



普通高等教育 $\frac{\text{电气工程}}{\text{自动化}}$ 系列规划教材

普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材

Electrical Testing
technology

电气测试技术

◎ 陈荣保 江琦 李奇越 编著

◎ 费敏锐 主审

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



014024870

TM93-43
38

普通高等教育 电气工程 系列规划教材
自动化
普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材

电气测试技术

陈荣保 江琦 李奇越 编著
费敏锐 主审



中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第303927号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号) 邮政编码 100073
责任编辑: 李奇越
封面设计: 张静
北京丰源印刷厂印刷
2014年1月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·18.25印张·431千字
标准书号: ISBN 978-7-111-42139-4
定价: 37.00元



机械工业出版社

TM93-43
38



北航 C1711769

078423410

本书密切关注新技术、新方法,在目前常规的测试技术和方法的基础上,进行了一定的调整和增加。本书共由 10 章组成,内容包括电学测试和磁学测试技术的基本知识、指针指示型电测技术、数字显示型电测技术、屏幕显示型电测技术、磁学量测试技术、极限参数测试技术、智能型电测技术、网络化电测技术、电测系统的抗干扰技术和电气测试安全技术。

本书可作为电气领域、电子信息领域、测控领域,以及电学测量和磁学测量领域的专业的高校教材,也可作为研究生教材和相关技术人员的参考书籍。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jinacmp@163.com 索取,或登录 www.cmpedu.com 下载。

图书在版编目(CIP)数据

电气测试技术/陈荣保,江琦,李奇越编著.

—北京:机械工业出版社,2014.1

普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-45159-4

I. ①电… II. ①陈…②江…③李… III. ①电气测量-高等学校-教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 302992 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 卢若薇

版式设计:霍永明 责任校对:刘秀丽

封面设计:张静 责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·18.25 印张·451 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-45159-4

定价:37.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着全球能源的进一步开发和再生能源、洁净能源以及自然能源的开发利用,智能电网技术越来越朝着“更加智慧”的电网建设方向发展。电网系统、电气设施、电器产品,以及用电、节电、电能计量等新的技术、新的要求、新的测试方法不断地涌现出来,基于物联网的通信平台也带来了全新的信息通信技术。在安全性、可靠性、实用性和实时性、准确性、低功耗的共同要求下,电气测试技术迎来了新技术、新方法、新领域的全面挑战。原有的电气测试手段和设备在不断地更新和丰富。

本书作者长期从事电气测试方面的科研和教学工作,具有丰富的教学积累和工程经验。全书既保留了传统的、经典的电测技术介绍,又较大篇幅地介绍了极限参数测量、智能化测量和电测系统的抗干扰技术。本书内容紧密结合基于物联网的智能电网、智能电表以及相应的电学测量和磁学测量最新知识。

电气测试技术包括电学测量、磁学测量技术,本书在目前常规的测试技术和方法的基础上,进行了一定的调整和增加,增加了一些新技术、新方法。全书章节和内容安排如下:

第1章 电气测量的基本知识。介绍电学测量、磁学测量技术的发展过程和趋势;介绍基本概念、电学标准、数据表示、误差处理等相关知识;介绍电测仪表类型和信息传输的基本知识。

第2章 直读式电测技术。介绍磁电系、电磁系和电动系仪表的电测技术,除测量电流、电压的方法外,还包括磁电系的电阻测量和电动系的电功率测量。

第3章 比较式电测技术。介绍稳压电源、直流电位差计和直流/交流电桥;简单介绍有源电桥、数字电桥和智能电桥。

第4章 电子式测试技术。介绍波谱型信号产生、测量和显示的技术,主要包括函数信号发生器、示波器和示波表等。

第5章 智能化电测技术。介绍数字式参数测量(包括时间、周期、频率、相位、相位差等)和数字式电测技术(包括信号分类、结构、基本功能、采样保持器与A-D转换器、数字电压表等);介绍智能测试过程中涉及的智能芯片、嵌入式技术和接口技术;介绍智能化测试中的软件技术。

第6章 磁学量测试技术。介绍磁学测量的基本概念;介绍空间磁场、磁性材料的测量技术和仪表。

第7章 极限参数测试技术。介绍极限参数的基本概念;介绍绝缘参数、接地电阻、瞬间信号和微弱信号的测试技术;介绍超高电压和超大电流的测试技术。

第8章 网络化电测系统。介绍智能测试系统中的接口总线技术、网络通信技术和远程技术。

第9章 电气测量系统的抗干扰技术。包括直接传导耦合、公共阻抗耦合、共模干扰及其抗干扰技术。

第10章 电气测试安全技术。强调在电气测试过程中的安全基础知识。

本书由合肥工业大学陈荣保博士、江琦博士和李奇越博士编写，上海大学费敏锐教授主审。其中，陈荣保博士负责第1~6章及第10章，江琦博士负责第7章，李奇越博士负责第8、9章，研究生侯伟、孟芳慧、张俊杰、肖华峰、豆贤为、路改香、计鹿飞等参与本书部分素材搜集和整理工作。全书由陈荣保博士统稿。

