

21世纪高等学校规划教材



DIANLU SHIYAN
ZONGHE JIAOCHENG

电路实验综合教程

胡 钊 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

21世纪高等学校规划教材



电路实验综合教程

主编 胡 钊

编写 文康珍 孔 峰 李 玲

夏俊峰 李红玲



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书按照国家教育部工科电工课程教学指导委员会关于电路课程及电路实验教学的基本要求编写而成。全书分为两篇,第一篇为电路实验基本知识,包括电气测量的基本知识、实验数据的记录与分析处理、电路实验常用测量仪器与仪表、PSpice 电路仿真软件等五章;第二篇为电路实验,共包含 22 个电路操作实验和 8 个 PSpice 电路仿真实验,这些实验分属六章,即直流电路实验、正弦交流电路实验、动态电路实验、有源电路实验、二端口网络实验和 PSpice 电路仿真实验。

本书着重反映近年来电路实验教学改革成果及现代电工测量新技术的应用。全书内容组织合理、概念准确、叙述清楚、文字流畅,非常便于自学。本书既可用于高等院校电路实验课程的教材,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验综合教程/胡钊主编. —北京:中国电力出版社, 2015.4

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5123-5296-4

I. ①电… II. ①胡… III. ①电路—实验—高等学校—教材
IV. ①TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 071639 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 4 月第一版 2015 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14 印张 332 千字

定价 28.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

培养较强的实践动手能力,提高实验技能,进行科学研究方法的基本训练是电气教育的重要内容。电路实验课程是电类专业重要的基础性的实践教学课程,也是一门操作性很强的课程,它以电工理论、仪器和仪表知识、应用物理为实践基础,侧重于学生基本实验技能的培训及综合实验能力的提高,是电类专业技术人才培养的重要环节。

本书介绍了电工测量技术的基础理论知识,使学生进一步熟悉常用电工测量仪器、仪表的工作原理,并掌握电路测量的基本方法,有助于培养和训练学生电工实验的技能。通过本课程的学习,学生不仅可巩固和深入理解已学的电路基本理论,而且能通过所掌握的电路实验的经验和初级技能,为后续课程的实验及今后从事专业技术工作和科学研究奠定良好的基础。

本书按照国家教育部工科电工教学指导委员会关于电路课程及电路实验教学的基本要求编写,共分为两篇,分别为电实验基本知识和电路实验。第一篇包含五章,介绍电路实验必备的知识,是电路实验课程的基础,同时也是其他实验课程及理论课程的基础;第二篇包含六章,是整个电路实验课程的动手操作部分,共包括22个电路操作实验和8个PSpice电路仿真实验,按照逐步培养学生独立实验能力的原则,将实验内容紧密联系,将所用仪器设备大致相通的若干个实验组合在一起,形成实验模块,共分为直流电路、正弦交流电路、动态电路、有源电路和二端口网络五个实验模块。这些实验可分为两种类型,一种是基本实验,用于熟悉常用仪器和仪表的工作原理和操作方法,验证电路理论中的重要概念,学习、掌握电路的基本测试方法和电工实验的基本技能;另一种是设计性、开放性和综合性实验,由学生根据实验任务自行拟定实验方案、选择实验方法,自主完成实验,旨在进一步锻炼学生的实验技能,提高其独立进行实验的能力。本书的实验数量较多,各院校可按照电路实验课的学时和具体的教学要求进行选用。各实验所用的仪器设备和电路参数可根据所在实验室的情况选配。

本书由胡钊担任主编,参与编写的还有文康珍、孔峰、李玲、夏俊峰、李红玲。其中,第一、二、三章由胡钊编写,第四、五章由文康珍编写,第六、十一章由李玲编写,第七、八章由孔峰编写,第九章和附录一由夏俊峰编写,第十章和附录二由李红玲编写。全书由胡钊负责统稿和校订。

在本书的编写过程中,编者参考了很多国内外实验教材,其中包括李小陆、胡钊编写的《电路实验》,谨向这些作者致以深深的谢意。此外,武汉大学电气工程学院“电路”课程组的全体教师以及唐炬、刘开培、查晓明、刘涤尘、阮江军、常湧等有关专家提出了很多宝贵的建议,在此向他们一并表示衷心感谢。

