

171077

基本館藏

高等学校教学用书

电工测量

A. C. 卡薩特金著

高等教育出版社

高等學校教學用書

電 工 測 量

A. C. 卡薩特金著
沈庆堉 姜兆望合譯

高等教育出版社

本書系根据苏联國立动力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 出版的卡薩特金 (А. С. Касаткин) 著“电工測量” (Электрические измерения) 1946 年版譯出的。原書經苏联部長會議直屬高等教育委員會審定為高等學校教學參考書。

本書內容為介紹各種电工測量儀表的結構，它們的動作原理和特性等以及各種電數量的測量方法。本書的特點是對电工測量的實際知識介紹得比較多，並且有些材料分析得比較詳細。例如測量儀表的一般機械特性和電的特性、各式儀表的結構及技術特性、功率及電能的測量、感應式電度表誤差曲線的分析等均較其他類似的書籍講得詳細。本書可作高等工業學校电工系电工量計課程的參考書，並可作為從事於與儀表有關的工作人員的參考書。

本書由沈慶堉翻譯緒論、第一、二、十一、十二、十三、十四、十五、十六、十七各章，姜兆望翻譯第三、四、五、六、七、八、九、十各章。

电 工 測 量

A. C. 卡薩特金著

沈慶堉 姜兆望合譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

商務印書館上海廠印刷 新華書店總經售

書號 15010-80 開本 850×1168 1/32 印張 12 12/16 字數 326,000

一九五六年十一月上海第一版

一九五六年十一月上海第一次印刷

印數 1—8,000

定價 (10) 洋 1.90

目 錄

序

緒論	9
0-1. 測量儀器的一般分類	9
0-2. 標準度量 and 標準測量儀表	10
0-3. 直讀法和零直法。直接測量和間接測量	12
0-4. 測量誤差	14
0-5. 電工測量儀表的分類	16
0-6. 電工測量儀表準確度的等級, 基本誤差及附加誤差	18
第一章 電工測量儀表的一般機械特性	20
1-1. 活動系統的裝置。摩擦力矩。傾側誤差	20
1-2. 摩擦誤差	24
1-3. 旋轉力矩和反作用力矩	25
1-4. 品質因數	30
1-5. 平衡	32
1-6. 比控制力矩	33
1-7. 阻尼器	34
1-8. 儀表活動系統移動的微分方程式	37
1-9. 無阻尼的自由振盪	39
1-10. 衰減振盪。阻尼系數	40
1-11. 非週期性偏轉	44
1-12. 在恆定轉矩作用下接入時系統的运动	45
1-13. 实际的阻尼系數	47
第二章 電工測量儀表的一般電的特性	49
2-1. 電工測量儀表的型式	49
2-2. 轉矩的一般表达式	53
2-3. 附加電阻	58
2-4. 分流器	62
2-5. 儀表本身的消耗	64
第三章 磁電式儀表	71
3-1. 磁電式儀表的構造	71

3-2. 旋轉力矩	73
3-3. 外界的影响及它們的消除法	76
3-4. 結構問題和材料問題	79
3-5. 技術特性和运用範圍	83
第四章 电磁式仪表	86
4-1. 电磁式仪表的構造	86
4-2. 旋轉力矩	88
4-3. 电磁的利用因数	91
4-4. 外界的影响及其消除法	92
4-5. 結構及材料的問題	99
4-6. 技術特性和运用範圍	101
第五章 电动式仪表	102
5-1. 电动原理在电工测量仪表中的应用	102
5-2. 电动式伏計、安計及瓦計的旋轉力矩及标尺的特征	103
5-3. 外界的影响及其消除法	106
5-4. 电动式仪表的結構問題及技術特性	114
5-5. 鉄磁电动式仪表	116
第六章 感应式仪表	119
6-1. 感应式仪表的構造	119
6-2. 多極仪表的轉矩及接線圖	122
6-3. 对感应式瓦計轉矩的特性的要求	128
6-4. 外界的影响	130
6-5. 技術特性与运用範圍	131
第七章 运用範圍狹隘的几种型式的仪表	133
7-1. 热線式仪表	133
7-2. 静电式仪表	137
7-3. 热电式仪表	142
7-4. 檢波式仪表	145
7-5. 电子管式仪表	150
第八章 电度表	154
8-1. 电度表的用途及分类	154
8-2. 制动力矩	157
8-3. 核算機構及电度表的誤差	160
8-4. 电动式电度表	162

