rd
- (4) 王 濟 仁 著 : 高等物理學實驗
- (5) 師 大 物 理 系 : 普通物理實驗
- (6) 李 偉 器 著 : 誤差論

初次付梓，遺誤難免，謹望學者不吝指正。

一九七二年三月
識于 南榮工專

實驗目錄

目次 1

緒論

(一) 實驗報告	1
(二) 有效數字及數量級表示法	1
(三) 測定方法	2
(四) 誤差分析	3
(五) 誤差公理和最確值	3
§1 誤差公理和相加平均	3
§2 相加平均之簡便求法	4
§3 百分率誤差	5
§4 平均誤差	6
§5 誤差分佈和度數折線	7
(六) 函數圖形舉例	8
(七) 實驗報告範例	10

第一篇 基本量度與實驗

實驗一 等臂天平	12
實驗二 測時儀	15
實驗三 長度測定	18
實驗四 長距離之測定	22
實驗五 球徑計	25

第二篇 力學

實驗六 同點力之平衡，向量和	28
實驗七 平行力之平衡和力矩	32
實驗八 斜面，摩擦力和功	35
實驗九 輪軸和滑輪	39
實驗十 向心力和離心力	43
實驗十一 虎克定律	46
實驗十二 簡諧運動	50
實驗十三 單擺	53
實驗十四 表面張力	58

2 目次

實驗十五	液體之比重	61
實驗十六	阿基米德原理	64
實驗十七	波義耳定律	68
實驗十八	液體之黏滯係數	71
實驗十九	楊氏係數	76
實驗二十	橫梁之彎曲	80
實驗二十一	轉動慣量	83

第三篇 光學

實驗二十二	照度平方反比定律	87
實驗二十三	平面鏡	91
實驗二十四	凹面鏡	95
實驗二十五	折射	98
實驗二十六	凸透鏡	102
實驗二十七	望遠鏡	106
實驗二十八	干涉	110
實驗二十九	波動之繞射	114

第四篇 熱學

實驗三十	熱之傳播	118
實驗三十一	比熱之測定	122
實驗三十二	露點和相對濕度	125
實驗三十三	冰點和沸點	128
實驗三十四	冰之熔解熱	131
實驗三十五	焦耳定律	134
實驗三十六	線膨脹係數	138

第五篇 聲學

實驗三十七	共鳴管和聲速測定	141
實驗三十八	音叉頻率之測定	144
實驗三十九	弦音計	148

第六篇 電學和磁學

實驗四十	帶電體和靜電感應	151
實驗四十一	歐姆定律	154
實驗四十二	電流之磁效應	157

實驗四十三	基本單位磁場強度量度	160
實驗四十四	電子質量測定	164
實驗四十五	電磁感應	169
實驗四十六	伏特計和安培計	174
實驗四十七	電位計	178
實驗四十八	惠斯登電橋	182
實驗四十九	電場分佈測定	186
實驗五十	二極管特性曲線	189
實驗五十一	電晶體之特性曲線	192

第七篇 原子物理及應用實驗

實驗五十二	電化學之應用 (鍍銀)	196
實驗五十三	單石收音機之裝置	199
實驗五十四	光電效應	201
實驗五十五	光速之測定	204
實驗五十六	熱電偶	208
實驗五十七	光譜分析	212
實驗五十八	X-射線	216
實驗五十九	放射性之平方反比定律	220
實驗六十	放射性同位素之半衰期	224

附 錄

A : 國際原子量表	230
B : 物理常數	231
C : 單位對照表	231
D : 氣體性質表	232
E : 液體性質表	233
F : 固體性質表	234
G : 稱量值之空氣浮力補正	235
H : 電化當量表	235
I : 三角函數表	236
J : 常用對數表	237

緒 論

實驗是研究學問的最科學方法。雖然從實驗中未必能預知確實結果，但往往可從屢次的實驗中意外地發現新的現象。如倫琴 (Wilhelm Roentgen) 發現 X 射線及白克勒爾 (Henri Becquerel) 發現放射性。另一方面由精密及嚴謹的實驗亦可證明理論之預言。如 Michelson Morley 的實驗。

