
電 氣 圖 樣

（管 門 部 分）

第一卷・管 門 部 分
第 一 章 管 門 部 分
管 門 部 分 的 圖 樣

管 門 部 分 的 圖 樣



电 气 测 量

(专 門 部 分)

保 · 尼 · 郭 留 諾 夫 講
哈 尔 濱 工 业 大 学
电气計量設備及測量技术教研室譯

高 等 教 育 出 版 社

本书系根据苏联专家保·尼·郭留諾夫 (П. Н. Горюнов) 博士于 1958—1959 年在哈尔滨工业大学为电气計量设备及測量技术专业教师、研究生及进修教师講課时所用的讲义“电气測量(专门部分)” (Электрические измерения (специальная часть)) 譯出的。

本书较全面地討論了电气測量技术中的精密測量技术的理論和方法, 同时也对各种特殊的、复杂的測量問題进行了系統的叙述, 并且对各种測量綫路和方法的最新成就作了相应的介紹。这些問題在电气測量的普通教程里是沒有叙述过的。本书可供电机类专业学生参考, 对我国从事电气仪表制造及計量工作者提高理論知識也有很大的帮助。

本书由哈尔滨工业大学电机系电气計量设备及測量技术教研室的教师尤德斐, 彭康强, 王在元, 赵新民, 郭傳錫, 赵国田, 刘嗣賢, 湯錦森及王傳賢等同志担任翻譯, 并由尤德斐, 彭康强, 王在元三同志担任校訂。

电气測量(专门部分)

保·尼·郭留諾夫 講

哈 尔 濱 工 业 大 学

电气計量设备及測量技术教研室譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內米厘巷 7 号

(北京市书刊出版业营业登記出字第 054 号)

民族印刷厂印裝 新华书店发行

統一书号 15010·827 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 11 $\frac{18}{32}$ 插頁 4

字數 376,000 印數 0001—4,000 定价 (7) 半 1.70

1959 年 11 月第 1 版 1959 年 11 月北京第一次印刷

目 录

第一章 緒論

§ 1.1 测量在科学与技术发展中的意义	1
§ 1.2 計量統一对国民經济的意义	2
§ 1.3 苏联校驗工作的建立	2
§ 1.4 社会主义經济制度在保持計量統一化以及組織校驗事业上的优越性	4
§ 1.5 課程的任务及其內容	4

第二章 測量的基本知識

§ 2.1 测量的分类	6
§ 2.2 电气测量的方法	7
§ 2.3 对测量方法的要求及灵敏度的决定	8

第三章 电气單位

§ 3.1 对单位制的要求	10
§ 3.2 电和磁的单位制	11
§ 3.3 MKCA 和 CGS _{μ0} 单位制間的关系	12

第四章 关于国际基准器及絕對基准器的基本知識

§ 4.1 基准器的概念及其特性	16
§ 4.2 由国际单位向絕對单位的过渡	17
§ 4.3 关于苏联基准器的某些知識	19

第五章 有限精度的标准量具

§ 5.1 电阻标准量具	24
§ 5.2 无抗电阻	26
§ 5.3 电动势的标准量具	28
§ 5.4 自感及互感的标准量具	29
§ 5.5 电容标准量具	31

第六章 測量精度的评价

§ 6.1 測量誤差的形式	33
§ 6.2 系統誤差	34
§ 6.3 定值及变值系統誤差对測量結果的影响	35
§ 6.4 清除系統誤差的方法	36
§ 6.5 偶然誤差	38

§ 6.6 偶然误差的分配定律及平均误差	41
§ 6.7 用剩余误差表示平均误差的公式	43
§ 6.8 一系列直接测量的处理	44
§ 6.9 间接测量时误差的计算	45
§ 6.10 平均误差的累积定律	46
§ 6.11 对实验室测量精度的评价	48
§ 6.12 工程测量时精度的评价	49
§ 6.13 线路元件制造精度的确定	50
§ 6.14 电气测量线路的误差	52
§ 6.15 电气测量线路的局部误差	53

第七章 电气测量线路的一般问题

§ 7.1 电气测量线路的定义及分类	68
§ 7.2 无源四端网路理论在电气测量线路中的应用	69
§ 7.3 一个四端网路输入阻抗与另一个四端网路输出阻抗的匹配	72
§ 7.4 不平衡线路	75
§ 7.5 测量线路阻抗与给定的发电机阻抗相匹配的情况	77