8-5. 感应式电度表的構造	172
8-6. 感应式电度表电压电路中相位条件的实现	175
8-7. 感应式电度表的誤差曲線	178
8-8. 外界影响对感应式电度表示数的影响	184
第九章 测量功率及电能的方法	185
9-1. 功率的测量	185
9-2. 瓦計的相位誤差	187
9-3. 相位差特性的确定法	189
9-4. 在平衡的三相負載系統內功率及电能的測量	190
9-5. 当負載不平衡时三相系統內功率及电能的測量	195
9-6. 無功功率及無功电能的測量	202
9-7. 虛構負載法	211
第十章 仪表用互感器	216
10-1. 仪表用互感器的用途	216
10-2. 电压互感器	219
10-3. 电流互感器工作过程的特征	225
10-4. 电流互感器的誤差方程式	227
10-5. 电流互感器構造的問題	229
10-6. 端鈕符号的校驗及接線圖	232
10-7. 仪表用互感器的誤差对仪表示数的影响	236
第十一章 测量非电流一次函数的电数量的仪表	239
11-1. 流比計的原理	239
11-2. 相位表	244
11-3. 赫芝表(頻率表)	249
11-4. 欧姆計	253
11-5. 同步指示器	261
第十二章 电流計	264
12-1. 电流計的用途及其分类	264
12-2. 具有活动線卷的磁电式电流計	267
12-3. 冲击电流計	271
12-4. 振動式(共振式)电流計	279
第十三章 示波器	283
13-1. 示波器的分类	283
13-2. 磁电式示波器的構造	285
13-3. 磁电式示波器活动系統振盪的理論	288

13-4. 陰極示波器	293
第十四章 补偿測量法	307
14-1. 补偿原理	307
14-2. 标准電池	310
14-3. 直流电位計的結構	312
14-4. 交流电位計	320
14-5. 利用补偿法校驗互感器	324
第十五章 电阻的測量	329
15-1. 电阻測量方法的分类	329
15-2. 电阻的度量	330
15-3. 直接偏轉法	337
15-4. 惠斯顿电桥	341
15-5. 湯姆生双电桥	348
第十六章 电感及电容的測量	353
16-1. 測量方法的選擇及其分类	353
16-2. 在交流电之下根据欧姆定律的測量法	354
16-3. 在交流电之下惠斯顿电桥的平衡条件	357
16-4. 交流电桥的电源和指零仪表	360
16-5. 用馬克斯威尔电桥測量电感	363
16-6. 用索契电桥測量电容	366
16-7. 用維納电桥測量电容	367
16-8. 測量小电容用的雪林电桥	368
16-9. 爱迪生型电桥	369
16-10. 測量互感用的桥形电路圖	373
第十七章 磁的測量	377
17-1. 測量磁的任务及磁性材料的主要特性	377
17-2. 冲击法測定磁化曲線及磁滯迴線	378
17-3. 电动法。开普西尔仪器	394
17-4. 感应法決定磁感应	396
17-5. 利用爱普契仪器确定鉄里的磁滯損耗及傅科电流損耗	399
参考書目	403
中俄文对照索引	

序

本書應該作為電工學院及其他高等學校電工系電工測量普通課程的教科書。這個課程只分配到 60—80 小時。在材料非常豐富的情況下，簡短的課程範圍使得在講課時和編寫教科書時都發生很大的困難。必須只選擇最重要的，只講一些基本的問題；而刪去一切次要的、技術上常常很饒興趣的且觀念新穎動人的材料。由於這個緣故，在全蘇高等教育委員會的教學大綱里，將電工測量的重要章節如：遠距離測量、非電數量的電工測量、在高頻下的測量、各種無線電測量、電纜的測量、在高压下的測量等等都被刪去。這是不得已並且是不可避免的約制，因為要將這些被刪去的材料安排在很簡短課程的狹窄範圍內是很困難的。測量的普通課程應該只給學生一些基本的知識，這些知識，學生先在校園里，然後在實際工作中對儀表的構造、特殊的和新的測量方法等等熟悉起來而得到補充。

