

电气测量

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

〔苏〕 A. B. 福莱姆坎 主编
E. M. 杜 兴

机械工业出版社



VAW

电 气 测 量

〔苏〕 A. B. 福莱姆坎 主编
E. M. 杜 兴

尤德斐 译

潘铁宝 校



机 械 工 业 出 版 社

本书为苏联1980年出版的高校教科书，除常用电磁测量仪表外，对近年来发展的数字式仪表、测量信息系统、随机过程函数值测量仪器及非电量的电测量等作了较多的介绍，系统性强，理论概括上比之同类书籍有它自己的特色。

本书主要供电力类及电工类专业学生学习电磁测量技术之用，亦可供广大工程技术人员学习和参考。

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Под редакцией А. В. Фремке

и Е. М. Душина

Ленинград, «Энергия» 1980

* * *

电 气 测 量

〔苏〕 А. В. 福莱姆坎 Е. М. 杜兴 主编

尤德斐 译

潘铁宝 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $13^{1/4}$ · 字数 349 千字

1986年2月北京第一版·1986年2月北京第一次印刷

印数 0,001—7,300 · 定价 3.85 元

*

统一书号: 15033 · 6031

译 者 的 话

本书为苏联电力类及电工类专业教科书。

主编为A. B. 福莱姆坎，在五十年代我国曾翻译出版了他主编的《电气测量》第一版教科书，并在各高等院校广泛使用。本书是修订第五版，内容已有了极大的变化，较好地反映了电磁测量技术近代发展的成就。

由于新内容的大量增加，使得在有限的教学计划学时内讲授必要的知识愈感困难，本书以相当简练的方式，建立了本课程内容的新体系，合理地处理了常用电工仪表与新发展的电测仪表间的关系。此外，本书在数字式仪表、测量信息系统及随机函数值测量仪器方面的叙述，在理论概括上做了较多的工作。

本书译本可作为我国高等学校电磁测量课程的教学参考书，也可供有关工程技术人员参考。

译者深切感谢潘铁宝同志，他在校对译稿中提出了许多宝贵的意见，使译稿避免了不少错误。

限于译者水平，又因时间仓促，工作上不够细致，错误之处可能较多，敬希读者批评指正。

译 者

一九八四年五月十九日

前 言

本书是按照电工类及动力类高等学校电磁测量课程的教学大纲编写的。

书中讲述了有关电磁测量的基础理论，电量、磁量及非电量的测量方法，以及用于电磁测量的各种技术手段。

本书采用的经过系统化了的材料十分适宜于电磁测量课程的讲授，因为这些材料仅仅反映了电测技术的最基本问题。书的内容比应该讲授的要略多些，这是考虑了有可能让学生们利用此书自学教学大纲中的个别章节，也可在某种程度上作为学生准备实验时的参考。

为了能够掌握本书内容，必须具备电工类和动力类院校教学大纲所规定的物理、高等数学、理论力学、电工原理、电子技术基础等课程的知识。

本教材采用国际单位制 (SI)。

提供大家使用的这本书是荣获列宁勋章的乌里扬诺夫(列宁)电工学院信息-测量技术教研室的教师们集体编写的。书中采用了在使用前四版教科书过程中积累的多年教学经验，同时也考虑了1973年第四版出版后作者们收集到的许多意见与建议。

作者们衷心感谢主审者——莫斯科动力学院信息-测量技术教研室的同行们。审稿之后，E. M. 安东纽克对第九章，И. А. 卡拉巴诺夫对第一章，E. A. 基谢廖娃对 § 4.1~4.3 节的原稿作了修改，对此，作者们也表示谢意。

