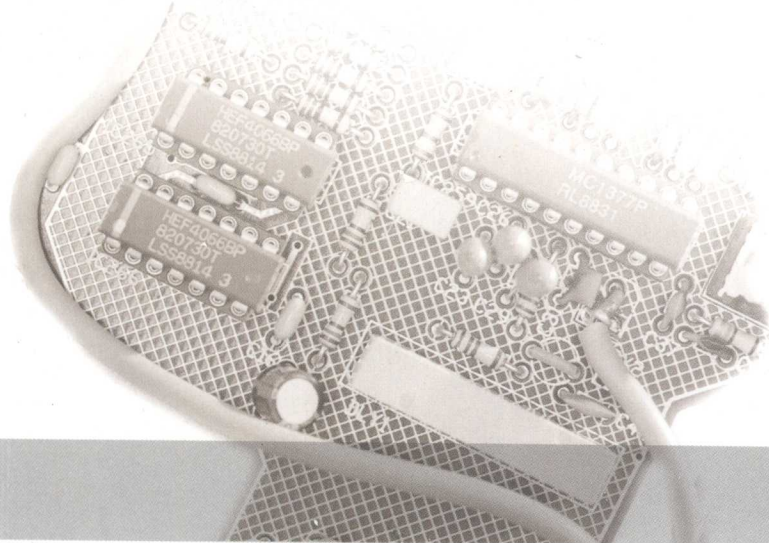


XINSHIJI DIANGONG DIANZI SHIJIAN XILIE GUIHUA JIAOCAI

新世纪电工电子实践系列规划教材



# 电气测量技术实验教程

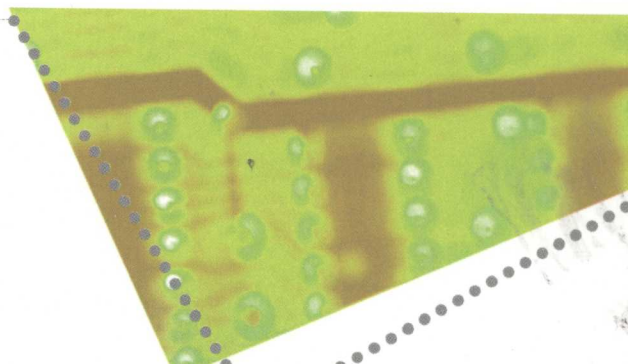
## DIANQI CELIANGJISHU

### SHIYAN JIAOCHENG

主 编 / 胡福年

副主编 / 白春艳 李洪美

东南大学出版社



要 點 容 內

## 新世纪电工电子实践系列规划教材

本书以容电及以想申, 理申; 網帶及以类代, 念聯的基另量属, 式式量属本基, 念聯本基的量属产申丁引指代聯一聯并本  
 度, 当时已率歸回知, 高申已丑申, 科詳朱对及照取看工, 知申的器对量属产申的田常及以朱对量属, 照取本基量属的幾是商  
 突的喜國聯分帶一樂已丁限个代聯二樂并本。照取看工的器对量属产申的田常及以照取本基量属的幾是产申等語申又率  
 率也, 能突的容申, 題申量属荷申而交用與, 能突量属的用申與對, 用申與參, 能突的用申量属荷申雙, 单高直聯因, 容內能  
 。能突用申的器對类者味能突用申的器對示及以, 能突量属的当时, 率聯, 能突量属的荷申并  
 生申的的业守以并其及业守器對已朱对對屬, 器工息前, 器工干申與時, 以保自, 以保自其及器工申式可何期并本

# 电气测量技术实验教程

器機(CIP)目錄強查并圖

大南來: 京南一. 聯主平語語 \ 器機強突朱对量属产申

主 编: 胡福年

副主编: 白春艳 李洪美

ISBN 978-7-2041-1522-3  
 I. 电... II. 胡... III. 电... IV. TM33

中國版本圖书館 CIP 数据核字(2009)第 008718 号

器機強突朱对量属产申

出版发行 东南大学出版社

出版人 江 文

社 址 南京市四牌楼 2 号

邮 编 210096

经 销 江苏省新华书店

印 刷 南京爱文印刷有限公司

开 本 787 mm × 1092 mm 1/16

印 张 15.52

字 数 308 千字

版 次 2009 年 2 月第 1 版

印 次 2009 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-2041-1522-3

印 价 1-35.00

定 价 26.00 元

### 东南大学出版社

· 南 京 ·

## 内 容 提 要

本书第一部分讲述了电气测量的基本概念、基本测量方法,测量误差的概念、分类以及消除;电阻、电感以及电容这些电路参数的测量基本原理、测量技术以及常用的电气测量仪器的组成,工作原理及技术指标;电压与电流、时间频率与相位、功率及电能等电气参数的测量基本原理以及常用的电气测量仪器的工作原理。本书第二部分介绍了与第一部分相配套的实验内容,包括直流单、双臂电桥测量电阻的实验,绝缘电阻、接地电阻的测量实验,使用交流电桥测量电感、电容的实验,功率和电能的测量实验,频率、相位的测量实验,以及示波器的应用实验和各类传感器的应用实验。