測量課程本身在教學計劃中的位置對課程的進行給予很大的幫助——可以依靠學生在物理課以及特別是理論電工學中所獲得的全部知識。因此，作者避免任何的重複，並在原文中引證理論電工學中相應的章節。

課程內容可以分為緒論及下列兩部分：

- (1) 直讀儀表和工程上的測量；
- (2) 實驗室的以及控制的測量及儀表。

緒論里簡單的說明電工度量衡的一般原理。

在第一部分（第一章至第十一章）中研究各種型式的測量儀表及測量各別電數量的特殊儀表（電度表、相位表、頻率表等等）；在這部分

里尚敘述測量功率和電能的問題，這些問題緊密地與相應的工業用儀表的構造問題相聯系。

第二部分前面的幾章是講電流計和示波器；然後敘述實驗室測量電勢、電壓、電流、電阻、電感和電容的主要方法。在最後一章里講測量磁的原理。

內容安排得使學生能由最簡單的指示儀表和直讀法逐漸轉到應用零值法和差值法的準確實驗室測量方法。

電工測量教程有時好像是有圖解的說明書。在這方面作者力求減少篇幅，並且給予足夠完整的基本原理和主要的概念。

必須指出：本書不是實驗課的參考書。通常有專門的指南作為實驗課的參考書；這些書中詳細地寫明儀表的結構、實驗步驟以及實驗室應用的設備。

作者對提供許多寶貴指示的 M. II. 列文表示衷心的感謝，作者認為這是自己很愉快的責任。

A. 卡薩特根教授

1946 年於莫斯科

緒 論

0-1. 測量儀器的一般分類

在日常電工方面的實際工作中，度量衡學^①上的許多名詞是任意使用的，常常與專門的標準名詞直接相反。這些術語上的錯誤和疏忽，在定制、使用和校驗測量儀器等等的時候，有時會引起不良的誤解。每個工程師，特別是電機工程師，應該了解並且正確地運用度量衡學上的主要定義。在本節中只引出一些學生在電工測量課程中所遇到的度量衡的分類及度量衡學的一般原理。

測量就是某一指定的量與被採用作為單位的同一量的某一數值作比較。實現這個比較所利用的全部技術工具的整体稱做測量儀器。它分為度量和測量仪表兩種(參看全蘇標準 OCT 7636)。

測量單位或測量單位倍数或分数的复制实体稱做具有恆定數值的度量或簡稱度量。例如：電阻線圈、標準電池等等。

在某些一定數值之間复制成單位的任何倍数或分数的度量稱做具有可變數值的度量。例如：可變電容器、可變電感。

用來實現被測量與測量單位作比較的仪表稱做測量仪表。分為指示仪表、較量仪表和成套仪表三種。

指示仪表由其讀數設備(標尺、積算機構等)指出被測量的數值。例如：鐘、溫度計、任何指針式仪表、電度表。指示仪表必須預先直接或間接與度量相比較而分度。例如：伏計可以利用電位計與標準電池相比較而分度。

① 度量衡學是一種測量的科學。

較量仪表(來自拉丁字 comparatio——比較的意思)供數個度量互相比較之用,或供被測量和與較量仪表分離的度量作比較之用(例如:電位計,利用它將被測的量與韋斯頓標準電池的電勢作比較)。

成套仪表包含度量和較量仪表,它們聯接成一個機械的整體(例如:帶有一套標準電阻組成的電阻箱的惠斯頓電橋)。

0-2. 標準度量和標準測量仪表

為了完成電工測量,必須建立電工測量單位的標準實體,並且適當的利用這些標準實體來與被測量作比較。在物理和理論電工學兩課程中已熟知電磁單位制^①以及其標準器;在這裡我們只講一些與利用度量及測量仪表有關的一些特殊度量衡學的問題。

標準度量和標準測量仪表是一切測量單位制的基礎;用它們來复制和保存測量單位,並用來檢驗和校準度量和測量仪表。依據從屬關係,度量和仪表的名稱分為標準器以及有限準確度的標準度量和標準仪表。

用來复制和保存測量單位具有度量衡學上準確度的(ГОСТ 1450-42),也就是在目前測量技術的情況下所能達到的最高測量準確度的標準度量和標準仪表稱做標準器。依據從屬關係,標準器分為第一標準器、第二標準器和第三標準器。

