

第 三 版

電子儀表 與測試技術



**ELECTRONIC
INSTRUMENTATION
AND MEASUREMENT TECHNIQUES**

W.D. COOPER A.D. HELFRICK

趙健雄 譯

電子儀表 與測試技術

第 三 版

趙健雄 譯

儒林圖書公司 印行

版權所有
翻印必究

電子儀表與測試技術

譯 者：趙 健 雄

發行人：楊 鏡 秋

出版者：儒林圖書有限公司

地 址：台北市重慶南路一段 111 號

電 話：3118971-3 3144000

郵政劃撥：0106792-1 號

吉豐印刷廠有限公司承印

板橋市三民路二段正隆巷 46 弄 7 號

行政院新聞局局版台業字第 1492 號

中華民國七十五年七月初版

定價新台幣 200 元正

原著序

本書係供四年或二年制大學及專科的電子及電機工程科系學生，作為教科書之用；當然，也可以當做專業工程師的複習教材或手冊。這本書可以協助讀者在基本的電氣測量上打好基礎；書中所舉的例子，範圍從基礎的測量到複雜的電腦控制系統均有。

第三版做了下面的一些修正：首先，有關機電式電表部份，由原來的兩章合併成一章；電橋部份也併入一章。而把節省出來的篇幅，用來介紹採用新技術的一些測量系統。

第七章的示波器部份已重新改寫，並添加了最近在陰極射線管及示波器電路方面，所發展出的技術。信號產生及信號分析，現在也分別各自獨立成為一章（第八章及第九章），以反映在這方面的發展。第十三章則敘述供自動測試系統使用的電腦控制測試設備，涵蓋目前快速發展的測試及測量技術。

一本好教科書所必須具備的，像精心設計的例題，每章後面的習題以及複習問題等，也都繼續保留下來。書末還附有部份問題的解答。

W. D. COOPER

A. D. HELFRICK

目 錄

原著序.....	VI
第一章 測量與誤差	1
1-1 定義	1
1-2 準度與精度	2
1-3 有效數字	3
1-4 誤差的類型	8
1-5 統計分析	12
1-6 誤差的機率	15
1-7 限定誤差	20
複習問題	22
習 題	22
第二章 測量單位之系統	27
2-1 基本單位與衍生單位	27
2-2 單位的系統	28
2-3 電及磁的單位	31
2-4 國際單位系統	34
2-5 其他的單位系統	38
2-6 單位的轉換	39
習 題	41

第三章 測量的標準	45
3-1 標準的分類	45
3-2 質量、長度及容量的標準	47
3-3 時間及頻率的標準	48
3-4 電的標準	51
3-5 溫度及發光強度的標準	60
3-6 IEEE 標準	61
複習問題及習題	62
第四章 機電指示儀表	63
4-1 懸垂式電流計	63
4-2 電流計的轉矩及偏轉	64
4-3 永久磁鐵動圈式機械裝置	69
4-4 直流安培計	76
4-5 直流伏特計	81
4-6 伏特計的靈敏度	84
4-7 伏特計安培計式電阻測量法	89
4-8 串聯式歐姆表	92
4-9 分路式歐姆表	96
4-10 複用電表或VOM	99
4-11 直流儀表的校準	104
4-12 交流指示儀表	105
4-13 熱電儀表	116
4-14 功率測量用的電動力計	118
4-15 瓦時表	121
4-16 功率因數計	124
4-17 儀表變壓器	126

習 題	132
第五章 電橋及其應用	135
5-1 簡 介	135
5-2 Wheatstone 電橋	136
5-3 Kelvin 電橋	144
5-4 保護式 Wheatstone 電橋	149
5-5 交流電橋 及其應用	153
5-6 比較電橋	157
5-7 Maxwell 電橋	161
5-8 Hay 電橋	163
5-9 Schering 電橋	166
5-10 不平衡條件	168
5-11 Wien 電橋	172
5-12 Wagner 接地	174
5-13 電位計	176
習 題	178
第六章 測量基本參數的電子儀表	181
6-1 具有放大作用的 DC 電表	182
6-2 用整流器的 AC 伏特計	186
6-3 真 RMS 值反應式伏特計	191
6-4 電子複用電表	192
6-5 選擇類比伏特計所需考慮的事項	197
6-6 差值式伏特計	200
6-7 數位伏特計	205
6-8 元件測量用的儀表	215
6-9 Q 值表	224