限于编者水平,书中难免存在不妥之处,衷心希望读者对本书提出宝贵的修改意见。

编者

2015年1月

目 录

前言

第一篇 电路实验基本知识

第一章 电路实验概述	1
第一节 电路实验的预备知识	1
第二节 实验报告要求	3
习题	5
第二章 电气测量的基本知识	6
第一节 测量的基本概念	6
第二节 测量手段	7
第三节 电气测量技术的发展概况	7
第四节 电气测量的主要量	10
第五节 基本电参量的意义及表示	11
第六节 电气测量的计量单位制	11
第七节 测量误差的基本概念	15
习题	23
第三章 实验数据的记录与分析处理	24
第一节 实验数据处理的基本知识	24
第二节 实验数据的处理方法	26
第三节 间接测量时误差的估算	41
习题	43
第四章 电路实验常用测量仪器与仪表	45
第一节 电测量指示仪表	45
第二节 万用表	51
第三节 绝缘电阻表	59
第四节 钳形电流表	59
第五节 函数发生器	61
第六节 通用示波器	64
第七节 直流稳压电源	76
第八节 旋转式电阻箱	78
习题	79

第五章 PSpice 电路仿真软件	80
第一节 PSpice 软件简介	80
第二节 PSpice 软件的组成、应用范围和分析功能	81
第三节 PSpice 软件的使用	83

第二篇 电 路 实 验

第六章 直流电路实验	100
实验一 基本电工仪表的使用及伏安特性的测量	100
实验二 基尔霍夫定律的验证	105
实验三 特勒根定理的验证	107
实验四 叠加定理、齐性定理与替代定理的验证	109
实验五 互易定理的验证	111
实验六 电压源与电流源的等效变换	113
实验七 线性有源一端口网络等效参数的测量	117
第七章 正弦交流电路实验	121
实验一 正弦交流电路参数的测量	121
实验二 荧光灯电路与功率因数的提高	125
实验三 最大功率传输定理的验证	128
实验四 双踪示波器(模拟)的构成、工作原理及操作	131
实验五 RC 无源滤波电路频率特性的测量	134
实验六 RLC 串联谐振电路的测试	138
实验七 耦合电路参数的测量	142
实验八 单相变压器特性的测试	146
实验九 三相交流电路电压、电流和相序的测量	152
实验十 三相电路功率的测量	157
第八章 动态电路实验	162
实验一 一阶电路的响应测试	162
实验二 二阶电路的响应测试	167
第九章 有源电路实验	172
实验一 运算放大器和受控源的实验分析	172
实验二 负阻抗变换器的实验分析	177
实验三 回转器的实验分析	181
第十章 二端口网络实验	188
第十一章 PSpice 电路仿真实验	193
实验一 直流电路工作点分析和直流扫描分析	193
实验二 正弦稳态电路分析和交流扫描分析	194
实验三 一阶动态电路的研究	195
实验四 频率特性和谐振的仿真	196

实验五	三相电路的研究·····	199
实验六	受控源电路的设计·····	200
实验七	负阻抗变换器电路的设计·····	202
实验八	回转器电路的设计·····	203
附录一	基本电子元件的识别·····	206
第一节	简述·····	206
第二节	电阻器和电位器·····	206
第三节	电容器·····	209
第四节	电感器·····	210
附录二	DGX-1 型电工技术实验装置 ·····	212
第一节	DG01 电源控制屏操作使用 ·····	212
第二节	基本实验组件挂箱·····	213
参考文献	·····	215

第一篇 电路实验基本知识

第一章 电路实验概述

第一节 电路实验的预备知识

电路实验,就其内容而言,一般分为四类,即验证性实验、训练性实验、综合性实验和设计性实验。

验证性实验和训练性实验是针对电路基础理论而设置的,其目的是使学生对重要的基础理论获得深刻的感性认识,同时掌握测量仪器的工作原理和规范使用方法,熟悉常用元器件的性能,掌握其参数的测量方法和使用方法,掌握基本实验知识、基本实验方法和实验技能。此外,培养学生一定的接线、测试、分析和故障查找等技能。

综合性实验主要侧重于对一些理论知识的综合应用和实验的综合分析,其目的在于培养学生综合应用理论知识的能力及解决较复杂实际问题的能力,包括实验理论的系统性、实验方案的完整性、可行性、元器件及测量仪器的综合应用等。

设计性实验既有综合性又有探索性,主要侧重于某些理论知识的灵活应用,要求学生在教师的指导下独立查阅资料、设计方案并进行实验。显然,这类实验对提高学生的科学实验能力等是十分有益的。

