

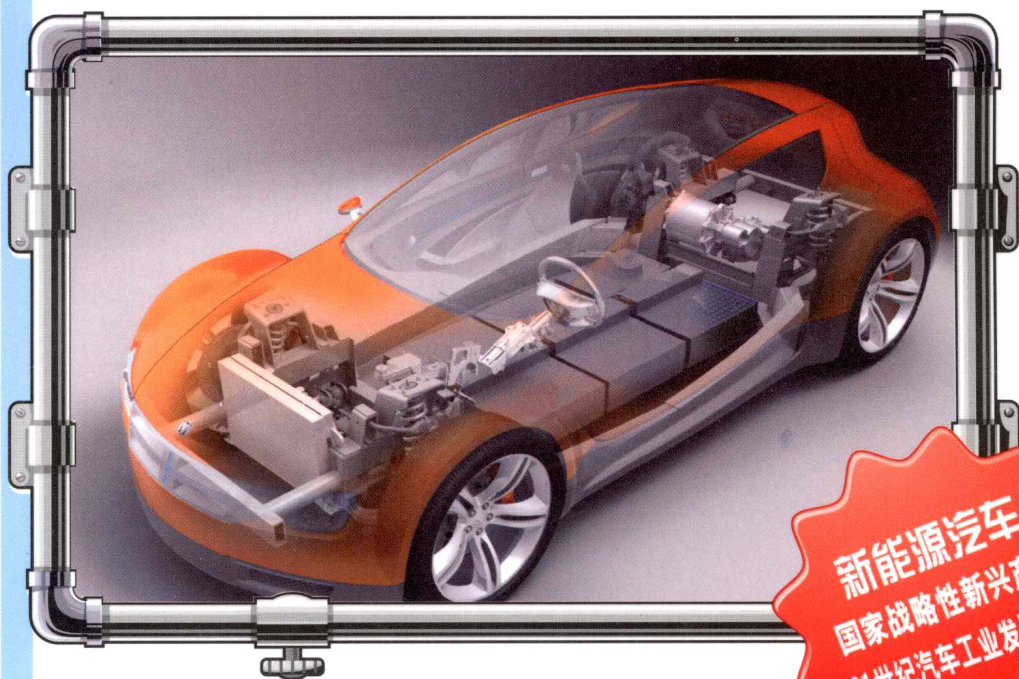


21世纪全国高等院校汽车类**创新型**应用人才培养规划教材

新能源汽车专业规划教材

电动汽车 测试与评价

赵立军 主 编



新能源汽车
国家战略性新兴产业
21世纪汽车工业发展热点



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材

电动汽车测试与评价

主 编 赵立军

副主编 佟钦智 张冠哲



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

前 言

进入 21 世纪，社会进步进入了前所未有的新阶段。随着各国工业化进程的加剧和城市化水平的不断提高，能源危机和环境污染已经成为人类社会发展的突出矛盾。如何减少汽车对不可再生石油资源的依赖，发展电动交通工具，特别是发展电动汽车成为国际社会共同关注的重大问题。

伴随着现代科学技术和汽车产业的发展，汽车测试技术也得到不断发展和完善。电动汽车作为新能源汽车的领军者，已逐渐得到推广和应用。本书是在《汽车试验学》的基础上对电动汽车领域的拓宽，并与之相配套，力求突出科学性和完整性。本书内容共分为 7 章。分别讲述了电工仪表与测量基础、电气参数的测量、电动汽车用动力蓄电池的测试与评价、电动汽车用电机的测试与评价、纯电动汽车的测试与评价、混合动力电动汽车的测试与评价及燃料电池电动汽车的测试与评价，最后还将书中引用的部分国家标准内容作为附录，以供读者参考学习。

全书由赵立军统稿和修正，其中第 1~4 章由赵立军、佟钦智合作编写；第 5~7 章由赵立军、张冠哲合作编写。哈尔滨工业大学(威海)Z 空间工作室的毛俊、李现飞、宁亚楠、汪家爽、邓宁宁等同学为本书的资料整理和校对工作付出了很多的努力，在此表示感谢。

本书围绕电动汽车测试及评价的相关内容展开阐述，具有较强的实用性和完整性。书中根据国家相关标准内容进行了整理和知识扩展，涉及知识较为广泛，考虑到读者自学的方便性和作为教材的系统性，每章内容都涵盖了原理和结构的理论知识。此外，各章后附有小结和习题，适合学生独立完成以巩固各章节重点内容。

本书的内容体系适合高等院校汽车相关专业的学生学习，符合高等院校车辆工程相关专业新能源汽车方向“电动汽车试验学”课程的教学需求。同时本书也可以作为汽车职业学校及汽车工程技术人员的参考书。

