

电 路 测 试 基 础

杨焯成 胡咏芬 编

宋开礪 审

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 9 8 年 · 北 京

(京)新登字063号

内 容 简 介

本书是为适应我国高等工程教育与教学改革形势,对传统的电路实验教学体系进行改革而编写的。其主要内容有电工类与电子类专业共同需要的基本技术理论、实验技能及实验内容。该书具有强弱电相结合的特点,基本技能训练实验有21个;并有10个较接近工程实际的综合设计实验及电路的计算机辅助分析上机实验。

本书可作全日制电类专业(电工、电子、信息及自动控制等)本、专科电路实践教学的教材或电路实验教材;也可作全日制其它电类和非电类专业及职大、函大的《电工基础》、《电工学》实验课的教材,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路测试基础 杨焯成,胡泳芬编. —北京:中国铁道出版社,
1998.4

ISBN 7-113-02921-3

.电... . 杨... 胡... .电路—测试技术 . TN707

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第06166号

书 名: 电路测试基础

著作责任者: 杨焯成 胡泳芬

出版·发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑: 刘波

责任编辑: 刘波

封面设计:

印 刷: 中国铁道出版社印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15.25 字数: 381千

版 本: 1998年4月第1版 1998年4月第1次印刷

印 数: 0001— 册

书 号: ISBN7-113-02921-3/TN-111

定 价: 23.30元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

传统的电路实践教学体系是由《电气测量技术》(或《电工量计》)课程和《电路》的实验教学及电工实习等三部分组成。这一教学体系已不适应世界科学技术日新月异进步的形势和我国现代化建设高速发展对人才的需求。我国社会主义市场经济体制的建立与发展,要求学校培养具有较宽广而又坚实的基础理论、能跟踪世界科学技术发展、具有一定专业知识和技术的富有进取精神与创造力的高素质人才。

为了使电路实践教学体系能适应新的形势,在高等工程教育与教学改革中,从避免课程内容重叠、缓解课时紧张,更重要的是从有利于培养能自觉地应用理论指导实践、强化基本技能训练和素质培养、为培养高素质人才打下良好的基础考虑,我们经过教学内容与课程体系改革的研究与实践,设置了新的《电路测试技术》课程取代原有的电路实践教学体系。根据国家教委工科电工课程教学指导委员会提出的电工课程的基本要求、秉着高等教育教学改革的精神、结合我们多年的教学实践经验,制定了该课程的教学大纲;编写了《电路测试技术》讲义。经几届教学实践后,在总结经验的基础上编写而成《电路测试技术》一书。

本书共分12章,31个实验。前4章分别介绍电路测试技术的基本知识、常用电测量仪表与常用电子仪器设备及其使用方法、常用电路元器件及设备,有4个实验。后8章分别介绍直流电路测试技术、正弦稳态电路测试技术、网络与信号的频域测试、双口网络的测试、三相交流电路的测试、动态电路测试、电路的计算机辅助分析、电路故障检测与排除和综合性与设计性实验,有27个实验(其中包括5个上机实验)。

本书的特点是:

1. 理论与实践紧密结合,有利于理论指导实践。本书包括基本实验技术理论、基本实验技能、实验内容及计算机辅助分析等完整的、系统的内容。在介绍了实验技术理论与测试技术之后,即安排进行相应的实验,使理论与实践紧密结合,有利于培养用新学理论知识指导实践的科学行为和习惯。

2. 突出强弱电结合的特点,因此,本书可作为电工类、电子信息类专业电路测试技术实践教学的教材或电路实验教材,还可供从事电气工程、电子信息工程的技术人员、实验技术人员阅读或参考。

本书加强了电类(包括电工类,电子类)各专业共同需要的、基本的、核心的内容。但篇幅力求简短,如常用电工仪表与常用电子仪器设备的工作原理及其使用方法、基本电路元器件的实际知识与其检测、基本电量的测试技术及相关实验内容、正确进行实验操作、实验数据的读取与处理、误差分析与测试结果的确定及其评价等等;还加强了网络与信号的频域测试、双口网络的测试等内容,突出了强弱电结合的特点。然而对验证性实验内容