电路实验课程是进入专业基础学习阶段的第一门实验课程。为什么要开设这门课?怎样学好这门课?这些问题可以从学习该课程的意义、目的、方法、注意事项等方面来讨论。

一、电路实验课程的基本意义

在大学学习阶段,学生可能会产生下列困惑:在理论课的学习过程中,课上听讲、课后消化、完成作业已是传统的模式,在建立接受理论知识的主动性和自觉性的同时,现在所学的知识究竟用在哪里?随着专业基础课程及专业课程的深入,课程内容的涉及面扩大,跳跃性增强,在学习过程中如何寻找重点,如何归纳所学知识已成为困扰学生的问题。

市场经济体制迈入 21 世纪,如何在这种环境下定位,主要取决于一个人的综合能力。这种能力不仅表现在是否具有扎实的理论基础,更表现在对实践的认识和动手能力方面,并且在进入社会之前就应该具有一定的综合能力。

工科专业的学习课程中包含了较多的实验课程。但在传统观念的影响下,实验课程的重要性易被人忽视。实验课程似乎只是为了巩固理论知识、验证定理、观察现象。这种重理论轻实验、放松对动手能力培养的结果是所学理论知识往往与社会需求不相适应。目前,这一问题得到逐步重视,并不断采取相应措施改进,各高校都在加强实践教学环节。

电路实验课程是一门培养电气专业学生综合知识及实际技能的入门课程,侧重于在实验室这个模拟现场的环境下,通过操作仪器设备对各种不同电路进行测试,从而认识客观世界

和电路规律,并运用理论知识分析和解决实际问题,为后续各门课程的学习及今后的工作建立良好的基础。

二、电路实验课程的目的

通过电路实验课程的学习应达到下述目的:

(1) 培养学生实事求是、一丝不苟、严格、严密、严谨、认真的科学态度和作风,养成良好的实验习惯。

(2) 培养正确连接线路和基本的实验技能,如正确熟练使用常用的电工仪器、仪表,掌握基本的电工及电气测量技术、电路测量的基本方法及数据的分析处理等。

(3) 培养认真观察、分析及研究电路物理行为的能力。

(4) 培养学生通过实验分析问题和解决问题的能力,以巩固和扩展所学到的理论知识。

(5) 学会编写合格的实验报告。

三、电路实验课程的学习方法

实验课程以互动形式展开,强调理论与实践的结合。实验课程以实验操作为中心,可划分为课前预习、教师指导、实验操作、总结归纳及编写实验报告,以及实验报告的批改及反馈五个部分。

1. 课前预习

实验能否顺利进行并收到预期的效果,在很大程度上取决于课前预习是否充分。根据实验课程的安排,学生需在上实验课之前认真阅读实验教材的指导内容及相关理论知识,理解实验内容,明确实验目的,掌握实验原理及实验方法,熟悉实验过程,牢记实验要求及注意事项。如果是探究性实验,还需根据实验要求进一步制订实验方案、实验步骤、测量数据记录格式,并通过理论分析和仿真,对实验过程中的现象及结果做到心中有数。课前预习工作做到位,可以使实验课堂学习达到事半功倍的效果。

建议在实验之前提出以下几个问题(并将其答案列出):

(1) 本次实验要做什么?

(2) 本次实验要怎么做?

(3) 实验完成后的效果如何?

实验前完成实验预习报告,思考实验指导书习题,带着探究性的疑问进实验室。

2. 教师指导

实验操作过程是实验课程中一个实用性、操作性很强的环节,有些实验还伴有一定的危险性,所以每次实验课开始,教师都会以演示文稿课件及实验演示的方式对本次课程进行讲授,使学生对实验原理、操作要点、测试方法、注意事项、相关知识等方面有更清楚的认识。在这个过程中,学生应该抓住重点,理解自己课前预习碰到的疑问,及时提出自己的问题,教师则予以解疑。这种与实际紧密结合的直接传授方式更有利于学生对知识的掌握。

3. 实验操作

实验操作就是一个将预定的实验方案付诸实施的过程。在此过程中,不仅要完成实验任务,最重要的是要锻炼实际动手能力,并养成严谨的工作习惯,同时逐渐积累实践经验,为将来设计电路奠定基础。在该过程中,要做到勤思考、勤动手、勤观察,要善于发现问题、思考问题并解决问题,并对其中的原始测量数据及出现的问题做详细的记录。