本书既可作为电气工程及其自动化、自动化、机械电子工程、信息工程、测控技术与仪器等专业及其相近专业的学生的教学用书,也可以作为从事电类专业的工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电气测量技术实验教程 / 胡福年主编. —南京: 东南大学出版社, 2009. 2

(新世纪电工电子实践系列规划教材)

ISBN 978-7-5641-1555-5

I. 电… II. 胡… III. 电气测量—高等学校—教材  
IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 009218 号

### 电气测量技术实验教程

出版发行 东南大学出版社

出版人 江汉

社 址 南京市四牌楼 2 号

邮 编 210096

经 销 江苏省新华书店

印 刷 溧阳晨明印刷有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 12.25

字 数 306 千字

版 次 2009 年 2 月第 1 版

印 次 2009 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5641-1555-5/TN·23

印 数 1—3500

定 价 26.00 元

(凡因印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话: 025-83792328)

# 前 言

随着科学技术的迅猛发展,电气测量技术的发展日新月异。电气测量是对物质世界的信息进行测量与控制的基本手段。它融合了微电子技术、计算机技术、通信技术、网络技术、新元器件新材料技术和现代测试技术等,是现代工业中新技术应用最多、最快的方向之一。当今世界,综合国力的竞争日趋激烈;而国力的竞争,归根结底是科技与人才的竞争。为了适应社会主义现代化建设的需要,我们组织编写了这本《电气测量技术实验教程》,满足广大电气工作者、爱好者以及师生的迫切需要。

本书编写时本着由浅入深,求精避繁的原则,从实用出发,力求理论与实际相结合,突出新颖性。本书对电气测量的基础理论、测量仪器的结构、工作原理、适用场合、技术操作要点等作了详细的阐述,并引导学生正确理解和应用相关理论、技术和方法去解决生产实际中的具体问题,提高学生分析问题和解决问题的能力,充分体现了理论联系实际和重在培养能力的原则。另外,本书主要介绍了广泛使用的传感器,包括电阻式传感器,电容式传感器,磁电式传感器,压电式传感器,热电式传感器,光电式传感器和半导体磁效应传感器等,分析了用于现代模拟和数字测量仪器中的信号输入、采样、变换、调理电路,介绍了万用表、示波器等常用仪器的工作原理、使用与维护,简要介绍了智能仪器和虚拟仪器。

“电气测量”是电气工程及其自动化、自动化、机械电子工程、信息工程、测控技术与仪器等专业及其相近专业的重要专业课。前置课程有模拟电子技术、数字电子技术、电路原理、自动控制理论等。本书按48学时编写,适当删减,并不影响本书的系统性和实用性,亦适用于40学时,部分内容可让学生自学。

本书由胡福年教授担任主编,其中第一篇的第1~3章由白春艳编写,第4~6章由李洪美编写;第二篇实验部分由白春艳、李洪美共同编写。徐州师范大学电气工程及自动化学院院长刘海宽教授、自动化学院分党委书记王莹章对本书的编写给予了大力支持和帮助,提出许多宝贵意见。在此,作者对各位专家、教授和领导表示衷心的感谢。本书的编写参考了大量文献和资料,在此对有关单位和作者一并致谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请广大师生和读者批评指正。

编 者

2008年8月

# 目 录

( 22 )	.....	五 驗 的 基 礎	1. 3. 2
( 22 )	.....	誤 差 的 基 礎	2. 1. 1
( 24 )	.....	計 量 的 基 礎	1. 1
( 24 )	.....	計 量 的 基 礎	1. 1. 1
( 24 )	.....	計 量 的 基 礎	1. 1. 2
( 24 )	.....	計 量 的 基 礎	1. 1. 3
( 24 )	.....	計 量 的 基 礎	1. 1. 4
<b>1</b>	<b>测量的基本知识</b>		( 1 )
1.1	测量的概念		( 1 )
1.1.1	测量		( 1 )
1.1.2	测量过程		( 1 )
1.1.3	测量手段		( 1 )
1.1.4	测量结果的表示		( 2 )
1.2	测量方法的分类		( 2 )
1.2.1	按测量结果的获得方式分类		( 2 )
1.2.2	按测量数据的读取方式分类		( 3 )
1.3	测量单位		( 4 )
1.3.1	单位		( 4 )
1.3.2	单位制		( 5 )
1.3.3	国际单位制		( 5 )
1.3.4	我国的法定计量单位		( 8 )
1.3.5	电气测量的单位		( 9 )
1.4	电学量具		( 10 )
1.4.1	量具的基本概念		( 10 )
1.4.2	基准的定值和国际比对		( 11 )
1.4.3	常用的电学量具		( 11 )
	习题和思考题 1		( 13 )
<b>2</b>	<b>测量误差</b>		( 14 )
2.1	测量误差的基本概念		( 14 )
2.1.1	测量误差的几个名词术语		( 14 )
2.1.2	测量误差的主要来源		( 15 )
2.1.3	测量误差的表示方法		( 16 )
2.2	测量误差的分类		( 20 )
2.2.1	系统误差		( 20 )
2.2.2	随机误差(偶然误差)		( 21 )
2.2.3	粗大误差(疏忽误差)		( 21 )
2.3	系统误差的消除		( 22 )