6-10	向量式阻抗表	236
6-11	向量式伏特計	240
6-12	RF 功率及電壓測量	244
	習 題	247
第七章	示波器	249
7-1	簡 介	249
7-2	示波器的方塊圖	250
7-3	陰極射線管	251
7-4	CRT 電路	266
7-5	垂直偏向系統	267
7-6	延遲線	274
7-7	多光跡式	278
7-8	水平偏向系統	281
7-9	示波器探針及轉換器	287
7-10	示波器技巧	290
7-11	特殊示波器	296
	習 題	306
第八章	信號產生器	309
8-1	正弦波產生器	309
8-2	頻率合成式信號產生器	322
8-3	分頻式產生器	327
8-4	信號產生器的調變	330
8-5	掃頻產生器	330
8-6	脈波及方波產生器	336
8-7	函數產生器	346
8-8	音頻信號產生器	348

習 題	350
第九章 信號分析	353
9-1 波形分析儀	353
9-2 諧波失真分析儀	357
9-3 頻譜分析	363
習 題	382
第十章 計頻器及時距測量	385
10-1 簡單計頻器	385
10-2 測量誤差	399
10-3 計頻器頻率量程之擴充	403
10-4 自動化及電腦化計頻器	407
習 題	409
第十一章 用做儀表系統輸入元件的變能器	411
11-1 變能器的分類	411
11-2 變能器的選擇	412
11-3 應力計	416
11-4 位移變能器	423
11-5 溫度的測量	435
11-6 光敏裝置	450
習 題	458
第十二章 類比及數位數據獲取系統	459
12-1 儀表系統	459
12-2 磁帶記錄器	462
12-3 自平衡式電位計	472

12-4	數位至類比轉換	476
12-5	類比至數位轉換	478
12-6	多工化	491
12-7	空間編碼器	495
第十三章	電腦控制式測試系統	501
13-1	測試音響擴大機	501
13-2	測試無線電接收機	503
13-3	電腦控制式儀表系統中之儀表	509
13-4	IEEE 488 電子界面	516
13-5	數位控制概論	519
13-6	以微電腦為基礎之測量中的信號時序例子	520
	複習問題	522
附錄A	縮寫、符號及字首	523
附錄B	分貝換算表	527
	部份習題解答	535
	名詞表	539

第一章

測量與誤差

1-1 定義

測量一般指的是使用一部儀表，以物理的方法來決定某種量或變數。儀表能擴充人類的能力，在許多情況下，只依賴人類的本能是不夠的，尚須借助儀表來決定某些未知量的值。因此，可以給儀表下這樣的定義：儀表是一種裝置，用來決定某種量或變數的數值或幅度。而電子儀表，顧名思義，就是利用電或電子原理，做為其測量功能的儀表。電子儀表可能只是極為簡單的裝置，像基本的直流電流計（見第四章）。隨著技術的進步，對更精密、更準確之儀表的需求日益迫切，在儀表設計及應用方面，也有新的發展。為靈活運用這些儀表，我們必須瞭解儀表的操作原理，並能評估它的適用性。

測量時所用到的一些名詞，分別定義於后：

儀表 (*instrument*)：一種用來決定某種量或變數之數值或幅度的裝置。

準度 (*accuracy*)：儀表讀出被測變數與其真值之間接近的程度。

精度 (*precision*)：指測量可重現的程度；也就是說，若變數之

值已固定，精度就是指重覆測得值之間的差異程度。

靈敏度 (*sensitivity*)：指儀表的輸出訊號或反應對輸入或被測變數變化的比值。

解析度 (*resolution*)：指儀表可以反應出的最小被測值之變化。

誤差 (*error*)：與被測變數之真值的偏差。

有許多方法可以用來減少誤差的影響，例如：在精密測量時，應該讀取多個觀測值，而非只讀取一個觀測值。改用不同的測量方式，或者用不同的儀表進行相同的測量，也可以增加準度。雖然這些技術可以藉著減少環境或隨機誤差，來增加測量的精度，不過卻無法計算儀表的誤差*。

本章將介紹在測量中不同類型的誤差，以及一般用來表示誤差的方法（用被測變數最可靠值來表示的方法）。

1-2 準度與精度

準度指的是與被測量之真值一致或接近的程度。精度則指一群測量或儀器之間一致的程度。

為說明準度與精度的差異，我們可以比較兩個製造商及型號均相同的電壓計。這兩個表都有邊緣指針 (*knife-edged pointer*) 及附有鏡子的刻度表，以避免看錯；二者的刻度也經仔細地校準，因此均可讀到相同的精度。如果其中一個電表的串聯電阻換成不同的阻值，而使其讀數的誤差很大，則這兩個電壓計的準度就不相同（要決定那一個電表有問題，必須與另外一個標準電表相比較）。