根据实验的任务,按照实验电路在断电的状态下接好线路。接线前,首先了解各种仪器

设备和元器件的额定值、使用方法和电源设备的情况，接线可按照先串联、后并联的原则，先接无源部分，再接电源部分，两者之间必须经过开关。

对于接线情况，经自查无误后请指导教师复查并准许后方可通电、调整、测试。根据观察和测试的结果，把测试数据记录在原始表格中。在实验操作全部完成，且复核测试数据及结果无误后，经指导教师同意方可在断电状态下拆除线路。整理好所用的实验设备，打扫好环境卫生后，再离开实验室。

实验操作过程是实验中最重要的一环，学生不要忙于接线、测试不要抢快，更不要盲目操作。当设备不正常或可能存在不安全的隐患时，要及时断开电源并把情况报告教师。

4. 总结归纳及编写实验报告

这个环节是对实验结果进行理论分析，并通过与理论值进行比较，分析两者的差异，找出原因，得出结论。具体工作如下：明确实验目的，掌握并巩固实验方法，对原始测量数据进行整理，对实验结果进行分析，对实验方法进行归纳、改进并找出实验成功或失败的原因，对实验过程中遇到的困难及问题进行思考和总结，最后，把实验总结所得结果以实验报告的形式反馈给教师。

实验报告是学生平时成绩的重要依据，实验后学生应该在规定的时间内，根据格式要求，用统一的实验报告纸，按时编写并提交实验报告。

5. 实验报告的批改及反馈

教师对学生提交的实验报告进行审阅批改，并把存在的问题在报告上注明及时反馈给学生。学生在拿到批改后的实验报告后，应结合存在的问题重新回顾实验内容，加深对实验的理解。

四、电路实验课程的注意事项

电路实验课程自始至终都离不开电，必须对用电予以特别重视，切实保证人身和设备的安全，杜绝事故发生。在实验过程中，应严格按照以下规程进行操作：

(1) 熟悉实验室的环境，熟悉仪器设备的带电部分，熟悉实验操作的规章制度。清楚实验所用设备的型号、规格，特别注意它们的量程或额定值，并熟悉其接线和使用方法。不可随意搬动仪器。

(2) 不得擅自接通电源，在不了解设备性能和用法的情况下，不可使用该设备。只有在电路、仪器连接正确并检查无误后，方可开启电源通电。在电路通电的情况下，不准擅自离开实验台。线路连接好后，拿走多余或暂时不用的导线，以避免不必要的短路。

(3) 实验中遵循“断电状态接线、检查合格通电、断电状态拆线”的操作程序。严禁带电改、接线路或带电更换量程。线路通电时，身体不可触及线路中带电的裸露部位。

(4) 谨防电容器间放电。电容通电时，与电容保持一定距离，尤其是容值较大的电容，因为电容极性接反或耐压等级不够被击穿时，带电电容会发生放电现象，易造成安全事故。

(5) 实验时，若发现电子元器件有异常现象，如过热、异味、冒烟等，应立即断开电源，并报告指导教师及时处理故障。

第二节 实验报告要求

利用规范的实验报告纸编写实验报告，实验报告分为三部分：预习部分、实验操作部

分、实验结果部分。

电路基础实验可以分为验证性实验和设计性实验。验证性实验指实验者已具有与实验相关的知识和经验的基础，在实验过程中通过观察和操作，验证并巩固所学知识，同时培养实验技能的实验方式；设计性实验指给定实验目的和实验条件，由实验者自行设计实验方案并加以实现的实验，其目的在于激发实验者学习的主动性和创新意识，培养实验者独立思考、综合运用知识和文献、提出问题和解决复杂问题的能力。因此，实验的性质不同，对实验报告的要求也不尽相同。

一、验证性实验报告

1. 实验预习报告内容

对于实验预习报告，要求必须包括以下几方面内容：

(1) 实验名称。

(2) 实验目的：明确通过该实验要达到什么目的，要验证什么理论，需要通过测量什么参数来验证该理论。

(3) 实验原理：仔细阅读实验教材及相关理论文献，清楚实验所要验证的理论和实验中测量方法所依据的基本原理。

(4) 实验仪器设备：使用仪器之前，要仔细阅读有关的仪器使用说明，掌握其使用方法。

(5) 实验内容、步骤与电路图：认真分析实验电路，并根据实验内容、步骤，进行必要的计算，仔细考虑测量中有什么要求，并估算各参数的理论值，以便在实验过程中做到“心中有数”。

