



研究生教材

电气测量技术

于轮元 编著

西安交通大学出版社

研究生教材

电气测量技术

于轮元 编著

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书介绍电学量、磁学量与非电量的测量技术，全书共分十章，包括：测量和测量设备的基本要求；测量误差；电工仪表的测量机构及其运动；电工较量仪器；测量电气量中各参数的电路；数字仪器，记录与显示仪器；磁测量；非电量的电测方法。

本书是在西安交通大学研究生院电类研究生中试用六届后整理成册付印的，是一本综合介绍测量技术的教材，除作研究生教材外，还可供有关科技人员阅读参考。

电 气 测 量 技 术

于 轮 元 编 著

责任编辑 刘宏珊

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安市前进印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本850×1168 1/32 印张10.75 字数：273千字

1988年1月第1版 1988年7月第1次印刷

印数：1——8000册

ISBN7—5605—0021—8/TM—1 定价：2.00元

《研究生教材》总序

研究生教育是我国高等教育的最高层次，是为国家培养高层次人才的人才。他们必须在本门学科中掌握坚实的基础理论和系统的专门知识，以及从事科学研究工作或担负专门技术工作的能力。这些要求具体体现在研究生的学位课程和学位论文中。

认真建设好研究生学位课程是研究生培养中的重要环节。为此，我们组织出版这套《研究生教材》，以满足当前研究生教学，主要是公共课和一批新型的学位课程的教学需要。教材作者都是多年从事研究生教学工作，有着丰富教学和科学研究经验的教师。

这套教材首先着眼于研究生未来工作和高技术发展的需要，充分反映国内外的最新学术动态，使研究生学习之后，能迅速接近当代科技发展的前沿，以适应“四化”建设的要求；其次，也注意到研究生公共课程和学位课程应有它最稳定、最基本的内容，是研究生掌握坚实的基础理论和系统的专门知识所必要的。因此，在研究生教材中仍应强调突出重点，突出基本原理和基本内容，以保持学位课程的相对稳定性和系统性，内容有足够的深度，而且对本门课程有较大的覆盖面。

这套《研究生教材》虽然从选题、大纲、组织编写到编辑出版，都经过了认真的调查论证和细致的定稿工作，但毕竟是第一次编辑这样高层次的教材系列，水平和经验都感不足，缺点与错误在所难免。希望通过反复的教学实践，广泛听取校内外专家学者和使用者的意见，使其不断改进和完善。

西安交通大学研究生院
西安交通大学出版社

1986年12月

前 言

本书为西安交通大学大多数电类专业研究生的基础课教材，出版前曾多次修改，并已在六届研究生中试用。

据了解，研究生选修本课程后，对完成论文有一定帮助，同时也改变了目前研究生普遍缺乏电气测量知识的局面。

配合教材内容还有一本实验指导书，考虑到各校条件不同，故未出版。

本书第一、二章介绍测量的基本概念和误差问题；第三、四章介绍电工仪表的测量机构及其运动；第五章介绍电工较量仪器；第六章介绍按照被测量的定义进行测量时的电路；第七章介绍数字仪器的基本单元—数字频率计与直流数字电压表的原理与使用；第八章介绍记录与显示仪器；第九章介绍磁测量问题，特别介绍了磁性材料的测量技术；第十章介绍非电量的电测量技术。

本书承蒙蒋大宗教授审阅。书中第七章数字仪器由童亦青同志根据她在计量中心积累的经验进行了修改。本教材修订工作中，全部材料的整理也是由童亦青同志协助完成。特此致谢。

由于水平有限，本书虽经多次修改，难免存在许多错误与不足，殷切希望专家、读者批评指正。

编 者



作者简介

于轮元教授1931年生，1953年毕业于交通大学电讯系。曾任西安交通大学电工原理教研室主任。长期从事电气测量技术的教学与科研工作，曾主持研制成XKQ-2断电相位控制器、CYD多用磁化电源、CYE电磁轭探伤机、CEQ-6000A三相全波整流磁力探伤机——超低频退磁机，是裂纹深度测量仪与CY系列磁粉探伤机的主要参加者。上述成果经鉴定均为填补国内空白产品，为此曾多次获国防工办、国家教委、航空部、陕西省、江苏省及学校等有关部门的奖励。曾发表有关上述产品的基础研究论文和磁力探伤方面论文多篇。