考虑到各专业条件和学生培养方向的不同，讲授时可以根据具体情况对内容适当取舍。

本书建议授课的总学时为 36 学时，各章内容及学时分配见下表。

章节	授课学时
第 1 章电工仪表与测量基础	4
第 2 章电气参数的测量	4
第 3 章电动汽车用动力蓄电池的测试与评价	5
第 4 章电动汽车用电机的测试与评价	5
第 5 章纯电动汽车的测试与评价	6



(续)

章节	授课学时
第 6 章混合动力电动汽车的测试与评价	6
第 7 章燃料电池电动汽车的测试与评价	6

受编者能力和水平所限，书中难免有疏漏之处，欢迎广大读者批评指正，以便再版时进行修正和完善。

编 者

2012 年 6 月

北京大学出版社汽车类教材书目

序号	书 名	标准书号	著作者	定价	出版日期
1	汽车构造(第2版)	978-7-301-19907-7	肖生发, 赵树朋	56	2012.7
2	汽车发动机原理	978-7-301-12168-9	韩同群	32	2012.7
3	汽车设计	978-7-301-12369-0	刘涛	45	2008.1
4	汽车运用基础	978-7-301-13118-3	凌永成, 李雪飞	26	2008.1
5	现代汽车系统控制技术	978-7-301-12363-8	崔胜民	36	2008.1
6	汽车电气设备实验与实习	978-7-301-12356-0	谢在玉	29	2008.2
7	汽车试验测试技术	978-7-301-12362-1	王丰元	26	2008.2
8	汽车运用工程基础	978-7-301-12367-6	姜立标, 张黎骅	32	2008.6
9	汽车制造工艺	978-7-301-12368-3	赵桂范, 杨 娜	30	2008.6
10	汽车工程概论	978-7-301-12364-5	张京明, 江浩斌	36	2008.6
11	汽车运行材料	978-7-301-13583-9	凌永成, 李美华	30	2012.1
12	汽车试验学	978-7-301-12358-4	赵立军, 白 欣	28	2011.8
13	内燃机构造	978-7-301-12366-9	林 波, 李兴虎	26	2011.12
14	汽车故障诊断与检测技术	978-7-301-13634-8	刘占峰, 林丽华	34	2008.8
15	汽车维修技术与设备	978-7-301-13914-1	凌永成, 赵海波	30	2010.8
16	热工基础	978-7-301-12399-7	于秋红	34	2009.2
17	汽车检测与诊断技术	978-7-301-12361-4	罗念宁, 张京明	30	2009.1
18	汽车评估	978-7-301-14452-7	鲁植雄	25	2012.5
19	汽车车身设计基础	978-7-301-15619-3	王宏雁, 陈君毅	28	2009.9
20	汽车车身轻量化结构与轻质材料	978-7-301-15620-9	王宏雁, 陈君毅	25	2009.9
21	车辆自动变速器构造原理与设计方法	978-7-301-15609-4	田晋跃	30	2009.9
22	新能源汽车技术	978-7-301-15743-5	崔胜民	32	2011.12
23	工程流体力学	978-7-301-12365-2	杨建国, 张兆营等	35	2011.12
24	高等工程热力学	978-7-301-16077-0	曹建明, 李跟宝	30	2010.1
25	汽车电气设备(第2版)	978-7-301-16916-2	凌永成, 李淑英	38	2012.5
26	现代汽车发动机原理	978-7-301-17203-2	赵丹平, 吴双群	35	2010.6
27	现代汽车新技术概论	978-7-301-17340-4	田晋跃	35	2012.5
28	现代汽车排放控制技术	978-7-301-17231-5	周庆辉	32	2012.6
29	汽车服务工程	978-7-301-16743-4	鲁植雄	36	2011.9
30	汽车数字开发技术	978-7-301-17598-9	姜立标	40	2010.8
31	汽车人机工程学	978-7-301-17562-0	任金东	35	2010.8
32	专用汽车结构与设计	978-7-301-17744-0	乔维高	45	2010.9
33	汽车空调	978-7-301-18066-2	刘占峰, 宋 力等	28	2010.11
34	汽车 CAD 技术及 Pro/E 应用	978-7-301-18113-3	石沛林, 李玉善	32	2010.11
35	汽车振动分析与测试	978-7-301-18524-7	周长城, 周金宝等	40	2011.3
36	新能源汽车概论	978-7-301-18804-0	崔胜民, 韩家军	30	2012.5
37	汽车空气动力学数值模拟技术	978-7-301-16742-7	张英朝	45	2011.6
38	汽车电子控制技术(第2版)	978-7-301-19225-2	凌永成, 于京诺	40	2012.5
39	车辆液压传动与控制技术	978-7-301-19293-1	田晋跃	28	2011.8
40	车辆悬架设计及理论	978-7-301-19298-6	周长城	48	2011.8
41	汽车电器及电子控制技术	978-7-301-17538-5	司景萍, 高志鹰	58	2012.1
42	汽车车身计算机辅助设计	978-7-301-19889-6	徐家川, 王翠萍	35	2012.1
43	现代汽车新技术	978-7-301-20100-8	姜立标	49	2012.2
44	电动汽车测试与评价	978-7-301-20603-4	赵立军	35	2012.7
45	电动汽车结构与原理	978-7-301-20820-5	赵立军, 佟钦智	35	2012.7