2.3.1	误差的修正	(22)
2.3.2	误差源的消除或削弱	(22)
2.4	测量误差的估计	(24)
2.4.1	直接测量方式最大误差的估计	(24)
2.4.2	间接测量中误差的合成和估计	(24)
2.5	误差的分配	(29)
2.5.1	系统误差的分配	(29)
2.5.2	最佳测量条件的确定	(31)
习题和思考题 2		(32)
<b>3</b>	<b>电参数的测量</b>	(33)
3.1	电阻的测量	(33)
3.1.1	电阻测量的传统方法	(33)
3.1.2	直流单电桥	(35)
3.1.3	直流双电桥	(36)
3.1.4	兆欧表	(38)
3.2	电容和电感的测量	(40)
3.2.1	常见的测量方法	(40)
3.2.2	交流阻抗电桥	(42)
3.3	电压和电流的测量	(45)
3.3.1	概述	(45)
3.3.2	直流电压和电流的测量	(46)
3.3.3	交流电压和电流的测量	(51)
3.3.4	测量用互感器	(59)
3.4	功率的测量	(64)
3.4.1	单相功率的测量	(64)
3.4.2	三相功率的测量	(66)
3.5	电能的测量	(68)
3.5.1	感应系电能表	(68)
3.5.2	电子式电能表	(72)
3.5.3	三相电能的测量	(73)
3.6	频率和相位的测量	(74)
3.6.1	频率的测量	(74)
3.6.2	相位的测量	(80)
习题和思考题 3		(81)
<b>4</b>	<b>非电参数的测量</b>	(82)
4.1	应变式电阻传感器	(82)

4.1.1	工作原理	(82)
4.1.2	种类和选用	(83)
4.1.3	使用注意事项	(85)
4.2	电容式传感器	(86)
4.2.1	工作原理和种类	(86)
4.2.2	特点和选用	(86)
4.2.3	使用注意事项	(87)
4.3	磁电式传感器	(88)
4.3.1	工作原理	(88)
4.3.2	特点和选用	(89)
4.4	压电式传感器	(89)
4.4.1	工作原理	(89)
4.4.2	特点和选用	(91)
4.4.3	使用注意事项	(92)
4.5	热电式传感器	(92)
4.5.1	热电偶式传感器	(92)
4.5.2	半导体热敏电阻	(96)
4.5.3	使用注意事项	(96)
4.6	光电式传感器	(97)
4.6.1	半导体光电效应传感器	(97)
4.6.2	红外辐射探测器	(99)
4.6.3	光栅传感器	(100)
4.6.4	光电式编码器	(104)
4.7	半导体磁效应传感器	(107)
4.7.1	霍尔传感器	(108)
4.7.2	磁敏电阻和磁敏二极管	(112)
4.7.3	磁敏三极管	(113)
4.7.4	磁敏集成电路	(114)
5	数字化测量技术	(116)
5.1	放大电路	(116)
5.1.1	集成运算放大器及其基本电路	(116)
5.1.2	测量放大电路	(119)
5.1.3	功率输出放大电路	(125)
5.1.4	隔离放大器	(126)
5.2	滤波电路	(128)
5.2.1	滤波器的分类	(129)