對一有計劃之實驗，事先需考慮可能發生的問題。判斷重要及無關的因素。根據統計，決定惟一和實驗目的有關的因素，並設法隔絕其他足以影響實驗的因素。如此可使實驗更趨精確。對於實驗產生之偏差，亦需加以留意和分析，因此偏差很可能導致新的重要發現。

(一) 實驗報告

學生應于實驗後即行整理呈繳實驗報告或由老師指定時間交上。教師于批改後發還學生，以備日後參攷之用。

實驗報告內容需包含下列各項：

- (1) 實驗項目，姓名、班級、學號和日期
- (2) 實驗目的、儀器及程序
- (3) 記錄觀測數值，並制成圖表，註明標記。
- (4) 計算觀測數值及誤差。
- (5) 綜合(3)(4)作成結論。
- (6) 回答問題。

(二) 有效數字及數量級表示法

有效值係包含觀測之確值及最後一位估計值 (包含 0)。如一棒長 52.3 公分，52 係觀測之確值，3 係估計值。此亦表示棒長于 52.34 ~ 52.25 公分之間 (四捨五入)。所以 52 公分不等于 52.0 公分，因前者有效數字為二位，後者有效數字為三位。

對有效數字之計算可利用下列規則：

- (1) 加減法中、對正小數點後相加減。取至含第一位估計值之數止，以下各數四捨五入後去掉。

$$\begin{array}{r}
 \text{例：} \quad 39.6 \\
 \quad 27.5 \\
 \hline
 + 3.867 \\
 \hline
 70.967 \rightarrow 71.0
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r}
 \quad 2.1 \\
 \quad 12.12 \\
 \hline
 + 6.345 \\
 \hline
 20.565 \rightarrow 20.6
 \end{array}$$

- (2) 乘除法中，其積商之有效值數和原數中有效數字較少者相同，估計值後之值四捨五入後棄之。

例：

$$\begin{array}{r} \times \quad 3.81 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 762 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 6096 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 2286 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 290322 \rightarrow 29.0 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 42.55 \rightarrow 43 \\ 29 \overline{) 1234} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 116 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 74 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 58 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 160 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 145 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 150 \end{array}$$

為避免冗長之計算，對一其大及極小之數值，常以數量級表示。以利演算。
例：0.000562取數量級表示為 562×10^{-6} 或 5.62×10^{-4} 。236,000,000
為 236×10^6 或 2.36×10^8 。當有效數值相同時，其準確度相等。例 1.23×10^7 和 123×10^5 精確度是相等的。

(三)測定方法

實驗測定需力求符合一些可靠的規則。第一必須先決定何者為實驗函數的參數（變數）。而將測定值記錄于表格內。實驗有關之其他數據亦應一併記錄于筆記本，以備查攷。如此可檢驗出實驗中屢次出現的錯誤所在。第二儘可能將測定繪成圖表，即使不符合函數關係，亦需確實根據測定值繪制。以便和理論值有一比較。

很多實驗中，均有某程度的環境因素干擾。這些干擾來源各異。例如電路中之交流雜音及放射性中子測定之伽瑪射線干擾等。需注意校正測定值或消除之，此外由測定時之誤差，亦為影響精度的一大因素。

測定之方法有下列幾種：

- (a) 直接測定：(Direct observation)

對物體直接以量器測度所需要之量，稱為「直接測定」如以尺量棒長。

- (b) 間接測定 (Indirect observation)

首先直接測定A量，再由A量求出所需的B值。稱為「間接測定」。如量半徑以求球之體積。

- (c) 條件測定 (Conditional observation)

于直接或間接測定中，若測定值理論上需受某種限制時稱為「條件測定」。如單擺之實驗，其擺動距鉛垂線左右不得大于5度。

- (d) 獨立測定 (Independent observation)

欲測之值，不受任何條件限制者稱為「獨立測定」如溫度。

(四) 誤差分析

實驗測定之大小，實難符合確實的真值 (True Value)。因此測定值和真值之差。稱為誤差 (Error)。誤差原因有下列幾種：

(1) 系統誤差 (Systematic Error)

(a) 理論誤差 (Theoretical errors):