请登录 www.pup6.cn 免费下载本系列教材的电子书(PDF版)、电子课件和相关教学资源。

欢迎免费索取样书, 并欢迎到北京大学出版社来出版您的大作, 可在 www.pup6.cn 在线申请样书和进行选题登记, 也可下载相关表格填写后发到我们的邮箱, 我们将及时与您取得联系并做好全方位的服务。

联系方式: 010-62750667, 童编辑, 13426433315@163.com, pup_6@163.com, 欢迎来电来信咨询。

目 录

第 1 章 电工仪表与测量基础 1

1.1 电工测量的基本知识	2
1.1.1 电工测量	2
1.1.2 测量方法的分类	3
1.1.3 测量单位制	4
1.2 电工仪表的基本知识	5
1.2.1 电工仪表的分类	5
1.2.2 电工指示仪表的原理与组成	6
1.2.3 电工仪表的表面标志	8
1.2.4 电工仪表的型号	9
1.2.5 电工仪表的主要技术特性	10
1.2.6 电工仪表的选择	11
1.3 电测量指示仪表技术特性	11
1.4 电工仪表的校验	15
1.4.1 校验前的检查	15
1.4.2 校验方法	16
1.4.3 校验线路	16
1.5 数字仪表	18
1.5.1 数字仪表的测量机构	18
1.5.2 数字电流表和数字电压表	22
1.5.3 数字毫欧表和电容表	25
小结	28
习题	28

第 2 章 电气参数的测量 29

2.1 电阻的测量方法	30
2.2 电容的测量方法	31
2.3 电感的测量	32
2.4 接地电阻的测量	34
2.4.1 电压表-电流表法	35
2.4.2 电桥法	35

2.4.3 补偿法	36
-----------------	----

2.4.4 TE3571 数字接地电阻 测量仪介绍	36
------------------------------------	----

2.5 温度测量 38

2.5.1 温度测量方法简介	38
2.5.2 热电偶测温	41
2.5.3 热电阻测温	43
2.5.4 埋置检温计测温法	44

2.6 功率测量 45

2.6.1 直流功率的测量	45
2.6.2 交流功率的测量	46
2.6.3 功率表的选择及使用	47

2.7 直流大电流测量 48

2.7.1 测量方法的理论基础	48
2.7.2 用单个电阻量具测量 直流大电流	49
2.7.3 电阻量具测量直流 大电流的误差	50
2.7.4 用分支电流总和法测量 直流大电流	54

小结	56
----------	----

习题	56
----------	----

第 3 章 电动汽车用动力蓄电池的 测试与评价 57

3.1 车用超级电容 58

3.1.1 车用超级电容的基本 原理	58
3.1.2 车用超级电容的分类	58
3.1.3 车用超级电容的基本 术语及型号	60
3.1.4 基本试验及要求	61
3.1.5 检验规则	63

