



中等專業學校教學用書

电工测量和测量仪器

B. C. 波波夫著

高等教育出版社



中等專業學校教學用書



电工測量和測量儀器

B. C. 波波夫著
陈以鴻譯

高等教育出版社

本書原來系根據蘇聯國立動力出版社(Государственное энергетическое издательство) 1952年出版的波波夫(В. С. Попов)著“電工測量和測量儀器”(Электротехнические измерения и приборы)第4版譯出的。現由原譯者根據原書1956年第5版修訂。原書第5版經蘇聯電站部和蘇聯電氣工業部的教育司審定為動力中等技術學校和電機中等技術學校用的教科書。

書中論述測量電流、電壓、電阻、電感、電容、功率、電能、相位差和頻率的儀器和方法，以及磁測量，用電的方法測量非電量，和遠距離測量。有專門一章講述電測量和儀器的實驗。

比起舊版來，新版第3—5章是增訂過的，第15章是新加的，第16章是重寫的，其餘各章也或多或少地有所改動。

本書也可作工程技術人員的參考書。

本書由交通大學陳以鴻同志翻譯，由該校電工量計教研室校訂。

電工測量和測量儀器

B. C. 波波夫著

陳以鴻譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7號
(北京市書刊出版業營業許可證出字第054號)

上海大東集成聯合印刷廠印刷 新華書店發行

統一書號 15010·401 開本 850×1168 1/32 印張 12 14/16
字數 328,000 印數 15,801—32,800 定價(3) 1.60

1957年2月新1版

1959年6月第2版(修訂本)

1959年6月上海第7次印刷

序

电测量在科学和技术方面起着非常重要的作用，因为如果没有测量，就不可能研究电的现象、管理电装置的工作和正确地进行生产。

在我们苏联，电测量具有特别重要的意义。

大规模的动力建设和电气工业的大规模的发展，不断增长的电生产，以及电能工业、运输和农业的各种新的范围内的应用，在在需要高度发展的测量技术。这种测量技术保证电装置的精确而不断的工作和合理的利用，保证能量、燃料和原料的节省，并保证生产程序的合理进行。

进行测量需要知道测量的方法和测量仪器的特性及结构，需要能够选择适当的测量方法和相应的测量设备，能够装配电路，进行观测和记录，处理所得数据，并在必要时将测量仪器加以检验。

因此，电测量课程包含两部分：一是理论部分，给学生以测量方法和测量仪器方面的必需的知識；一是实践部分，通常在实验室中进行，使学生获得测量过程中的必需的經驗，并熟悉测量仪器和辅助设备的结构。

本书是中等动力学校和中等电机学校的教科書，它的目的是使学生熟悉最主要的测量方法和在电工技术方面实际应用的国产测量仪器，并熟悉仪器的选择、应用和检验。

本书也可供在工业方面工作并接触到电测量问题的工程技术人员作参考書之用。

本书所根据的讀者程度是已经知道电工学的基础、交流电的理论和高等数学的初步。

本書第五版的全部材料都經過重新審閱，舊的材料換成了新的。
第3—5章是增訂過的，第15和16章是從新寫的。

對在本書的編輯工作中付出巨大勞動的A. C. 卡薩特金教授，表示深切的謝意。

著 者

目 录

序	1
导言	3
第一章 测量方法和测量误差的分类	3
1-1. 测量方法	3
1-2. 与度量和仪器有关的基本概念和定义	4
1-3. 测量误差	7
第二章 电单位的度量	17
2-1. 电势的度量	17
2-2. 电阻的度量	18
2-3. 电感和互感的度量	24
2-4. 电容的度量	25
2-5. 电的量的单位	26
第三章 电测量仪器概说	30
3-1. 分类	30
3-2. 直接计值仪器	38
3-3. 结构零件	43
3-4. 对仪器的要求	50
3-5. 误差	50
3-6. 损耗功率	57
3-7. 阻尼	58
3-8. 绝缘强度	59
3-9. 过载能力	59
第四章 仪器的测量机构	61
4-1. 磁电式	61
4-2. 电磁式	66
4-3. 电动式	70
4-4. 铁磁电动式	75
4-5. 感应式	77