第一標準器是蘇聯國家標準器,根據國際單位定義而確定。

第二標準器是按照度量衡學上的準確度根據第一標準器來校準而確定的。相應地,第三標準器是根據第二標準器來校準的。

依據度量衡學上的用途,標準器分為:基本標準器、導出標準器、證明標準器、副本標準器、比較標準器及工作標準器。

基本標準器——這是與所規定單位(基本單位)無關的第一標準

^① 參閱例如:Круг 著:“電工原理”第5版第1冊第281頁;Казантаров 著:“交流電的理論”第2版第384頁;Пейман 著:“電工學的物理基礎”第409頁(均指俄文版)。

器,是國家測量事業的法定基礎和科學基礎。其中保存在列寧格勒全蘇度量衡科學研究院的水銀歐姆標準器和安培標準器——水銀的伏計——便是基本標準器。

導出標準器是導出單位具體的複製。例如,伏特標準器——以電池形式保存的韋斯頓標準電池——便是導出標準器,因為相應的單位——伏特——是根據歐姆定律來決定的。

為了減少對第一標準器的影響,特制根據第一標準器校準的副本標準器。在工作時便以這種副本標準器來代替第一標準器。

有限準確度的標準度量和標準測量仪表,它們的準確度小於度量衡學上的準確度,並用來在實際工作中檢驗和校準與其所要求的準確度相適合的各種度量和測量仪表。

將準確度較低的度量和測量仪表分為實驗室的和工程的是有一定實際意義的。

OCT 7636 規定:實驗室度量及實驗室測量仪表,和工作度量及工作測量仪表一樣,在使用時必須考慮測量準確度。

被測定的量值在正常的工作情況下是借實驗室度量及實驗室仪表來決定的,並且須加入必要的校正。因此,這些仪表應該各有各有關度量衡機構的校驗證件。降低準確度便大大的簡化了這些仪表的保存和使用。正如名稱本身所表示的那樣,工業上和科學研究院實驗室研究工作所用的所有許多精確的仪表都屬於這一類。在許多情況下,實驗室仪表本身又分為較高準確度和較低準確度諸等級。例如,實驗室仪表分為 0.2 級和 0.5 級的仪表,其最大允許誤差為該仪表額定量程的 0.2% 和 0.5%。

但在日常實際工程上,實驗室仪表是不甚適用的。必須始終注意:降低對準確度的要求使測量和使用仪表都簡便,並且能使這仪表在機械方面和電的方面做得更結實而又價廉。為了這個緣故,極大多數電工測量是用準確度較低的所謂工程仪表來完成的。

工程測量儀表和工程度量——這是這樣的運行儀表和度量，在使用它們時採用一定的、預先確定的測量準確度(OCT 7636)。因此，校驗這些儀表和度量時，只要確定它們是否滿足一定準確度等級的要求即可，對於它們的示數或數值不必作任何的校正。工程儀表和度量也是依據準確度的等級來分類的。

必須附帶說明：將測量儀表和度量分為實驗室的和工程的是有一些條件的，因為在工程上和實驗室里都採用各種不同準確度等級的儀表和度量；譬如，在工程上計算電能需要準確度等級為 0.5 的儀用互感器，而有時甚至用 0.2 級。

0-3. 直讀法和零值法。直接測量和間接測量

要測量一個物理量可以用各種不同的方法來完成。在每一指定的情況下，這些方法的選擇就與被測量的特性、測量條件以及對準確度所提出的要求有關。測量方法可以依據各種不同的特征來分類。在實際上最重要的分類法是將許多方法分成兩類——直讀法和零值法。

直讀法(或直接評定法)是這樣的一些方法，利用這些方法時，被測量由測量儀表上直接讀出或與該量的度量直接相比較而決定。這些方法的特征是用指針式儀表來測量電數量。這些方法最簡單並且進行測量所需時間也最少，因此在實際工程上用得最廣泛。但在用直讀法時，測量準確度是不高的，因為它至多就是儀表的準確度，而在極大多數情況下儀表的準確度是不可能很高的。

