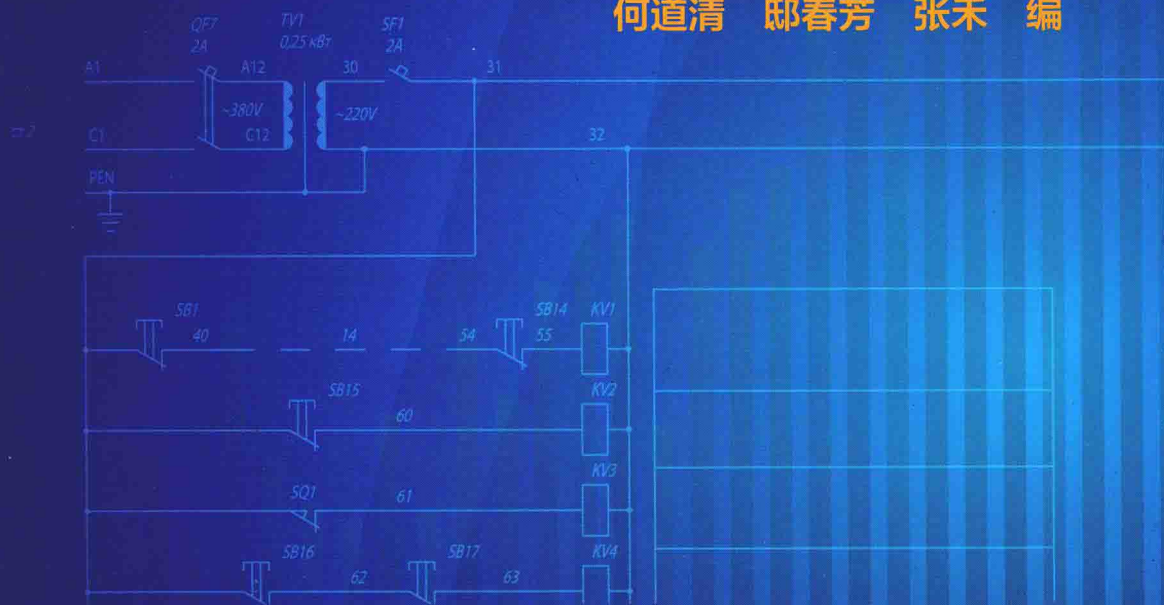


“十二五”普通高等教育本科规划教材

# 电气测量技术

DIANQI CELIANG JISHU

何道清 邱春芳 张禾 编



化学工业出版社

“十二五”普通高等教育本科规划教材

# 电气测量技术

何道清 邸春芳 张 禾 编



化学工业出版社

·北京·

本书根据现代电气/电子测量领域仪器仪表的工程应用实际和发展趋势,较系统地介绍经典电气测量的基本原理、基本方法以及常用电气测量仪器仪表的结构、原理和使用、检定方法及其对主要电气参量及电磁参数的测量技术,并适当增加现代电子仪器和数字仪表的电气测量技术和方法。每章末附有相当数量的思考题与习题供教学使用,以便加深理解、巩固知识。

本书主要作为高等院校仪器仪表、电气工程及其自动化、机电工程等专业电工/电气测量或相关课程的教材,也可作为其他相近专业高年级本科生或硕士研究生的学习参考用书,同时可供从事电气测量的工程技术人员参考。

本书免费提供内容丰富的教学电子课件和习题解题参考,如有需要或教学交流,请与编者(hedaoqing@swpu.edu.cn)或出版社(www.cipedu.com.cn)联系。

图书在版编目(CIP)数据



电气测量技术/何道清, 邱春芳, 张永亮. — 北京: 化学工业出版社, 2015.9

“十二五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-122-24846-6

I. ①电… II. ①何…②邱…③张… 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 (2015) 第 179853 号

责任编辑: 金杰 杨菁

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 吴静

装帧设计: 刘剑宁

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张20 字数491千字 2015年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 42.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

电气测量不仅可以直接测量和控制科学研究与实际生产过程中的各种电磁参量，而且几乎所有的“非电量”都可以通过传感器转换成电量进行测量，即非电量电测技术。近年来，随着科学技术的进步和发展，电气测量领域不断出现新的测量原理、方法，测量手段也在不断更新并日臻完善。因此，电气测量技术在各种测量技术中占有极其重要的地位，应用非常广泛。可以说电气测量技术是仪器仪表及电气工程类专业技术人员必须掌握的一门基本技术。