有所压缩。这样做旨在使本书能适应于电类各专业(包括电工、电子、信息及自动控制等)学生学习与掌握基本的实际知识和基本技能的训练。

为了初步培养学生的工程意识和工程设计能力、使用计算机能力、开发应用能力及创造精神,本书还有综合性与设计性实验、电路故障检测与排除、电路的计算机辅助分析等内容,这部分内容涉及到运算放大器及用它们来设计、组装成具有一定功能的电路,加深对多端器件与有源网络的认识与理解;而电路的计算机辅助分析内容,其目的是使学生初步了解计算机应用于电路分析的知识及上机操作的基本训练,贯彻学、用计算机“不断线”精神。以上内容能拓宽视野,也能自然地过渡到后续电子技术实践课程的学习。

3. 该书编写力求语言表达准确、流畅、通俗易懂、可读性强、方便自学。为适应高等工程教育与教学改革形势,实践教学应从以提高“动手能力”为目的,转变为素质培养。书的内容编写安排由浅入深、循序渐进;语言叙述既准确、通透,又或详或简。如实验原理、仪器与设备的使用方法,测试技术与测试方法等以讲透、讲清、能覆盖电工类与电子信息类所涉及的基本电量测量为度;而对测量电路、元件参数的选择、仪器的选择及实验步骤等简写或不写。在实验任务与要求明确的前提下,逐步引导学生通过自学去完成实验的全过程。这样,有利于培养自学能力和养成主动吸取新知识的良好习惯。

4. 本书具有不同层次的内容,不仅可供电类本科、专科电路实验教学使用,还照顾到电大、职大及函大相关专业的选用,甚至非电类相关教学也可从中选取到合适的内容。

如前所述,本书既有基本内容,又有层次较高的、较接近工程实际、有一定实用价值的实验内容。而且实验个数多,有些实验其内容也有可供选择的灵活性。用书者可根据自己的实验条件和学时安排选择本书的部分实验,或从某个实验中选取其一部分内容。因此,本书能方便地适合于不同层次不同条件电路实验教学需要。

本书是编者多年从事“电路”及其实践教学和教学改革的成果。全书由杨焯成、胡咏芬主编,杨焯成对全书进行统稿。各章节分工如下:第一章的第一节、第二章由胡咏芬编写,付智辉编写了第一章的第二节至第四节并绘制了本书全部图稿,第三章、第七章、第十一章、第十二章以及这些章的实验、绪论与附录由杨焯成编写,第一章的第五节和第六节、第八章、第十章及这几章的实验由刘子英编写,第四章、第六章由汪庆年编写,第二、四、六章的实验由舒洪编写,第五章、第九章及此两章的实验由张以霞编写。

北方交通大学宋开璠教授审阅了全书,提出了许多宝贵意见;本书的编写工作,得到中国铁道出版社和各院校许多同志的热情帮助和大力支持。还得到南昌大学和华东交通大学有关教研室与实验室的密切配合。在此一并表示衷心感谢。

本书的编写是改革中作的新探索,又由于编者水平所限,编写时间仓促,书中不当之处,敬请读者批评指正。

编者

1997年11月于南昌

绪 论

一、21世纪电类专业人才应具有的知识、能力及素质

世界科学技术迅猛发展，21世纪将进入计算机、微电子和通信工程相结合的信息时代。目前，我国现代化建设事业中，电子技术、通讯、控制与计算机等所谓的“弱电”技术已大量的普遍的渗入到电机、电器、电力、铁道电气化等“强电”工程；呈现出强弱电相结合的特点。知识和信息急剧增加；科学技术日新月异的进步；新旧技术更替周期日趋缩短；我国现代化建设继续向世界开放，吸收世界先进科技与经验及四化建设的高速发展，这就决定了对面向21世纪电类高等工程教育培养人才应具有的知识、能力及素质，所提出的要求及培养目标如下：