本书是普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材，适用于电气领域、电子信息领域、测控领域，以及电学测量和磁学测量领域的专业的高校教材，也可作为研究生教材和相关技术人员的参考书籍。

在编写本教材过程中，参阅了较多高等学校使用的相关教材、教学大纲，参考了网上较多对本门课程的见解和共识，得到了上海大学费敏锐教授的许多宝贵意见和建议，还得到了徐科军教授及其同行、研究生和家属的热情支持与帮助，也得到了出版社的大力支持，本书作者在此一并表示感谢！

在教学过程中若需要电子课件和经验交流，请与编者联系：CRBWISH@126.COM。

由于本书成书周期短，对编写过程存在的编写错误或不妥之处，在此表示歉意。希望广大读者指出，不吝赐教！并将在再版时予以更正。

作者

目 录

前言

第1章 电气测量的基本知识 1

1.1 基本概念	1
1.2 电气测量方法	3
1.3 电气测量仪表及其选择	4
1.4 测量数据的表示和单位	6
1.5 电气基准及其标准器具	8
1.5.1 电学基准	9
1.5.2 电学标准器具	10
1.6 电气测量仪表特性指标	15
1.6.1 静态特性	15
1.6.2 动态特性	16
1.6.3 误差的处理	16
1.7 电气测量的发展趋势	19

习题与思考 20

第2章 直读式电测技术 21

2.1 概述	21
2.2 磁电系仪表	22
2.2.1 磁电系仪表的结构	22
2.2.2 磁电系仪表的原理	23
2.2.3 磁电系仪表的应用	24
2.2.4 万用表	28
2.2.5 检流计	31
2.3 电磁系仪表	33
2.3.1 电磁系仪表的结构	33
2.3.2 电磁系仪表的原理	34
2.3.3 电磁系仪表的应用	35
2.4 电动系仪表	37
2.4.1 电动系仪表的结构	37
2.4.2 电动系仪表的原理	37
2.4.3 电动系仪表的应用	39
2.4.4 电功率表	39

习题与思考 42

第3章 比较式电测技术 44

3.1 概述	44
3.2 稳压电源	44
3.2.1 交流稳压电源	45

3.2.2 直流稳压电源	49
3.3 直流电位差计	54
3.3.1 直流电位差计的工作原理	55
3.3.2 电位差计的应用	55
3.4 电桥	57
3.4.1 直流电桥	57
3.4.2 交流电桥	59
3.4.3 变压器电桥	62
3.4.4 平衡式电桥	63
3.4.5 数字电桥	63
习题与思考	64

第4章 电子式测试技术 65

4.1 概述	65
4.2 信号发生器	66
4.2.1 模拟信号发生器	66
4.2.2 数字信号发生器	68
4.2.3 任意信号发生器	69
4.3 示波器	69
4.3.1 简介	69
4.3.2 模拟示波器	70
4.3.3 数字示波器	71
4.3.4 示波器的测量技术	80
4.3.5 示波器的应用	83

习题与思考 85

第5章 智能化电测技术 86

5.1 概述	86
5.2 数字量参数测量	87
5.2.1 电子计数器的原理结构	87
5.2.2 时间值测量	92
5.2.3 频率值测量	94
5.2.4 相位测量	95
5.2.5 智能计数器	95
5.3 模拟量参数测量	95
5.3.1 数字化测量的意义	95
5.3.2 ADC 的性能指标	96
5.3.3 ADC	97
5.3.4 模拟量的数字化测量	106