本书根据现代电气/电子测量领域仪器仪表的工程应用实际和发展趋势，较系统地介绍经典电气测量的基本原理、基本方法以及常用电气测量仪器仪表的结构、原理和使用、检定方法及其对主要电气参量及电磁参数的测量技术，并适当增加现代电子仪器、电子测量技术和数字仪表、数字测量技术，旨在扩大电气测量的知识面。全书共分为6篇19章：第1篇分为2章，介绍电气测量的基本概念和电学计量器具；第2篇分为7章，介绍常用电气测量指示仪表的结构、原理、特性、检定方法以及用它们进行电参量的直读测量方法；第3篇分为4章，介绍常用比较仪器的结构、原理及比较测量法；第4篇分为4章，介绍磁测量的基本知识及测量磁场和磁性材料磁特性的基本原理和方法；第5篇1章，介绍主要电子仪器的结构、原理及电子测量技术；第6篇1章，介绍数字仪表的原理、结构及数字测量技术。本书主要作为高等院校仪器仪表、电气工程及其自动化、机电工程等类专业电工/电气测量或相关课程的教材，也可作为其他相近专业高年级本科生或硕士研究生的学习参考用书，同时可供从事电气测量的工程技术人员参考。

本书在编写过程中，力求做到取材广泛、知识结构体系科学合理，教材的通用性好（带\*的章节，可根据不同专业、不同层次或学时作为选讲或自学内容，不影响电气测量技术的基本知识体系）；基本概念清楚、内容深入浅出、文字通俗易懂、便于学习；单位、符号和图表编写规范；注重理论与工程实际相结合，并尽可能反映电气测量仪表与电气测量技术的发展水平；每章末附有相当数量的思考题与习题供教学使用，以便加深理解、巩固知识。编写时编者参考了国内外有关电气测量、电子测量、数字化测量技术及仪表类书籍和资料，谨向其作者表示感谢。

本书免费提供内容丰富的教学电子课件和习题解题参考，如有需要或教学交流，请与编者（hedaoqing@swpu.edu.cn）或出版社（www.cipedu.com.cn）联系。

鉴于编者水平有限，恳请读者对书中不妥之处给予批评指正。

编 者

2015年7月

# 目 录

第 1 篇 电气测量概论 .....	1
第 1 章 电气测量的基本知识 .....	1
1.1 电气测量概述 .....	1
1.1.1 测量的概念 .....	1
1.1.2 电气测量的发展和地位 .....	2
1.1.3 电气测量的任务 .....	3
1.2 电气测量的方法和分类 .....	4
1.2.1 根据获得测量结果的过程分类 .....	4
1.2.2 根据所用器具分类 .....	5
1.3 电气测量仪器仪表的分类 .....	6
1.4 测量误差及其消除方法 .....	7
1.4.1 测量误差的分类和来源 .....	7
1.4.2 测量误差的消除方法 .....	8
1.4.3 仪表误差 .....	10
思考题与习题 .....	14
第 2 章 电学度量器 .....	15
2.1 度量器 .....	15
2.2 标准电池 .....	16
2.2.1 饱和标准电池 .....	16
2.2.2 不饱和标准电池 .....	17
2.2.3 标准电池的主要技术特性 .....	17
2.2.4 标准电池的使用和维护 .....	17
2.3 标准电阻 .....	18
2.3.1 固定标准电阻 .....	18
2.3.2 电位端钮和电流端钮 .....	20
2.3.3 可变直流电阻箱 .....	20
2.3.4 交流标准电阻 .....	21
2.3.5 标准电阻的使用和维护 .....	21
2.4 标准电感 .....	21
2.4.1 对标准电感的技术要求 .....	22
2.4.2 标准电感器的主要技术性能 .....	22
2.4.3 实际线圈的等效电路 .....	22
2.4.4 标准电感的使用和维护 .....	23