第八章 大小直流电流及电压的测量

§ 8.1 用磁电式电流计测量小电流及小电压	83
§ 8.2 光学倍增器	87
§ 8.3 无反馈的热电及光电放大器	88
§ 8.4 有正反馈及负反馈的光电放大器	91
§ 8.5 电子式电流计	96

第九章 直流大电流及电压的测量

I 电流互感器	106
§ 9.1 直流互感器的作用原理	106
§ 9.2 直流电流互感器中的电磁过程	111
§ 9.3 直流电流互感器在有功负载情况下的工作情况	112
§ 9.4 直流电流互感器的误差	115
§ 9.5 带反馈的直流电流互感器	118
II 直流电压互感器	119
§ 9.6 电压互感器的作用原理	119
§ 9.7 电压互感器因磁化曲线倾斜所产生的误差	122
§ 9.8 互感器主要参数计算概述	125

第十章 交流电流和电压的测量

§ 10.1 概述	124
-----------	-----

§ 10.2 测量大电流用的测量用互感器	125
§ 10.3 在母线中测量电流时误差的分析	131

第十一章 与测量互感器有关的专门问题

§ 11.1 测量互感器的意义	134
§ 11.2 测量互感器的复数误差	135
§ 11.3 用铁心磁阻所表示的复数误差公式	140
§ 11.4 补偿式测量用电流互感器	142
§ 11.5 差动测量用互感器	144
§ 11.6 交流电流测量用互感器校验器的线路	148
§ 11.7 测量用直流电流互感器的校验方法	153
§ 11.8 应用霍尔效应测量大电流	154

第十二章 单相交流电路中功率和能量的测量

概 述

I 功率的测量	159
§ 12.1 低频时功率测量的特殊情况	159
§ 12.2 高频时测量有功功率之仪表	165
§ 12.3 单相电路中测量无功功率之仪表	171
II 电能的测量	173
§ 12.4 感应式电度表基本误差曲线的分析	173
§ 12.5 感应式电度表附加误差的数学公式	178

第十三章 三相电路中功率和能量的测量

I 三相三线电路中的测量	183
§ 13.1 线和各量间的关系	183
§ 13.2 将非对称三相系统分解为对称系统	187
§ 13.3 用对称分量表示有功和无功功率的公式	190
§ 13.4 几何和不为零的相电压和相电流系统分解成对称分量	191
§ 13.5 最常用的有功和无功功率(能量)测量仪表的线路	194
§ 13.6 利用对称分量分析测量功率和电能仪表的线路	197
II 四线制电路中功率和能量测量	201
§ 13.7 功率和能量的各种公式	201
§ 13.8 四线制电路中测量功率和能量之仪表线路	203

第十四章 电桥测量法

概 述

I 在直流情况下的电桥测量法	207
----------------	-----

§ 14.1 单臂电桥	207
§ 14.2 应用插入法在单臂电桥上测量电阻	216
§ 14.3 双臂电桥	221
II 在交流电路里的电桥测量法	226
§ 14.4 交流电桥的分类	226
§ 14.5 交流电桥的基本电路	228
§ 14.6 交流电桥的平衡速度或收敛性	234
§ 14.7 “多臂”交流电桥	241

第十五章 补偿测量法

概 述

I 直流补偿器	251
§ 15.1 低电阻补偿器	252
§ 15.2 高电阻补偿器	254
§ 15.3 关于电流计电阻的选择	256
§ 15.4 精密测量电阻的补偿线路(插入法)	258
II 特殊的直流补偿器	261
§ 15.5 检验电气测量仪表的补偿器	261
§ 15.6 半自动补偿器	263
§ 15.7 双级与串级的补偿线路	266
III 交流补偿器	270
§ 15.8 极坐标交流补偿器	270
§ 15.9 直角坐标补偿器	276
§ 15.10 直角坐标补偿器的特殊线路	279
§ 15.11 关于校验交流补偿器的基本概念	285
§ 15.12 用热电比较方法来检验标准仪表	288

第十六章 电阻测量的特殊情况

I 电阻范型量具的校验	291
§ 16.1 电阻量具及电阻仪器的校验线路	291
§ 16.2 利用补偿线路精密测量电阻	291
§ 16.3 用交流来检验大电流分流器	296
II 极大电阻的测量	299

第十七章 电气测量装置对于不同干扰影响的防护与屏蔽

I 干扰影响及防护方法	302
§ 17.1 干扰影响的原因	302

§ 17.2 基本防护方法	303
II 对磁场影响的屏蔽	304
§ 17.3 铁磁屏蔽的使用	304
§ 17.4 利用涡流做屏蔽	305
III 对电容漏电的屏蔽	308
§ 17.5 概述	308
§ 17.6 单个电阻的屏蔽	309
§ 17.7 几个电阻的屏蔽	311
§ 17.8 电感线圈及电容器的屏蔽	312
§ 17.9 互感线圈及变压器的屏蔽	314
§ 17.10 线路的屏蔽	316
IV 接地	322