量器受熱膨脹，化學天平受空氣浮力影響，折射對視深的改變，空氣摩擦力對重力加速度測定的影響以及伏特計對電路電流所生之改變等均屬理論誤差。此類誤差可預先測知儀器對實驗之影響因素，加以校正。例若測知伏特計電阻，可求其和電路之合電阻而求出電路正確總電流。或者由測定值中，再將此誤差因素校正亦可。例鋼尺于高溫測定之值，可利用線膨脹公式，換算至任何低溫度之正確長度。

(b) 儀器誤差 (Instrumental errors):

此類誤差多係儀器使用過久受到損壞所致，或因儀器本身不過精確所產生。例如天平兩臂未平衡，圓盤中心不正而生偏心現象，以及電表或溫度計之刻度不準確等。這些現象均可由事先經精密正確之儀器校正而避免。

(c) 個人誤差 (Personal errors):

由個人之習慣所引起之觀察偏差而影響到測定值變大或變小。

(d) 過失誤差 (Mistakes):

錯看刻度或計算錯誤所致。若十分小心測定當可避免發生。

(2) 偶然誤差 (Chance Errors):

此係實驗時不可避免之誤差，其發生原因即不清楚，亦不規則；它和測定條件無固定關係。但于同一條件測定下正負偶然誤差之機會係相等。故以下之誤差計算均係對偶然誤差而論。

(五) 誤差公理和最確值

§ 1 誤差公理和相加平均：

設某量之真值為 T ， n 次測定值為 $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ ，誤差各為 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，則

$$\left. \begin{aligned} M_1 - T &= x_1 \\ M_2 - T &= x_2 \\ \dots\dots\dots \\ M_n - T &= x_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(1) 改寫為

$$M_i - T = x_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

當測定次數很多時，由經驗得知下面三個有關誤差之公理：

(一) 絕對值小的比絕對值大的誤差，發生之機會大。

(二) 絕對值相等之誤差，發生的機會相等。

(三) 絕對值非常大的誤差，發生的機會幾近乎零。

故由(2)式及公理(二)得：

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n x_i = 0 \quad (3)$$

$$T = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} \quad (4)$$

所以當 $n \rightarrow \infty$ 時，其值 T 可由(4)計算得之。但實際上 n 並不接近無限大。故不能由(4)計算 T 值，因此實驗之偶差亦難得知。故我們採用測定值之相加平均 X 取為最確值，即實驗所需之值。

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} = [\bar{M}] / n \quad (5)$$

設 v 為 M 和 X 之差，稱為殘差 (residual)，則

$$M_i - X = v_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

$$\text{及} \quad \sum_{i=1}^n v_i = [v] = 0 \quad (7)$$

(6)(7)兩式于 $n \rightarrow \infty$ 時 $X \rightarrow T$ ， $v_i \rightarrow x_i$ ， $[]$ 係代表和。

§ 2 相加平均之簡便方法：

設 X_0 為測定值 $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ 平均值附近之某數， $M_i - X_0$ 之差以 $v_1', v_2', \dots, v_n'$ 表示。

則：

$$X = X_0 + [v'] / n \quad (8)$$

上式可以A表列表計算：

表 A

M	$v'(M_i - X_o)$	$v(M_i - X)$
M_1	v_1'	v_1
M_2	v_2'	v_2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
M_n	v_n'	v_n
$[M]$	$[v']$	$[v]$

$[v]$ 是用以驗算，當 $[v] = 0$ 表示計算無誤。

例：某棒測定值如下，求最確值？（單位 cm ）。

312.2	311.9	312.0
312.4	311.8	312.3

解：取 $X_o = 312.0$

M	v'	v
312.2	0.2	0.1
311.9	-0.1	-0.2
312.0	0	-0.1
312.4	0.4	0.3
311.8	-0.2	-0.3
312.3	0.3	0.2
	$[v'] = 0.9 - 0.3 = 0.6$	$[v] = 0.6 - 0.6 = 0$

由 $X = X_o + [v'] / n$

得 $X = 312.0 + 0.6 / 6$

$= 312.1$ Ans

又 $[v] = 0$ 所以 312.1 無誤

§ 3 百分率誤差：(Per Cent Error)