(6) 思考题的问答：对于实验中提出的思考题，应尽量通过仿真或搭建电路来进行求证，或查找资料进行求解。

(7) 原始数据记录表格：这部分内容是指导教师考证实验结果的依据之一，应保证表格干净、整齐。

(8) 实验操作注意事项：这部分内容要求简洁、明了。因为预习是一个对实验准备的过程，不需要实验者把实验教材原封不动地抄一遍。实验者应该结合自己的理解，用自己的语言简要完成实验预习报告。

2. 实验总结报告内容

实验总结报告是对实验过程的全面总结，是教师评定学生实验成绩的重要依据，必须认真书写，其内容应包括：

(1) 实验数据的处理、误差的计算和误差分析。

(2) 曲线图或波形图的绘制（应使用坐标纸绘制）。

(3) 实验教材中思考题的回答。

(4) 实验结果的总结，包括实验结论（用具体数据和观察到的现象说明所验证的理论），实验现象的解释和分析，实验过程中遇到的困难及其解决方法，对实验的认识、收获及改进意见等。

(5) 实验教材中对总结报告额外提出的其他要求。

(6) 把实验原始数据作为附录页，附在总结报告后面。

二、设计性实验报告

1. 实验预习报告内容

做设计性实验前,实验者必须要明确实验的目的和任务,并在预习阶段设计出实验方案,所以,预习在设计性实验中显得尤为重要。设计性实验预习报告主要包括以下内容:

- (1) 实验名称。
- (2) 已知条件:设计性实验给出的条件,如提供的电子元器件、测量仪器等。
- (3) 主要技术指标:实验要达到的主要技术参数,如频带、增益、信噪比等。
- (4) 实验所需仪器。
- (5) 电路工作原理及电路设计:根据实验的已知条件及主要技术指标给出实验实施方案,包括实验步骤、内容及实验电路图。在此过程中,应仔细查阅并理解相关文献手册,方可提出可行的实验方案。
- (6) 列出实验需测试的技术指标,以便实验时对其测量。

2. 实验总结报告内容

设计性实验总结报告主要包括以下内容:

- (1) 电路组装、调试及测量:电路组装所使用的方法,包括组装的布线图等;调试电路方法和技巧;测试时所使用的主要仪器;测量的数据和波形的记录;列出调试、测量成功后的各元器件的参数。
- (2) 故障分析及解决的方法:在电路组装、调试、测试时出现的故障及其原因和排除方法。
- (3) 测量数据的计算和处理,并对其结果进行讨论及误差分析。
- (4) 思考题的回答。
- (5) 总结设计电路的特点和方案的优缺点,指出课题的核心及实用价值,提出改进意见。
- (6) 列出参考文献。
- (7) 实验的收获和体会。

总之,编写实验报告时,要求思路清晰、文字简洁;图标正规、清楚;尊重实验原始数据,即不可随意涂改原始数据单;计算准确,结论合理,并进行必要的分析与研究。

实验报告一律采用学校统一印制的实验报告纸编写,并于下一次实验时交给指导教师。要求自己完成,切忌抄袭。



习 题

1. 简要说明电路实验报告的基本形式。
2. 如何在电路实验中保障人身和设备的安全?

第二章 电气测量的基本知识

测量是人类用数量概念描述客观事物,进而认识并逐步掌握客观事物本质,揭示自然界规律的一种重要手段。显然,若要对自然界中的客观事物进行定量分析和研究,则必须通过测量来进行。著名俄国科学家门捷列夫说过:没有测量,就没有科学。英国科学家库克也认为:测量是技术生命的神经系统。现代科学技术的飞速发展充分说明测量在其中所起到的重要作用。

在测量技术中,电磁测量近年来有很快的发展,这种技术已经应用到国民经济和科学技术的各个领域,而且各种不同的测量实践与研究又迅速地推动其自身的不断发展。电磁测量技术的特点如下:

(1) 准确度高,目前电磁测量的误差可以达到 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 。

(2) 测量速度快,很容易达到 $10^2 \sim 10^3$ 次/s。

(3) 测量范围广,不但所有的电量、磁量和电路、磁路参数能用电磁测量技术测量,而且很多非电量,如物体的长度、质量、湿度、压力、振动、速度、位移、水位、地震波、飞行高度、潜水深度、人的血压等,也可以先变成与其成函数关系的电磁量或电路参数后,再用电磁测量的方法测量。测量数值的覆盖面非常宽,如用电磁测量的方法测量的电阻值范围为 $10^{-7} \sim 10^{10} \Omega$,甚至更广。