3.2 电动汽车用铅酸蓄电池 65

3.2.1 铅酸蓄电池的基本原理	65
3.2.2 铅酸蓄电池的分类	65



3.2.3	铅酸蓄电池的基本术语及型号	66	4.3	电动汽车用电动机测试基本术语	101
3.2.4	基本试验及要求	66	4.3.1	工作制	101
3.2.5	检验规则	70	4.3.2	定额	104
3.2.6	铅酸蓄电池的改进	72	4.4	电动汽车用电动机及其控制器测试技术条件	106
3.3	电动汽车用锂离子蓄电池	73	4.4.1	环境条件	106
3.3.1	锂离子蓄电池的基本原理	73	4.4.2	技术要求	106
3.3.2	锂离子蓄电池的分类	73	4.4.3	检查试验项目	109
3.3.3	锂离子蓄电池的基本术语及型号	74	4.4.4	型式试验	109
3.3.4	基本试验及要求	75	4.4.5	标志、包装、运输和储存	110
3.3.5	检验规则	79	4.5	电动汽车用电动机及其控制器测试方法和要求	110
3.4	电动汽车用金属氢化物镍蓄电池	80	4.5.1	试验准备	110
3.4.1	金属氢化物镍蓄电池的基本原理	80	4.5.2	一般性试验项目	111
3.4.2	金属氢化物镍蓄电池的分类及特点	81	4.5.3	环境试验	116
3.4.3	基本试验及要求	82	4.5.4	电动机转矩特性及效率测试	117
3.5	简单模拟工况试验	85	4.5.5	再生能量回馈试验	118
3.6	一致性分析方法	87	4.6	电动汽车用电动机的性能测试系统实例	119
小结		88	4.6.1	试验平台的建立	119
习题		88	4.6.2	测试系统结构	121
第4章 电动汽车用电机的测试与评价			4.6.3	测试软件开发	122
4.1	电动汽车用电机的分类、作用和要求	91	4.6.4	应用	123
4.1.1	电动汽车用电机的分类	91	小结		123
4.1.2	电动汽车用电机的作用	93	习题		123
4.1.3	电动汽车用电机的要求	93	第5章 纯电动汽车的测试与评价		
4.2	电动汽车用电动机原理	94	5.1	电动汽车的发展和理论基础	126
4.2.1	基本电磁原理	94	5.1.1	电动汽车发展现状	126
4.2.2	直流电动机	94	5.1.2	电动汽车的理论基础	127
4.2.3	感应电动机	97	5.2	纯电动汽车的基本结构和原理	127
4.2.4	永磁同步电动机	99	5.3	纯电动汽车整车性能测试项目	132
4.2.5	开关磁阻电动机	100	5.4	纯电动汽车测试基本术语及续驶里程影响因素	133
			5.4.1	基本术语	133
			5.4.2	电动汽车续驶里程的影响因素	134
			5.5	纯电动车测试条件	135

5.6 测试方法及设备	136	6.5.2 试验循环	166
5.6.1 电动汽车安全性能的 测试	136	6.5.3 试验准备	166
5.6.2 整车动力性试验	137	6.5.4 试验仪器	168
5.6.3 电动汽车能量消耗率和 续驶里程测试	141	6.5.5 试验程序	169
5.6.4 电动机、电池及调速系统的 测试	146	6.6 轻型混合动力电动汽车能量 消耗量试验	170
5.6.5 其他性能试验	146	6.6.1 可外接充电、无行驶模式 手动选择功能车型	170
5.7 电动汽车能量消耗率测试的 实例	146	6.6.2 可外接充电、有行驶模式 手动选择功能车型	171
小结	147	6.6.3 不可外接充电的混合动力 电动汽车	173
习题	147	6.7 重型混合动力电动汽车污染物 排放测量	174
第6章 混合动力电动汽车的 测试与评价	149	6.7.1 NEC 的计算方法	174
6.1 混合动力电动汽车概述	150	6.7.2 试验循环	176
6.1.1 混合动力电动汽车分类	150	6.7.3 试验准备	176
6.1.2 三种混合动力电动汽车 优缺点比较	152	6.7.4 试验程序	176
6.1.3 动力传动系统及控制	153	6.8 轻型混合动力电动汽车污染物 排放测量	179
6.2 混合动力电动汽车测试技术 基础	154	6.8.1 试验要求	179
6.2.1 基本术语	154	6.8.2 试验项目	179
6.2.2 几种常见的测试评价方法	155	6.8.3 试验准备	180
6.2.3 混合动力电动汽车测试 指标	157	6.8.4 试验程序	180
6.3 混合动力电动汽车动力性能 测试	158	小结	180
6.3.1 试验原则	158	习题	181
6.3.2 试验条件	158	第7章 燃料电池电动汽车的 测试与评价	182
6.3.3 试验车辆的准备	159	7.1 燃料电池电动汽车概述	183
6.3.4 试验方法	160	7.1.1 燃料电池电动汽车基本 结构	183
6.4 混合动力电动汽车安全要求	163	7.1.2 燃料电池工作原理	184
6.4.1 车辆结构要求	163	7.1.3 燃料电池能源管理系统	185
6.4.2 功能安全要求	165	7.2 燃料电池电动汽车测试基本 术语	186
6.4.3 故障防护	165	7.3 燃料电池发动机性能试验	187
6.5 重型混合动力电动汽车能量 消耗量试验	165	7.3.1 测试用仪表精度的要求	187
6.5.1 净能量的改变 NEC 的计算 方法	166	7.3.2 试验前准备工作	187
		7.3.3 一般试验条件及试验 要求	188





电动汽车测试与评价

7.3.4	性能试验方法	188	7.5	加氢车技术条件	200
7.3.5	试验数据的计算	190	7.5.1	基本术语	200
7.3.6	燃料电池电动汽车最高 车速试验方法	191	7.5.2	技术要求	201
7.4	电动汽车 DC/DC 变换器测试与 评价	194	7.5.3	标志	202
7.4.1	基本概念	194	7.5.4	运输、停放	202
7.4.2	分级与型号命名	195	7.5.5	随车文件	202
7.4.3	试验及要求	196	小结		203
7.4.4	检验规则	198	习题		203
7.4.5	标志、包装、运输和 储存	199	附录		204
			参考文献		241