若真值 T 已知，而量測之最確值 X 可由 § 2 計算得知。則百分率誤差

$$\% \text{Error} = E = \frac{|X - T|}{T} \times 100\%$$

(9)

例：學生測出 0°C 時乾燥空氣之聲速為 333.1m/sec ，但已知該溫之聲速為 331.4m/sec ，故該生實驗之百分率誤差為：

$$E = \frac{|333.1 - 331.4|}{331.4} \times 100\% = 0.5\%$$

§ 4 平均誤差 (A.D) (The average deviation of the mean)

已知一組測定值之算術平均為 $m = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n}$ ，設 $\delta_i = |M_i - m|$ 稱為偏差，

$$\text{又平均偏差 } \delta = \sum_{i=1}^n \delta_i / n$$

則：

$$A.D = \delta / \sqrt{n} \quad (10)$$

根據誤差分佈之可能率，知真值 T ，居于 $m \pm A.D$ 之區域和區域外之可能率各為 $1/2$ 。

平均百分率誤差，定義為

$$\%A.D = \frac{A.D}{m} \times 100\%$$

此亦為一重要表示法，顯示平均誤差對測定值之比值。

階級 (Δh)	級中值 (h)	度數 (f)	相對度數 (f/n)
-5.5 ~ -1.5	-5.0	2	0.002
-4.5 ~ -3.5	-4.0	16	0.016
-3.5 ~ -2.5	-3.0	79	0.079
-2.5 ~ -1.5	-2.0	193	0.193
-1.5 ~ -0.5	-1.0	204	0.204
-0.5 ~ 0.5	0	212	0.212
0.5 ~ 1.5	1.0	190	0.190
1.5 ~ 2.5	2.0	89	0.089
2.5 ~ 3.5	3.0	10	0.010
3.5 ~ 4.5	4.0	4	0.004
4.5 ~ 5.5	5.0	1	0.001
計 0		1000	1.000

表 B

§ 5 誤差分佈和度數折線：

某人距靶 200ft，靶高 11ft 寬 25ft，擊出 1000 發子彈，若將靶高分成 11 階級（每級 1ft），得知落在各階級之度數（frequency）及度數分佈如表 B。其中 $n = 1000$ ， f 為度數。階級以靶中心為原點，向上為正，向下為負。

圖 A 係將階級 Δh 取在 X 軸，相對度數取在 Y 軸所繪的柱狀圖。所得中點之連線稱為度數折線。由圖可知左側矩形高於右側矩形，此原因係由重力因素所引起。由誤差公理(2)知正負誤差發生之機會應相等，故取對應左右之高度平均值而得點線所示之折線，為一完全對稱之圖形。

若 $n \rightarrow \infty$ 而 $\Delta h \rightarrow 0$ 則度數折線將漸趨一圓滑而對稱的曲線，此極限之曲線稱為度數曲線。

由 A 圖之度數折線，知橫坐標自 0 向左右偏離的大小，即表示誤差之大小。而縱坐標折線之高度，即表示此誤差產生之可能率。因此可知絕對值愈小的誤差發生的機會愈大，反之誤差無限大者發生的機會幾近於零。