2.5	标准电容 .....	24
2.5.1	对标准电容器的技术要求 .....	24
2.5.2	实际电容器的等效电路 .....	24
2.5.3	标准电容器的屏蔽 .....	25
2.5.4	标准电容器的主要技术性能 .....	25
2.5.5	标准电容器的使用及维护 .....	26
	<b>思考题与习题 .....</b>	<b>26</b>
<b>第2篇</b>	<b>电气测量指示仪表及直读测量 .....</b>	<b>27</b>
<b>第3章</b>	<b>电气测量指示仪表的一般知识 .....</b>	<b>27</b>
3.1	电气测量指示仪表的分类 .....	27
3.2	电气测量指示仪表的组成 .....	27
3.2.1	仪表的组成 .....	27
3.2.2	仪表测量机构的组成原理 .....	28
3.3	电气测量指示仪表的主要技术特性 .....	30
	<b>思考题与习题 .....</b>	<b>34</b>
<b>第4章</b>	<b>磁电系仪表 .....</b>	<b>35</b>
4.1	磁电系测量机构 .....	35
4.1.1	磁电系测量机构的结构 .....	35
4.1.2	磁电系测量机构的工作原理 .....	36
4.2	磁电系电流表 .....	37
4.2.1	单量限电流表 .....	38
4.2.2	分流器 .....	38
4.2.3	多量限电流表 .....	40
4.3	磁电系电压表 .....	42
4.4	磁电系欧姆表 .....	45
4.4.1	欧姆表的基本原理 .....	45
4.4.2	欧姆表的倍率 .....	45
4.4.3	欧姆表的调零 .....	46
4.5	带整流器的磁电系仪表 .....	47
4.5.1	半波整流式仪表 .....	48
4.5.2	全波整流式仪表 .....	48
4.5.3	整流系电流表和电压表 .....	49
4.6	万用表 .....	50
4.6.1	万用表的结构 .....	50
4.6.2	万用表原理电路 .....	51
4.6.3	万用表的正确使用和维护 .....	55
4.7	兆欧表 .....	56
4.7.1	兆欧表的结构 .....	56
4.7.2	兆欧表的工作原理 .....	57

4.7.3 兆欧表的使用 .....	58
4.8 磁电系检流计和冲击检流计 .....	60
4.8.1 检流计的结构特点 .....	60
4.8.2 检流计的特性及参数 .....	61
4.8.3 检流计的正确使用和维护 .....	63
4.8.4 冲击检流计 .....	63
* 4.9 晶体管放大式检流计 .....	64
4.10 磁电系仪表的技术特性 .....	65
<b>思考题与习题</b> .....	66
<b>第5章 电磁系仪表</b> .....	68
5.1 电磁系测量机构 .....	68
5.1.1 电磁系测量机构的结构 .....	68
5.1.2 电磁系测量机构的工作原理 .....	69
5.2 电磁系电流表 .....	70
5.3 电磁系电压表 .....	71
5.4 电磁系仪表的技术特性 .....	72
<b>思考题与习题</b> .....	74
<b>第6章 电动系仪表</b> .....	75
6.1 电动系测量机构 .....	75
6.1.1 电动系测量机构的结构 .....	75
6.1.2 电动系测量机构的工作原理 .....	75
6.2 电动系电流表 .....	77
6.3 电动系电压表 .....	78
6.4 电动系仪表的技术特性 .....	79
6.5 铁磁电动系仪表 .....	80
6.6 电动系功率表及其使用 .....	81
6.6.1 功率表的结构和工作原理 .....	81
6.6.2 功率表的读数 .....	82
6.6.3 功率表的正确使用 .....	82
6.7 低功率因数功率表 .....	85
6.8 电动系相位表 .....	86
6.8.1 电动系相位表的结构及工作原理 .....	86
6.8.2 电动系相位表的使用 .....	88
6.9 电动系频率表 .....	88
6.9.1 电动系频率表的结构及工作原理 .....	88
6.9.2 电动系频率表的使用 .....	90
<b>思考题与习题</b> .....	90
<b>第7章 感应系仪表</b> .....	92
7.1 感应系测量机构 .....	92

7.1.1	感应系测量机构的结构	92
7.1.2	感应系测量机构的工作原理	92
7.2	感应系电度表	95
7.2.1	单相电度表的结构与原理	95
7.2.2	电度表的主要技术特性及使用	97
<b>思考题与习题</b>		99
<b>第8章</b>	<b>电气测量指示仪表的选择与检定</b>	100
8.1	常用电气测量指示仪表的性能比较	100
8.2	电气测量指示仪表的选择	101
8.3	电气测量指示仪表的检定	103
8.3.1	检定项目及技术要求	103
8.3.2	仪表准确度的检定方法	106
8.4	直接比较法检定电流表、电压表、功率表	107
8.4.1	检定前的准备工作	107
8.4.2	检定线路	107
8.4.3	检定步骤	110
8.4.4	测量数据的计算、化整与仪表准确度的确定	110
* 8.5	热电比较法检定电流表、电压表、功率表	112
8.5.1	热电变换器的结构及工作原理	112
8.5.2	热电比较法检定电压表、电流表、功率表	113
<b>思考题与习题</b>		115
<b>第9章</b>	<b>电量和电路参数的直读测量</b>	116
9.1	电流、电压的直读测量	116
9.1.1	测量电流、电压应注重的问题	116
9.1.2	电流、电压直读测量的方法误差	116
9.1.3	电流和电压的其他测量方法	119
9.2	直流电路参数的直读测量	119
9.2.1	用欧姆表、兆欧表测直流电阻	119
9.2.2	伏安法测量直流电阻	120
9.2.3	替代法和半偏法测直流电阻	121
9.2.4	用冲击检流计测绝缘电阻	122
9.3	交流电路参数的直读测量	123
9.3.1	用三表法测阻抗	123
9.3.2	用伏安法测量交流电阻、电感和电容	125
9.3.3	电感的测量	126
9.3.4	电容的测量	128
9.4	功率的直读测量	130
9.4.1	三相电路有功功率的测量	131
9.4.2	对称三相电路无功功率的测量	135