5.3.5 A-D 转换应用电路设计要点	108	7.3.4 峰值电压表	182
5.4 智能电测硬件技术	109	7.3.5 直流高电压的测量	184
5.4.1 智能芯片	110	7.4 大电流的测量	185
5.4.2 控制逻辑接口	113	7.4.1 电磁式电流互感器	185
5.4.3 前向通道	115	7.4.2 罗格夫斯基(Rogowski)线圈	191
5.4.4 显示器	115	7.4.3 光学电流传感器	193
5.4.5 总线接口	120	7.5 瞬间高速信号的产生和测量	194
5.4.6 通信接口	121	7.5.1 局部放电	194
5.5 智能电测软件技术	121	7.5.2 局部放电的参数	195
5.5.1 通用软件	121	7.5.3 冲击检流计	198
5.5.2 算法程序	122	7.5.4 瞬间高速信号的测量	200
5.5.3 功能程序	123	7.6 微弱信号的测量	201
5.5.4 平台软件	126	7.6.1 概述	201
5.5.5 工具软件	128	7.6.2 常规微弱信号检测方法	202
习题与思考	130	7.6.3 锁定放大器	206
第 6 章 磁学量测试技术	131	习题与思考	210
6.1 基本概念	131	第 8 章 网络化电测系统	212
6.1.1 概述	132	8.1 概述	212
6.1.2 术语、定义	132	8.1.1 网络化仪器和测量技术的 发展历程	212
6.1.3 测量对象和测量方法	139	8.1.2 网络化仪器和测量技术的 进步特征	213
6.2 空间磁场测量	146	8.1.3 网络化仪器和测量技术的 发展趋势	215
6.2.1 磁感应法	146	8.2 接口总线技术	215
6.2.2 霍尔效应法	146	8.3 网络通信技术	218
6.2.3 磁通门法	152	8.3.1 现场总线通信网络	218
6.2.4 其他磁测量法	156	8.3.2 工业以太网通信网络	224
6.3 磁性材料测量	157	8.3.3 EPA 标准	226
6.3.1 磁性材料测量的意义	157	8.3.4 煤矿安全监控系统实例	227
6.3.2 磁性材料特性及其测量特点	158	8.4 远程技术	229
6.3.3 退磁	158	8.4.1 远程数据传输技术和标准	229
6.3.4 磁性材料静态特性测量	160	8.4.2 远程电表自动集抄系统实例	236
6.3.5 磁性材料动态特性测量	163	8.4.3 智能电表简介	241
6.3.6 磁性材料特性测量电路的发展	165	习题与思考	242
习题与思考	166	第 9 章 电气测量系统的抗干扰技术	243
第 7 章 极限参数测试技术	167	9.1 概述	243
7.1 绝缘参数的测量	167	9.2 直接传导耦合	245
7.1.1 绝缘电阻和吸收比的测量	167	9.2.1 电导性耦合及其干扰抑制技术	245
7.1.2 介质损耗因数 $\tan\delta$ 的测量	171	9.2.2 电容性耦合及其干扰抑制技术	248
7.2 接地电阻的测量	173	9.2.3 电感性耦合及其干扰抑制技术	251
7.3 高电压的测量	175	9.3 公共阻抗耦合	253
7.3.1 测量球隙	175	9.3.1 公共地阻抗耦合及	
7.3.2 静电电压表	178		
7.3.3 高压交流分压器及充气 标准电容器	181		

其干扰抑制技术	254	10.1.2 安全用电标志	267
9.3.2 公共电源阻抗耦合及 其干扰抑制技术	255	10.1.3 电气故障诱发因素	267
9.4 串、共模干扰及其干扰抑制技术	255	10.2 安全测量要求	271
9.5 测量系统的接地与浮置	258	10.2.1 安全测量规范与管理	271
9.5.1 信号地子系统	258	10.2.2 安全测量标准	271
9.5.2 安全地子系统	260	10.3 电气测量安全技术	274
习题与思考	261	10.3.1 电气测量计划	274
第 10 章 电气测试安全技术	262	10.3.2 绝缘材料	276
10.1 安全测量知识	262	10.3.3 安全测量技术	277
10.1.1 电流对人体的作用及影响	262	习题与思考	282
		参考文献	283

第 1 章 电气测量的基本知识

自 1832 年高斯提出根据力的单位进行地磁测量以来, 电气测试技术就始终在创新, 不仅仅是测量的内容越来越多, 还包括测量原理与方法、测量数值与单位、测量标准与仪器等, 使得电气测试学科不断在发展。

电气测试技术是一门对电学/磁学类相关物理量, 依据电学和磁学测量原理, 采用相关测量工具和仪表开展测量工作的学科。随着智能电网技术“更加智慧”的发展, 关于电网系统、电气设施、电器产品和用电、节电、电能计量等新的技术、新的要求以及新的测试方法不断地涌现出来; 基于物联网的通信平台也带来了全新的信息通信技术, 在安全性、可靠性、实用性和实时性、准确性、低功耗的共同要求下, 电气测试技术也在不断地更新和丰富。

1.1 基本概念

电气测试技术涉及的电学类、磁学类相关物理量较多, 表 1-1 列举了部分电学量和磁学量, 这些参量在不同的应用领域体现出重要的作用。对这些参量采取什么样的测量方法, 首先需要了解这些参量的具体定义。

表 1-1 部分电工量及其单位、符号

物理量	符号	基本单位		常用换算单位	
		名称	符号	名称	符号
电流	I	安[培]	A	千安/毫安/微安	kA/mA/ μ A
电荷[量]	Q	库[仑]	C		
电场强度	E	伏每米	V/m		
电位, 电压, 电动势	U, E	伏[特]	V	千伏/毫伏/微伏	kV/mV/ μ V
电阻	R	欧[姆]	Ω	兆欧/千欧	M Ω /k Ω
电阻率	ρ	欧米	$\Omega \cdot \text{m}$	欧·毫米 ² /米	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
电阻温度系数	α		$^{\circ}\text{C}^{-1}$		
电感	L	亨[利]	H	毫亨/微亨	mH/ μ H
电容	C	法[拉]	F	微法/皮法	μ F/pF
感抗	X_L	欧[姆]	Ω	兆欧/千欧	M Ω /k Ω
容抗	X_C	欧[姆]	Ω	兆欧/千欧	M Ω /k Ω
电抗	X	欧[姆]	Ω	兆欧/千欧	M Ω /k Ω
阻抗	Z	欧[姆]	Ω	兆欧/千欧	M Ω /k Ω
频率	f	赫[兹]	Hz	兆赫/千赫	MHz/kHz
周期	T	秒	S	毫秒/微秒	ms/ μ s

