

萬用電表設計

邱傳訓 著



中國科學圖書儀器公司
出版

萬用電表設計

邱 傳 訓 著

中國科學圖書儀器公司

出 版

萬用電表設計

版權所有

不准翻

52215

一九五二年十月初版

◀定價人民幣一萬元▶

編著者 邱 傳 訓

出版者 中國科學圖書儀器公司
上海(18)延安中路537號

總發行所 中國科技圖書聯合發行所
上海中央路24號304室
電話19566 電報掛號21968

分銷處 中國科學圖書儀器公司
南京：太平路32號
廣州：永漢北路204號

引 言

萬用電表⁽¹⁾，即複用電表⁽²⁾或伏歐毫安表⁽³⁾，亦稱電路分析器⁽⁴⁾為一個高靈敏電流計藉電路的變換配合，以供多種類及多量限的量電之用，使應用者對電路情況，得以瞭如指掌。故萬用電表當為我電業工作者不可或少之利器，誠如狩獵者之有鷹犬然。

商品萬用電表不但價格高昂，且因大量製造之故，其準確度未必件件可靠。自製萬用電表如能合理設計和精心製作，不但能節省金錢，且可符合設計者的特殊要求，得到價廉和物美的雙重利益。讀者祇要了解萬用表中各系的作用原理，有條不紊地進行設計與製作，則自製精確滿意的萬用表，絕非難事。

本書以基本電學理論為基礎，分析萬用表各系的工作原理和設計方法。取材齊全，凡屬於萬用表範圍內各種測試方式，羅列無遺。此外並有下列三個特點：

(一)編排系統化：依設計應循路線編排，使整個設計過程，順利進展，決無混亂顛倒以至進退維谷之弊。

(二)公式通用化：公式準確可靠，骨架簡單明朗，計算時代入即得。

(1) Universal Meter

(2) Multirange Meter

(3) Volt-ohm-milliammeter

(4) Circuit Analyzer

(三)數字精確化：附表中各項數值，在演算過程中均採取四位以上有效數字⁽¹⁾，並用計算機搖出，堪稱精確。讀者苟能直接採用，可免繁複操算之勞。

至於配裝方面，對零件的選取以及電阻的修配，均有經驗介紹。初學者並可參照書末連續性設計實例，以作借鏡。

本書承錢尚平先生詳為校正，陸鶴壽先生提示寶貴意見，均此誌謝。

著者於滬濱 1952.5

(1) 四位有效數字的最大誤錯率(Percentage Error)為0.1%，其意義為一數不論屬整數或小數，自有效數字中最大位數的一位起，連續採用四位原數，以後的數字可改成零。例如 125.322 可簡化成 125.3，1004999 可簡化成 1004000 或 1005000，.000123456 可簡化成 .0001234，但萬不可改成 .0001，因如此扣去的數字似乎很小，但和原數相比，其誤錯實大至 20%。

目 錄

| | |
|---------------------|----|
| 第 一 章 永久磁鋼動圈電流計 | 1 |
| (一)動圈電流計的作用原理 | 1 |
| (二)動圈電流計的內部結構 | 4 |
| (三)表頭選擇及靈敏度的簡便測試 | 5 |
| (四)表頭內部的檢視和必要的修整 | 8 |
| (五)表頭靈敏度的擴展 | 9 |
| (六)表匣改裝和指針放長的參考 | 11 |
| 第 二 章 表頭特性的測定 | 13 |
| (一)定度規律的鑑定 | 13 |
| (二)用標準電流計測定表頭靈敏度 | 14 |
| (三)電阻替代測定表頭內阻法 | 15 |
| (四)分路半負荷測定表頭內阻法 | 16 |
| (五)用滑線電橋直接測算表頭內阻法 | 19 |
| (六)用歐姆定律測算表頭靈敏度 | 21 |
| 第 三 章 直流電流測量系 | 24 |
| (一)量限分檔的選定 | 24 |
| (二)開路置換式分流器計算 | 27 |
| (三)閉路抽頭式分流器計算 | 28 |
| 第 四 章 電阻測量系之一——串連測量 | 31 |