目 录

前言

绪论	1
第一章 电气测量概述	6
§ 1.1 测量工具的定义与分类	6
§ 1.2 测量工具的特性	10
§ 1.3 测量工具的结构框图	17
§ 1.4 基准器, 标准及工作量具	27
§ 1.5 测量的分类	33
第二章 测量误差与测量结果的处理	37
§ 2.1 基本概念	37
§ 2.2 一系列观察的概率估计	39
§ 2.3 在观测系列基础上求得的测量结果误差的概率估计	42
§ 2.4 误差的合成	48
§ 2.5 动态误差	52
第三章 模拟式仪表测量电气量	55
§ 3.1 概述	55
§ 3.2 测量机构的作用原理, 理论基础及其应用	60
§ 3.3 比例型测量变换器	79
§ 3.4 直流电流、电压及电量的测量	93
§ 3.5 在不进行电流种类的变换情况下用电气机械式仪表测量 交流电流和电压	99
§ 3.6 用具有电流种类变换器的磁电系仪表测量交流电流及电压	106
§ 3.7 功率、能量、相移角及频率的测量	121
§ 3.8 电路参数的测量	148
§ 3.9 交流电波形的分析	155
§ 3.10 电气机械式仪表内的过渡过程	158
第四章 随时间变化电量的测量与记录	166

V

§ 4.1	概述	166
§ 4.2	直接作用式自记录仪表	168
§ 4.3	光线示波器	170
§ 4.4	电子射线示波器	179
§ 4.5	电子射线示波器的应用	190
第五章	用与量具比较的方法测量电气量	199
§ 5.1	概述	199
§ 5.2	电桥线路的一般理论	200
§ 5.3	测量直流电阻的电桥	206
§ 5.4	用于测量电容器电容及损耗角、电感、线圈品质系数及频率的交流电桥	209
§ 5.5	测量电动势、电压、电流及电阻的直流电位差计(补偿器)	218
§ 5.6	测量电动势、电压及阻抗复数值的交流电位差计	222
§ 5.7	自动电桥及电位差计	226
第六章	应用数字式仪表测量物理量	233
§ 6.1	概论	233
§ 6.2	数字式仪表的基本特性	241
§ 6.3	数字式仪表的部件	249
§ 6.4	顺序计数式数字仪表	260
§ 6.5	逐位平衡式数字仪表(码—脉冲式)	272
§ 6.6	校对式数字仪表	278
§ 6.7	打印和记忆装置	280
§ 6.8	现代数字式仪表及模—数转换器的技术特性	283
第七章	磁量的测量	285
§ 7.1	概述	285
§ 7.2	磁通、磁感应强度和磁场强度测量仪器的构成原理及测量方法	286
§ 7.3	有关磁性材料及其特性的基本知识	298
§ 7.4	试验磁性材料的设备和样品	305
§ 7.5	磁性材料静态特性的确定	308
§ 7.6	磁性材料动态特性的确定	315

§ 7.7	关于在中频、高频及脉冲磁化工作状态下确定材料磁特性的某些知识	325
第八章	非电量的测量	330
§ 8.1	概述	330
§ 8.2	参数式测量变换器	337
§ 8.3	发电式测量变换器	355
§ 8.4	温度的测量	363
§ 8.5	几何量和机械量的测量	374
§ 8.6	液体和气态介质浓度的测量	378
第九章	应用测量信息系统测量及监控物理量	382
§ 9.1	概述	382
§ 9.2	测量信息系统的基本部件	387
§ 9.3	测量系统	394
§ 9.4	自动监测系统	398
§ 9.5	遥测系统	400
第十章	测量随机过程概率特征的基本知识	405
§ 10.1	概述	405
§ 10.2	随机过程数学期望及方差的测量	409
§ 10.3	概率分布函数值的测量	411
§ 10.4	相关函数值的测量	413
文献目录		415

绪 论

在十八世纪四十年代，俄罗斯科学奠基人米哈依尔·华西列也维契·罗蒙诺索夫和他的同事 Г. B. 黎赫曼院士共同从事大气电现象的研究。当进入对电的系统性研究工作时，Г. B. 黎赫曼立即注意到了测量的必要性，并在对电的实验性研究的最早阶段就成功地创造了世界上第一台电测仪表——“电力指示器”。