以上僅簡略介紹實驗中，所用到的最基本數學，以決定測值的最確值及誤差分佈情形。讀者欲作測定值之深入分析可參閱：

Pugh & Winslow : Analysis of physical measurements 一書。

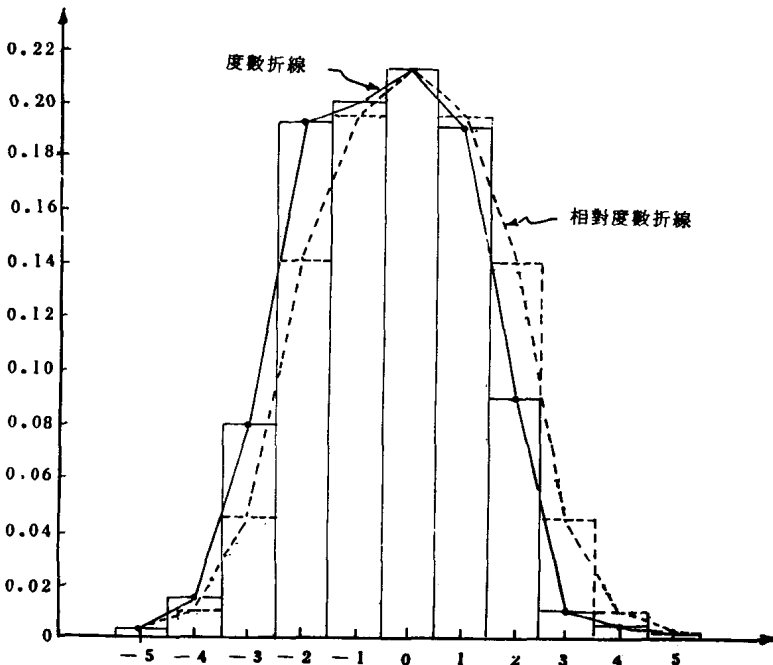


圖 A 度數折線圖

(六)函數圖形舉例

若一數 x ，依某一定律或關係對應於一定數 y ，此對應即稱為函數 (Function)。對 x 值可以某條件限制之，如 $x \geq 2$ ， $x \neq 0$ 等，對應於 x 之數 y ，稱為函數之值，常以 $y = f(x)$ 表示。

x 稱自變數， y 稱因變數。於直角坐標 $X-Y$ 軸上，繪出 $y = f(x)$ 之關係圖形者，謂之函數圖形。

下面舉出三種函數圖形，以供學生實驗時繪圖參考之用：

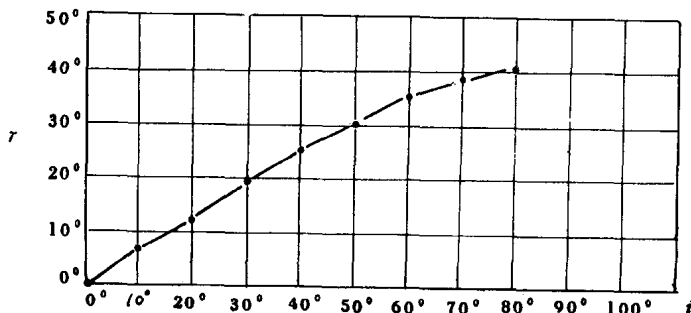
(一) 一次函數關係圖形：

光之折射實驗 (實驗廿五) 中，某學生測得以玻璃為介質時之入射角 i 及折射角 r 之值如下：

入射角 i	折射角 r
0	0
10	6.7
20	13.3
30	19.6
40	25.2
50	30.7
60	35.1
70	38.6
80	40.6

則其 $i-r$ 圖形如下：

圖B



(二) 平方函數關係圖形：

某學生測一正方形面積，測定其長度之值如下：

長度 ℓ (m)	面積 A (m^2)
1	1
2	4
3	9
4	16
⋮	⋮

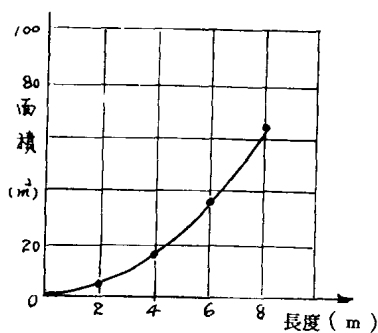
則 $\ell - A$ 之圖形如圖C所示。

(三) 立方函數關係圖形：

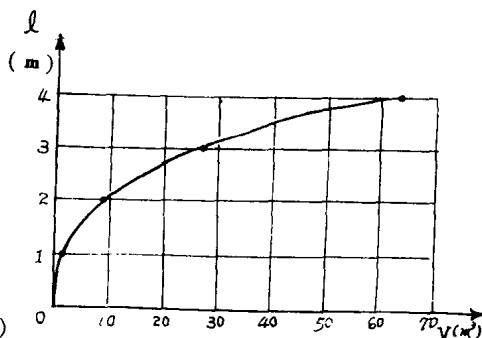
若求正立方形之體積，則由上例可得下表：

長度 ℓ (m)	面積 V (m^3)
1	1
2	8
3	27
4	64
⋮	⋮

則 $\ell - V$ 之圖形如圖D所示。



圖C



圖D