* 參閱 Melville B. Stout 的 *Basic Electrical Measurements* 2nd ed. (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1960) 一書，pp. 21-26。

精度有兩項特徵：－致性 (*conformity*) 及有效位數 (*significant figures*)。以一個真值 $\approx 1,384,572\ \Omega$ 的電阻為例，用歐姆表反覆測得的值均指到 $1.4\ \text{M}\Omega$ 。測量者是否能從刻度上讀到真值呢？然而測量者從刻度上所能讀到的只是 $1.4\ \text{M}\Omega$ 這個數值，這已經是他可能從刻度上讀出最接近真值的數值了。雖然這些測出值彼此沒有偏差，這種由於刻度的限制所產生的誤差，便是精度誤差。此例說明了由於有效位數的不足，一致性是精度的必要條件，但不是充分條件。同樣的，精度也只有準度的必要，而非充分條件。

初學者往往傾向毫不考慮地接受從儀表上所讀出的表面值，而忽略了精度並不足以保證讀數的準度。事實上，良好的測量技術，需要對測得結果的準度「不斷地懷疑」。

在比較嚴格的工作中，測試者應養成使用不同的儀表或不同的測量技巧，來進行各自獨立的多組測量習慣，以避免受相同的系統誤差所支配。同時，也要能確定儀表的功能是否正常，能用已知的標準加以校正，並確定沒有外部的干擾來影響測量的準度。

1-3 有效數字

精度可以從表示結果的有效數字 (*significant figures*) 之位數看出。有效數字傳達了有關某一量的測量精度及數量之實際資訊。有效數字愈多，測量的精度也愈大。

舉例而言，一枚標示阻值為 $68\ \Omega$ 而非 $67\ \Omega$ 或 $69\ \Omega$ 。如果標示的電阻值是 $68.0\ \Omega$ ，則表示其電阻值比較接近 $68.0\ \Omega$ ，而非 $67.9\ \Omega$ 或 $68.1\ \Omega$ 。 $68\ \Omega$ 有兩位有效數字， $68.0\ \Omega$ 有三位有效數字。後者有較多的有效數字，表示精度比前者高。

不過往往數目字的總位數，並不足以代表測量的精度。用來表示人口或金錢的數目往往很大，通常在小數點之前加上多個零，來表示

約略的值。例如，都市人口有 380,000（用六位數來表示），或許意味著人口數的真值是在 379,999 與 380,001 之間；但是通常是指人口數接近 380,000，而非 370,000 或 390,000——在這種情況下，人口數的有效數字只有兩位。那麼較大的數目該如何表示呢？

在技術上，可以用十的次幂此種較科學性的修正記號來表示，如 38×10^4 或 3.8×10^5 。如此便可以表示出人口數目的有效位數只有兩位。由於小數點「左側」的零而產生的不確定問題，便可用十的次幂這種科學表示法 (*scientific notation*) 來解決。以光速是 186,000 哩／秒來說，對具有技術背景的人而言不會不懂；不過若寫成 1.86×10^5 哩／秒，則更清楚。

習慣上在記錄測量的結果時，都是把我們確定最接近真值的所有數字都記錄下來。例如從電壓計上讀取的電壓值是 117.1 V，這表示由觀測者所得到的最佳估計值是比較接近 117.1 V，而非 117.0 V 或 117.2 V。此外結果也可以用可能誤差範圍 (*range of possible error*) 來表示。電壓可以表示為 $117.1 \pm 0.05\text{V}$ ，顯示電壓值介於 117.05 V 與 117.15 V 之間。

為獲得最可能的答案（最接近真值）而進行多次各自獨立的測量時，結果通常可以用所有讀數的算術平均值 (*mean*) 來表示，並以與平均值的最大偏差來做為可能誤差範圍。請參見例題 1-1。