第 1 章

电工仪表与测量基础



本章学习目标

- ★ 理解电工测量的基本概念，了解电工仪表的主要技术要求和选择方法
- ★ 掌握校验仪表的步骤和方法，掌握用直接比较法校验电流表、电压表和功率表
- ★ 了解数字仪表测量机构的组成、工作原理及技术特性



本章教学要点

知识要点	能力要求	相关知识
电工测量基本知识	了解电工测量的基本概念； 测量过程及方法分类	电工测量与测量技术之间的联系； 测量的三个过程
电工仪表基本知识及其校验	了解电工仪表的主要技术要求和选择方法； 掌握常用电工仪表校验方法	常用电工仪表的选择及使用方法； 直接比较法校验电流表、电压表和功率表
数字仪表	了解数字仪表的测量机构、工作原理及技术特性	双积分 A/D 转换器； LED 数码管及字符管



导入案例

电工仪表及测量技术是研究各种电磁量(电量+磁量)的测量方法,相应仪表的原理、结构、使用操作技术以及测量误差与数据处理的技术。

电工仪表及测量技术对从事电气技术工作的人员来说是十分必要的;不论是电气设备的安装、调试、实验、运行和维修;还是对电气产品进行检验、测试和鉴定都会涉及电磁测量方面的技术问题。其主要应用于工农业生产、生活、国防、科研等各领域,如变电所、配电室、发电厂、电力监控网、火箭发射中心、家用电能计量表等。

准确而有效的测量是科研、生产等成功的关键,随着科学技术的不断进步,电工测量的方法也在不断改进,新型的测量仪器也不断涌现,对生产力的发展起到极大的促进作用。

1.1 电工测量的基本知识

1.1.1 电工测量

测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。在这个过程中常借助专门的设备,将被测对象直接或间接地与同类已知单位进行比较,取得用数值和单位共同表示的测量结果。

在所有的测量技术中,有一种是以电磁规律为基础的测量技术,即电工测量。电工测量是借助测量设备,将被测量的各种电量和各种磁量与作为测量单位的同类电工量进行比较,以确定其大小的过程。

一个测量过程通常包括测量对象、测量方法和测量设备3个要素。测量对象指电压、电流、电阻、电容、电感、电功率、电能、频率、相位、功率因数、磁感应强度、磁通量、磁导率等物理量;测量方法可根据测量的目的和被测量的性质进行选择;测量设备包括度量器和测量仪器仪表。

进行电量或磁量测量所需的仪器仪表称为电工仪表。电工测量中使用的标准物理量是物理量单位的复制体,称为电学度量器。电学度量器是电工测量设备的重要组成部分,它不仅作为标准量参与测量的过程,而且是维持电磁学单位统一、保证量值准确传递的器具。电工测量中常用的电学度量器有标准电池、标准电阻和标准电感等。

测量过程一般包括3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。

1.1.2 测量方法的分类

1. 按被测量的测量方式分类

按被测量的测量方式,测量方法可分为如下3种。

(1) 直接测量。将被测量与同类标准量直接比较,或用事先刻度好的测量仪表进行测量,从而直接测得被测量的数值,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均属于直接测量。直接测量被广泛地应用于工程技术测量中。

(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计算出被测量数值,这种测量方式称为间接测量。例如,当需测量某种导体的电阻系数 ρ 时,因为导体的电阻系数 ρ 与导体的电阻 R 、导体截面积 S 及导体长度 l 有着一定的关系,所以分别测出各有关量 R 、 S 和 l ,然后根据公式 $\rho=R \cdot S/l$,就可计算出 ρ 值了。当某些被测量由于某些原因而不便于进行直接测量时,就可以考虑采用间接测量。

(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表示,可通过直接或间接测量这些组合的数值时,称为组合测量。组合测量未知的被测量数值,测量方法方便且测量精度较高。

2. 按度量器参与测量过程的方式分类

测量是将被测量与作为测量单位的同类量进行比较,单位复制体的度量器参加到这一比较过程可以是直接的,也可以是间接的。因此,根据是否有度量器直接参与测量过程,测量方法分为两大类:直读法和比较法。

(1) 直读法。直接从仪器仪表的刻度盘上读出测量结果的方法。例如,一般用电压表测量电压、用温度计测量温度等都是直读法,这种方法是根据仪器仪表的读数来判断被测量的大小,作为计量标准的实物并不直接参与测量。这种方法具有简单方便等优点,因而被广泛应用。