4-6. 静电式	80
4-7. 热敏式	88
第五章 电流和电压的测量	84
5-1. 安培计和伏特计的特点	84
5-2. 分流器	86
5-3. 附加电阻	89
5-4. 磁电式安培计和伏特计	92
5-5. 磁电式电流计	94
5-6. 整流式安培计和伏特计	108
5-7. 电子管式伏特计	113
5-8. 热电式安培计和伏特计	115
5-9. 电磁式安培计和伏特计	117
5-10. 电动式安培计和伏特计	119
5-11. 铁磁电动式安培计和伏特计	121
5-12. 静电式伏特计	122
5-13. 热敏式安培计和伏特计	123
5-14. 用补偿法测量电压和电流的仪器(补偿器)	124
5-15. 自动补偿器	129
5-16. 交流补偿器的工作原理	130
5-17. 关于测量电流和电压的一般说明	133
第六章 仪用互感器	139
6-1. 仪用互感器的用途	139
6-2. 电压互感器	139
6-3. 电流互感器	146
6-4. 仪用直流互感器	156
第七章 电阻的测量	159
7-1. 与测量电阻有关的一般说明	159
7-2. 用安培计和伏特计法测量中等电阻	159
7-3. 用单臂电桥测量中等电阻	160
7-4. 与测量小电阻有关的说明	164
7-5. 用安培计和毫伏计法测量小电阻	165
7-6. 用双臂电桥测量小电阻	166
7-7. 与测量大电阻有关的说明	168
7-8. 用电流计和伏特计法测量大电阻	171
7-9. 用代替法测量大电阻	172
7-10. 测量电阻用的直接计值仪器(欧姆计)	174

7-11. 与测量现成装置的絕緣电阻有关的說明	179
7-12. 裝置不在工作电压下时絕緣电阻的測量	181
7-13. 裝置处在工作电压下时絕緣电阻的測量	183
7-14. 与确定綫路絕緣损坏地点有关的說明	187
7-15. 用迴路法确定絕緣损坏地点	187
7-16. 与接地有关的基本概念和定义	189
7-17. 用安培計和伏特計法測量接地电阻	192
7-18. 列宁格勒电工学院的測量接地电阻用的仪器(补偿測量法)	193
7-19. 測量接地电阻用的 MC-07 型仪器	194
7-20. 用三电极法測量接地电阻	196
7-21. 地面上各点电位的測量	197
第八章 电感、互感和电容的測量	199
8-1. 与測量电感、互感和电容有关的說明	199
8-2. 用交流測量电感	199
8-3. 用电桥測量电感	201
8-4. 互感的測量	203
8-5. 用交流測量电容	205
8-6. 測量电容用的指示仪器(法拉計)	207
8-7. 用冲击电流計測量电容	207
8-8. 用电桥測量电容	209
第九章 功率的測量	213
9-1. 用安培計和伏特計測量直流电路內的功率	213
9-2. 电动式瓦特計用于直流电路	213
9-3. 电动式瓦特計用于交流电路	216
9-4. 感应式瓦特計	221
9-5. 应用仪用互感器測量交流电路內的功率	224
9-6. 四綫三相交流电路內有功功率的測量	230
9-7. 各相負載平衡时三綫三相交流电路內有功功率的測量	232
9-8. 用二瓦特計法測量三綫三相交流电路內的有功功率	237
9-9. 三相交流电路內无功功率的測量	242
9-10. 应用仪用互感器測量三相交流电路內的功率	246
第十章 电能和电量的測量. 电計量器	251
10-1. 概說	251
10-2. 感应式單相交流有功瓦时計	251
10-3. 三相交流电路內有功电能的測量	253
10-4. 三相交流电路內无功电能的測量	260

10-5. 电动式瓦时計	263
10-6. 磁电式安时計	264
第十一章 功率因数(相角差)和交流頻率的測量	265
11-1. 电动式相位計	265
11-2. 电磁式相位計	266
11-3. 振动式頻率計(赫志計)	268
11-4. 鉄磁电动式頻率計	269
11-5. 灯泡式同步指示器	270
11-6. 电磁式同步指示器	271
第十二章 自动記錄仪器	273
12-1. 自动記錄仪器的用途	273
12-2. 連續記錄仪器	273
12-3. 斷續記錄仪器	276
12-4. 一般說明	278
第十三章 示波器	280
13-1. 示波器的用途	280
13-2. 具有磁电式測量机构的机电示波器	280
13-3. 电子管示波器	284
第十四章 磁測量	291
14-1. 一般說明	291
14-2. 磁通計	291
14-3. 用冲击电流計法求磁化曲綫和磁滯迴綫	293
14-4. 用差作用法求磁化曲綫	298
14-5. 測鉄計	301
14-6. 用瓦特計法求鋼損耗	303
14-7. 鋼損耗的区分	306
14-8. 用差作用法求鋼損耗	308
第十五章 用电的方法測量非电量	311
15-1. 一般說明	311
15-2. 电阻变换器	313
15-3. 电感变换器	322
15-4. 电容变换器	323
15-5. 感应变换器	324
15-6. 热电变换器	325