例題 1-1

由四位觀測者分別測得的電壓，依次是 117.02 V、117.11 V、117.08 V 及 117.03 V。計算 (a) 平均電壓，(b) 誤差範圍。

解答

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad E_{av} &= \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{N} \\
 &= \frac{117.02 + 117.11 + 117.08 + 117.03}{4} = 117.06 \text{ V}
 \end{aligned}$$

$$(b) \text{ 誤差範圍} = E_{\max} - E_{\min} = 117.11 - 117.06 = 0.05 \text{ V}$$

$$\text{又 } E_{\max} - E_{\min} = 117.06 - 117.02 = 0.04 \text{ V}$$

平均誤差範圍為

$$\frac{0.05 + 0.04}{2} = \pm 0.045 = \pm 0.05 \text{ V}$$

當準度不同的兩個以上測量要相加時，「結果的準確性以準度最差的測量為準」。例題 1-2 是以串聯時，兩個電阻值之相加為例。

例題1-2

電阻 R_1 及 R_2 串聯。利用 Wheatstone 電橋測得兩個電阻的阻值分別為 $R_1 = 18.7 \Omega$ ， $R_2 = 3.624 \Omega$ 。以適當的有效位數計算出電阻總和。

解答

$$R_1 = 18.7 \Omega \text{ (三位有效數字)}$$

$$R_2 = 3.624 \Omega \text{ (四位有效數字)}$$

$$R_T = R_1 + R_2 = 22.324 \Omega \text{ (四位有效數字)} = 22.3 \Omega$$

以斜體字表示的是有疑問的數字；在 R_1 及 R_2 相加時，和的最後三位數都是有疑問的數字。因為有一個電阻值只準確到三位有效數字（十分之一歐姆），所以保留最後兩位數（2 及 4）並沒有什麼意義。結果因此須減少到三位有效數字（也就是最接近的十分之一 Ω ），亦即 22.3Ω 。

在「乘法」運算時，有效位數會增加得很快，但是答案須維持適當的有效位數，如例題 1-3 所示。

例題1-3

電阻值為 $35.68\ \Omega$ 的電阻上，流過 $3.18\ \text{A}$ 的電流，試計算電阻兩端的壓降，並取適當的有效位數。

解答

$$E = IR = (35.68) \times (3.18) = 113.4624 = 113\ \text{V}$$

在此乘法運算中，有效數字只有三位，因此答案最多也只能有三位有效數字。

在例題 1-3 中，電流 I 有三位有效數字，電阻 R 有四位有效數字；乘出的結果因此只有三位有效數字。這個例子說明了答案的準度不可能大於各因數中的最差準度。留意即使答案位數增多，也必須刪掉或四捨五入。通常如果將刪掉的（最低效）數字其第一位數小於 5，那麼其後的數字都要刪掉，如例題 1-3 所示。如果要刪掉的第一位數字等於或大於 5，先前的數字就要加 1。對三位數的精度而言， 113.46 須取為 113 ；而 113.74 須進位成 114 。

帶有誤差範圍之數字加法，如例題 1-4 所示。

例題1-4

$$826 \pm 5 \text{ 加 } 628 \pm 3$$

解答

$$N_1 = 826 \pm 5 (= \pm 0.605\%)$$

$$N_2 = 628 \pm 3 (= \pm 0.477\%)$$

$$\text{和} = 1,454 \pm 8 (= \pm 0.55\%)$$

例題 1-4 中有疑問的部份是「相加」的，而 $\pm$ 號表示一個數目可能大於，而另一個數目是小於。因此，相加之後便能把有疑問的範圍在最糟的情況下一併考慮進去。最後結果中有疑問部份的百分比，並不會顯著大於原來 N_1 及 N_2 疑問部份之百分比。

在下面這個例題中，我們將前面兩個數目相減之後，比較誤差範圍的變化。

例題 1-5

以 826 ± 5 減 628 ± 3 ，並把答案的誤差範圍用百分比來表示。

解答

$$N_1 = 826 \pm 5 (= \pm 0.605\%)$$

$$N_2 = 628 \pm 3 (= \pm 0.477\%)$$

$$\text{差} = 198 \pm 8 (= \pm 4.04\%)$$

例題 1-5 裡也是將有疑問的部分相加，相加的理由和例題 1-4 一樣。比較這兩個例題的結果，注意結果的精度以百分比表示時，相差甚鉅。相減之後的結果，疑問部份的百分比比較相加之後疑問部份的百分比，呈現大幅度地增加。即使是二數目的差相當小時疑問部份之百分比，也會增加得很大。請看下面的例題。

例題 1-6

以 462 ± 4 減 437 ± 4 ，並用百分比來表示答案的誤差範圍。

解答

$$N_1 = 462 \pm 4 (= \pm 0.87\%)$$

$$N_2 = 437 \pm 4 (= \pm 0.92\%)$$

$$\text{差} = 25 \pm 8 (= \pm 32\%)$$