9.5	测量用互感器 .....	138
9.5.1	概述 .....	138
9.5.2	测量用互感器的结构和工作原理 .....	139
9.5.3	测量用互感器的误差和准确度等级 .....	141
9.5.4	互感器的正确使用 .....	143
	<b>思考题与习题</b> .....	146
<b>第3篇</b>	<b>比较仪器及比较测量法</b> .....	149
<b>第10章</b>	<b>直流电位差计</b> .....	150
10.1	直流电位差计的工作原理 .....	150
10.1.1	电位补偿原理 .....	150
10.1.2	直流电位差计的原理电路 .....	150
10.2	直流电位差计的线路结构 .....	152
10.2.1	直流电位差计的温度补偿线路结构 .....	152
10.2.2	直流电位差计的测量线路 .....	152
10.3	UJ-9型直流电位差计的简化线路 .....	154
10.4	直流电位差计的分类和主要技术特性 .....	155
10.5	直流电位差计的使用与维护 .....	156
10.5.1	直流电位差计的使用 .....	156
10.5.2	直流电位差计的维护 .....	157
10.6	直流电位差计的应用及其检定 .....	158
10.6.1	直流电位差计的应用 .....	158
10.6.2	直流电位差计的检定 .....	159
	<b>思考题与习题</b> .....	161
<b>第11章</b>	<b>交流电位差计</b> .....	162
11.1	交流电位差计的特点 .....	162
11.2	极坐标式电位差计线路 .....	162
11.3	直角坐标式电位差计线路 .....	163
11.3.1	互感移相型 .....	163
11.3.2	阻容移相型 .....	164
11.4	交流电位差计的技术特性和应用 .....	164
	<b>思考题与习题</b> .....	165
<b>第12章</b>	<b>直流电桥</b> .....	166
12.1	直流单电桥 .....	166
12.1.1	直流单电桥的平衡条件及其性质 .....	166
12.1.2	直流电桥的用途及特点 .....	168
12.1.3	实际的单电桥线路 .....	168
12.2	直流双电桥 .....	169
12.2.1	双电桥的原理 .....	169
12.2.2	双电桥测大电阻存在问题 .....	171

12.2.3 实际的双电桥线路 .....	171
* 12.2.4 关于电阻 $r$ .....	171
* 12.3 三次平衡双电桥 .....	172
12.3.1 对接触电阻和引线电阻的处理 .....	172
12.3.2 三次平衡双电桥的原理 .....	173
* 12.4 单电桥的电源接入点的选择 .....	173
12.5 直流电桥的主要技术特性 .....	175
12.6 直流电桥的使用、维护及检定 .....	176
12.6.1 直流电桥的使用 .....	176
12.6.2 直流电桥的维护 .....	177
12.6.3 直流电桥的检定 .....	177
<b>思考题与习题</b> .....	177
<b>第 13 章 交流电桥</b> .....	179
13.1 交流电桥的基本原理 .....	179
13.1.1 交流电桥的平衡条件 .....	179
13.1.2 交流电桥的特点 .....	180
13.1.3 交流指零仪和电源 .....	182
13.2 常用的交流阻抗比电桥 .....	183
13.2.1 电容电桥 .....	183
13.2.2 电感电桥 .....	185
13.2.3 测量频率的电桥 .....	187
13.2.4 万用电桥 .....	187
13.3 变压器电桥 .....	188
13.3.1 变压器电桥的特点 .....	188
13.3.2 变压器电桥的基本原理 .....	189
13.3.3 变压器电桥的基本线路 .....	190
13.3.4 等效三端网络 .....	190
* 13.4 交流电桥的干扰防护及使用 .....	191
13.4.1 干扰因素及其影响 .....	192
13.4.2 干扰的检查 .....	192
13.4.3 干扰的排除 .....	192
13.4.4 使用注意事项 .....	192
* 13.5 交流电桥的灵敏度和收敛性 .....	193
13.5.1 交流电桥的灵敏度 .....	193
13.5.2 交流电桥的收敛性 .....	194
<b>思考题与习题</b> .....	196
<b>第 4 篇 磁测量技术</b> .....	197
* <b>第 14 章 磁测量的基本知识</b> .....	197
14.1 磁场的基本知识 .....	197