(续)

物理量	符号	基本单位		常用换算单位	
		名称	符号	名称	符号
电能	W	焦[耳]	J	千瓦·小时	$kW \cdot h$
有功功率	P	瓦[特]	W	千瓦	kW
无功功率	Q	乏	var	千乏	kvar
视在功率	S	伏安	VA	千伏安	$kV \cdot A$
功率因数	$\cos\varphi$				
磁场强度	H	安每米	A/m	奥斯特	Oe
磁通量	Φ	韦[伯]	Wb	麦克斯韦	Mx
磁通密度、磁感应强度	B	特[斯拉]	T	高斯	Gs, G
磁导率	μ	亨[利]每米	H/m		

电荷(量): 物体的带电质子称为电荷, 用于度量电荷多少的物理量称为电荷量。

电流: 单位时间内通过导体截面积的电荷称为电流。

电场强度: 描述电场性质的基本物理量, 是个矢量, 简称场强。规定其方向与正(负)电荷在该点受的电场力方向相同(反), 电场的基本特征是能使其中的电荷受到电场力。

电位(电势): 在电场中, 某点电荷的电势能与它所带的电荷量之比, 称为这点的电势。

电压: 电场强度沿一规定路径从一点到另一点的线积分。在无旋场条件下, 电压与路径无关, 等于两点之间的电位差。

电动势: 电路中因其他形态的能转换为电能所引起的电位差, 其数值等于单位正电荷在回路中绕行一周时电力所作的功。

电阻: 在物理学中用来表示导体对电流阻碍作用的大小, 表示某一种导体传输电流能力的强弱程度。导体的电阻越大, 表示导体对电流的阻碍作用越大。不同的导体, 电阻一般不同, 电阻是导体本身的一种特性。

电阻率: 衡量物质导电性能好坏的一个物理量。电阻率越大, 导电性能越低。

电阻温度系数: 表示物质的电阻率随温度而变化的物理量, 其数值等于温度每升高 1°C 时, 电阻率的增加量与原来的电阻率的比值。

电感: 自感 L 与互感 M 的统称, 一般情况下, 多指自感。当闭合回路中的电流发生变化时, 则由此电流所产生的穿过回路本身的磁通也发生变化, 这现象称为自感现象。如果有两只线圈互相贴近, 则其中第一只线圈中电流所产生的磁通有一部分与第二只线圈相环链, 当第一只线圈中的电流发生变化时, 与第二只线圈环链的磁通也发生变化, 在第二只线圈中产生感应电动势, 这种现象称为互感现象。

感抗: 交流电流过电感电路时, 电感有阻碍交流电流过的作用, 该作用称为感抗。

电容: 在相互绝缘的两个极板(导体)上, 加上一定的电压, 就具有储存电荷的性质, 所储存的电荷与电压之比称为电容。

容抗: 交流电流过电容电路时, 电容有阻碍交流电流过的作用, 该作用称为容抗。

电抗：感抗和容抗统称为电抗，在正弦电流电路中，为复数阻抗的虚部。

阻抗：交流电流通过具有电阻、电感、电容的电路时，它们有阻碍交流电流通过的作用，该作用称为阻抗。

频率：交流电每秒钟变化的次数。

周期：交流电每变化一周所需要的时间。

功率：单位时间内所作的功称为功率。

有功功率：功率在一周期内的平均值称为有功功率，是电路中电阻部分所消耗的功率。

无功功率：为建立交变磁场和感应磁通而需要的电功率称为无功功率。“无功”不是“无用”的电功率，在供用电系统中，与有功电源一样，是不可缺少的。

视在功率：在具有电阻和电抗的电路内，电压与电流的乘积称为视在功率。

功率因数：有功功率与视在功率之比称为功率因数。

磁场强度：磁场中各点磁力大小和方向的量，等于磁感应强度与磁介质磁导率之比。

磁通（量）：磁感应强度与垂直于磁场方向的面积的乘积称为磁通（量）。

磁感应强度：在物理学中磁场的强弱使用磁感强度（也称磁感应强度）来表示，磁感强度大表示磁感强，磁感强度小表示磁感弱。它是描述磁场强弱和方向的基本物理量。

磁导率：又称导磁系数，是衡量物质的导磁性能的一个系数，即磁介质中磁感应强度与磁场强度之比。

还有较多的电学和磁学的术语定义，如相位、电流密度、电纳、导纳、电磁感应、磁滞回线、磁化曲线等。

1.2 电气测量方法

各种电学量或磁学量的测量，统称为电气测量，也称电工测量，即将被测的电学量或磁学量，与作为测量单位的同类标准电学量或磁学量进行比较，从而确定这个被测量的大小的过程。根据测量数据的获取，电气测量的方法可以分为直接测量、间接测量和组合测量。