( 58 )	5.2.2 低通滤波电路	(129)
( 58 )	5.2.3 高通滤波电路	(131)
( 58 )	5.2.4 巴特沃斯滤波器	(131)
( 58 )	5.2.5 带通和带阻滤波电路	(133)
( 58 )	5.2.6 数控滤波器及其集成电路	(134)
( 58 )	5.3 信号转换电路	(136)
( 58 )	5.3.1 电压/电流转换和电流/电压转换电路	(136)
( 58 )	5.3.2 信号幅值比较电路	(137)
( 58 )	5.3.3 电压/频率转换电路	(139)
( 58 )	5.4 采样/保持电路	(141)
( 58 )	5.5 D/A 转换电路	(143)
( 58 )	5.6 A/D 转换电路	(148)
( 58 )	5.7 示波器	(153)
<b>6</b>	<b>智能仪器和虚拟仪器</b>	(156)
( 58 )	6.1 概述	(156)
( 58 )	6.2 智能仪器	(156)
( 58 )	6.2.1 智能仪器的特点和组成	(156)
( 58 )	6.2.2 智能仪器的新发展	(158)
( 58 )	6.2.3 智能仪器中的数据转换和控制	(159)
( 58 )	6.3 虚拟仪器	(160)
( 58 )	6.3.1 虚拟仪器的分类和硬件构成	(160)
( 58 )	6.3.2 虚拟仪器的设计制作和软件系统	(161)
<b>7</b>	<b>实验</b>	(163)
( 58 )	7.1 实验 1:用直流单、双臂电桥测量电阻	(163)
( 58 )	7.2 实验 2:接地电阻的测量	(166)
( 58 )	7.3 实验 3:用交流电桥测量电感和电容	(169)
( 58 )	7.4 实验 4:三相电路功率的测量	(171)
( 58 )	7.5 实验 5:电阻式传感器(金属箔式应变片)的应用	(174)
( 58 )	7.6 实验 6:用电容式传感器测量位移	(178)
( 58 )	7.7 实验 7:用磁电式传感器测量转速	(179)
( 58 )	7.8 实验 8:用压电式传感器测量振动	(180)
( 58 )	7.9 实验 9:铂电阻测温特性	(181)
( 58 )	7.10 实验 10:用光电转速传感器测量转速	(182)
( 58 )	7.11 实验 11:霍尔传感器的位移特性	(182)
	<b>参考文献</b>	(185)



# 1 测量的基本知识

## 1.1 测量的概念

### 1.1.1 测量

测量是人们认识客观事物,并用数量概念描述客观事物,进而达到逐步掌握事物的本质和揭示自然界规律的一种手段。在工农业生产、商业贸易、日常生活中都需要测量,而现代科学技术的发展更是与测量的发展分不开。

测量是用实验的方法把被测量与同类标准量进行比较以确定被测量大小的过程。同理,电磁测量是通过直接或间接的方法,将被测的电磁量与同类的标准单位量进行比较,以确定被测电磁量的大小。同类标准量的参与方式可以是直接的,也可以是间接的。例如,电位差计测电压,同类标准量(标准电池)是直接参与;电流表测电流,这里标准量是间接参与的。因为电流表在出厂时,已经与标准量(标准电流)进行比较,以获得定标和校准。

### 1.1.2 测量过程

测量包含有三个重要因素,即测量对象、测量方法和测量设备。一个完整的测量过程一般包括以下三个阶段:

(1) 准备阶段。认真分析测量对象的性质、特点、测量条件及测量结果所要达到的准确度要求,然后选定适当的测量方法及选择相应的测量仪器,拟定出测量过程及测量步骤。测量方法的选择正确与否,直接关系到测量结果的可信赖程度,也关系到测量方案的经济性和可行性。不正确的测量方法,即使有先进的精密仪器,也不会得到正确的测量结果。

(2) 测量阶段。了解测量设备的特性、使用方法,建立测量仪器所必需的测量条件,按照已拟定出的测量过程及测量步骤谨慎进行操作,认真记录测量数据。

(3) 数据处理阶段。根据记录的数据,考虑测量条件的实际情况,按照选定的测量方法及理论计算出被测量的测量结果的估计值;根据误差传递理论,求得测量误差。

### 1.1.3 测量手段

常见的测量手段有以下几种:

(1) 量具:体现计量单位的器具。量具中一小部分可直接参与比较,如尺子、量杯等。多数量具要用专门设备才能发挥比较的功能,如利用标准电阻器测量电阻时,需要借助于电桥。

(2) 仪器:泛指一切参与测量工作的设备。包括各种直读仪器、非直读仪器、量具、测试信号源、电源设备以及各种辅助设备,如电压表、频率表、示波器等。

(3) 测量装置:由几台测量仪器及有关设备所组成的整体,用以完成某种测量任务。

(4) 测量系统:由若干不同用途的测量仪器及有关辅助设备所组成,用以多种参量的综合测试。

### 1.1.4 测量结果的表示

测量结果由两部分组成,即测量单位和与此测量单位相适应的数字值,一般表示成:

$$X = A_x x_0 \quad (1.1)$$

式中: $X$  为测量结果; $A_x$  为测量所得的数字值; $x_0$  为测量单位。

当然,测量结果也可以用曲线或图形等方式来表示,但它们同样包含具体的数值与单位;没有单位,数值是没有物理意义的。

## 1.2 测量方法的分类

测量的具体方法是由被测量的参数类别、量值的大小、所要求的测量准确度、测量速度的快慢、进行测量所需的条件以及其他一系列因素决定的。每个物理量都可以用具有不同特点的多种方法进行测量。