零值法(或使指零的方法)是測量電路具有這樣一套參數的測量方法，在這些參數之下，被測量所產生的效應與另一已知量所產生的效應相比較，以使得它們總的效應縮減為“零”(OCT 7767)。

電橋法和補償法便是電工學上零值法的例子。一般說來，零值法要比直讀法複雜得多，並且需要花費很多的时间，但準確度之高無與倫比。零值法的測量準確度大體上是決定於標準度量制造的準確度和指

零仪表的灵敏度,指零仪表就是用来指示电路中有无电流或其他任何量的仪表(例如,在电桥和电位计电路中,在直流电时用电流计作为指零仪表,而在音频交流电时则用耳机作为指零仪表)。标准度量的制造可以做得使具有很高的准确度;目前仪表的灵敏度,在大多数情况下能满足所提出的要求而绰绰有余。例如,在用电位计测量电压时,就有可能使测量准确度达 0.02% 以上;但是在利用最优良的指针式仪表时,0.2% 的 $\frac{1}{10}$ 的准确度就很难保证。根据上述理由,零值法基本上是用於实验室测量及校验直讀法用的仪表。

直讀法的部分特征与零值法部分特征结合而成的許多方法——差值法——是有一定实际意义的。在利用这种方法时,和利用零值法时一样,被测量的效应与已知量的效应相平衡,但并不使得测量电路完全平衡,而是利用直讀法测量出被测量与已知量之差。如果彼此相差極小的两个量作比较,那末,这些方法能得到很准确的结果。例如,如果两个量之差为 1%,而这差值是用准确度达 0.2% 的仪表测定的,那末,所研究的量的测量准确度因而提高到 0.002%。差值法目前广泛应用於作最准确的实验室测量(校验标准电阻,校验仪用互感器等等)。

依据测量结果获得的方法应区分为直接测量和間接测量。

直接测量得到的所求数值,是直接讀出按被测量单位分度的仪表示数的结果(例如,用瓦计测量功率),或者是被测量与度量直接比较的结果(例如,利用电位计借与标准电池电势相比较的方法测量电势)。

間接测量是根据一个方程式来决定所求的量,在此方程式中除了所求的量之外,还有通过此方程式与所求量联系起来的若干量的直接测量数据(例如,根据瓦计、安计及伏计的示数决定功率因数)。

由於包含在算式里的数个量的直接测量误差相加的结果,在間接测量时,其准确度常比直接测量低得多^①。

① 参阅 Г. М. Фихтенгольц 著:“工程数学”第 1 册第一章。

0-4. 測量誤差^①

作任何測量時，被研究量的測得值 $A_{из}$ 與實在值 A 之間，不可避免地是有一些差別的。這個差別如以被測量的單位來表示就稱做測量的絕對誤差

$$\Delta A = A_{из} - A_0. \quad (0-1)$$

這個數量本身並不表示出測量的準確度，而在實際上相對誤差才是有重大意義的。相對誤差是以被測量實在值的分數或百分數來表示的誤差(OCT 7636)：

$$\Delta A_0 = \frac{\Delta A}{A} = \frac{A_{из} - A}{A} \quad (0-2)$$

或

$$\Delta A_0 \% = \frac{A_{из} - A}{A} \times 100 \% . \quad (0-3)$$

實在值 A 通常是不知道的，並且在大多數情況下它是與 $A_{из}$ 相接近，因此，相對誤差常決定於：

$$\Delta A \div A_{из} = \Delta A_0 .$$

依據誤差的性質，誤差分為偶然誤差，有規則誤差和疏忽。

偶然誤差是這樣的誤差，它們的變動不服從任何的規律性。在測量時，偶然誤差是不可避免的，並顯示出這樣的情況：即使在不變動的準確度下進行數次測量，所得被測量的數值會稍有一些差別。偶然誤差的存在是測量方法有充分靈敏度並且完全利用了這靈敏度的標誌。

有規則誤差是按一定規律變化或在重複測量時保持不變的誤差。這些誤差是能夠被研究出來的，並且能夠從測量結果中除去的。例如：外界磁場或電場的影響所引起的誤差，溫度影響所引起的誤差，測量儀表分度不準確所引起的誤差等等，均屬於有規則的誤差。