1) 直接测量：在电气测量过程中，能够直接将测量与同类标准量进行比较，或能够直接用事先刻度好的测量仪器对被测量进行测量，从而直接获得被测量的数值的测量方式称为直接测量。例如，用电压表测量电压、用电能表测量电能以及用直流电桥测量电阻等都是直接测量。直接测量方式广泛应用于工程测量中。

2) 间接测量：当被测量由于某种原因不能直接测量时，可以通过直接测量与被测量有一定函数关系的物理量，然后按函数关系计算出被测量的数值，这种间接获得测量结果的方式称为间接测量。例如，用伏安法测量电阻，是利用电压表和电流表分别测量出电阻两端的电压和通过该电阻的电流，然后根据欧姆定律计算出被测电阻的大小。间接测量方式广泛应用于科研、实验室及工程测量中。

3) 组合测量：如果被测量有多个，虽然被测量（未知量）与某种中间量存在一定函数关系，但由于函数式有多个未知量，对中间量的一次测量是不可能求得被测量的值的。这时可以通过改变测量条件来获得某些可测量的不同组合，然后测出这些组合的数值，解联立方程求出未知的被测量。如图 1-1 所示，通过一个电流表、一个电压表和一个电位器 R_L 求取 R_x 和 U_s ，通过建立方程组求得 R_x 和 U_s 。

根据测量过程的实现手段，电气测量有直读法、比较法、零位法、替代法等。

1) 直读法：用直接指示被测量大小的指示仪表进行测量，直接从仪表刻度盘上读取被测量数值的测量方法称为直读法。采用直读法测量时，度量器不直接参与测量过程，而是间接地参与测量过程。例如，用欧姆表测量电阻时，从指针在刻度尺上指示的刻度可以直接读出被测电阻的数值。这一读数被认为是可信的，因为欧姆表刻度尺的刻度事先用标准电阻进行了校验，标准电阻已将它的量值和单位传递给欧姆表，间接地参与了测量过程。直读法测量的过程简单，操作容易，读数迅速，但其测量的准确度不高。

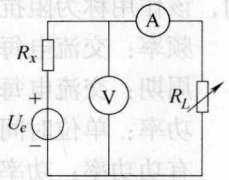


图 1-1 组合测量法

2) 比较法：将被测量与度量器在比较仪器中直接比较，从而获得被测量数值的方法称为比较法。例如，用天平测量物体质量时，作为质量度量器的砝码始终都直接参与了测量过程。在电工测量中，比较法具有很高的测量准确度，可以达到 $\pm 0.001\%$ ，但测量时操作比较麻烦，相应的测量设备也比较昂贵。

3) 零值法：又称平衡法。利用被测量对仪器的作用，与标准量对仪器的作用相互抵消，由指零仪表做出判断的方法称为零值法。即当指零仪表指示为零时，表示两者的作用相等，仪器达到平衡状态，此时按一定的关系可计算出被测量的数值。显然，零值法测量的准确度主要取决于度量器的准确度和指零仪表的灵敏度。

4) 替代法：分别把被测量和标准量接入同一测量仪器，在标准量替代被测量时，调节标准量，使仪器的工作状态在替代前后保持一致，然后根据标准量来确定被测量的数值。用替代法测量时，由于替代前后仪器的工作状态是一样的，因此仪器本身性能和外界因素对替代前后的影响几乎是相同的，有效地克服了所有外界因素对测量结果的影响。替代法测量的准确度主要取决于度量器的准确度和仪器的灵敏度。

1.3 电气测量仪表及其选择

电气测量仪表，常见的就有绝缘电阻表、万用表、电流表、示波器、互感器、指示仪表、记录仪表、数字仪表等等。电气测量仪表的形式和种类多种多样，根据不同的方式可以有多种不同的划分方法。