1745年3月29日 Г. B. 黎赫曼第一次将此仪表介绍给彼得格勒科学院的公共集会。

在那个时代还没有任何电测仪表，物理学对电仅仅是作定性研究。Г. B. 黎赫曼以他的重大的发明充实了科学。

“电力指示器”是一根固定在金属立柱2上的亚麻线1（图B. 1），靠近立柱底部置有一个木质的1/4圆弧的量角器3，其半径略长于亚麻线。若立柱2与带电物体连接，则由于立柱与线的同极性极化而使线被排斥而偏离立柱。根据木质质量角器的刻度尺可测定线的偏摆量，并据以说明“电的力”的大小，这在罗蒙诺索夫的时代来说是电现象的特征。

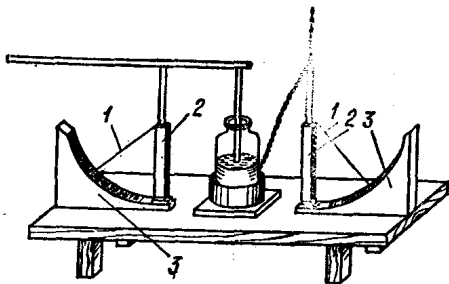


图0.1 Г. B. 黎赫曼的“电力指示器”——第一个验电计

这一由黎赫曼提供的用于大气电现象研究的仪器是第一台电测仪表，也是测量电位差的验电计的始祖，虽然电位的概念是这很久以后才确立的。

在研究雷电时，罗蒙诺索夫制成了具有独创性的用于确定最大“电的力”的仪器。它具有一个十分重要的部分——产生反作用力矩的弹簧。

十八世纪下半叶的特点是在静电学领域中有很多新发现。为了能定量地研究电现象，III. 库伦继罗蒙诺索夫和黎赫曼之后制成并应用了一种测量仪表——“扭秤”。

II. 加里伐尼的实验及 A. 伏特的研究工作合起来发现了电流。紧接这些研究之后又发现了电流的化学效应、光效应及热效应，发现了载流回路对磁针的影响，以及载流导体与永磁体间的相互作用。为了弄清有关电流的理论问题，必须创造测定电流强度的仪表，这一仪表终于由 Г. C. 欧姆造出。Г. C. 欧姆利用载流导体对磁针的作用来相对地确定电流强度。正是依靠这样的仪表欧姆通过实验确定了以他命名的著名的定律。

1831年 M. 法拉第发现了电磁感应现象。1837年瑞士物理学家 O. 杰拉里夫发明了热式电测仪表。

十九世纪下半叶一个新的知识领域——电工技术发展起来了。发电机的制成及其在实际中的多种应用促使这一时期的许多优秀电工技术专家发明和制造了各种电测仪表，如果没有它们，欲使电工技术的理论和实践进一步发展是不可想像的。

在 1880~1881 年，法国工程师戴玻列与生理学爱特松伐制成了一系列带有镜式读数的高灵敏度检流计。在 1881 年，德国工程师 F. 乌宾波尔发明了具有椭圆形铁心的电磁式仪表。而在 1886 年，他又创制了具有圆形线圈及两个圆柱式铁心的电磁式仪表。在 1894 年德国工程师 T. 勃鲁盖尔发明了流比计。

十九世纪下半叶及二十世纪初，发展电测技术的特殊荣誉应属于米哈依尔·奥西波维契·杜里伏-杜勃洛伏立斯基，他在电工技术的各个领域进行了大量的工作并作出了许多发明。

M. O. 杜里伏-杜勃洛伏立斯基在电测技术领域内的事业是在好几个方向上进行的。

首先，他制成了电磁式的安培计和伏特计，发明并造出了具有旋转磁场和圆盘状活动部分的感应式的测量机构并用在瓦特计和相位表上，此外他还设计并造出了铁磁电动式的瓦特计。但由于革命前俄国的电气工业水平很低，M. O. 杜里伏-杜勃洛伏立

斯基的专利最先是在国外得到利用，例如，德国“奥爱格”牌仪表就是按此生产的。

其次，他完成了许多对于设计制造电测仪表具有原则意义的工作。在《电测量仪表中铁的应用》一文中他不仅介绍了新的铁磁电动式的仪表，并强调地指出了它们的基本优点，即相当大的转矩及仪表示值与外界磁场的影响无关。他还提出了一系列意见，建议如何选取磁动势及气隙大小，以便获得线性的磁场强度与磁动势之间的关系，降低磁滞带来的误差。在M. O. 杜里伏-杜勃洛伏立斯基的著作及讲演中使用了术语“转动力矩”，并指出转动力矩值及活动部分的重量两者是代表仪表特点的值，这在以后导致了“品质系数”的确立。