第十八章 相角位移的测量

I 单相电路中相位移的测量	325
§ 18.1 利用电子示波器测量极小角位移	325
§ 18.2 微相位的方法	332
II 三相电路中功率因数的测量	337
§ 18.3 在对称三相电路中测量 $\cos \varphi$ 的近似方法	337
§ 18.4 在三相不对称的电路中功率因数的测量	345

第十九章 频率的测量

I 频率测量的仪表和方法	348
§ 19.1 直读式仪表	348
§ 19.2 比较法	362
II 频率测量仪表的校验方法	365

第一章 緒論

§ 1.1 測量在科學與技術發展中的意義

各個知識領域的進展以及這些知識的實際應用與測量技術，尤其是電氣測量技術的發展有着密切的聯繫。測量是了解自然界的方分之一，因而它不斷促進着科學的新發現。沒有測量，要進行任何一種科學研究工作都是不可能的。在技術領域里，測量的作用也是具有決定性的；沒有測量就不可能組織現代化的生產，實行動力及生產過程自動化，對工件質量進行檢查，實行零件的互換性，與廢品作鬥爭，對生產的經濟性進行估價，等等。

在今天，一個企業里測量工作的狀況是其技術水平的主要指標。

Д. И. 門捷列也夫(Менделеев)曾說過：“在自然界中，度量和權衡是獲取知識的主要工具。”他在1865年所進行的一系列有關度量衡方面的研究成果直到今天還被人們應用着。

П. Н. 列別捷夫(Лебедев)在1901年利用一系列精密測量的方法發現了光的壓力，這曾經是輻射能的電磁理論所預言過的。

А. Г. 斯托列托夫(Столетов)所完成的對鐵的磁性的研究及與之有關的測量工作對電工技術的發展具有非常重大的意義。早在1871年他就預見到鐵在電磁機構中將得到重大的實際應用。今天，這個用途的多样性及廣泛性竟達到如此程度，使得電氣測量技術方面的專家目前還不能完全解決科學技術工作者在下述方面提出的要求，即研究並大量製造出一種精密而且方便的能對各種鐵磁材料進行各種試驗的萬能器具。

§ 1.2 計量統一對國民經濟的意義

在測量具有如此巨大作用的今天，對任何一個工業發達的國家的生活而言，有關保持計量統一以及測量儀表準確度的問題是屬於國家的必須進行的事業。

計量統一後就有可能使測量準確度提高到現代水平。當一個國家的計量統一以後，那麼，尋找各種計量之間相互關係的工作就成為不必要了。

一個國家對全國計量統一化的關懷首先表現在制定度量衡法規和測量儀表的校驗規程上。

有關的國家科研機關以及專門的實驗室即根據上述立法來奠定計量統一的科學技術基礎，並付諸實現。

§ 1.3 蘇聯校驗工作的建立

在蘇聯，保持計量統一及測量準確度的工作是由專門的計量與測量儀表事務委員會及其所屬各單位（每個大城市都有）負責的。委員會按照國家標準、檢驗規程及制度來保持計量的統一以及測量的準確度。

按規定，標準量具、標準測量儀表及標準電度表必需定期校驗。

例如，對國際標準電池、標準電阻綫圈、標準補償器、0.2 級與 0.5 級的安培計及伏特計必須每年校驗一次。對電阻箱、標準固定電容、標準電感綫圈、實驗室及工程用補償器、交流補償器、0.1 級與 0.2 級的測量互感器等必須每兩年校驗一次。

對每個標準電氣測量儀表以及電度表除去定期校驗外，在產品出廠及每次修理後也必須進行校驗。

在蘇聯或者中國這樣大的國家里，校驗事業的正確設置需要周密考慮其組織機構，而校驗機關則需要良好的物質裝備（如場所、電源、

高度精密的测量器具等)。

必须指出, 任何一个被测量的精密测量, 如果采用电气测量的方法, 则必须把被测量变换为电气参数, 而这个电气参数是可以用适当的电气仪表来进行测量的。此时, 如果是用复杂仪表 (电桥, 补偿器等), 则应用 e, r, L, C 等的工作量具。