本社已出版的研究生系列

教材:

计算方法	邓建中、葛仁杰 程正兴
大系统的递阶与分散控制	李人厚、邵福庆
应用泛函分析	龚怀云、寿纪麟 王绵森
数理统计	汪荣鑫
随机系统理论	韩崇昭等
信息论	孟庆生
工程断裂力学	陆毅中
应用最优控制	吴受章
英语精读	郝克琦等
数字系统诊断与综合	郑崇勋
辩证逻辑与科学方法论	潘宇鹏
金属的晶界与强度	宋余九
电气测量技术	于轮元
工程优化的算法与分析	张可村
非线性连续介质力学基础	匡震邦
随机过程	汪荣鑫
英语阅读和技能	华威、潘能
《反杜林论》哲学编新解	马鼎璋

1988年将出版的:

压缩机数学模型及应用	吴业正
微波无源和有源电路	傅君眉
振动力学	倪振华
计算机绘图应用	卢振荣
高等流体力学	费祥麟
位错与材料强度	石德珂
数值传热学	陶文铨

目 录

第一章 关于测量和测量设备的基本要求

- § 1—1 测量的概念····· (1)
- § 1—2 单位制····· (2)
- § 1—3 单位的原器····· (20)
- § 1—4 四种电学计量用的度量器····· (22)
- § 1—5 测量方法分类····· (28)
- § 1—6 灵敏度、精密度和准确度····· (30)
- § 1—7 测量仪器的检验····· (31)

第二章 测量误差

- § 2—1 测量误差的一些基本概念····· (33)
- § 2—2 系统误差的处理····· (34)
- § 2—3 偶然误差的处理····· (42)
- § 2—4 有效数字····· (48)

第三章 电工仪表的测量机构

- § 3—1 电工仪表测量机构中的力矩····· (50)
- § 3—2 磁电系测量机构的静态力矩平衡····· (52)
- § 3—3 电磁系测量机构的静态力矩平衡····· (53)
- § 3—4 电动系测量机构的静态力矩平衡····· (54)
- § 3—5 感应系测量机构的作用力矩····· (54)
- § 3—6 静电系测量机构的静态力矩平衡····· (56)
- § 3—7 衡量仪表质量的几个参数····· (57)

第四章 电工仪表测量机构的运动

- § 4—1 磁电系电流计的阻尼力矩····· (60)

- § 4—2 磁电系电流计测量直流电流时的运动状态… (61)
- § 4—3 磁电系测量机构测量交变电流时的运动状态
(振动电流计、振子) …… (64)
- § 4—4 冲击电流作用下磁电系测量机构的运动状态
(冲击电流计) …… (66)
- § 4—5 冲击电流作用下没有反作用力矩的磁电系测量
机构的运动状态(磁通计) …… (69)
- § 4—6 电磁系、电动系、感应系、静电系测量机构测
量交变电流时的运动情况… (70)
- § 4—7 电工仪表的误差… (72)

第五章 电工较量仪器

- § 5—1 概述… (74)
- § 5—2 直流电桥… (74)
- § 5—3 直流电位差计… (86)
- § 5—4 应用直流较量仪器获得高精度测量结果的几个
方法… (88)
- § 5—5 交流电桥… (89)
- § 5—6 交流电位差计… (103)

第六章 测量电气量中各参数的电路

- § 6—1 复用电表——直流电压电流、交流电压电流与
电阻的测量仪表… (107)
- § 6—2 对复用电表电路线性化的方法… (110)
- § 6—3 真有效值的测量与转换电路… (114)
- § 6—4 直流低电压电流的转换电路… (132)
- § 6—5 交流低电压电流的转换电路… (139)
- § 6—6 测量直流高电压大电流的转换电路… (149)
- § 6—7 测量交流高电压及大电流的转换电路… (152)
- § 6—8 矢量形式交流电的转换电路… (158)

§ 6—9	波形分析的转换电路·····	(164)
§ 6—10	有功功率 P 与无功功率 Q 的转换电路·····	(175)
§ 6—11	几种特殊的功率转换电路·····	(180)
§ 6—12	测量频率的转换电路·····	(184)