14.1.1	磁感应强度 .....	197
14.1.2	磁力线和磁通 .....	197
14.2	磁场强度及安培环路定律 .....	198
14.3	磁场边界条件 .....	199
14.4	电磁感应 .....	200
14.4.1	电磁感应定律 .....	200
14.4.2	均匀磁场中运动导体内的感应电动势 .....	200
14.4.3	均匀磁场中转动线圈内的感应电动势 .....	201
14.5	铁磁材料的磁特性 .....	201
14.6	磁路概念 .....	203
14.7	磁学标准量具 .....	205
<b>思考题与习题 .....</b>		<b>206</b>
<b>第 15 章 磁场的测量 .....</b>		<b>208</b>
15.1	磁测量的感应法 .....	208
15.1.1	冲击检流计法 .....	208
15.1.2	磁通表法 .....	210
15.1.3	旋转线圈法 .....	212
15.1.4	数字磁通表法 .....	213
15.2	磁测量的霍尔效应法 .....	214
15.2.1	霍尔效应 .....	214
15.2.2	霍尔效应法测磁场 .....	215
15.2.3	霍尔电流表 .....	216
15.3	磁测量的铁磁探针法 .....	217
15.3.1	磁通门磁场计的结构 .....	217
15.3.2	测量原理 .....	218
<b>思考题与习题 .....</b>		<b>218</b>
<b>第 16 章 铁磁材料静态磁性的测量 .....</b>		<b>220</b>
16.1	测量样品的准备 .....	220
16.1.1	闭路样品 .....	220
16.1.2	开路样品和磁导计 .....	221
16.1.3	样品的去磁 .....	221
16.2	样品中的磁场的测量 .....	222
16.2.1	扁平测 H 线圈 .....	222
16.2.2	双层同轴测 H 线圈 .....	223
16.2.3	用磁位计测磁压 .....	223
16.3	用冲击法测量静态磁特性 .....	224
16.3.1	基本磁化曲线的测定 .....	224
16.3.2	磁滞回线的测定 .....	226
* 16.4	静态磁性的自动测量装置 .....	228

思考题与习题 .....	229
<b>第 17 章 铁磁材料动态磁性的测量</b> .....	230
17.1 交流磁化的特点 .....	230
17.1.1 铁芯损耗 .....	230
17.1.2 磁通的趋表效应 .....	231
* 17.1.3 铁芯中的 $B(t)$ 和 $H(t)$ 的波形 .....	232
* 17.1.4 正弦波磁感应强度的获得 .....	233
17.2 交流磁化曲线和交流磁滞回线的测量 .....	233
17.2.1 交流磁化曲线的测量 .....	233
17.2.2 交流磁滞回线的测量 .....	235
17.3 铁芯损耗的测量 .....	236
17.3.1 硅钢片样品 .....	236
17.3.2 测量铁芯损耗的线路 .....	237
* 17.4 电桥法测量复磁导率和铁芯损耗 .....	239
17.4.1 复磁导率 .....	239
17.4.2 被测样品等效为电路元件 .....	239
17.4.3 测复磁导率的交流电桥 .....	240
17.4.4 用交流电桥测量铁芯损耗 .....	241
思考题与习题 .....	241
<b>第 5 篇 电子测量技术基础</b> .....	243
<b>第 18 章 电子仪器及应用</b> .....	243
18.1 信号发生器 .....	243
18.1.1 信号发生器概述 .....	243
18.1.2 XD-2C 低频信号发生器 .....	244
18.1.3 函数发生器 .....	247
18.1.4 脉冲和方波发生器 .....	248
18.1.5 扫描发生器 .....	249
* 18.1.6 合成信号发生器 .....	250
18.2 电子示波器及其应用 .....	250
18.2.1 示波器的基本原理 .....	251
18.2.2 示波器主要技术指标 .....	253
18.2.3 示波器的分类 .....	254
18.2.4 示波器的应用 .....	255
18.3 电子电压表及其应用 .....	256
18.3.1 电子电压表概述 .....	256
18.3.2 电子电压表的整流原理 .....	256
18.3.3 电子电压表的基本结构与特点 .....	261
18.3.4 电子电压表的应用 .....	261
思考题与习题 .....	265