为了确信工作仪表的准确度, 工作仪表必须用标准电气仪表来校验。而标准仪表又借补偿器来校验, 后者的准确度用工作量具 (如电势 e 及电阻 r) 来保证。

工作量具的准确度是借助于和标准量具相比较来确定的。

标准量具的准确度 (现代科学技术发展所能达到的最高准确度) 是靠定期地与基准器相比较的方法来保持的。

以上所述可用图 1.1 所示线路来说明。

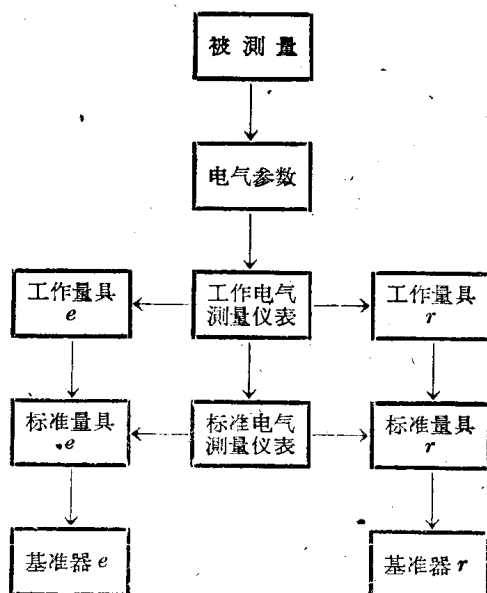


图 1.1

§ 1.4 社会主义經濟制度在保持計量統一化 以及組織校驗事业上的优越性

国家的社会主义計劃經濟为校驗机关开辟了无限的可能性，而在另一方面，又要求校驗机关严格地保持計量的統一以及很好地組織校驗事业。

由于科学与技术的測量准确度的不断提高，以及与之相联系着的工件标准化的广泛采用，保证了进行大量生产的可能性。这是社会主义經濟的特点。

社会主义国家除了慎重考虑对国家校驗机关的組織及立法的制定外，还关心有关校驗及度量衡科研机关所必須的科学干部的培养。

社会主义經濟系統便有可能在最短的期限內把校驗机关的立法及措施推广到从事生产及运用电气測量仪表的全部人員中去，并把科学的度量衡的要求在工作中付諸实现。

§ 1.5 課程的任务及其內容

在本課程中将研究一些特殊的电气測量仪表及装置，也同时研究一些特殊的方法，这些都是在电气測量一般教程里沒有叙述过的，或者是研究得不够詳細的。

我們如果測量了电路的主要电量，如 U , I , P , f ……及参数 R , L , C , M ……等，就可以知道电路的情况，因而可以把它們导向我們所需要的状态。所以，对任何一个电工技术領域里的重要問題，如事先不进行研究及測量，要获得正确的解决是不可能的。

所有的測量根据准确度可以分为二組。第一組的測量誤差为 1—10%，第二組的測量誤差为 0.001—1%。

我們主要研究与第二組測量有關的問題。但是有一系列特殊的測量方法及仪表，它們在实际应用中很重要，但是暫時还不能达到較高的

准确度,例如,极小与极大直流电流及电压的测量方法等等也将在本課程中加以研究。

在本課程中将研究测量与誤差的簡要理論,有关单位,标准量具及基准器的資料。直流及交流电流电压及功率的特殊測量方法,在直流中精密測量电阻法,測量交流电路参数的方法,測量頻率及相位差角的方法以及有关电气測量裝置的防护問題(避免外界电磁場及寄生电流的干扰)。必須注意,在今天很多电气測量綫路被广泛应用着。它們为数可以千計。因此,甚至在專門課程里也不可能对全部綫路进行詳尽的研究,即使对主要的綫路也不能做到这一点。所以,在很多情况下,只是指出一些在各个領域中能够保証电气測量有足够准确度的仪表及方法的实例。

无容置疑,电气測量技术方面的专家必須經常注意本专业的文献,因为科学技术的飞速发展会不断丰富与扩充我們的知識,而知識是必須每天补充以新的內容并使之更加确切的。

第二章 測量的基本知識

§ 2.1 測量的分類

測量可分為三類：

1. 直接測量法，
2. 間接測量法，
3. 綜合測量法。

直接測量法：測量結果可直接由測量的實驗數據得到。在直接測量時，或把未知量直接與量具相比較，或按儀表的指示來決定（例如用安培計來測量電流 I ）。

間接測量法：測量結果要根據對幾個量（有某一方程式將這幾個量聯繫起來）進行直接測量所得數據來確定。此時，被測量要通過計算方法來求出。例如，要求導線的电導系數 γ ，必須用直接測量法求其長度 l 、直徑 d 以及電阻 r ，而後根據下式求出：

$$\gamma = \frac{4l}{\pi d^2 r}. \quad (2.1)$$

實際中碰到的大多數測量都屬於這類。

綜合測量法：此法由一系列直接測量組合而成。此時，當進行完一系列測量後而轉入另一系列測量時，測量條件或被測量的組合要發生變化。例如，如果要確定電阻線圈的溫度系數 α 與 β 以及它在 20°C 時的電阻值 R_{20} ，則根據公式