第七章 数字仪器

§ 7—1	数字仪器概述·····	(189)
§ 7—2	数字频率计的工作原理和精度·····	(190)
§ 7—3	对数字频率计中各部分的技术要求·····	(192)
§ 7—4	数字频率计的控制电路框图·····	(193)
§ 7—5	数字频率计的基准信号的形成·····	(198)
§ 7—6	数字电压表的发展过程·····	(201)
§ 7—7	V-T电压时间转换电路·····	(202)
§ 7—8	V-F电压频率转换电路·····	(203)
§ 7—9	双积分型模数转换电路·····	(208)
§ 7—10	逐次比较直流数字电压表·····	(215)
§ 7—11	电子模拟开关·····	(228)

第八章 记录与显示仪器

§ 8—1	感应系测量机构的作用力矩和阻尼力矩·····	(231)
§ 8—2	单相感应系电度表测量机构中作用力矩和负载功率的关系·····	(237)
§ 8—3	单相感应系电度表铝盘转数和负载消耗电能的基本关系·····	(239)
§ 8—4	单相感应系电度表的调节机构·····	(241)
§ 8—5	感应系电度表的使用方法和工作特性·····	(244)
§ 8—6	记录式仪表·····	(244)
§ 8—7	简易示波器的概念·····	(245)
§ 8—8	测量示波器的触发扫描电路·····	(252)
§ 8—9	双迹示波器(电子开关的作用)·····	(255)

- § 8—10 双时基电路原理……………(258)
- § 8—11 示波器测量特性曲线的方法……………(260)

第九章 磁测量

- § 9—1 磁测量的基本问题……………(266)
- § 9—2 磁测量的探头……………(268)
- § 9—3 提高磁测量灵敏度的方法……………(275)
- § 9—4 磁测量探头变换系数的测定……………(277)
- § 9—5 测量磁性材料特性曲线的基本方法与电路…(282)
- § 9—6 测量磁性材料的试验样品与夹具……………(283)
- § 9—7 基本磁化曲线的测量……………(284)
- § 9—8 某一 H_m 下磁滞回线的测定……………(286)
- § 9—9 用示波器或 $X-Y$ 记录仪测量磁滞回线及基本
磁化曲线……………(288)
- § 9—10 硅钢片损耗的测定与分开……………(290)
- § 9—11 电桥法测定铁磁材料的特性……………(294)
- § 9—12 磁强计法测量棒状永久磁钢的磁矩和磁场的水
平分量……………(296)
- § 9—13 铁磁材料 B_r 与 H_c 的直接测定……………(299)

第十章 非电量的电测方法

- §10—1 概述……………(303)
- §10—2 传感器的主要分类……………(304)
- §10—3 电阻传感器……………(305)
- §10—4 电感传感器……………(320)
- §10—5 电容传感器……………(334)

第一章 关于测量和测量设备的基本要求

本章介绍“测量”一词的基本含义，单位制及其演变的历史与现状，保存单位的原器，工程实践中使用的保存单位的度量器，测量方法的分类，评价测量质量的主要指标和维持测量仪器准确度的检验问题。

§1—1 测量的概念

测量，是将两个同类的量进行比较的认识过程。这两个同类量中，一个是已知的作为单位的量 x_e ，另一个是未知的量 A_x 。进行比较的结果使人们得到了 A_x 等于 x_e 的倍数 x 。所以测量是一个认识 A_x 的性质和数量的过程。这样

$$A_x = x \cdot x_e \quad (1-1)$$

或
$$x = \frac{A_x}{x_e} \quad (1-1a)$$

在测量过程中，必定具有三个重要的因素，它们是测量对象，测量设备和测量方法。测量时应根据测量对象的要求确定测量设备和测量方法。为此，必须深入地、全面地了解各种测量设备和测量方法。

未知量 A_x 的测得值和它的实际值（又名真值） A_0 不会一致，它是由测量设备和测量方法的缺陷造成的，它们的不一致程度是用测量误差表示的。测量设备和测量方法的改善可以减小测量误差。但是测量误差不可能完全消除。