第 6 篇 数字测量技术基础 .....	267
第 19 章 数字仪表及数字测量技术 .....	267
19.1 概述 .....	267
19.1.1 数字仪表及数字测量技术的发展 .....	267
19.1.2 数字仪表的构成原理 .....	268
19.1.3 数字仪表及数字测量技术的特点 .....	268
19.1.4 数字仪表的分类 .....	269
19.2 电子计数器 .....	269
19.2.1 工作原理 .....	269
19.2.2 基本组成框图 .....	270
19.3 直流数字电压表 .....	270
* 19.3.1 逐位逼近比较式数字电压表 .....	271
* 19.3.2 电压-时间变换型 ( U-T ) 数字电压表 .....	271
* 19.3.3 电压-频率型 ( U-f ) 数字电压表 .....	277
19.3.4 直流数字电压表的主要技术指标 .....	279
19.3.5 直流数字电压表的检定 .....	281
19.3.6 使用直流数字电压表的注意事项 .....	281
19.4 主要电学量的数字化测量技术 .....	282
19.4.1 直流电流和中高值电阻的测量 .....	282
19.4.2 低值电阻的测量 .....	283
19.4.3 超高值电阻的测量 .....	283
19.4.4 交流电压/电流的测量 .....	284
19.4.5 频率的测量 .....	285
19.4.6 周期的测量 .....	286
19.4.7 相位的测量 .....	287
19.4.8 单相有功功率的数字测量 .....	288
19.4.9 三相功率和电能的数字测量 .....	290
19.5 数字万用表 .....	291
19.5.1 数字万用表的构成原理 .....	291
19.5.2 数字万用表的主要特点 .....	294
19.5.3 数字万用表的测量准确度 .....	296
19.5.4 数字万用表测量误差计算 .....	296
* 19.6 新型数字化仪表 .....	297
19.6.1 微机化仪表 .....	297
19.6.2 虚拟仪器简介 .....	299
思考题与习题 .....	305
参考文献 .....	307

# 第 1 篇 电气测量概论

电气测量技术是人们掌握电气知识、发展电磁理论和电磁技术的重要手段。由于电气测量具有测量方便、易于实现自动化和遥测等固有优点，它不仅可以直接对电气参量及电磁参数进行测量，而且由于传感器技术的发展，几乎所有的“非电量”都可以通过传感器转换成电量进行测量，所以，它在各种测量技术中占有很重要的地位。

本篇主要介绍有关电气测量技术的基本概念、基本方法和电学量具。

## 第 1 章 电气测量的基本知识

### 1.1 电气测量概述

#### 1.1.1 测量的概念

测量是人类对自然界的客观事物取得数量概念的一种认识过程。在这一过程中，借助于专门的设备，通过实验方法，求出以测量单位表示的被测量的数值大小。

测量可分为绝对测量与相对测量。

测量中，当被测量是通过对一个或数个基本量的直接测量或利用物理常数值进行测量时，则称为绝对测量。绝对测量主要用来决定各个测量单位，用于基准的建立，它虽然在理论上是完全正确的，但由于绝对测量必然有着非常复杂的操作过程，因此，它远不如相对测量应用得广泛。

通过物理实验方法，将被测量与作为单位的量进行比较的过程，称为相对测量。通常在科学技术和工程实际中所进行的测量一般都是相对测量。

通过测量得到的结果，通常是用数字标出的，这个数字就表明了被测量为测量单位的多少倍。

设被测量为  $A_0$ ，测量单位为  $X_0$ ，则测量结果为

$$A_x = \frac{A_0}{X_0}$$

所以

$$A_0 = A_x X_0 \quad (1-1)$$

显然，作为测量单位的标准量  $X_0$  与被测量  $A_0$  必须是同类量，而测量结果  $A_x$  是一个无单位的数字量。

例如，当我们用“天平”称东西时，就把被测物放到“天平”一端的盘子里，而在“天平”另一端的盘子里加入“砝码”，不断地调整放到盘中的砝码的大小和个数，最后使“天平”达到平衡，这时我们就可由砝码的总质量而确定被测物的质量了。如果在“天平”平衡

时，盘中有一个 10g 的砝码、一个 1g 的砝码、两个 0.1g 的砝码，那么被测物的总质量就是 11.2g，这表明被测量的质量为测量单位“g”的 11.2 倍。在这里，10g、1g、0.1g 的砝码都是质量的测量单位的整数或分数的实物复制体，这些都是质量的度量器。“天平”作为一种测量仪器起着把被测量的质量与质量度量器进行比较的作用。

这个例子虽然简单，但它却包含了测量的基本概念：测量是将被测量与标准量进行比较的过程。在这个过程中，它一定需要有作为测量单位的复制实体的度量器的参与（直接参与或间接参与）；同时又需要有能将被测量与度量器进行比较的测量仪器的参与。

测量过程一般包括三个阶段。

① 准备阶段 首先要明确“被测量”的性质及测量所要达到的目的，然后选定测量方式，选择合适的测量方法及相应的测量仪器。

② 测量阶段 建立测量仪器所必需的测量条件，慎重地进行操作，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，进行数据处理，以求得测量结果和测量误差。