(4) 电磁测量的灵敏度高。例如,用电磁测量的方法可以检测数值小到 10^{-15} A 的电流。

(5) 能比较方便地实现自动测量、自动控制和自动处理实验数据,能够给出数码,易与计算机配合。

电磁测量技术包括三个主要方面:电磁量的测量方法,电磁测量仪器、仪表的设计与制造,电磁量的量值传递。其中,仪器、仪表的发展最能体现电磁测量技术的发展。

第一节 测量的基本概念

测量是定量的基础,也是实验的重要环节。通过测量可以获取所研究对象的各种有关信息,从而总结出客观规律,得出正确的结论。测量就是利用实验的方法将被测物理量与体现计量单位的同类标准量进行比较,得出被测量值是标准值多少倍从而确定被测量大小的一个实验过程。倍数称为等待测量的数值,选做计量标准的已知量称为单位。因此,一个物理量的测量结果必须由两部分组成,即测量单位和与此测量单位相适应的纯数字值,可以表示为

$$X = |X| \cdot x_0 \quad (2-1)$$

式中: X 为被测量,即测量结果; $|X|$ 为测量所得的数字值,即单位的倍数; x_0 为测量单位。

例如,对某一电压进行测量,所得测量结果表示为

$$V_x = 5.0V$$

式中： V_x 为被测电压； V 为电压单位“伏特”；5.0 为测得的数字值，表示被测量是单位值的 5.0 倍。

当然，测量结果也可以用曲线或图形等方式来表示，但它们同样必须包含具体的数值与单位，两者缺一不可，因为没有单位的数值是没有物理意义的。

第二节 测 量 手 段

常见的测量手段有以下四种：

(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、电源设备及各种辅助设备，如电压表、频率表、示波器等。

(3) 测量装置：由若干台测量仪器及有关设备所构成的整体，用于完成某项测量工作。

(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，用于多种参量的综合测试。

在实际测量中，有时会同时用到多种测量手段。

第三节 电气测量技术的发展概况

电气测量技术的发展主要体现在测量仪表发展与创新上。电气测量仪表至今已经发展到第三代。

第一代仪表是模拟式仪表，也称为指针式仪表。19 世纪 20 年代前后，由于发现“电流对磁针有力的作用”，相继制造出了检流计、惠斯登电桥等最早的电气指示仪表。1895 年，设计制造出世界上第一台感应系电能表。20 世纪 40~50 年代，由于使用了新材料，电气仪表在准确度方面有所提高。20 世纪 60 年代出现的电磁系、电动系和磁电系模拟式仪表具有结构简单、工作可靠和价格便宜等优点，这类仪表在电气测量中至今仍被广泛使用。

第二代仪表是数字式仪表。20 世纪 50 年代初，电子技术的进步为电气仪表的发展提供了极大的支持。1952 年，世界上第一块电子管数字式电压表问世。20 世纪 60 年代，生产出品体管数字式电压表。20 世纪 70 年代，研制出中、小规模集成电路的数字式电压表。近年来，又相继推出了由大规模集成电路和超大规模集成电路构成的数字式电压表，它们的特征是高准确性、高可靠性、高分辨率等。作为数字式仪表的核心，数字式电压表已被广泛应用于电气测量领域。

第三代仪表是智能式仪表。这种仪表能随外界条件改变而具有正确的反应能力。目前，由于电子技术、计算机和信息处理技术的综合应用，电气测量技术正向自动化、智能化方向迅猛发展。特别是由于传感器技术正向智能化、集成化、小型化、高精度方向发展，因此可以比较方便地将各种非电量转换成电信号，再利用电气仪表进行测量，进一步扩大了电气测量的范围。因此，电气仪表在非电量测量中也得到了广泛的应用。

一、电气测量的过程

测量过程有三个重要因素,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历经以下三个阶段:

(1) 准备:在对测量对象的性质、特点和测量条件仔细分析的情况下,根据对测量结果的准确度要求选择恰当的测量方法和测量设备,从而拟定出测量过程及测量步骤。

(2) 实施测量:在了解测量设备的特性与使用方法的前提下,按照已拟定出的测量过程及测量步骤进行测量,科学而实事求是地记录数据。

(3) 数据处理: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,对测量结果估计值的不确定度作出合理的评定。