最后，杜里伏-杜勃洛伏立斯基还提出了并实现了若干新的电与磁的测量方法。最值得指出的，是他利用瓦特表测量铁磁材料在反覆磁化下的能量损耗。

十九世纪下半叶，亚力山大·格里果立维契·斯托列托夫在电工技术领域内的工作也值得称颂。在《软磁磁化函数的研究》一文中A. Г. 斯托列托夫叙述了由他发现的磁导率随着磁场强度而变化的规律。用于表征磁化度随磁场强度而变的量被A. Г. 斯托列托夫称之为“磁化函数”（现称为磁敏感度）。为了研究“磁化函数”，A. Г. 斯托列托夫采用了一个特殊的方法：将被试样品做成镯环状，样品为镯环铁心绕组中的电流所磁化，根据绕在样品上的另一线圈中感生的电流来确定其磁化度之值，而此电流则用冲击检流计测量之。

虽然在十九世纪中叶已经使用了电测仪表，但还未建立能被普遍接受的电磁单位制。

波里斯·谢苗诺维契·雅各比院士为在电量测量中建立统一性作了最早的尝试。他制造出了若干测量电阻的仪器，称之为“伏特安培兼测仪”^①。他用铜导线制成了他自己临时的电阻基

① “Вольтаметр”一词是Якоби（雅各比）自己创造的，现在早已不用，并无确切的译名，这里按其实际所指的意义译出。——译者注

准器并分送给几个物理学家。Б. С. 雅各比改进了“伏安计”——一种根据单位时间内电解液中析出物的多少来测量电流强度的仪器。Б. С. 雅各比的这些工作对电测技术的发展十分重要，对于很久以后才建成的电单位制来说，这是先驱者的工作。

在1880年，同时有15个电阻单位，8个电动势单位及5个电流强度单位被普遍使用。由于各种单位如此五花八门，使得一切测量结果及各种科学研究计算结果的互相比较在实际上都是不可能进行的。

1881年在巴黎召开的第一次电学会议确定了电学单位制，А. Г. 斯托列托夫代表俄国出席了会议。会议决定采用电磁单位制和静电单位制。为了实用时方便，这次会议还提出了绝对单位制，它的单位是从相应的CGS单位制中取来的。在1889年、1900年以及后来的几次电学会议上用新的实用单位充实了电学单位制，并且确定了磁学单位。

在上世纪与本世纪相交接的年代，按照季米特利·依凡诺维奇·门得列也夫的建议，在彼得堡的度量衡管理局内设立了专门检定电测仪器的科室。到了1909年，А. Н. 盖奥奇也夫斯基及М. Ф. 马利柯夫在度量衡管理局中进行了电阻基准与伏特基准的建立工作（伏特基准是一组标准电池）。

虽然俄国科学家在电测技术领域内有很多发明，但在革命前的俄国却实际上不能生产测量仪器。

伟大的十月社会主义革命成功之后，国民经济各部门开始了全面的发展，这种发展对电测技术领域提出了许多新课题。

1927年新建的“电工仪表”工厂开始生产电测仪器。1930年建立了独立的测量实验室（ОЛИЗ），该室的同事们试制成功了许多仪表并在电测仪器的结构与计算方面做了大量研究工作。在这一方面，Н. Н. 波诺马廖夫的工作极富成果。这一时期还开始了用电的方法测量非电量的仪器的生产。到了三十年代，在研究所和专业实验室中开始研制工业电力系统中使用的遥测设备并从1944年起由“电控制台”工厂实行了系列化的生产。

测量技术乃是获得可靠的关于量的信息方法与手段的总和，它是国民经济各个部门技术进步的决定性因素之一。在最近几年中，对电气测量工作的要求发生了质的跃变。由于在现代化生产和科学研究的很多领域中存在着极端条件（高温高压与低温低压，有害介质，极小或相反地极高的过程行进速度，很宽的被测量范围等等），已经提出了使测量过程广泛地自动化的要求。对测量工具提出的新要求，是由利用个别的测量结果向利用测量信息流过渡，以及采用电子计算机处理测量结果。各式测量信息系统已在迅猛发展。