(2) 比较法。将被测量与度量器通过较量仪器进行比较,从而测得被测量数值的方法称为比较法。可见,在比较法中,度量器是直接参与作用的。例如,用天平测量物体质量的方法就是一种比较法,在测量过程中,作为质量度量器的砝码始终参与作用。用比较法测量可以得到高的测量准确度,但测量操作比较麻烦,相应的仪器设备也比较昂贵,这是比较法的不足之处。

根据被测量与标准量进行比较时的特点,又可以将比较法分为平衡法、微差法和替代法等。

(1) 平衡法(零值法)。在测量过程中,连续改变标准量,使它产生的效应与被测量产生的效应相互抵消或平衡,这种方法称为平衡法。由于在平衡时指示器指零,所以又称为零值法。这时被测量可以由标准量通过一定的关系式求出。电桥和电位差计都是采用平衡法原理。平衡法的准确度主要取决于标准量的准确度和指零仪器的灵敏度。

(2) 微差法。如果在上述平衡过程中,被测量与标准量不能平衡或标准量不便于调节,则可以通过测量仪器测量二者的差值或正比于差值的量,进而根据标准量的数值确定被测量的大小,这种方法就称为微差法。微差法的测量误差取决于标准量的误差及测量差



值的误差,显然,差值越小,对测量结果的误差的影响越小。例如,若差值为被测量总量的千分之一,测量差值的误差为百分之一时,则测量差值的误差反映在测量结果的测量误差中仅为十万分之一,可见,微差法可以达到较高的测量准确度。标准电池的相互比较就采用这种方法。

(3) 替代法。将被测量与标准量分别接入同一测量装置,在标准量替代被测量的情况下,调节标准量使测量装置的工作状态保持不变,从而可以用标准量的数值来确定被测量的大小,这种方法称为替代法。用替代法测量时,由于测量装置在被测量和标准量分别作用时的状态是一样的,因此装置本身的性能及各种外界因素对测量的影响也几乎相同,这样就极大地减小了所有外界因素对测量结果的影响。替代法的测量准确度主要取决于标准量的准确度和测量装置的灵敏度。

在测量时,到底选用哪种测量方法,要由测量结果准确度的要求以及实验条件是否相同等多种因素决定。

1.1.3 测量单位制

测量单位是确定一个被测量的标准,因此测量单位的确定和统一是非常重要的。我国统一实行以国际单位制(SI)为基础的法定计量单位。表 1-1 列出了电工测量中常用并具有专门名称的国际单位制导出单位。

表 1-1 部分具有专门名称的 SI 导出单位

量				
	名称	符号	用其他 SI 单位表示的表示式	用 SI 基本单位表示的表示式
频率	赫 [兹]	Hz	—	s^{-1}
力	牛 [顿]	N	—	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
能, 功, 热量	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	—	$s \cdot A$
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	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
电感	亨 [利]	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
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、磁通密度	特 [斯拉]	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	—	K

需要说明的是,工程测量中,电能单位常用的“千瓦时($kW \cdot h$)”不是 SI 单位。由于它很实用,所以在电能的测量中,习惯上仍然常用 $kW \cdot h$ 作为电能的测量单位。 $kW \cdot h$ 与 SI 单位中能量单位“焦(J)”的换算关系是 $1kW \cdot h=3.6 \times 10^6 J$ 。

1.2 电工仪表的基本知识

1.2.1 电工仪表的分类

测量各种电磁量的仪器仪表统称为电工仪表。电工仪表不仅可以用来测量各种电磁量，还可以通过相应的变换器用来测量非电磁量，如温度、压力、速度等。电工仪表种类繁多，规格各异。按其工作特点通常可分为指示仪表、数字仪表和比较仪器3大类，其中指示仪表是最常见的电工仪表。

1. 指示仪表

电工指示仪表的工作特点为：先将被测电磁量转换为可动部分(其上附有指针等)的偏转角位移，再根据指针在标尺上指示的位置，直接读出被测电磁量的数值。

指示仪表又可按照以下方法进行分类：

(1) 按工作电流种类，可分为直流电表、交流电表和交直流两用电表。

(2) 按工作原理，可分为磁电系、电磁系、电动系、感应系、整流系、静电系、热电系等。

(3) 按被测对象的名称或单位，可分为电流表、电压表、功率表、电度表、电阻表、相位表等。

(4) 按电工仪表的使用方式，可分为安装式仪表、便携式仪表等。

(5) 按仪表的准确度等级，可分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0七个等级。数字越小准确度越高。

(6) 按读数装置的结构，可分为指针式、光标式、振簧式和数字转盘式等。

此外，指示仪表还可按外壳的防护性能及耐受机械力作用的性能进行分类。

2. 数字仪表

数字仪表的工作特点为：先将被测模拟量(即连续量，如电压、电流等)转换为数字量，再以数字方式显示出被测量的数值，由于这种仪表中采用了数字技术，若再与微处理器配合，可以提高测量的自动化程度，如自动选择量程、自动存储测量结果及自动进行数据处理等。与指示仪表相比，数字仪表没有机械转动部分，可以避免摩擦、减小读数误差，在测量精度及速度方面均有所提高。