1) 按照测量仪表的工作原理分，有电磁式、磁电式、电动式、电子式、数字式、智能式、软件式和网络式等。

2) 按测量仪表的功能来分，有电流表、电压表、功率表、电阻表、电能表、功率因数表、频率表、万用表、磁强计等。

3) 根据测量仪表的使用来分，有装置式（如交流稳压电源）、台式（如示波器、信号发生器、虚拟仪器等）和可携带式（如电笔、万用表、示波表）等。

4) 根据测量仪表的工作电流分，有直流仪表、交流仪表、交直流两用仪表等。

5) 按照测量数据显示方式分，有指针指示型、光柱指示型、数字显示型和屏幕显示型。

6) 按准确度可分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 共 7 个等级。

还有一种分类，电学量测量基本上属于接触式测量，磁学量测量属于非接触式测量。如

电弧光、雷电以及因电磁因素导致的热效应等，还能通过（特种）图像传感器测量，图像测量属于二维非接触测量。

在实际电气测量时，如何选择电气测量仪表、如何使用电气测量仪表、如何测量电学量和磁学量、如何获取测量数据以及如何处理测量数据，都涉及许多相关知识。表 1-2 列出的是常用电气测量仪表的符号及其意义。因此在进行电气测量时，要注意以下 6 个明确。

表 1-2 常用电气测量仪表的符号及其意义

分类	符号	名称	被测量的种类
电流种类	—	直流电表	直流电流、电压
	~	交流电表	交流电流、电压、功率
	⎓	交直流两用表	直流电量或交流电量
	≅ 或 3~	三相交流电表	三相交流电流、电压、功率
测量对象	(A) (mA) (μA)	安培表、毫安表、微安表	电流
	(V) (kV)	伏特表、千伏表	电压
	(W) (kW)	瓦特表、千瓦表	功率
	$\boxed{\text{kW} \cdot \text{h}}$	千瓦时表	电能量
	(φ)	相位表	相位差
	(f)	频率表	频率
	(Ω) (MΩ)	欧姆表、兆欧表	电阻、绝缘电阻

1) 明确测量对象。了解是电学量还是磁学量。特别是电学量，不同的参数有不同的测量方法，相同的参数也可能有不同的测量仪表。例如，直流电流，从纳安 (nA)、微安 (μA)、毫安 (mA) 到安培 (A)、千安 (kA)、兆安 (MA) 乃至更大；还有电流量限、电流接入方法、电流测量方法等，都需要清清楚楚。

2) 明确精度要求。一旦测量展开，由于测量精度不符合测量要求，势必要从头再来，不仅造成极大的浪费，有些测量甚至是无法重复的。还有一些测量，仅仅定性测量，可以忽略精度要求，如检查一下市电 AC220V 是否正常，用最简单的电压测量工具都能胜任。

3) 明确测量环境。测量环境包括两个方面：一个是环境干扰因素，由于电学和磁学的特殊关系，任何影响电磁测量的因素，或由电影响磁，或由磁影响电，都是干扰源，而环境电磁因素还会成为与电场或磁场成相关函数的电磁感应，直接影响到测量仪表；另一个是现场测量仪表的安装、运行和操作。









4) 明确测量数据表达方式。测量的结果表达主要是显示方式，指针指示、数字显示、屏幕波形描述、虚拟仪器编程还是直接在智能仪表中保存，不同的表达方式也意味着测量仪器的成本规模、操作模式、性能价格比等。

5) 明确测量标准。标准的体现有多种方式：一是测量值是否在正常范围，如市网电压不一定精确到 AC220V，可以有一个范围；二是误差处理要求，计算绝对误差、相对误差，甄别出是否有粗大误差；三是测量值的有效值位数等。

6) 明确测量安全性。这是在整个测量过程中最重要，也是必须先解决的问题。它涉及

测量内容是否清晰、测量方案是否科学、测量仪表是否合适、接线方式是否正确、测量步骤是否明确、安全保障是否到位等一系列安全问题，都不能掉以轻心，如表 1-3 中列出的“绝缘等级”。

表 1-3 常用电气测量仪表的功能及其操作意义

分类	符号	名称	被测量的种类
工作原理		磁电系仪表	电流、电压、电阻
		电磁系仪表	电流、电压
		电动系仪表	电流、电压、电功率、功率因素、电能量
		整流式仪表	电流、电压
		感应式仪表	电功率、电能量
准确度等级	1.0	1.0 级电表	以标尺量限的百分数表示
	①.5	1.5 级电表	以指示值的百分数表示
绝缘等级	 2kV	绝缘强度试验电压	表示仪表绝缘经过 2kV 耐压试验
工作位置		仪表水平放置	
		仪表垂直放置	
	$\angle 60^\circ$	仪表倾斜 60° 放置	
端钮	+	正端钮	
	-	负端钮	
	\pm 或 \times	公共端钮	
	\perp 或 $\frac{1}{2}$	接地端钮	

具体对应到某一款选择的电气测量仪表，也有以下 6 点注意事项。

- 1) 准确度高、误差小，其数值应符合所属准确度的要求。
- 2) 误差不应随时间、温度、湿度、外磁场等外界环境条件的影响而变化。
- 3) 仪表本身消耗功率应越小越好，否则在测量小的功率时，会引起较大的误差。
- 4) 仪表应有足够高的绝缘强度和耐压能力，有承受短时间过载的能力，以保证使用安全。
- 5) 应有良好的读数装置，被测量的数值应能直接读出。
- 6) 构造坚固，使用维护方便。