电测技术对科学研究工作来说具有特殊重大的意义。电磁测量仪器越是完善和精密，则越可对被研究现象作深入和正确的研究。电测技术的发展十分有效地推动了知识的深化，促进了各种新的发现和科学、技术一切部门的全面进步。

近年来电气测量技术在各个方向上都迅猛地发展着：

（1）提高了精确性和快速性，扩展了频率范围，改进了电测仪器的结构。在许多仪表中，除了具有读数及记录装置外，同时还设有信号装置，能针对某一预定的被测量值发出信号并自动控制生产过程。生产了许多电子式和数字化的仪表，它们具有很高的计量性能和运行使用性能。

（2）扩大了品种，改善了各种测量变换器的特性。这些变换器被广泛地应用于电的测量、磁的测量和非电量的测量，以及自动控制系统中。

（3）研制并生产了各种用于电测仪表的检定、铁磁材料的试验和其它目的的各种专用设备。

（4）生产并完善了测量信息系统。采用现代计算技术的测量—计算综合装置也得到了应用。

（5）研究并生产了电测技术的列入国家仪器仪表系统的成套综合设备（АСЭТ）。

（6）完善及建立了新的电学量单位和国家基准器，从而保证了电气测量精确度水平的提高。

第一章 电气测量概述

§ 1.1 测量工具的定义与分类

一、电气测量及物理量单位

电气测量的任务为使用专门的电工技术工具以实验方法寻求物理量的值，并以通用的单位表述该值。

物理量是在质的意义上为以下几方面：许多的物理对象或物理系统，它们的状态以及在它们内部进行着的某种过程所共有的。物体的电阻、电场强度、质量、时间等等都是物理量。

一般说来，量所取单位的大小可以是任意的。但测量工作必须采用通用的单位，这些单位在每个国家都是在考虑了国际组织的推荐意见之后由专门立法确定的。

在苏联自1963年1月起采用国际单位制（SI）。

SI的基本单位为：米（m）——长度单位，千克（kg）——质量单位，秒（s）——时间单位，安培（A）——电流单位，开尔文（K）——热力学温度单位，摩尔（mol）——物质的量的单位，坎德拉（cd）——光强度单位。辅助单位有：弧度（rad）——平面角单位，球面度（sr）——立体角单位。

国际单位制的导出单位用基本单位和辅助单位根据单位制的建立原则以确定方程式表示之。单位制外被允许使用的单位则按各个测量领域所订的单位标准来确定。

国际单位制（SI）是通用的，因为它包含了测量的一切领域，同时也是协调的，因为它的一切导出单位均可利用确定方程式来获得，而其数字系数都等于1。此外，无论SI的基本单位或绝大多数导出单位其大小均便于实际应用。SI中大量单位，诸如米、千克、秒、安培、伏特等等，均在国际单位制被采用之前很

久就已广泛普及。测量准确度提高的需要，物理量单位的确切化和统一化等都迫使我们必须向国际单位制过渡。

二、电气测量工具的形式

所谓电气测量工具，是指用于电的测量并具有规定的计量特性的技术工具，它们分为以下几种形式：

量具；

电气测量仪表；

测量变换器；

测量信息系统。

用以复现给定大小物理量的测量工具称为量具。有单值量具，多值量具和成套量具三类。

单值量具复现单一大小的物理量，多值量具可复现许多个不同大小的同名量，这种多值量具的例子如可变电容器，可均匀改变电感的可变电感器等等。成套量具是经过专门挑选并组合在一起的量具，它们不仅可以个别地使用，还能以不同的组合方式复现各种不同的组合方式复现各种不同大小的同名量，例如电阻箱，电容箱等等。

用于产生测量信息的信号的电测工具称为电气测量仪表，这些信号与被测物理量之间有着函数关系，且具有能被观测者直接接受的形式。电气测量仪表的动作原理和结构形式极其多种多样，这是由于对它们提出的要求也是多种多样的，它们可按多种标志予以分类。