第十六章 远距离测量	327
16-1. 一般說明	327
16-2. 远距离測量系統的分类	327
16-3. 强度式远距离測量系統	328
16-4. 頻率脉冲式远距离測量系統	334
16-5. 相加法	337
第十七章 实验	343
一、对做实验的一般指示	343
二、組成电路的元件和它們的容許工作条件	346
三、实验內容	351
17-1. 指針电流計(实验 1)	351
17-2. 鏡子电流計(实验 2)	354
17-3. 带有热电变换器和整流器的磁电式儀器的校准(实验 3)	357
17-4. 与檢驗安培計、伏特計和瓦特計有关的指示	358
17-5. 工程安培計的檢驗(实验 4)	360
17-6. 工程伏特計的檢驗(实验 5)	361
17-7. 工程瓦特計的檢驗(实验 6)	362
17-8. 范型安培計的檢驗(实验 7)	365
17-9. 仪用电流互感器誤差的決定(实验 8)	366
17-10. 用單臂电桥測量电阻(实验 9)	370
17-11. 用双臂电桥測量电阻(实验 10)	370
17-12. 絕緣电阻的測量(实验 11)	371
17-13. 接地电阻的測量(实验 12)	372
17-14. 用交流电桥測量电感(实验 13)	373
17-15. 用交流电桥測量电容(实验 14)	374
17-16. 感应式瓦时計的檢驗和調节(实验 15)	374
17-17. 用二元件瓦特計測量功率(实验 16 甲)	376
17-17 甲. 用二元件瓦特計和电流互感器測量功率(实验 16 乙)	378
17-18. 三相交流高压电路內功率的測量(实验 17)	380
17-19. 有功和无功瓦时計接入三相交流电路(实验 18)	383
17-20. 銅損耗的決定(实验 19)	385
17-21. 电子管示波器(实验 20)	386
参考書目	392
中俄文对照索引	394
俄文下标意义說明	400

导 言

要研究电的现象和确定各种电量之间的量的关系,必须进行测量并应用测量仪器。

一方面,由测量可以得到新的知识和新的发现;另一方面,这些知识和发现又保证测量本身有进一步发展的可能。电测量的发展史,是与电学理论的发展史,与电工技术的发展史紧密地联系着的。

虽然许多俄国科学家在电测量方面有巨大的成就,但是在沙皇俄国,电测量仪器的工业生产差不多完全没有,而国内的小量需要还是由外国公司来供应的。

在推翻地主和资本家的政权之后,工人阶级在共产党的领导下掌握了政权,开始建设社会主义社会。符·伊·列宁指出,国家电气化是社会主义胜利的最重要条件。他在1920年曾经非常明确地阐述了电气化的意义:“共产主义——这就是苏维埃政权加全国电气化。”

在1920—1921年,不管经济破坏和国内战争,拟订并通过了著名的列宁国家电气化计划——全俄电化委员会计划。

在这个计划的实施过程中,我们国内不仅建筑了最大的发电站,而且创立了电气工业,包括电工仪器制造工业在内。

在战前的五年计划的年代里,组织了电测量仪器的生产,进行了仪器制造人才的培养;在科学研究实验室和实验设计局,研究了电测量仪器的理论和计算方法,以及新型的国产仪器和新的连续生产法。最后,还建造了生产电测量仪器的最大的工厂。