同一个物理量的测量值,可以通过不同的测量方法获得,因此,正确选择测量方法,直接关系到测量结果的可信程度,也关系到测量方案的经济性和可行性。采用不正确的测量方法,即使利用了先进的精密仪器,也不会得到正确的测量结果。

二、电气测量的基本方法

实际测量所采用的具体方法是由被测量的参数类别、量值的大小、进行测量所需的条件、所要求的测量准确度、测量速度的快慢及其他诸多因素决定的。因此,每个物理量都可以用具有不同特点的多种方法进行测量。

对测量方法进行分类的主要目的是明确测量方法的特征,以便正确地选择测量方法。测量方法的分类形式很多,一般可以按测量结果的获得方式分类、按测量读数的获得方式分类、按测量性质分类及按测量条件分类。

1. 按测量结果的获得方式分类

按测量结果的获得方式不同,又可将测量细分为三类,即直接测量、间接测量和组合测量。

(1) 直接测量:由所用测量仪器仪表直接测得被测量数值。例如,用电压表测量电压,用电流表测量电流,用电桥测量电阻,用米尺测量长度,用天平称衡质量,用温度计测量温度等都是直接测量。该方法测量过程简单、快捷。一个电量能否直接测量并不是绝对的,随着科学技术的飞速进步,测量仪器不断得到大幅度的改进,因此,过去很多只能间接测量到的量,现在可进行直接测量。例如,电能原本只能间接测量,但现在可通过电能表进行直接测量。

(2) 间接测量:先由测量仪器、仪表的读数经若干次直接测量测出与被测量有关的几个中间量,然后按照一定的函数关系经计算而求得被测量的数值。例如,要测量电阻和电功率,可先直接测出电流和电压,然后通过欧姆定律和功率公式进行计算,得出电阻和电功率。其中,电流和电压是直接测量量,电阻和电功率是间接测量量。该方法测量过程复杂费时,一般应用在三种情况,即直接测量不方便,或间接测量比直接测量的结果更为准确,或没有直接测量的仪表。

(3) 组合测量:若被测的未知量与某个中间量的函数关系式中还有其他未知量,那么对中间量的一次测量还无法求得被测量的值,这时可以通过改变测量条件,测出不同条件下的中间量数值,写出方程组,然后通过解联立方程组求出被测量的数值。组合测量也适用于同时测量一个函数式中的多个被测量。例如,要测量电阻温度系数 α 和 β ,必须在不同温度条件下,分别测出 20°C 、 t_1 、 t_2 三种不同温度时的电阻值 R_{20} 、 R_{t1} 、 R_{t2} 然后通过解联立方程,

求得 α 和 β 的值。

$$R_{t1} = R_{20} [1 + \alpha(t_1 - 20^\circ\text{C}) + \beta(t_1 - 20^\circ\text{C})^2] \quad (2-2)$$

$$R_{t1} = R_{20} [1 + \alpha(t_2 - 20^\circ\text{C}) + \beta(t_2 - 20^\circ\text{C})^2] \quad (2-3)$$

若式 (2-2)、式 (2-3) 中 t_1 、 t_2 、 R_{20} 、 R_{t1} 、 R_{t2} 为已知, 将这些值带入式 (2-2)、式 (2-3), 即可求出 α 和 β 的值。

在测量两个或两个以上相关的未知量时, 通过改变测量条件而获得一组含有测量读数和未知数的方程组, 求解进而获取测量结果。例如, 电阻温度系数 (一次、二次) 的测量。此法结合计算机计算求解是比较方便的。

2. 按测量读数的获得方式分类

按测量读数的获得方式不同, 又可将测量细分为两类, 即直读测量和比较测量。

(1) 直读测量: 从测量仪器、仪表的指示直接获取读数。该方法过程简单, 但一般准确度较低。

(2) 比较测量: 把被测量与同类的标准量进行比较, 根据比较的结果推算出测量读数。比较典型的比较测量法有零值测量法、差值测量法和替代测量法。

1) 零值测量法。被测量与已知量进行比较时, 两种量对仪器的作用相消为零的方法称为零值法。例如, 用电桥测电阻, 具体电路如图 2-1 所示, 当调节电阻 R_0 使电桥公式 $R_z = \frac{R_1}{R_2} R_0$ 保持恒等时, 指零仪表 P 的读数为零。被测电阻 R_z 可由 R_1 、 R_2 、 R_0 值求得。由于比较中指示仪表只用于指零, 因此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。天平测质量就是一种零值法的实例。