其示值为被测量变化的连续函数的电气测量仪表称为模拟式仪表。

能够自动地产生测量信息的离散信号，其示值采取数字形式的电气测量仪表称为数字式仪表。

根据电气测量仪表是仅能读出示值还是既能读数又能以某种方式记录示值，或是仅仅就是记录，可将一切仪表分为两大类：指示式仪表及记录式仪表。

如果记录式测量仪表以图形给出示值的记录，则这类仪表称

为自记录式的。

将示值打印成数字形式的记录式测量仪表称为打印式仪表。

其示值与来自两个或多个不同通道的量之和成函数关系的电气测量仪表称为求和式仪表，例如用于测量几台发电机功率总和的瓦特表即为求和式仪表。

被称为积分式的仪表得到了广泛的应用。在这种仪表内可实现被测量对时间或其他独立变量的积分，电能电度表可作为一例。

为了能以通用的单位表示物理量的测量结果就必须有量具参与。电气测量仪表可以用被测量的单位预先进行分度，也就是说在仪表制造过程中预先使用量具。

但也有一类仪表是用于将被测量与其值为已知的量直接进行比较的，这类电气测量仪表称为比较式仪表，例如电桥、电位差计等等（参看第五章）。

在比较式仪表及某些其他仪表中，为了确定在电路的某一段内不存在电流或在电路的某些段内确定电压的是否相等，使用了一种名为指零仪的仪表。例如检流计及某些电子装置，后者在它两个输入端上的电压相等时能够输出一个电流脉冲（或者停止给出脉冲）。

根据结构特点和功能特点进行的分类是并行式分类法。

略举例如下。

按应用的特征可分为以下几类仪表：

（1）固定式，即仪表外壳能刚性地固定在安装点上的。

（2）便携式，即仪表外壳不是制成要刚性地固定在安装点上的。

根据防护程度的不同，可将仪表划分为普通型、防尘型、防水型、防爆型、气密型等等。

按照被测量的自然属性可将仪表划分为安培计——用于测量电流，伏特计——用于测量电压，欧姆计——用于测量电阻等等。

除以上分类法外，还有多种其他方法，将在以后叙述。

测量变换器也是产生测量信息的电测工具，但信号具有的形式是便于传送，便于进一步的变换、处理和（或）保存的，不过对观测者来说却不适于直接接受之。

测量变换器可根据被测量种类的不同而分为两大类：

（1）将电气量仍然变换为电气量的变换器。

（2）将非电量变换为电气量的变换器。

分流器、分压器、测量用互感器及其他类似装置是将电气量变换为电气量的变换器。利用这种变换器可以制造多量限仪表，或应用小量限仪表测量比较大的电流和电压等等。还有很多用于获得其形式便于传送、变换、处理和保存的测量信息信号的变换器也属于将电气量变换为电气量的变换器。这一类的例子有将被测电气量变换成电码的变换器（参看第六章），电码则被用于沿通讯道传输测量信息，或被用于输入电子计算机按给定程序作进一步的处理，或者将测量信息以数字方式显示出来。

将非电量变换成电量的变换器是在用电的方法测量非电量时使用的范围宽广的一类变换器。例如各种应变电阻丝片和电感式变换器等均属此类，利用它们可用电气量（电阻、电感等等）反映被测的非电量（温度、压力等等），这些电气量与被测非电量之间存在着确定的函数关系（参看第八章）。

某些种类的测量变换器有时被称为传感器[⊖]。传感器是指单个或几个变换器同配备它们上面的某些结构性元件的总称。这些元件直接装在测量对象上，并且远离测量信息的显示、记录或处理的地点。例如宇航员血压传感器，被检测对象的温度传感器等等。

将若干测量工具以及为合理地组织测量所需的辅助装置按照原理在结构上组合起来的总体称作测量设备。这种测量设备可以按一定的测量方法构成并预先估算其测量误差。

测量信息系统也是若干测量工具与辅助装置的总和，它通过

⊖ 必须注意，至今还不能认为在电气测量技术和工具领域内各种术语已都是最后完全确定了。