在伟大的卫国战争时期,电工仪器制造工业光荣地经过了撤退工厂和完成战时订货的严重考验。

在恢复和发展苏联国民经济的第四个五年计划中,规定1950年电测量仪器的生产量增大到7倍于1940年的生产量。

第五个五年计划规定电测量仪器的生产量增大到2.7倍。

苏共第二十次代表大会的决议规定在当前的五年计划期间电测量仪器的生产量增大到3.6倍。

在战后的五年计划的年代里,祖国的电工仪器制造业得到了巨大的成就。为了适应工业方面和科学研究机关方面的需要,研究并掌握了各种不同电测量仪器的大量生产,这些仪器都达到了电测量技术的最新成就的水平。

在苏维埃政权的年代里生长起来的苏联电工仪器制造业,现在正出产着科学和技术方面所必需的一切检测仪器。

第一章 測量方法和測量誤差的分类

1-1. 測量方法

所謂測量，就是把被測的量与規定作为單位的同类量作比較的過程。測量結果用被測的量与測量單位的比值表示。

測量單位或測量單位的分数或倍数的复制实体，称做度量。

用来比較被測的量和測量單位的設備，称做測量儀器。

測量時，利用度量和測量儀器，并采用各种不同的測量方式或方法。測量方法有直接法和間接法的区别。

将被測的量直接与同类量比較的測量方法，称做直接法。

直接法分成直接計值法和比較法。

当被測的量直接从按照它的值分度的測量儀器的讀数决定時，这种方法称做直接計值法，例如用安培計測量电流，用瓦特計測量功率等。

当被測的量直接与这量的度量比較而决定時，这种方法称做比較法，例如測量电压時将它与标准电池的電势(電势的度量)比較。

比較法包括下面几种：

1. 零值法；

2. 差作用法；

3. 代替法。

零值法——就是被測的量(或与被測的量具有函数关系的量)对于儀器的作用被同类已知量的相反作用抵消到零的方法，例如測量電势時用已知电压来补偿它，測量电阻時利用電桥。

差作用法——就是利用仪器测量未知量与已知量之间的差的方法,例如用差作用法求鋼損耗(參閱第 14 章)。

代替法——就是用已知量(度量)来代替被测的量而不引起测量仪器讀数的变更的方法,例如用代替法测量电阻(參閱第 7 章)。

当未知量不直接测量,而根据别的量的测量結果和被测的量与未知量之间的关系值計算时,这种方法称做間接法。例如测量导体的电阻时,可用安培計测量导体內的电流,而用伏特計测量导体两端的电压。已知电流 I 、电压 U 与电阻 r_x 之间的关系,可从下式求出电阻:

$$r_x = \frac{U}{I}。$$

因为直接計值的直接法最簡單,需要的測量時間也最短,所以虽然測量的准确度不高(0.2—10%),但是在电工技术上,实际应用最普遍。

为了使测量更加准确(达 0.001%),利用零值法和差作用法,这两种方法所需測量時間長得多,所需仪器設備也比較复杂而貴重。

1-2. 与度量和仪器有关的基本概念和定义

度量和测量仪器分成范型的和运用的。

用来复制和保存測量單位并用来檢驗和校准各种度量和测量仪器的度量和测量仪器,称做范型度量和范型測量仪器。

一切度量和测量仪器,除了范型的以外,凡用于实际测量的目的的,称做运用度量和运用測量仪器。

范型度量和范型測量仪器分成标准(第一标准、第二标准、第三标准)和限定准确度(一級、二級和三級)的范型度量和測量仪器。

用于复制和保存單位的目的、并具有在目前的測量技术情況下所能达到的最高准确度(度量衡学上的准确度)的范型度量和范型測量仪器,称做标准。

具有较小于度量衡学上的准确度的一定准确度、并用来实际检验和校准各种度量和测量仪器的度量和测量仪器，称做限定准确度的范型度量和范型测量仪器。

运用度量和运用测量仪器分成实验室的和工程的。

所谓实验室度量和实验室测量仪器就是这样的度量和仪器，在使用时，必须计及测量准确度，即计及度量值和仪器读数的补值，并计及各种因素例如温度、磁场等的影响。

使用时采取一定的、预先确定的测量准确度的度量和测量仪器，称做工程度量和工程测量仪器。

以后我们讲到的将限于限定准确度的度量和运用度量。

度量的标称值就是度量上标明的值。

度量的实际值就是用范型度量或范型测量仪器决定的度量值。

度量的标称值 A_n 与实际值 A 的差称做度量的绝对误差 ΔA ：

$$\Delta A = A_n - A. \quad (1-1)$$

度量的实际值与标称值的差称做度量的绝对补值 δA ：

$$\delta A = A - A_n. \quad (1-2)$$

补值等于误差的负值：

$$\delta A = -\Delta A.$$

从方程(1-2)得

$$A = A_n + \delta A, \quad (1-3)$$

即要得到度量的实际值，应将补值与度量的标称值用代数法相加。

测量仪器的读数就是被测的量从仪器确定的值。

被测的量的实际^①值就是用范型度量或范型测量仪器决定的值。

仪器的读数与被测的量的实际值的差，称做仪器的绝对误差。

用 A_1 代表测量仪器的读数， A 代表被测的量的实际值， ΔA 代表仪器的绝对误差，可写成：

① 必须注意，实际值并不是真正值。

$$\Delta A = A_1 - A_0. \quad (1-4)$$

被测的量的实际值与仪器读数的差, 称做仪器的补值 δA , 即

$$\delta A = A - A_1. \quad (1-5)$$

补值等于误差的负值:

$$\delta A = -\Delta A.$$

从方程(1-5)得

$$A = A_1 + \delta A, \quad (1-6)$$

即要得到被测的量的实际值, 应将补值与仪器读数用代数法相加。

例 1-1. 安培计读数 $I_1 = 20$ 安。

范型安培计读数 $I = 20.4$ 安。

安培计误差

$$\Delta I_1 = I_1 - I = 20 - 20.4 = -0.4 \text{ 安}.$$

安培计补值

$$\delta I_1 = -\Delta I_1 = I - I_1 = 20.4 - 20 = 0.4 \text{ 安}.$$

用安培计所测电流的实际值

$$I = I_1 + \delta I_1 = 20 + 0.4 = 20.4 \text{ 安}.$$

有些仪器用改正因数代替补值。改正因数就是为了得到被测的量的实际值所必需将仪器读数乘上的一个数。

绝对误差与被测的量的实际值相比的百分数称做测量仪器的相对(实际^①)误差:

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A} 100\% = \frac{A_1 - A}{A} 100\%. \quad (1-7)$$

绝对误差与仪器的最大测量限值相比的百分数称做测量仪器的折合误差:

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_n} 100\%. \quad (1-8)$$

例 1-2. 安培计读数 $I_1 = 20$ 安。

① 绝对误差与仪器读数的比称做仪器的相对标称误差。相对实际误差与相对标称误差通常相差很小, 在许多情形中是可以互相代替的。

安培計的最大測量限值即標稱電流 $I_n = 50$ 安。

范型安培計讀數 $I = 20.5$ 安。

相對測量誤差

$$\gamma_{I_1} = \frac{I_1 - I}{I} 100\% = \frac{20 - 20.5}{20.5} 100\% \approx -2.5\%。$$

安培計的折合誤差

$$\gamma_n = \frac{I_1 - I}{I_n} 100\% = \frac{20 - 20.5}{50} 100\% = -1\%。$$

所謂儀器的基本誤差，就是在正常工作條件下，即當位置正常，周圍媒質的溫度是 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ，沒有外電場和外磁場（除了地的場以外），頻率是 50 赫，波形是正弦形時，儀器所有的誤差。

所謂儀器的附加誤差，就是因儀器的工作條件與正常條件不同而引起的誤差。附加誤差有不正確裝置誤差、溫度誤差、外磁場和外電場誤差、頻率誤差等。

依照全蘇國家標準、各項指示或規程，儀器可以有的最大折合相對誤差，稱做測量儀器的容許誤差：

$$\gamma_d = \frac{\Delta A_{\text{наиб}}}{A_n} 100\%。 \quad (1-9)$$

儀器讀數的可靠程度稱做測量儀器的準確度。它是用儀器的容許誤差來計值的。

決定儀器誤差的过程稱做測量儀器的檢驗。

當外界條件不變時，由儀器重複測得對應於被測的量的同一實際值的不同讀數間的最大差別，稱做測量儀器讀數的變差值。

儀器在相同條件下測量同一量所得讀數的穩定程度，稱做測量儀器的恒定度。儀器的恒定度用它的變差值來表明。

1-3. 測量誤差

無論我們用什么方法測量一個量，無論我們怎樣仔細地進行測量，