1．应具有包括电工技术、电子技术、信息、控制与计算机技术等较宽广而坚实的基础理论知识，以适应多学科间的相互渗透、相互交融及多学科多种技术的综合利用的发展方向。

2．应具有一定的实验技能和使用计算机的能力、工程设计、制造和调试能力、综合应用所学知识分析和解决实际问题的能力，成为具有开拓精神、创造能力的高素质人才，以适应我国四化建设中的研制、运行、教育及管理等多方面需求人才的要求

3．应具有自学的能力和不断进取的精神。从而能不断学习与掌握新科学技术、应用新科学技术，增强对工作内容、工作性质频繁变动的适应能力。

由此可见，面向21世纪的电类高等工程教育不是传统的专才教育，而是一种“素质型”人才的教育。为此，必须加强工程基础学科教育，同时，要特别重视加强能力及素质培养，加强工程师的基本训练。使之毕业后经过一段不长时间的实际工作锻炼，能成为一名合格的电气或电子信息工程师。

二、实践教学环节在面向21世纪高等工程教育中的作用与地位

电工与电子信息学科具有系统的基础理论性，同时还具有显著的工程性与实践性。元器件的特性，电路与系统的特性，除用理论分析进行研究外，另一种重要的研究手段便是实验。通过实际测试来研究元器件、电路与系统的特性。每一个新的、具有专门功能的电路与系统的研制、调试及投入运行，都要经历实际测试阶段。所以，实验在电气与电子信息工程中起着决定性的作用。

电气与电子信息学科的工程性、实践性决定了从事电气工程与电子信息工程技术工作的高级专门人才，无论是从事科研的或教育工作的，还是从事工程技术工作的都不仅要有较宽广而又坚实的工程基础理论知识；易于接受新科技的能力；而且还应具有一定的工程实践知识与能力。这就决定了实践教学环节在电类高等工程教育整体方案中占有极其重要的地位。它是整体教育方案中一个极其重要的有机组成部分；也是当前电类高等工程教育和教学改革的核心问题之一。

面向21世纪电类各专业毕业生应具有的能力和素质应包括以下几个主要方面：

1. 对电气工程或电子信息工程中的部件设备, 电路与系统有研制、生产和运行的基本能力, 发现并解决一般工程实践问题的能力;

2. 应用计算机、微机等进行工程计算及数据处理或作为部件研制新产品, 开发新技术的能力;

3. 具有对相关企业进行技术、生产及质量管理的初步能力;

4. 具有自学, 易于接受新科技的能力;

5. 具有应用外语查阅文献资料, 获得新信息, 了解新科技的能力。

能力与素质的培养贯穿于大学四年整个学习过程, 由所有的教学环节综合培养来完成。主要从理论教学和实践性教学环节两方面来保证实现培养目标。理论教学主要是教给学生解决工程实际问题的方法与思路, 而实践教学则主要是培养和实际训练学生实现上述方法的能力和素质。电工类和电子信息类学科的技术基础课程的理论教学与实践教学对实现能力与素质培养起着基础性、先导性的作用。

三、《电路测试技术》课程的作用与地位及其教学内容

《电路测试技术》课程是电类学生学习的的第一门电类实践性课程。该课程所培养的工程实践知识、基本技能及素质, 是电工类与电子信息类后续各门实践课程共同需要的。因此, 它在专业教学计划中应属于实践性的技术基础课。本课程在总体能力和素质培养方案中的作用与地位, 就决定了本课程的教学内容应由基本实验技术理论、基本实验技能及相关实验内容、电路的计算机辅助分析(CAA)等四部分组成。

1. 基本实验技术理论

电工类与电子、信息类各专业的毕业生, 应学会用理论去指导自己的工程测试实践。《电路测试技术》课程的实验技术理论应包括电气工程与电子、信息工程中涉及到的一般电量的基本测试方法和调试方法; 常用各种电工仪表与设备及常用电子仪器与设备的工作原理与使用方法; 正确操作测试过程以及科学处理测试数据与分析测试结果; 各种电路元器件及具有一定功能的典型应用电路的实际知识; 电路的CAA计算原理等技术理论知识。应用这些技术理论知识直接指导实验过程和实验技能的培养。