总之，研究一个完整的测量过程，通常必须研究如下几个主要方面：测量对象；测量方式和方法；测量设备，真中包括度量器与测量仪器仪表。

在测量工作中，常用的名词术语如下。

① 准确度 测量结果与被测量真实值间相接近的程度，它是测量结果准确程度的量度。

② 精密度 在测量中所测数值重复一致的程度，它表明在同一条件下进行重复测量时，所得到的一组测量结果彼此之间相符合的程度，它是测量重复性的量度。

③ 灵敏度 仪器仪表读数的变化量（响应）与相应的被测量的变化的比值。

④ 分辨率 仪器仪表所能反映的被测量的最小变化值。实际上，分辨率是灵敏度的倒数。

⑤ 误差 测量结果对被测量真实值的偏离程度。

⑥ 量限（量程） 仪器仪表在规定的准确度下对应于某一测量范围内所能测量的最大值（测量上限—测量下限）。

准确度与误差：准确度与误差本身的含义是相反的，但两者又是紧密联系的，测量结果的准确度高，它的误差就小，因此在实际测量中往往采用误差大小来表示准确度的高低。

准确度与精密度：准确度与精密度的含义是不同的，两者容易混淆。为了搞清这两个概念，可以举两个例子来加以说明。假定有两只同类型、同规格的电压表，它们原来所标注的准确度也相同，若其中一只电压表因内部的附加电阻变质而实际准确度下降，那么，当用这两只仪表测量电压时，尽管它们有相同的精密度（表现在两只仪表读数的有效位数相同），但两者的准确度却相差很大。可见，仪表的精密度并不能一定保证其准确度，然而精密度却是一定准确度的前提，仪表有什么样的准确度等级，也就要求有什么样的精密度相适应。精密度低，准确度也不会高。例如用万用表测量某一电阻，得测量值为  $1.4\text{M}\Omega$ ，若用另一个高准确度的电桥测量这个电阻，得测量值为  $1384572\Omega$ ，显然电桥测量的准确度高，它的精密度也是与之适应的。因此，在正常条件下，准确度和精密度是紧密相关的，精密度高，准确度也高，两者是一致的，特别在精密测量中，人们往往就用精密度（也称精度）来描述测量的准确度。

### 1.1.2 电气测量的发展和地位

电气测量就是借助于各种电气测量器具（测量仪器仪表、量具及附属设备），对科学技

术和工程实际中的各种电磁现象和电磁过程进行定量分析研究的过程。它的成长和发展是与电磁学理论及电磁技术的成长和发展密切相关、互相促进的。它的发展大体上经历了以下几个时期。

早在远古时代，人们已经了解到“摩擦生电”的现象。在我国，也很早就发现了天然磁铁，并制造了指南针。但当时人们对电磁的认识是很肤浅的。

直到18世纪，库仑（Coulomb）制成了叫做扭摆的测量仪器，首先用实验方法从数量上确定了电荷间相互作用的规律——库仑定律；18世纪末到19世纪初，伏打（Volta）制成了“伏打电池”，从此得到了电流；欧姆（Ohm）通过实验得出了有名的“欧姆定律”；1831年法拉第发现了“电磁感应定律”；这些定律奠定了电路理论和电工技术的基础。1873年，麦克斯韦（Maxwell）提出“麦克斯韦方程”，则奠定了电磁场理论的基础。19世纪中叶以后，发电机、电动机的发明，为人类利用电能开辟了宽阔的道路。所有这些，都促进了电气测量技术的发展。在此期间，人们制造了电磁系、感应系、铁磁电动系等仪表。正是有了这些测量仪表，相应地出现了多种测量单位。当时，仅电阻就有15种单位，电流有5种单位。如此众多的单位使得测量结果无法比较，在1881年召开的国际会议上规定了统一的电学单位制，统一了测量单位。

20世纪以来，尤其是20世纪60年代以来，由于电子技术、大规模集成电路以及计算机技术的迅速发展，使电气测量进入了一个新的时期，正朝着快速测量、小型化、数字化、多功能、高准确度、高灵敏度、高可靠性及智能化、虚拟化等方面发展。

总之，电磁理论和电磁技术的发展推动着电气测量技术的提高；而电气测量技术的提高又促进了电磁理论和电磁技术的发展。

由于电气测量具有测量方便、易于实现自动化、遥测等固有优点，电气测量仪器仪表广泛应用于科学技术和工程实际测量中，不但可以直接对电磁参量进行测量，而且，由于传感技术的发展，几乎所有的“非电量”都可以通过传感器转换成电量进行测量，因此，电气测量技术在各种测量技术中占有很重要的地位，应用极为广泛。