测量的灵敏度、准确度等，在很大程度上决定于生产实践与科

学技术的发展水平。反过来灵敏度、准确度等的提高又为生产实践与科学技术的发展提供了新的条件。

§1—2 单位制

已经指出测量过程中必须要有一个作为单位的量，也就是说要给这个量一个名称和单位。例如长度单位是m。这表示量的名称是长度而单位是m（米）。

生产实践和科学技术的发展，人们发现各种量相互之间是有一定联系的，例如

$$1 \text{ “电阻单位”} = \frac{1 \text{ “电压单位”}}{1 \text{ “电流单位”}}$$

并且逐步认识到，在各门学科中，必定有一些独立的“基本单位”。例如在电磁学中，麦克斯韦创立了严密的电磁场理论，他把电与磁在空间和时间中运动的现象概括成下列四个基本方程式：

$$\left. \begin{aligned} \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} &= \frac{\partial q}{\partial t} + \int_{\mathbf{s}} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \\ \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= - \int_{\mathbf{s}} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \\ \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} &= 0 \\ \oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} &= q \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

上列方程中包括了八个量，它们是磁场强度 H ，电场强度 E ，磁感应强度 B ，电位移 D ，电荷 q ，长度 l ，面积 S 和时间 t 。显然，这八个量中的四个量一定可以由另四个量导出。这表明电磁学“基本单位”应当有四个，其它单位可由基本单位导出。这些单位

称为“导出单位”。在实际工作中,虽然各个量的大小可以用 10^n “量的单位”来表示,但 n 的值可能较大,也可能较小。因此还应当规定 10^n 的名称,它们称为“词头”。

基本单位、导出单位、词头以及它们的使用方法都属于单位制的内容。由于生产的需要,人们在很久以前就进行了单位的制订,但由于科学技术发展水平的限制,单位制被作为一种研究课题是从1790年开始的。在此之后,国际上召开了多次科学家会议,一直到1954年才由“计量委员会”提出以“国际单位制”命名的单位制,并在1960年由“国际计量大会”正式通过,它的国际符号是SI。我国于1984年2月,由国务院下令推行以这种国际单位制为基础的法定计量单位。

SI制是一种科学的单位制,其构成原则有以下几点:

1. 它由基本单位、导出单位和词头组成。

2. 一个物理量应只有一个单位。而以目前各科技和生产领域内使用的能量单位为例,常见的就有焦耳、公斤(力)米、尔格、卡、大卡、千瓦小时、瓦秒、电子伏、马力小时、呎磅等等。SI制中规定能量只有一个单位焦耳,从而废除了其它能量单位。焦耳(J)是一导出单位。

$$1\text{J} = 1\text{kg} \cdot 1(\text{m}/\text{s}^2) \cdot 1\text{m}$$

3. SI制是“一贯性”单位制。所谓一贯性单位制是指采用了它的单位后,能够使物理量数字间的关系式和物理公式的形式一样。例如速率 v 的物理学公式是

$$v = \frac{ds}{dt}$$

上式中 s 是长度, t 是时间。如果选取米/秒(m/s)和千米/小时(km/h)的这样一套单位,那么数字间的关系和物理公式在形式上就不一样了。必须引入换算系数 K 。

例如

$$\Delta s = 7200 \text{ m}, \Delta t = 3600 \text{ s}$$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{7200}{3600} = 2 \text{ m/s}$$

v 的数字 $\{v\}$ 为 2。而用 km/h 为单位时，由于 $7200 \text{ m} = 7.2 \text{ km}$ ， $3600 \text{ s} = 1 \text{ h}$

$$v = \frac{7.2 \text{ km}}{1 \text{ h}} = 7.2 \text{ km/h}$$

v 的数字 $\{v\}$ 为 7.2，7.2 与 2 之间有一系数 3.6。这就是说，上例中数字 $\{v\}$ 、 $\{s\}$ 、 $\{t\}$ 之间的关系和物理公式不同。

$$\{v\} = K \frac{\{s\}}{\{t\}}$$

系数 K 要由选取的单位决定，出现上述这种情况，是由于时间 t 选取了两个单位后造成的，废除小时作为时间单位，也就是只用秒作时间单位，那么 K 就总等于 1。所以一个物理量选用一个单位后，必然会使物理量数字间的关系和物理公式的形式一样。