| | |
|--------------------------|-----------|
| (一)歐姆表的作用原理 | 31 |
| (二)歐姆表標準檔設計 | 32 |
| (三)歐姆表倍率檔設計 | 34 |
| (四)歐姆表內電阻的配算 | 36 |
| (五)電池電壓變動的抵償 | 37 |
| (六)串連式零歐姆調整器的計算 | 38 |
| (七)歐姆表的量限和定度 | 41 |
| 第五章 電阻測量系之二——並連測量 | 48 |
| (一)並連測量的原理和計算 | 48 |
| (二)量限標準的指定和分路抽頭點的求法 | 50 |
| (三)並連歐姆表的定度 | 54 |
| 第六章 直流電壓測量系 | 56 |
| (一)每伏脫歐姆數的意義 | 56 |
| (二)倍率器計算 | 57 |
| (三)倍率分檔的方式 | 59 |
| 第七章 交流電壓測量系 | 61 |
| (一)交流電的平均值 | 61 |
| (二)有效值和平均值的折算 | 63 |
| (三)氧化銅整流器 | 65 |
| (四)整流器的接法 | 66 |
| (五)交流倍率器的計算 | 69 |
| (六)交流定度分流器 | 71 |
| (七)交流電壓表的定度 | 73 |

| | |
|----------------------|-----|
| 第八章 交流電流測量 | 79 |
| (一)交流電流測量的原理 | 79 |
| (二)電流變壓器的配裝和接法 | 80 |
| 第九章 音頻功率及電平測量 | 82 |
| (一)音頻電壓測量 | 82 |
| (二)音頻功率計算 | 83 |
| (三)電平和分貝 | 83 |
| (四)增益和減損的比較計算 | 85 |
| (五)固定標準分貝值計算 | 87 |
| (六)分貝表刻度和累加分檔的測讀 | 89 |
| (七)阻抗配合及阻抗失合時分貝讀數的矯正 | 90 |
| (八)奈波和 VU | 92 |
| 第十章 感應量及電容量的測量 | 94 |
| (一)感應電抗及電容電抗 | 94 |
| (二)耗阻與電抗的合成阻抗 | 96 |
| (三)電感電容測量的原理和計算定度 | 97 |
| (四)電感電容測量的倍率分檔 | 103 |
| (五)電感電容測量時應行注意事項 | 105 |
| 第十一章 萬用電表的配裝 | 107 |
| (一)面板的選製 | 107 |
| (二)電路轉換的方式 | 108 |
| (三)耗阻的選擇及修整 | 110 |
| (四)耗阻的校核——簡易電橋法 | 114 |

| | |
|--|------------|
| (五) 刻度片的繪製 | 117 |
| 第十二章 實施設計的步驟及應用公式集要 | 119 |
| (一) 設計順序圖 | 119 |
| (二) 應用公式集要 | 120 |
| 連續設計實例 | 124 |
| (一) 高級萬用電表 | 124 |
| (二) 袖珍式萬用電表 | 136 |
| 成品萬用表電路及裝配的參考 | 143 |
| (一) 業餘製作伏歐毫安表 | 143 |
| (二) 中級伏歐毫安表, 辛浦森240型 | 144 |
| (三) 高級萬用表, 辛浦森260型 | 146 |
| (四) 高級軍用表 I-176 型 | 147 |
| (五) Radio City Products 449 型 | 149 |
| (六) Triplet 630 型 | 149 |
| (七) Precision 85 型 | 149 |
| 附表 | 150 |
| (一) 基本電學公式單位對照表——附電流電阻及電壓實用單位 定義 | 150 |
| (二) 電容器色譜表 | 151 |
| (三) 常用電阻線規格表 | 152 |
| (四) 軟銅線導電性能表 | 153 |
| (五) AWG, BWG, SWG 20—40 線徑及切面對照表——附公 厘, 密爾的長度及面積換算式 | 154 |