数字仪表一般按被测量对象分类，如数字电压表、数字电流表、数字频率表、数字万用表等。

3. 比较仪器

比较仪器的工作特点为：将被测量与度量器(即标准单位的实体，如标准电池、标准电阻等)进行比较，从而读出被测量的数值。

比较仪器包括电位差计、各类电桥等，一般分为直流、交流两大类，常用于较精密的测量。



1.2.2 电工指示仪表的原理与组成

电工指示仪表的结构如图 1.1 所示。从图上可以看出,整个指示仪表可以分为测量线路和测量机构两个部分。指示仪表要把被测量 x 转换为仪表可动部分的偏转角,一般要经过两步变换。第一步先把被测量 x 转换成仪表的测量机构可以直接接受的过渡量 y , 这一步变换由测量线路完成。第二步再将过渡量 y , 变为仪表可动部分的偏转角 α , 这一步变换由测量机构完成。通过偏转角 α 可以直接读出被测量 x 的值。

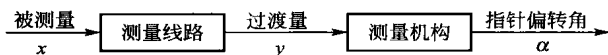


图 1.1 电工指示仪表的结构

指示仪表首先应有一个将电量转换成角位移的结构,称之为测量机构。测量机构是电工测量指示仪表的核心,没有测量机构就不能成为电工指示仪表。不同仪表的测量机构尽管在动作原理上各不相同,可是它们在仪表上的功能却是相同的,即在被测量作用下产生转矩,推动可动部分偏转,指示被测量的大小。测量机构通常包括以下 5 部分:

1) 驱动装置

为了使可动部分的偏转角反映被测电量的大小,测量机构必须具有产生转动转矩的驱动装置。转动转矩可由电磁力、电力、电场力或其他力产生。产生转动转矩的不同方式和原理可构成不同系列的指示仪表。例如,磁电系仪表利用永久磁铁与通电线圈之间的电磁力来产生转矩,电动系仪表利用两个通电线圈之间的电磁力产生转矩等。

2) 控制装置

仪表可动部分在转矩作用下,将带动指示器偏转。但是,如果在仪表可动部分上只有转动转矩作用时,则不论被测量多大,只要转矩能克服可动部分的摩擦力,都将使指示器一直偏转到尽头,因此在可动部分上还要有反作用力矩。反作用力矩是由控制装置产生的,在电测量指示仪表中,测量机构的控制方法有两种:

(1) 利用机械力。利用机械力产生反作用力矩所使用的主要元件是游丝、张丝和悬丝,它们都是弹性元件,因此可以利用它们在弹性变形后所具有的恢复原状的弹力来产生反作用力矩。在仪表测量机构中,游丝、张丝或悬丝往往还起着导流作用,把电流引入和导出仪表的可动部分。

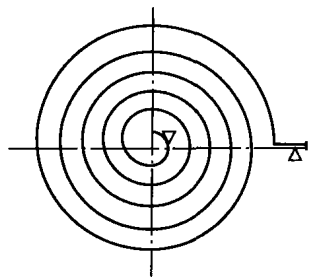


图 1.2 游丝

对游丝、张丝或悬丝的共同要求是阻尼弹性稳定、残余变形小、电阻值低、温度系数小以及无磁性等。通常用以制造这些弹性元件的材料是锡锌青铜、铂银合金以及磷青铜等。

游丝的形状为阿基米德螺线,如图 1.2 所示。

图 1.3 所示为利用游丝产生反作用力矩的控制装置,当可动部分偏转时游丝被扭转,利用游丝的弹力产生反作用力矩,它的内端与转轴固结,外端与称为调零器的弯杆固结。仪表在测量之前其指针必须处于机械零位,但指针有时会在零位附近有些偏转,这就需要转动调零器来改变游丝外部的

位置，使指针恢复零位。

(2) 利用电磁力。利用电磁力产生反作用力矩的一类仪表称为“比率表”或“流比计”。这类仪表的特点是可动部分有两个元件，彼此固结装在转轴上，其中一个元件用以产生转动力矩。电动系相位表即属于此类。

3) 阻尼装置

测量时，仪表指针可动部分要偏转，由于惯性当偏转到转动力矩与反作用力矩相等的平衡位置时不能马上停下来，而要继续偏转，这时由于反作用力矩大于转动力矩，可动部分的偏转速度将逐渐减慢。当最后减至零时，可动部分已经超过了平衡位置，因而反作用力矩大于转动力矩，可动部分又将往回偏转，形成可动部分在平衡位置左右来回摆动，这样指针经过一段时间才能稳定在平衡位置上。为了减少可动部分摆动的时间以利于尽快读数，仪表中必须有阻尼装置，用来消耗可动部分的动能，即限制可动部分的摆动。