为了探讨测量方法的特征,正确地选择测量方法,需要对测量方法进行分类。测量方法的分类形式很多,例如,根据被测量在测量期间是否随时间的变化而变化,可分为静态测量和动态测量;根据测量条件,可分为等精度测量和非等精度测量;根据测量器具的敏感元件是否与被测物体接触,可分为接触测量和非接触测量;等等。但常用的分类方法有两种,一种是根据测量结果的获得方式进行分类,另一种是根据测量数据的读取方式进行分类。

### 1.2.1 按测量结果的获得方式分类

1) 直接测量

用预先按标准量标定好的仪器对被测量进行测量或用标准量直接与被测量进行比较,从而从仪器的指示机构的读数直接获得被测量之值的一种测量方法,叫做直接测量。采用这种测量方法,可以使用量具进行测量,也可以用预先按已知标准量定度好的直读式测量仪器或比较式仪器对被测量进行测量。例如,用电流表测量电流、用电桥测量电阻等。这种方式的特点是测出的数据就是被测量本身的值,测量过程简单快速,应用比较广泛。直接测量法又可分为直接比较测量法、替代测量法、微差测量法、零位测量法和符合测量法等。

(1) 直接比较测量法:将被测量直接与已知其值的同类量相比较,从而确定被测量值。例如,用刻度尺测量长度等。

(2) 替代测量法:将选定的且已知其值的量替代被测的量,使得在指示装置上有相同的效应,从而确定被测量值。

(3) 微差测量法:将被测量与同它的量值只有微小差别的同类已知量相比较并测出这两个量值间的差值,从而确定被测量值。

(4) 零位测量法:通过调整一个或几个与被测量有已知平衡关系的量,用平衡的方法确定出被测量的值。零位测量法的典型例子是用电桥测电阻。

(5) 符合测量法:是由对某些标记或信号的观察来测定被测量值与作比较用的同类已知量值间微小差值的一种微差测量法。例如,用游标卡尺测量物体的尺寸等。

2) 间接测量

间接测量是通过与对被测量有函数关系的其他量的测量而通过计算得到被测量值的测量

方法。例如,用伏安法测电阻,通过测量电阻器两端的电压和通过电阻器的电流,根据欧姆定律,可以算出被测电阻器的电阻值。

该方法需要测量的量较多,测量过程复杂费时,手续繁多,花费时间较长,引起的误差因素也较多;但如果对测量误差进行分析,并选择和确定具体的优化测量方法以及在比较理想的条件下进行测量,测量结果的准确度不一定低,有的甚至有较高的准确度。所以,一般情况下应尽量采用直接测量,只有在下列情况才选择间接测量:

- (1) 被测量不便于直接读出。
- (2) 直接测量的条件不具备,如直接测量该量的仪器不够准确或没有直接测量的仪器。
- (3) 间接测量的结果比直接测量更准确。

### 3) 组合测量

在测量过程中,当测量两个或两个以上相关的未知数时,需要改变测量条件进行多次测量,根据直接测量和间接测量的结果,解联立方程组求出被测量,称为组合测量。例如,测量电阻  $R$  的温度系数  $\alpha$  和  $\beta$ ,根据电阻器在温度  $t$  时的电阻值与温度系数的关系式,可先测出不同温度下该电阻器的电阻值  $R_{t_1}$  和  $R_{t_2}$ ,再通过求解下述联立方程组来求  $\alpha$  和  $\beta$ :

$$R_{t_1} = R_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2] \quad (1.2)$$

$$R_{t_2} = R_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2] \quad (1.3)$$

组合测量法实质上仍然是一种间接测量法。组合测量法有两个明显的优点:在准确度要求相同的情况下,组合测量需要进行的测量次数较少;系统误差出现的规律变为随机性质,因而可使测量结果的准确度有所提高。组合测量的手续繁多,较花费时间,但容易达到较高的精度,通常在实验室中使用。

测量方法的选择与仪器的选择同等重要,即使在同一种类的测量方法中,仍有很多具体的测量方法。因此,在实际测量时,要根据具体情况选择合适的测量方法。

## 1.2.2 按测量数据的读取方式分类

直接测量需要从测量中读出被测量,间接测量也需要从测量中读出中间量。不论是测量还是中间量,读取其数据的方法可分为直读法和比较法两种。

### 1) 直读法

用电测量指示仪器(仪表)直接读取测量数据的方法称为直读法。直读法不等于直接测量,因为测出的数据可能是中间量。直读法的特点是作为单位的标准量具并不参与比较。为了读取被测量之值,这些仪器(仪表)已预先按被测量的单位刻度好分度,因而直读法实际上是被测量与量具间接比较的方法。例如,利用万用表测量电流、电压都属于这种测量方法。