1.4 测量数据的表示和单位

测量的过程包括 3 个含义：①测的过程，也是辨识对象的过程；②量的过程，给对象确定一个量值，即能够描述对象的数值；③对象的特性表示，测量的结果就是给予对象的一个明确的数值和包含对象特征的单位。例如，1A，表明对象是电流，数值的大小是 1，单位是

安培 (A)。

在一种单位制中,基本量的主单位称为基本单位,它是构成单位制中其他单位的基础。1974年,第十四届国际计量大会后确定了7个国际单位制(SI)的基本单位和2个辅助单位,包括米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)、摩尔(mol)、坎德拉(cd)以及平面角的弧度(rad)、立体角的球面度(sr)。

在选定了基本单位之后,由基本单位以相乘、相除的形式构成的单位称为导出单位。例如,面积单位“平方米”就是基本单位米的二次方构成的,速度单位“米/秒”就是由基本单位米除以基本单位秒构成的。

安培是电流的国际基本单位,是为了纪念法国物理学家安德烈·玛丽·安培(André-Marie Ampère, 1775—1836)而命名的。对安培的定义,在1948年第九届国际计量大会上得到批准,在1960年第十一届国际计量大会上,被正式采用为国际单位制的基本单位之一。

安培简称安,符号为A,定义为:在真空中相距为1m的两根无限长平行直导线,通以相等的恒定电流,当每米导线上所受作用力为 $2e^{-7}N(2 \times 10^{-7}N)$ 时,各导线上的电流为1安培。导出单位可以是基本单位的数值换算,也可以是其他参量的单位,比如安培小的电流可以用毫安、微安等单位表示,即1安培=1000毫安(mA)、1毫安=1000微安(μA);在电池上常见的单位为mA·h(毫安·时),如500mA·h代表这颗电池能够提供 $500mA \times 1h = 1800C$ (库仑,简称“库”)的电子,即耗电量为500mA的电器使用1h的电量。表1-4中列出的都是导出单位。表1-5中列出的是数值换算后,在单位前冠以的前缀词(权值符号)。

表1-4 具有专门名称的SI导出单位

量的名称	SI 导出单位		
	名称	符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
频率	赫[兹]	Hz	$1\text{Hz} = 1\text{s}^{-1}$
力/重力	牛[顿]	N	$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
压力;压强;应力	帕[斯卡]	Pa	$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$
能(量);功;热量	焦[耳]	J	$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$
功率;辐射通量	瓦[特]	W	$1\text{W} = 1\text{J}/\text{s}$
电荷(量)	库[仑]	C	$1\text{C} = 1\text{A} \cdot \text{s}$
电压;电动势;电势	伏[特]	V	$1\text{V} = 1\text{W}/\text{A}$
电容	法[拉]	F	$1\text{F} = 1\text{C}/\text{V}$
电阻	欧[姆]	Ω	$1\Omega = 1\text{V}/\text{A}$
电导	西[门子]	S	$1\text{S} = 1\Omega^{-1}$
磁通(量)	韦[伯]	Wb	$1\text{Wb} = 1\text{V} \cdot \text{s}$
磁通密度;磁感应强度	特[斯拉]	T	$1\text{T} = 1\text{Wb}/\text{m}^2$
电感	亨[利]	H	$1\text{H} = 1\text{Wb}/\text{A}$
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$	$1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$
光通量	流[明]	lm	$1\text{lm} = 1\text{cd} \cdot \text{sr}$
(光)照度	勒[克斯]	lx	$1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2$

表 1-5 数值换算的单位前缀表

词头	符号	英文	10 的指数值	十进制数	确认年代
yotta	Y	Septillion	24	1000 000 000 000 000 000 000 000	1991
zetta	Z	Sextillion	21	1000 000 000 000 000 000 000	1991
exa	E	Quintillion	18	1000 000 000 000 000 000	1975
peta	P	Quadrillion	15	1000 000 000 000 000	1975
tera	T	Trillion	12	1000 000 000 000	1960
giga	G	Billion	9	1000 000 000	1947
mega	M	Million	6	1000 000	1960
kilo	k	Thousand	3	1000	1795
		One	0	1	
milli	m	Thousandth	-3	0.001	1795
micro	μ	Millionth	-6	0.000 001	1795
nano	n	Billionth	-9	0.000 000 001	1960
pico	p	Trillionth	-12	0.000 000 000 001	1960
femto	f	Quadrillionth	-15	0.000 000 000 000 001	1964
atto	a	Quintillionth	-18	0.000 000 000 000 000 001	1964
zepto	z	Sextillionth	-21	0.000 000 000 000 000 000 001	1991
yocto	y	Septillionth	-24	0.000 000 000 000 000 000 000 001	1991