第一章

永久磁鋼動圈電流計

(一) 動圈電流計的作用原理

以構造和作用原理來分別，電流計有多種類型，一般因靈敏度較低，攜帶和使用不方便以及表面刻度不勻稱等缺點，不宜作萬用電表之用。迨 1885 年，由達松凡爾檢電表 (D' Arsonval

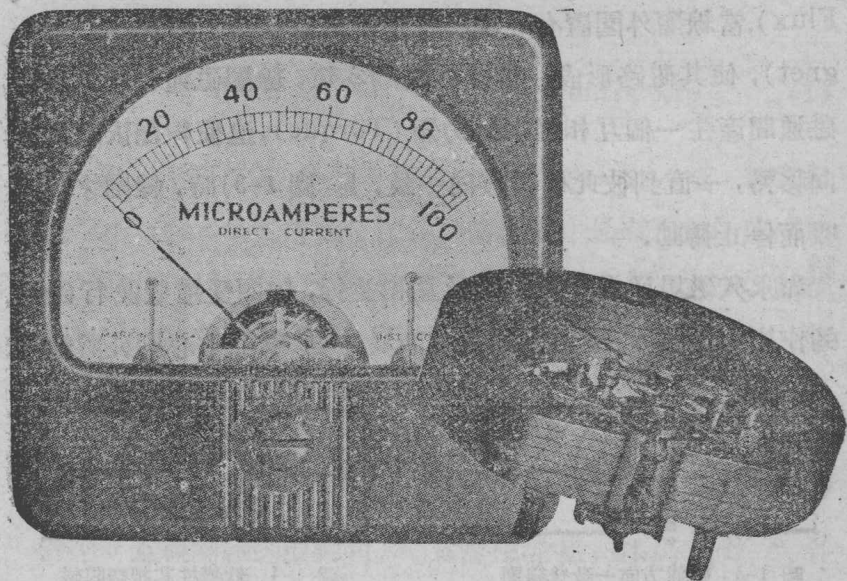


圖 1-1 永磁動圈電流計

Galvanometer)演進成輕巧便攜的韋斯登動圈電流計 (Weston Movement) 後,用途大為擴展,目前所有萬用電表的表頭幾無一不屬此式,蓋以其缺點盡除而優點俱備之故。

動圈電流計的作用原理是一個通有直流電流的輕巧線圈,作用在一個永久磁場 (Permanent Magnet Field) 的空隙 (Air gap) 中,產生相對力矩的結果。圖 1-2 在一個線圈 L 中通了直流電流,依右手定則 (Right Hand Rule) 產生自下而上方向的磁通 (Magnetic Flux),當線圈外圍置有一塊馬蹄形永久磁鋼 (Permanent Magnet),使其磁路形成一個圓柱體的空隙,線圈磁通和永久磁場磁通間產生一個互相推拒的力矩 (Torque),迫使線圈依時針方向移轉,一直到彼此磁通方向一致,見(圖 1-3)時,線圈才被緊吸而停止轉動。

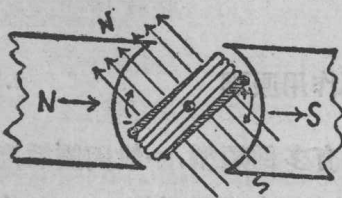


圖 1-2 磁場磁通和線圈磁通間產生相對力矩。

用在一個永久磁場 (Permanent Magnet Field) 的空隙 (Air gap) 中,產生相對力矩的結果。圖 1-2 在一個線圈 L 中通了直流電流,依右手定則 (Right Hand Rule) 產生自下而上方向的磁通 (Magnetic Flux),