SI 制中电学与磁学量的单位是由基本单位米、千克、秒、安（以 MKSA 表示）、一系列导出单位和词头组成。

SI 制中还有两个辅助单位，它们是平面角与立体角的单位。

表 1.1 列出了 SI 基本单位，表 1.2 列出了 SI 辅助单位，表 1.3 列出了具有专门名称的 SI 导出单位，表 1.4 列出了 SI 词头，表 1.5 是词头的名称。

表 1.1 SI 基本单位

量	单位名称 ²⁾	单位符号 ⁴⁾
长度	metre	米
质量	kilogram	千克, (公斤) ¹⁾
时间	second	秒
电流	Ampere	安[培]
热力学温度 ³⁾	kelvin	开[尔文]
物质的量	mole	摩[尔]
发光强度	candela	坎[德拉]
		m
		kg
		s
		A
		K
		mol
		cd

1) 圆括号中的名称和它前面的名称是同义词(以下各表同)。

2) 去掉方括号时为单位名称的全称, 去掉方括号及其中的字即成为该单位名称的简称。使用时既可以使用全称也可以使用简称。如使用简称可能引起误解时则应使用全称(以下各表同)。

3) 除了使用以开尔文表示的热力学温度外, 也可以使用按下式定义的摄氏温度

$$t = T - 273.15\text{K}$$

式中 t 为摄氏温度

T 为热力学温度

单位“摄氏度”和单位“开尔文”相等。“摄氏度”是表示摄氏温度时用来代替“开尔文”的一个专门名称。摄氏温度间隔或温差可以用“摄氏度”表示, 也可以用“开尔文”表示。

4) 是单位的国际符号。在中小学课本和普通书刊中, 在比较简单的情況并有必要时, 单位的中文简称可以用作单位的中文符号, 但一般不得与国际符号混合组成导出单位(以下各表同)。

SI制是近三百年来世界各国科学家的研究成果, 它是一种严密的、完整的、结构合理的、概念明确的、可以用于生产与科技领域的单位制。但是在某些科技领域内(如粒子物理学)工作的部分科技人员还认为其它一些单位更适合。也有一些原采用英制的资本主义国家由于某种原因推行SI制的进度比较慢。在查阅过去的一些文献资料时, 还会遇到其它单位制。下面就合理化与非合理化的CGSE、CGSM、高斯制和SI制换算的方法作一原则介绍。

1790年法国制定米制。提出以自然物理量为单位基准的十进制计量制度。米制初建时只制定了厘米、克、秒(简称c、g、s)三个基本单位。随着科学技术发展的需要, 在电学与磁学领域中, 就出现了以c、g、s制为基本单位的单位制, 它们是静电单位制CGSE, 静磁单位制CCSM和高斯制。(这些单位制的制定一方面反映了当时科学技术的进步, 另一方面也反映了当时历史条件下科学家认识上的局限性。采用c、g、s三个基本量的单

表1.2 辅助单位

量	单位名称	单位符号
平面角	radian 弧度	rad
立体角	steradian 球面度	sr

表1.3 具有专门名称的SI导出单位

量的名称	SI 单位			
	名称	符号	用其他SI单位表示的关系式	用SI基本单位表示的关系式
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}	s^{-1}
力,重力	牛[顿]	N	$kg \cdot m/s^2$	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
压强,压力,应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
能量,功,热	焦[耳]	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率,辐射通量	瓦[特]	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
电荷量	库[仑]	C	$A \cdot s$	$s \cdot A$
电位,电压,电动势	伏[特]	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
电容	法[拉]	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
电阻	欧[姆]	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
电导	西[门子]	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁通量	韦[伯]	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁感应强度,磁通量密度	特[斯拉]	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
电感	亨[利]	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$		K
光通量	流明	lm	$cd \cdot sr$	$cd \cdot sr$
光照度	勒[克斯]	lx	lm/m^2	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
放射性活度	贝可[勒尔]	Bq	s^{-1}	s^{-1}
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
剂量当量	希[沃特]	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

注：方括号的含义见表1.1的注