导出单位数量很多，一般可以分为 3 类：用国际基本单位表示的一部分 SI 导出单位、具有专门名称的 SI 导出单位和用 SI 辅助单位表示的一部分 SI 导出单位。其中，具有专门名称的 SI 导出单位总共有 19 个，几乎是以杰出科学家的名字命名的，以纪念他们在本学科领域里作出的贡献。表 1-4 列出的是与电磁学有关的具有专门名称的 SI 导出单位。

测量的结果，除了明确大小的数值外，单位的表示有严格的要求，不能随意书写。而在读的过程中，也必须遵守其规定。例如，长度的 2 次方和 3 次方是指面积和体积，相对应的名称是“平方”和“立方”，置于长度单位的名称之前，为“平方米”、“立方米”，但不能称为“米平方”、“米立方”。

1.5 电气基准及其标准器具

1.3 节已经提及“测量标准”，该标准如同标准秤的砝码，或者是标准量杯，测量的标准是能够被复制或传递的。复制“标准”的手段和工具（器具）有类似砝码的基准量具（器）、类似标准量杯的标准量具和工作量具。工作量具可以认为是比实际测量仪表的精度更高一级的标准表，或者是偏差可以忽略的标准仪表或器具。

“标准”的复制技术随着微观世界或量子工程领域的新发现，可以被真实的物理现象所表现。由于“物理现象”不是实物性质，不能作为标准器具和工作器具，因此只能作为基准。这种基准一般是通过可以复现的、严谨的物理实验而获得的。

因此测量工具若作为标准器具,可分为基准器具、标准器具和工作器具,3种器具也反映了精度的等级差别,最高的就是基准。由物理现象所表现的基准称为自然基准,由具体实物实现的基准称为实物基准,也可以作为基准器(具)。

在电学基准中,可以用精度较高的元器件作为工作器具,标准电池、标准电阻(电容、电感)作为标准器具,而作为电学基准的,依照1990年执行的新的国际标准规定,采用自然基准。

1.5.1 电学基准

电学基准具有最高计量特性的电学标准。在国际单位制(SI)的7个基本单位中,电流单位“安培”是电学量的基本单位,因此直流电流基准是最重要的电学基准。原则上,其他电学基准、标准的量值均可由直流电流基准和基本单位(米、千克、秒)导出。

直流电流基准本身的量值需由绝对测定的实验来确定,如“电压除以电阻”。1990年新的国际电学标准规定,采用约瑟夫森自然效应和冯·克利青自然效应复现“电压”和“电阻”。

1. 约瑟夫森效应和电压自然基准

布赖恩·戴维·约瑟夫森(Brian David Josephson, 1940—)是英国的物理学家,因预言约瑟夫森效应,在固态电子学领域的理论上取得重大进步,而获得了1973年诺贝尔物理学奖。

1962年约瑟夫森还是研究生时,他想计算在两种超导材料所组成的结处,电流通过时会出现什么情况。结果,他发现两种材料没有任何电压降时,隧道结仍有电流流过。他还提议,这种现象会受到磁场的影响。不久,他的预言在直流电情况下,得到安德森(P. C. Anderson)和罗威尔(J. M. Rowell)所证实,而在交流电情况为夏皮罗(S. Shapiro)所证实。由于他理论预言,人们用两种超导材料,中间用一绝缘材料隔开,而做成著名的约瑟夫森结。这种结在许多固体器件中有广泛的应用,如约瑟夫森结是测磁场高灵敏器件的关键元件。

两块超导体通过一绝缘薄层(厚度为 10\AA (10^{-9}m 左右)连接起来,绝缘层对电子来说是一势垒,一块超导体中的电子可穿过势垒进入另一超导体中,这是特有的量子力学的隧道效应。当绝缘层太厚时隧道效应不明显,太薄时两块超导体实际上连成一块,这两种情形都不会发生约瑟夫森效应。绝缘层不太厚也不太薄时称为弱连接超导体。

两块超导体夹一层薄绝缘材料的组合称为S-I-S超导隧道结或约瑟夫森结,主要表现为:

(1) 直流约瑟夫森效应 结两端的电压 $U=0$ 时,结中可存在超导电流,它是由超导体中的库珀对的隧道效应引起的。只要该超导电流小于某一临界电流 I_c ,就始终保持此零电压现象, I_c 称为约瑟夫森临界电流。 I_c 对外磁场十分敏感,甚至地磁场可明显地影响 I_c 。

(2) 交流约瑟夫森效应 结两端的直流电压 $V\neq 0$ 时,通过结的电流是一个交变的振荡超导电流,振荡频率(称为约瑟夫森频率) f 与电压 V 成正比,即

$$V = \frac{h}{2e} f \quad (1-1)$$

式中, e 为电子电荷; h 为普朗克常数。这使超导隧道结具有辐射或吸收电磁波的能力,以微波辐照隧道结时可产生共振现象,连续改变所加的直流电压以改变交流振荡频率。