當線圈外圍置有一塊馬蹄形永久磁鋼 (Permanent Magnet),使其磁路形成一個圓柱體的空隙,線圈磁通和永久磁場磁通間產生一個互相推拒的力矩 (Torque),迫使線圈依時針方向移轉,一直到彼此磁通方向一致,見(圖 1-3)時,線圈才被緊吸而停止轉動。

如永久磁場通過空隙的磁通互相並行,線圈受這些並行磁通的作用力,將隨線圈所處的角度而異。故空隙中心應裝置軟鐵



圖 1-3 磁通方向一致後線圈停留不動。



圖 1-4 軟鐵柱芯把空隙磁通集中起來。

柱芯 (Iron Core) 一個, 因軟鐵的導磁率遠較空氣為高, 故把穿過空隙的磁通集中而束成以柱芯為中心的雙扇形 (圖 1-4), 這樣非但平均了磁場對線圈的作用, 抑且因磁阻 (Reluctance) 和磁漏 (Magnet Leakage) 的減小, 大大地增加了電表的靈敏度 (Sensitivity)。

設 T 為推動線圈的轉力, 單位為達因公分。

B 為磁隙中的磁通密度, 單位為磁力線數/平方公分。

I 為通過線圈的電流, 單位為安培。

L 為線圈邊的長度, 單位為公分。

R 為線圈半徑, 單位為公分。

N 為線圈圈數, 則:

$$T = \frac{2BILNR}{10} \quad \text{dyne-centimetre} \quad (1)$$

線圈軸的上下二端, 各裝有游絲 (Hair Spring) 一盤, 經常把線圈平衡在圖 1-2 的零值位置。當線圈中通有正向的直流電流, 線圈便依時針方向轉動, 但因受了游絲張力 (Tension) 的抗拒而在一定的角度處停留下來。依虎克定律 (Hook's Law), 線圈軸的扭轉角, 正比於所受的扭力 T , 即:

$$\theta = KT = \frac{2KBINR}{10} \quad (2)$$

式中 θ 為線圈軸的偏轉角, K 為游絲常數, 因 B, L, N, R , 各項也都是不變數字, 故線圈的偏轉角 θ 正比於通過線圈的電流

1. 所以標度片的電流(電壓同)刻度,可以達成均勻一致。

(二)動圈電流計的內部結構

圖 1-5 及 1-6 為電表結構剖視: PM 為馬蹄形永久磁鋼, 由

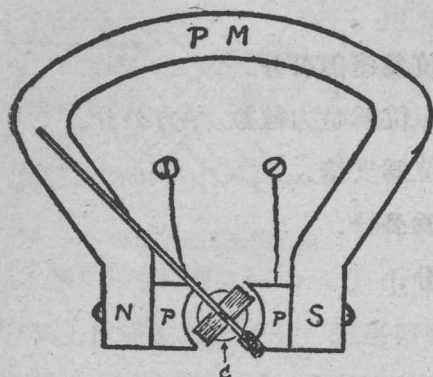


圖 1-5 永磁動圈電流計結構平面。

鎢, 鉻, 鈷等含碳鋼或阿爾尼古 (Alnico 為鋁, 鎳, 鈷, 鐵合金) 系新磁性材料, 製成整塊或多片層疊式。 P 為磁極 (Magnet Poles)。 C 為軟鐵柱芯, 被非磁性金屬 (如銅) 支承於磁場空隙中心。 F 為輕金屬 (鋁) 線圈框架, 上下各裝硬鋼質軸尖 (Pivot) 一

個。 N 為鋁質管形指針, 針頭壓成垂直刀口 (Knifeedge), 針尾有蜷曲銅片或螺旋形銅絲圈等重力平衡物 (左右兩邊亦有平衡裝置, 與指針互成十字架形)。 B 為寶石, 硬玻璃或硬鋼質軸承 (Bearing), 以支承線圈軸尖, 使線圈在磁場空隙中能自由轉動。 S 為上下二游絲, 盤