这种测量方法具有测量过程简单、迅速的优点,但测量精确度较低,在工程测量方面得到广泛应用。

### 2) 比较法

比较法是将被测量与度量器置于比较仪器上进行比较,从而按度量器的值求得被测量数据的一种方法。这种方法多用于高准确度的场合,当然,为了保证比较结果的准确度,还要有较准确的仪器,测量时还要保持较严格的实验条件,如温度、湿度、振动、外界电磁干扰等都不能超过规定值。

该方法的特点是标准量直接参与,测量准确度高,但测量设备较贵,过程复杂。电桥、电位差计就是利用比较测量法的原理设计制作的典型的比较式测量设备。在数字测量技术中,

用三步测量、自动校零和迭代等方法,它们都是以比较测量为理论基础的。

根据比较时的特点,比较法又可分为三类。

(1) 零值法:又称零位式(补偿式或平衡式)测量法。在测量过程中,用已知的标准量直接与被测量比较,若有差值,则调整标准量使差值减小,该差值用指零仪表来指示,当指零仪表指在零位时,说明被测量等于标准量,然后用标准量之值决定被测量之值。例如用电桥测电阻,具体电路如图 1.1 所示,当调节电阻  $R_0$ ,使电桥公式  $R_x = (R_1/R_2)R_3$  保持恒等时,指零仪表 P 的读数为 0。被测电阻  $R_x$  可由  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  值求得。由于比较中指示仪表只用于指零,所以仪表误差并不影响测量结果的准确度,测量准确度只与度量器及指示仪表灵敏度有关。

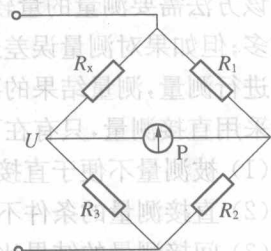


图 1.1 零值法测量电阻的电路

零值法测量的特点如下:

① 测量精度高。  
 ② 读数时指零仪表 P 指零,说明指零仪表 P 支路电流为 0;即读数时,不向被测电路吸取能量,不影响被测电路的工作状态,所以不会因为仪表的输入电阻不高而引起误差。

③ 由于在测量过程中要进行平衡操作,其反应速度较慢,故不适合测量变化迅速的信号,只适用于测量缓慢变化的信号。由于上述特点,这种测量方法在实验室和工程实践中都得到广泛应用。

(2) 较差法:又称微差式测量。较差法是通过测量已知量与被测量的差值,从而求得被测量的一种方法。较差法测量综合了直读式测量和零位式测量的优点,较差法实际上是一种不彻底的零值法。

较差法测量的优点是反应快,测量精度高,既适用于测量缓变信号,也适用于测量迅速变化的信号,因此,在实验室和工程测量中都得到广泛应用。

(3) 替代法:是将被测量与已知量先后两次接入同一测量装置,如果两次测量中测量装置的工作状态能保持相同,则认为替代前接在装置上的待测量与替代后的已知标准量其数值完全相等。当然,要做到完全替代,已知标准量最好是连续可调的,这样才能在替代时通过调节使测量装置的工作状态保持不变。

采用这种方法,如果前后两次测量相隔的时间很短,而且又是在同一地点进行,那么装置的内部特性和各种外界因素对测量所产生的影响可以认为完全相同或绝大部分相同,所以测量误差极小,准确度几乎完全取决于标准量本身的误差。

各种测量方法都有各自的特点,在选择测量方法时,应首先研究被测量本身的特性、所提出的精度要求、环境条件及所具有的测量仪器(装置、仪表)等,经综合考虑,再确定采用哪种测量方法和选择哪些测量设备。

### 1.3 测量单位

#### 1.3.1 单位

用来标志量或数的大小的指标统称为单位。标志可测量大小的单位称为计量单位或测量单位。计量单位或测量单位是有明确定义和名称的。例如,m(米)、kg(千克)、s(秒)等都是计

量单位。米、千克和秒是它们的名称,并且米、千克和秒都有其各自的明确定义。

### 1.3.2 单位制

由于物理量间有各种物理关系相联系,所以一旦几个物理量的单位确定后,其他物理量的单位就可以根据物理关系式推导出来。这些由基本单位和一定物理关系推导出来的单位称为导出单位。基本单位与导出单位组成的一个完整的单位体制,称为单位制。

基本单位是可以任意选定的,由于基本单位选择的不同,因此组成的单位制也就不同,例如,有市制、英制、米制等。这就造成了同一物理量具有多个不同单位的情况,而单位不统一给人们的生产、生活、国际贸易和科技交流造成了极大的困难。这就需要有一个国际上公认的、统一的单位制。近数十年来世界各国为了贸易和科学技术交流的需要,趋于采用国际单位制。1960年第11届国际计量大会(CGPM)正式通过了适合于一切领域的单位制,称为国际单位制,用代号“SI”表示。随后一些国际组织,如国际法制计量组织(OIML)、国际标准化组织(ISO)和国际电工委员会(IEC)等也采用了国际单位制。