电工指示仪表中广泛采用如图 1.4 所示的空气式与磁感应式两种阻尼器。

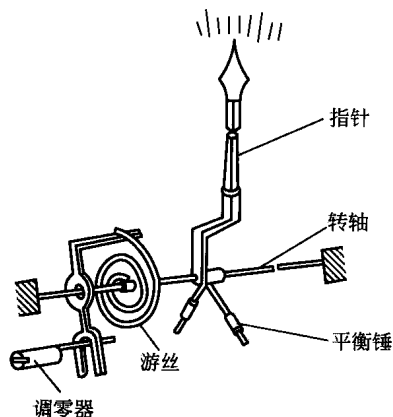


图 1.3 用游丝产生反作用力矩的装置

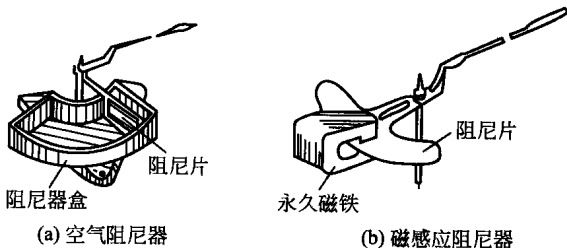


图 1.4 仪表的阻尼器

4) 读数装置

指示仪表的读数装置由指示器与标度盘组成。

(1) 指示器。指示器有指针式指示器和光标指示器两种。指针式指示器用指针指示出仪表的读数，大多数指示仪表采用这种指示器。光标指示器利用光标读数，在这类仪表的可动部分上带有一个很小的反光镜，在仪表内部设置有光源和一套光学系统。由于利用光的多次反射，因此可以使得可动部分的较小偏转变换为相应标尺上的较大的偏转，从而大大提高了仪表的灵敏度，降低了仪表本身的功率消耗。在光标式检流计中就是采用的这种指示器。

(2) 标度盘。标度盘上带有标度尺，此外还标注有仪表类型、测量单位符号、仪表准确度等级、工作位置等一系列符号，以表明该仪表的技术特性。标度盘上标度尺的长度是与仪表的准确度相适应的。在准确度较高的仪表中，标度尺的下面装有用以消除视差的反光镜。

5) 支撑装置

测量机构的可动部分要随被测量的大小而偏转，因此必须有支撑装置。常用的支撑装



置有轴尖轴承支撑方式和张丝弹片支撑方式两种。
如图 1.5 所示为测量机构的支撑装置示意图。

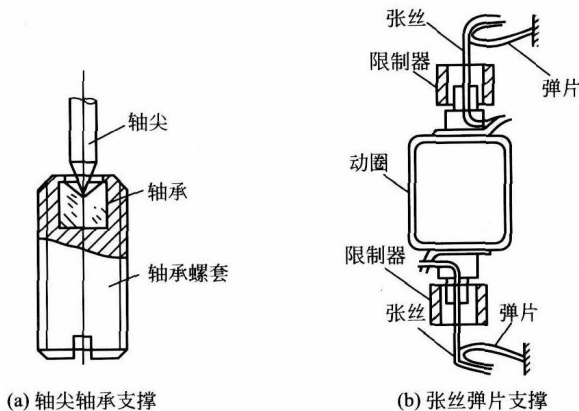


图 1.5 测量机构的支撑装置

1.2.3 电工仪表的表面标志

电工仪表的表盘上有许多表示其基本特性的符号标志。根据国家标准的规定，每一只仪表必须有表示测量对象的单位、准确度等级、工作电流的种类、相数、测量机构的类别、使用条件组别、工作位置、绝缘强度、试验电压的大小、仪表型号和各种额定值等标志符号。

常用电工仪表和附件的表面标志符号见表 1-2。

表 1-2 常用电工仪表和附件的表面标志符号

测量单位的符号		测量单位的符号	
名称	符号	名称	符号
千安	kA	赫 [兹]	Hz
安 [培]	A	太欧	TΩ
毫安	mA	兆欧	MΩ
微安	μA	千欧	kΩ
千伏	kV	欧 [姆]	Ω
伏 [特]	V	毫欧	mΩ
毫伏	mV	微欧	μΩ
微伏	μV	库 [仑]	C
兆瓦	MW	毫韦	mWb
千瓦	kW	毫韦/米 ²	mT
瓦 [特]	W	位法	μF
兆乏	Mvar	皮法	pF
千乏	kvar	亨 [利]	H
乏	Var	毫亨	mH
兆赫	MHz	微亨	μH
千赫	kHz	摄氏度	℃

常见电工仪表的表盘主要符号和字母的含义见表 1-3。