### 1.1.3 电气测量的任务

电气测量的任务就是，利用一定的电气测量器具和电气测量技术，测量各种电磁参量。

电参量可以分为电量（电压、电流、电功率、电能、……）和电路参数（电阻、电感、电容、互感、……）。

磁参量也可以分为磁量（磁通、磁感应强度、磁场强度、……）和磁路参数（磁阻、磁性材料的磁导率、……）。

电气测量器具是为了测量目的而用的技术装备，它包括电气测量仪器（仪表）和电测量具。

电气测量仪器（仪表）可将被测电磁参量转换成示值或其等效信息。它包括各系列、各类直读指示仪表（磁电系、电磁系、电动系、感应系、整流系、电子式、数字式等以及电压表、电流表、功率表、频率表、相位表、电阻表等）；各类仪器（交、直流电桥，交、直流电位差计，示波器等）；及其他辅助设备（分流器、分压箱、仪用互感器等）。

电测量具是以固定形式复现某个量的一个或多个已知量值的器具。主要包括：标准电池；标准电阻或电阻箱；标准电容或电容箱；标准电感或电感箱；标准互感器；磁学基准器等。

利用电气测量器具进行测量时，必须掌握其结构、工作原理、技术特性、使用方法及其计量检定，以便充分发挥其性能，获得较好的测量结果，这是“电气测量技术”课程的基本



内容,也是工程和实验检测技术人员应具备的基本知识。

电气测量技术是为了进行测量而采用的原理、方法、手段和技术措施。对于某一测量对象,一般有多种测量技术可供选择,而某种测量技术又往往可用于不同的测量对象。用于同一测量对象,不同的测量技术的效果可能大致相同,也可能大不相同。在电气测量中,对不同参量、不同量程、不同频率等,往往要采用不同的测量技术,主要有:直接和间接测量技术;直接和非直接比较测量技术;无源参量和有源参量测量技术;变换测量技术;减小测量不确定度的校准技术、垫整和误差倍增技术、测量数据处理技术;以及接地、防干扰、阻抗匹配等技术措施。

电气测量技术是检测技术人员必须具备的基本技能。因为有了一定的测量器具,还必须根据被测对象和要求,选择合适的测量技术才能获得最佳的测量效果。

电气测量是一门实践性很强的课程。学习电气测量的原理和方法后,还必须进行实际的电气测量基本实验操作训练,加深对电气测量器具的结构、原理和技术性能的理解,掌握电气测量的基本方法和技术并能熟练地测量各种基本电磁参量。

## 1.2 电气测量的方法和分类

同一物理量可以用各种不同的方法进行测量。但是在一定条件下,要根据被测量的性质、特点以及对准确度的要求等因素选择测量方法。根据各种测量的性质和特点可将测量方法作如下分类。

### 1.2.1 根据获得测量结果的过程分类

根据获得测量结果的过程可以将测量分为三类。

#### (1) 直接测量

将被测量与作为标准的量具直接比较,或用事先刻度好的测量仪表进行测量,从而直接获得被测量的数值,这种测量方式称为直接测量。例如,用电流表测量电流、用直流电桥测量电阻等属于直接测量,因为被测量的数据能够直接从仪表或仪器上得到。

#### (2) 间接测量

测量中,通过对与被测量有一定函数关系的几个量进行直接测量,然后再按这个函数关系通过计算而获得被测量数值,这种测量方式称为间接测量。例如用伏安法测电阻就是间接测量,因为这种测量是先测出电阻两端的电压  $U$  和通过电阻中的电流  $I$ ,然后再根据公式  $R=U/I$  计算出电阻值。

间接测量比直接测量要复杂一些,一般在不能使用直接测量或直接测量达不到测量要求时,才采用间接测量。

#### (3) 组合测量

如果被测量有多个,而且能以某些可测量的不同组合形式(函数关系)表示时,可先通过直接或间接地测量这些组合的数值,再通过解联立方程组求得未知的被测量数值,这种测量方式称为组合测量。例如,金属导体的电阻  $R_t$  与温度  $t$  之间的函数关系为

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20^\circ\text{C}) + \beta(t - 20^\circ\text{C})^2] \quad (1-2)$$

式中,  $R_{20}$  为导体在温度为  $20^\circ\text{C}$  时的阻值;  $R_t$  为导体在温度为  $t$  时的阻值;  $\alpha$ ,  $\beta$  为导体的电阻温度系数。

如果要确定某一标准电阻与温度之间的函数关系,则需要测定式(1-2)中的  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $R_{20}$ ,为此我们可以在不同的温度下进行三次测量即可达到目的。在一次测量中,只能测得