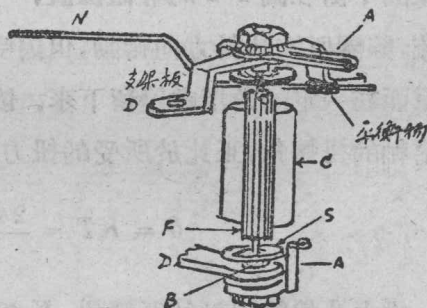


圖 1-6 動作機構剖視。

絡方向相反，以生勻稱的彈力。游絲內端黏連於線圈頂方或底方的接線釘柱上，和圈架絕緣，但和線圈相通。外端各黏連於扭力調整臂 A 上。調整臂和軸承一起嵌夾於上下支架板 D 上，轉動調整臂可變化游絲的扭力以改變指針的位置。上調整臂並可藉表蓋上的歪螺絲來推動，以隨時調整指針的零值位置。

電流由電表的 (+) 接柱通入，經上支架板，上調整臂，上游絲通入線圈，由下游絲，下調整臂和下支架板至 (-) 接柱流出。(下支架板和表體連接)。

當線圈在磁隙中轉動，割切磁通而過，使鋁框架中感生渦流 (Eddy Current)，產生相反的磁效應，阻抑線圈迅速移轉 (即曳長移轉時間) 及靜止前的左右搖擺，這種現象稱阻尼 (Damping) 作用。若阻尼過大將延遲響應時間 (Response time)，過小則指針在偏轉停留前來回擺動，故阻尼過大過小，均非所宜。

(三) 表頭選擇及靈敏度的簡便測試

萬用電表是一個高靈敏電流計 (俗稱表頭)，經電路的配合而作各種量電單位的測試儀器，其要求必須使用手續簡捷明晰，指度數字精密準確而測量範圍廣泛寬闊。說得具體些就是萬用電

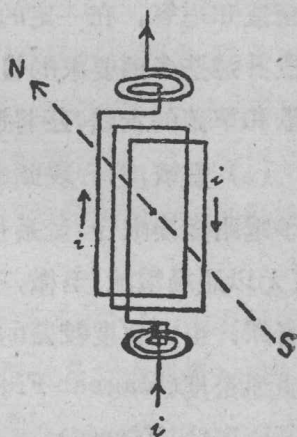


圖 1-7 電流路徑。

表能量直流又可量交流，能量電流，電壓又能量耗阻，甚至能量電感和電容。在一定的準確限度內並俱備足夠的量限分檔。在設計這些多種要求的複用表過程中，首要的條件是選取一個靈敏和準確的表頭，茲將選擇要點列下：

(1) 靈敏度：表頭靈敏度以愈高愈好，唯有靈敏的表頭，藉了電路變換配合，量系量限才可隨心擴展，且靈敏表頭所耗功率（尤以通過電流）至微，不影響被測電路的常數，故所得讀數符合實際。至靈敏度較差的表頭則反是。表頭靈敏度正比於磁鋼的磁通密度(Magnet Flux Density)，線圈的圈數，反比於游絲的僵硬度(Stiffness)。

(2) 準確度(Accuracy)和穩定度(Stability)：表頭製作材料和結構必求上乘，如磁鋼磁性的持久不退，游絲盤列整齊，長度足夠和彈力均勻。線圈質輕，重心適中，形狀規則和排線勻稱。軸尖和承座間角度適當而平滑無缺損。此外如少受溫度濕度和雜散磁場的作用影響。使用時不拘時間和地點，均能保持讀數的準確和不變。

(3) 精密度：指針偏轉範圍不宜小於 90° ，指針要長（當然表頭要大），使極小的轉角得有較長的弧線距，以便刻度寬暢，讀數清晰明確。

以電流通入表頭，使指針得滿度偏轉（一般是 90° ），所需電流愈小表頭愈靈敏。或以等強度電流通入多個表頭，所得偏轉角愈大的愈靈敏。一般萬用電表的表頭，其滿限電流自 50 微安培