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2,$$

未知量將為 α 、 β 及 R_{20} 。

改變電阻線圈的热状态，並測量溫度為 $t_1, t_2, t_3, \dots$ 時的電阻 R_t ，

得一系列方程式:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_2 &= R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \\ R_3 &= R_{20} + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2 \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

这些方程式中每一个都可进行一系列测量, 这些测量的目的在于求出 $R_t (R_1, R_2, \dots)$ 。根据这些方程式(方程式数不得少于未知量数)可以通过计算来求出这些值。

§ 2.2 电气测量的方法

当进行测量时, 根据被测量及测量器具的特性及测量准确度来决定采用那种方法。

其中最重要的方法有以下几种:

1. 直接读数法;
2. 平衡法: 其中又分为差值法及零值法;
3. 重合法。

当用直接读数法进行测量时, 整个被测量或者它所产生的效应, 直接用一些量具或测量仪表来读数。此法的准确度决定于测量仪表的准确度, 因而是比较不高的。

差值法是直接用测量仪表测出被测量 X 与已知量 N 的差。例如, 若此差值为

$$\frac{N - X}{N} = 0.1\%, \quad (2.3)$$

则甚至用 1% 准确度的仪表来读数, 我们求得的 X 值之误差将等于 0.001%。

因此, 当这两个被比较量相近时, 此法能得很准确地测量结果。

差值法的测量线路只有一个电源。

当用零值法时 $N - X = 0$, 即 X 与 N 达到完全平衡, 则甚至在使用高灵敏度的平衡指示器的情况下, 此差值也不会引起平衡指示器的指示。此法属于高精度测量法, 因为不是凭我们的感觉器官来确定电流的存在, 所以可达到很高的准确度。零值法的典型例子是补偿测量法。

零值法的测量线路有二个电源。

重合法是比较一系列被测量与已知量重合的标记或信号。被测量的值就由这些标记的重合结果来决定, 属于此法的如: 用閃頻仪法测量交流电流的频率。

§ 2.3 对测量方法的要求及灵敏度的决定

为了测量各种未知量一般采用好几种仪表与方法。当在给定具体条件下选择最合适的测量方法时, 必须考虑此法应保证以下几点:

1. 足够的灵敏度;
2. 足够的准确度;
3. 从测量对象处吸取的功率小;
4. 测量迅速;
5. 测量方便;
6. 测量前的准备工作尽量简易。
7. 为了得到最终测量结果所必须进行的计算最少和最简单。

在一般情况下, 测量方法的灵敏度 S_M 决定于变换器的灵敏度 S_{np} , 这个变换器把被测的非电量变换为电量 ϑ 。

$$S_{np} = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta X}. \quad (2.4)$$

灵敏度 S_M 也决定于线路灵敏度 S_{ox} , 这个线路把电量 ϑ 变换为直接作用于测量机构的电量 Y

$$S_{ox} = \frac{\Delta Y}{\Delta \vartheta}. \quad (2.5)$$

最后,灵敏度还决定于输出仪表的灵敏度 S_I

$$S_I = \frac{\Delta \alpha}{\Delta Y}. \quad (2.6)$$

式中 α —仪表指示。

因为整个测量方法的灵敏度为

$$S_M = \frac{\Delta \alpha}{\Delta X}, \quad (2.7)$$

则由以前各方程式将 $\Delta \alpha$ 及 ΔX 值代入方程式(2.7),得

$$S_M = \frac{S_I \Delta Y}{\Delta X} = \frac{S_I S_{CX} \cdot \Delta \vartheta}{\Delta X} = S_I \cdot S_{CX} \cdot S_{np}. \quad (2.8)$$

在测电气量时 $\Delta \vartheta = \Delta X$, 则

$$S_M = S_{CX} \cdot S_I. \quad (2.9)$$

因此,测量的全部线路可简单地表示于式

$$X \longrightarrow \vartheta \longrightarrow Y \longrightarrow \alpha.$$