### 1.3.3 国际单位制

#### 1) 国际单位制的构成

国际单位制(SI)由 SI 单位和 SI 单位的倍数单位组成。SI 单位由 SI 基本单位和 SI 导出单位组成。SI 导出单位由包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位和组合形式的 SI 导出单位组成。

#### 2) SI 基本单位

国际单位制有 7 个基本单位(见表 1.1)。

表 1.1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称		单位符号
长度	米	meter	m
质量	千克(公斤)	kilogram	kg
时间	秒	second	s
电流	安[培]	ampere	A
热力学温度	开[尔文]	kelvin	K
物质的量	摩[尔]	mole	mol
发光强度	坎[德拉]	candela	cd

国际单位制中的基本单位是通过计量标准来定义、实现、保持或复现的。实现基本单位的初期基准是利用有关实物来建立的,它们被称为实物基准,例如国际米原器、国际千克原器等。实物基准比较简便直观,所以在一段历史时期内得到广泛应用(国际千克原器至今仍在使用)。但是,由于实物基准受到材料纯度、加工准确度、使用磨损、环境变化等限制,它们难以达到并保持很高的准确度。随着科学技术的进步,特别是量子力学的发展,实现基本单位的基准相继利用宏观量子效应来建立,它们被称为自然基准。自然基准的不确定度较小,并且可以在不同国家以同样的准确度来建立。

目前,国际计量大会(CGPM)所确定国际单位制中的 7 个基本单位定义如下:

(1) 长度单位:米(m) 米是光在真空中于 1/299 792 458 s 时间间隔内所经过的距离(1983 年第 17 届国际计量大会通过)。

(2) 质量单位:千克(kg) 千克是质量单位,等于国际千克原器的质量(1901 年第 3 届国际计量大会规定)。这是迄今为止在国际单位制基本单位中唯一保留的实物基准。

(3) 时间单位:秒(s) 一秒是铯-133( $\text{Cs}^{133}$ )原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间(1967 年第 13 届国际计量大会决定)。

(4) 电流强度单位:安[培](A) 安[培]是一恒定电流,若保持在处于真空中相距 1 m 的两无限长而圆截面可以忽略的平行直导线内,则此两导线之间产生的力在每米长度上等于  $2 \times 10^{-7}$  N(1948 年第 9 届国际计量大会确定)。

(5) 热力学温度单位:开[尔文](K)

开[尔文]是水的三相点热力学温度的 1/273.16(1967 年第 13 届国际计量大会通过)。

(6) 物质的量的单位:摩[尔](mol)

摩[尔]是一系统的物质的量,该系统中所包含的基本单元数与 0.012 kg 碳-12( $\text{C}^{12}$ )的原子数目相等(1971 年第 14 届国际计量大会决定增加的基本单位)。

(7) 发光强度单位:坎[德拉](cd)

坎[德拉]是发出频率为  $540 \times 10^{12}$  Hz 单色辐射的光源在给定方向上的发光强度,而且在此方向上的辐射强度为 1/683 W/sr(1979 年第 16 届国际计量大会规定)。

### 3) SI 导出单位

SI 导出单位由两部分组成:一部分是包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位;另一部分是组合形式的 SI 导出单位。

19 个具有专门名称的导出单位的名称、符号见表 1.2。

表 1.2 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示式例
频率	赫[兹]	Hz	$\text{s}^{-1}$
力;重力	牛[顿]	N	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
压力,压强;应力	帕[斯卡]	Pa	$\text{N}/\text{m}^2$
能量;功;热	焦[耳]	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
功率;辐射通量	瓦[特]	W	J/s
电荷量	库[仑]	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
电位;电压;电动势	伏[特]	V	W/A
电容	法[拉]	F	C/V
电阻	欧[姆]	$\Omega$	V/A
电导	西[门子]	S	A/V

续表 1.2

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示式例
磁通量	韦[伯]	Wb	V · s
磁通量密度;磁感应强度	特[斯拉]	T	Wb/m <sup>2</sup>
电感	亨[利]	H	Wb/A
摄氏温度	摄氏度	°C	
光通量	流[明]	lm	cd · sr
光照度	勒[克斯]	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射性活度	贝可[勒尔]	Bq	s <sup>-1</sup>
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	J/kg
剂量当量	希[沃特]	Sv	J/kg

4) SI 辅助单位

SI 辅助单位的名称、符号见表 1.3。

表 1.3 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr

国家计量委员会 1980 年明确指出,在国际单位制中,辅助单位弧度和球面度解释为“无量纲的导出单位”,以此来保持仅基于 7 个基本单位的国际单位制的一贯性。之所以称为辅助单位,是因为它们既可以用“1”表示,又可以用给定的专用名称“弧度”和“球面度”表示。从实用出发,根据不同场合下的需要选择。