(Microampere 即百萬分之一安培) 至 1 毫安培 (Milliampere 即千分之一安培) 間, 但表頭愈靈敏, 價格愈昂貴, 購買如此全新的表頭, 或非一般人所能負擔, 故採用舊表頭或以照相曝光表 (如 PH-77-C 係採用 GE DW48 型表頭), 無線電 R.F 表, 調諧指示表或其他較靈敏的舊表頭改裝, 實為經濟之道, 但此等表頭的可用與否, 必先經一個初步試驗, 以免茫無頭緒而有無從抉擇之感。

試驗時照圖 1-8 以口直接或間接(用導線連繫)含住電表的正接頭, 一手緊握鋅或鋁(如舊乾電或鋁質煙盒及打火機等)一塊, 和電表負接頭搭觸, 試看表針有無偏轉。

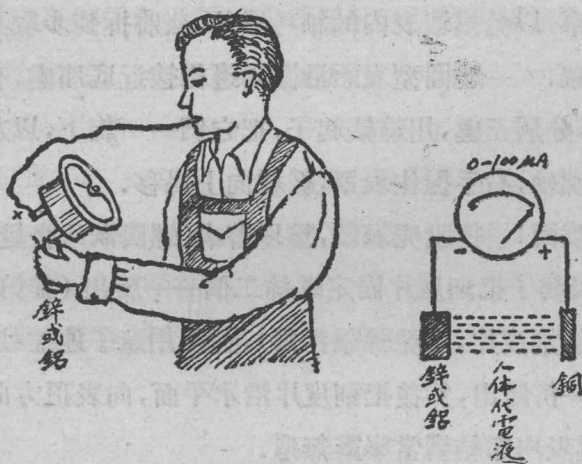


圖 1-8 表頭靈敏度簡便試驗及其相似電路。

讀者也許要奇怪, 電路中沒有電池 (電動力) 何能使表針偏轉呢? 原來人體內大量水份中含有鹽類及有機酸類等, 配合了表

頭接線銅柱及鋅(或鉛)塊等物質,組成一個形體龐大,內阻極高而電動力低微的電池(前者充電液,後者當作正負電極)。如以一手緊握標準舊手乾電的鋅壳為例,足使 $100\ \mu\text{A}$ 的表頭得 90° 或 $1\ \text{MA}$ 的表頭得 9° 的偏轉(餘可依此反比推算,但手執及口含正負電極接觸面的大小,或接觸處濕潤的程度對所生效果極有關係,讀者宜注意之)。

(四)表頭內部的檢視和必要的修整

靈敏度合格的表頭,尚須經內部檢視的手續,方定取捨。不過這是一件精細的工作,動手時必須注意力集中,耐性下手,萬不可慌亂從事,以免損壞表內的細巧機件,茲將拆裝步驟列下:

(1) 揭罩: 一般圓型表頭沿圓周邊緣接近底座處,有小螺絲銷子三個,分居三處,用鐘錶起子,把它們一一旋下,以左手執住表底接線螺絲,右手握住表罩,緩緩向上揭移。

(2) 移度面: 把脫壳表頭,墊以書本(螺脚嵌入書縫)平置桌面,用鐘表起子把刻度片固定螺絲二個一一旋出(旋第二個時,左手應按住刻度片,以免彈擊指針),隨即用鑷子連擋柱(Bumper)二個一併鉗出,然後把刻度片沿水平面,向表頂方向緩緩抽出,此時電表內部結構當曝露無遺。

(3) 電路檢視: 自(+)接頭螺絲看起,接線應直接連接寶石座夾板,經游絲進入線圈,由另一游絲,另一夾板經接線連至(-)接頭。如果發現內部有耗阻絲並接或串接,應予以剪除(如係串