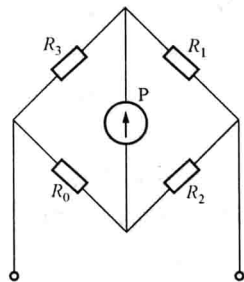


图 2-1 零值测量法测电阻

2) 差值测量法。差值测量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。差值测量法实际上是一种不彻底的零值测量法。例如, 用电位差计测量电池的电动势值 E_z , 如图 2-2 所示。图中 E_0 为已知量, 是标准电池的电动势, 在这里作为度量器。电位差计可以测出被测量 E_z 与已知量 E_0 的差值 δ , 然后根据 E_0 和差值 δ 求得被测量 E_z , 通常差值 δ 仅仅是被测量的很小一部分。例如, δ 为 E_0 的 $1/100$, 若差值 δ 在测量中产生 $1/1\,000$ 的误差, 则反映到被测量 E_z 中, 产生的误差仅为 $1/10^5$ 。

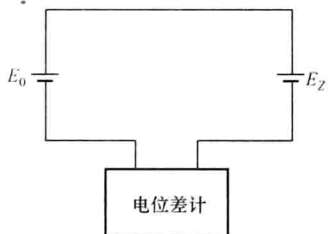


图 2-2 差值测量法测电动势

3) 替代测量法。替代测量法是将被测量与已知量先后两次接入同一测量装置, 若两次测量中测量装置的工作状态保持不变, 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。显然, 若要做到完全替代, 已知标准量最好是连续可调的, 这样才能通过调节使测量装置的工作状态保持不变。采用这种方法, 若前后两次测量相隔的时间很短, 并且又是在同一地点进行, 则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, 故测量误差极小, 准确度几乎取决于标准量本身的误差。

比较测量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比较式测量设备。在数字测量技术中,常用三步测量、自动校零和迭代等方法,它们都是以比较测量法为理论基础的。

3. 按测量性质分类

按测量性质不同,测量细分为三类,即时域测量、频域测量和数据域测量。

(1) 时域测量:也称为瞬态测量,主要是测量被测量随时间变化的规律。例如,用示波器测量脉冲信号的上升沿、下降沿、过冲、平顶跌落、脉冲宽度等。

(2) 频域测量:也称为稳态测量,主要是测量被测量随频率变化的规律。例如,用频谱分析仪测量信号的频谱;用函数分析仪测量单元电路的幅频特性、相频特性等。

(3) 数据域测量:也称为逻辑量测量。例如,用逻辑分析仪测量数字电路的逻辑状态、时序等。

4. 按测量条件分类

按测量条件不同,又可将测量细分为两类,即等精度测量和不等精度测量。

(1) 等精度测量:在测量条件完全相同(同一观察者、同一仪器、同一方法和同一环境)的情况下的重复测量。在等精度测量中,各重复测量值可能不相等,但没有理由认为哪一次(或哪几次)的测量值更可靠或更不可靠。实际上,没有绝对不变的人和物,只要其变化对实验的影响很小以至可以忽略不计,就可认为是等精度测量。一般所说的对一个量的多次测量,均是指等精度测量。但应注意的是,重复测量一定是重复进行测量的整个操作过程,而非只是重复读数。

(2) 不等精度测量:在测量条件不同(如观察者不同、仪器改变、方法改变、环境变化等)的情况下对同一物理量的重复测量。例如,用游标卡尺和千分尺测同一钢球的直径,由于两仪器的精度不同,所测结果为不等精度测量。类似地,应用不同量程的电流表测量电流,所测结果也为不等精度测量。

实际上,电气测量方法还可以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。但是最为常用的分类方法只有两种,即按测量结果的获得方式分类和按测量读数的获得方式分类。

电气测量的方法多种多样,对某一被测量的量,常不限于采用一种方法。例如,测量电阻值有伏安法、电桥法,也可用万用表来测量。每一种方法都有其优点和缺点,需要根据具体条件,采用合适的仪器、仪表和合适的方法来进行测量,尽可能方便地获得准确的测量结果。

第四节 电气测量的主要量

电气测量的主要量有以下六种:

(1) 元器件参数:如电阻、电感、电容、阻抗、互感、品质因数、损耗率、二端口网络参数等。

(2) 电量:如电流、电压、功率等。

(3) 信号特征量:如频率、周期、相位、幅度、调制系数、逻辑状态、失真度等。

(4) 电子设备参数:如通频带、增益、衰减量、灵敏度、信噪比等。