疏忽是顯然地歪曲測量結果的、粗魯的誤差，例如，觀察結果記錄

① 詳閱 М. Ф. Маликов 著：“準確的測量”，標準出版社 1935 年版。

得不正确,在仪表标尺上所取讀数不正确。包含疏忽的观察結果應該除去,因为它顯然是不可靠的。观察結果所包含的誤差如超过許多次测量的均方根誤差的三倍,便可能与疏忽有关(拉以脫标准)。

示数的折合誤差是表明大多数仪表的准确度之用——这是度量或仪表的誤差,以被测量額定值的分数或百分数來表示,它表明仪表的特性(OCT 7636)。對於具有标尺的仪表來說,如果仪表有單向的标尺,則折合誤差理解为其示数的誤差对最大量程之比;如果仪表有双向的标尺,則为对最大量程与最低量程之和之比;如果仪表具有無零值的标尺,則为对最大量程与标尺起点相当的被测量的数值之差之比。折合誤差以下列比例式表示:

$$f = \frac{\Delta A}{A_{ном}}。$$

例如,設用量程为 0—10 安的安計測量 4 安的电流时,安計指示为 4.1 安,則相对誤差(表明測量准确度的量)为:

$$\Delta I_0\% = \frac{I_{из} - I}{I} \times 100\% = \frac{0.1}{4} \times 100\% = 2.5\%,$$

同时折合誤差(表明仪表准确度的量)則僅为

$$f\% = \frac{I_{из} - I}{I_{ном}} = \frac{4.1 - 4}{10} = 1\%。$$

为了消除誤差,測量結果应加以校正。校正值应与度量額定值或仪表示数代数相加,以得到被测量的实在值(OCT 7636)。校正值等於示数誤差或度量值誤差而取負号:

$$k = -\Delta A = A - A_{из}。$$

依据誤差的來源,誤差可以分为应用仪表誤差,測量方法誤差及讀数誤差。

应用仪表誤差或工具誤差是由仪表的不完善和不精确以及仪表装配的不正确所引起。在电工測量仪表中,这些誤差分为:由仪表本身的不完善所引起的基本誤差,以及由外界影响所引起的附加誤差。这些

誤差的原因可能是仪表机械上的不完善(摩擦、傾倒、标尺描繪和裝置不正确、彈簧的性質不良等等所引起的誤差)和电磁現象(內部和外界磁場或电場所引起的誤差,磁滯、电阻变动等等所引起的誤差)。这些誤差將在学习仪表的机械結構和各式仪表时研究。

測量方法誤差或理論誤差是由測量方法不完善所引起的,这些測量方法大多数是近似的方法。例如,利用惠斯頓电桥測小电阻时,由於接触电阻和联接導線电阻的影响而產生这类的誤差;当利用安計伏計根据欧姆定律($R=U \div I$)測电阻时,沒有考慮到仪表本身电阻的影响(第二章)便是方法誤差。为了消除这些誤差,應該或者作輔助的測量和適當的校正(在第二种情況下——測出仪表的电阻並計及仪表电阻的影响而計算 R),或者採用对該对象更適宜的其他方法(在第一个例子里——以湯姆生双电桥代替惠斯頓电桥,运用这种双电桥时,接触电阻和联接導線电阻的影响相当小)。

讀数誤差或個人誤差由实验者个人的特性所引起。在以主觀法取讀数时,这些誤差便特別顯著。例如,在利用耳机作为交流电桥的指零仪表时,实验者決定耳机中声音消失的瞬間具有某些誤差。在用眼睛讀取仪表标尺分格的分数时,个人誤差也是有意义的,每个实验者偏爱於一定的小数而損害其他的小数(例如,讀数 0.2 分格來代替实际的 0.13 分格以及代替 0.33 分格)。考慮到个人誤差,不應該用目測讀取小於 1 的数字,亦即标尺分格的十分之几,特別是仪表本身不能有較大的准确度,因为它的工具誤差不小於标尺分格的十分之几。

0-5. 电工測量仪表的分类

OCT 8005 規定了电工測量仪表的詳細分类,其中指示了 14 种分类的特征:(1)依据被測量的种类;(2)依据电流的种类;(3)依据准确度和決定准确度的其他特征;(4)依据与型式有关的作用原理;(5)依据取得讀数的方法;(6)依据使用的性質;(7)依据裝置的方法;