5) SI 词头

国际单位制规定一个物理量只有一个 SI 单位,这给使用带来不便。比如,电流的 SI 单位为安[培],符号为 A,对于比较小的电流,小数位太多,如 0.000 005 A,对于比较大的电流,数字后“0”太多,如 50 000 A。显然,这对记录和读数是十分不便的,为此,国际单位制规定了一套词头,用它和 SI 单位组合而成 SI 单位的十进倍数单位和十进分数单位。有了词头,上述两数字就可分别表示成 5 μA 和 50 kA。这里的“μ”、“k”就是词头,分别读为“微”和“千”。

SI 词头的定义、名称及符号见表 1.4。

表 1.4 国际单位制的词头

所表示的因数	词头名词	词头符号
10 <sup>24</sup>	尧[它]	Y
10 <sup>21</sup>	泽[它]	Z
10 <sup>18</sup>	艾[可萨]	E
10 <sup>15</sup>	拍[它]	P
10 <sup>12</sup>	太[拉]	T

续表 1.4

词头符号所表示的因数	符号	词头名词	词头符号
$10^9$	G	吉[咖]	G
$10^6$	M	兆	M
$10^3$	k	千	k
$10^2$	h	百	h
$10^1$	da	十	da
$10^{-1}$	d	分	d
$10^{-2}$	c	厘	c
$10^{-3}$	m	毫	m
$10^{-6}$	$\mu$	微	$\mu$
$10^{-9}$	n	纳[诺]	n
$10^{-12}$	p	皮[可]	p
$10^{-15}$	f	飞[母托]	f
$10^{-18}$	a	阿[托]	a
$10^{-21}$	z	仄[普托]	z
$10^{-24}$	y	幺[科托]	y

在使用词头时应注意以下几点:

- (1) 词头符号用罗马体(正体)印发,在词头符号和单位符号之间不留间隔。
- (2) 不允许使用重叠词头。
- (3) 词头永远不能单独使用。

(4) 在国际单位制的基本单位中,由于历史原因,质量单位(kg)是唯一带有词头的单位名称,它的十进倍数与分数单位是将词头加在“g”前,而不是加在“kg”前构成的。但“kg”并不是倍数单位而是 SI 单位。

国际单位制具有严格的统一性、突出的简明性与广泛的实用性,因而可以使单位统一,消除多种单位制并存的弊病,省掉许多不同单位制单位之间的换算系数,简化运算过程,减少产生差错的环节和减小换算的误差。

### 1.3.4 我国的法定计量单位

法定计量单位是由国家以法令形式规定允许使用的计量单位。

1977 年 5 月 27 日国务院颁发《中华人民共和国计量管理条例(试行)》明确规定要逐步采用国际单位制(SI)。1984 年 2 月 27 日国务院发布《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》,决定在采用先进的 SI 基础上进一步统一我国的计量单位。1986 年 7 月 1 日起施行的《中华人民共和国计量法》规定,我国的法定计量单位以国际位制的单位为基础,并根据我国的实际情况,适当增加了一些其他单位。我国法定计量单位包括:

- (1) 国际单位制的基本单位(见表 1.1);
- (2) 国际单位制的辅助单位(见表 1.2);



(3) 国际单位制中具有专门名称的导出单位(见表 1.3);

(4) 国家选定的非国际单位制单位(见表 1.5);

表 1.5 国家选定的部分非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号
时间	分 小时 天	min h d
平面角	秒 分度	' °
旋转速度	转/分	r/min
长度	海里	n mile
土地面积	公顷	hm <sup>2</sup>
质量	吨 原子质量单位	t u
体积	升	L
能	电子伏	eV
级差	分贝	dB
线密度	特[克斯]	tex

(5) 由以上单位构成的组合形式单位;

(6) 由词头和以上单位所构成的十进倍数和分数单位(词头见表 1.4)。

在电磁测量中,量值的单位无特殊要求的一般采用国际单位制,采用非国际单位时必须按照国家标准执行。

### 1.3.5 电气测量的单位

在电磁学中涉及的物理量的单位只与四个基本单位有关,即:米、千克、秒、安培。通过这四个基本单位和电磁学定律,就可导出电磁学中所有物理量的单位。

表 1.6 中列出了部分电磁学量的单位。

表 1.6 电磁学量的部分单位

量的名称	定义方程式	单位名称	单位符号
电荷[量]	$q = It$	库[仑]	C
电场强度	$E = \frac{U}{d}$	伏[特]每米	V/m
电位,电压,电动势	$U = \frac{W}{q}$	伏[特]	V
电容	$C = \frac{q}{U}$	法[拉]	F