2. 基本实验技能

基本实验技能是《电路测试技术》课程的重要组成部分之一。本课程的实验技能在专业培养目标对实验技能的总体要求中属于基础部分。通过本课程的学习与训练, 应使学生得到一定基本技能的训练, 如正确布线和连接电路、焊接、组装、测量与调试, 初步分析和排除电路故障, 正确使用常用电工仪表与设备及常用电子仪器与设备, 查阅手册和资料, 编制小型、专用电路分析程序并上机调试与运行程序等方面是培养电气工程、电子信息工程技术人员必要的基本训练。

3. 实验内容

实验与理论分析是对同一学科进行研究的两种同等重要的手段。《电路》课程是通过理论分析和计算来研究各种类型电路在不同性质的激励下所产生响应的一门课程。而《电路测试技术》课程则是通过各种测试技术和测试方法, 即通过实验的手段来测定各种类型电路在不同性质激励下所产生的响应的一门课程。显然, 这两门课程是对同一领域进行研究。因此, 《电路测试技术》课程的大部分实验内容与《电路》课程的教学内容相同。但

由于两门课程研究的手段和方法截然不同，该两门课程内容体系也就不同，各自在教学计划中的作用也不同，不能相互代替，也不是从属关系。例如，《电路》课程中，用理论分析去研究 RC 电路， RL 电路及 RLC 电路的动态过程，它们各有不同的特性和理论价值，然而《电路测试技术》课程却是通过实验手段来研究，只涉及到动态电流和电压的测试技术与测试方法，因此，只需要选取一种动态电路进行测试。又如：电工仪表测量误差处理的实验、信号源特性的实验、万用表的设计与组装实验等等，这些是本课程特有的实验内容。由此可见《电路测试技术》课程的实验内容绝不是相应理论课的附属内容，而是根据电气工程与电子信息工程中所涉及到的基本电量的测试技术理论与技能，组织相关的实验内容。

另一方面，实验内容也不仅限于验证相应理论的实验内容。根据电工类、电子与信息类专业培养人才的目标与要求，通过四年整个学习过程和实践教学环节的系统训练，以及毕业后经过一段时间的实际工作锻炼，使之成为电气或电子信息工程师。而本课程与其实验内容正是工程师的最基本的训练。为培养学生综合应用所学理论知识，自觉地去分析解决实际问题的能力、培养工程设计能力与独立工作能力，培养开发应用能力与创造性，本课程还有综合性、设计性的实验内容。通过设计出具有一定功能，能达到一定技术指标要求的电路，并制作与装配成实际电路装置，继而调整、测量达到技术指标要求的完整训练过程，从而实现工程师的初步训练。

无疑，面向21世纪的电气工程师，或电子信息工程师必须熟练掌握电路的CAA与CAD(计算机辅助设计)技术。因此，电路的CAA与CAD技能的训练也就成了一项基本功的训练。本课程必须包含其有关内容。

总之，通过对本课程的学习，应掌握电气工程与电子信息工程中所涉及到的基本实验技术理论；同时受到相关的基本技能的训练；培养自学的能力与独立工作能力；通过实践教学过程培养实事求是的科学态度和细致踏实的工作作风。为后续实践性课程的学习、生产实践和科学研究打下坚实的基础。

四、《电路测试技术》课程的学习方法

为了达到本课程的学习要求与目的，在学习过程中应充分注意到以下几方面：

1. 本课程是一门具有一定理论而实践性又很强的课程。而且要用所学到的实验技术理论去指导自己的实验工作。针对学习本课程是在学习了《物理实验》课程之后与《电路》课程同在一学年而时间安排稍滞后于《电路》来进行教学的情况，学习者已具有一定的理论基础和实践训练基础，因此，大部分实验技术理论的学习和实验内容的理解，是通过实验前的预习过程自学的，这不仅可行，而且十分有利于培养自学能力。只要认真预习，就能明确实验任务与要求，理解实验内容，实验过程中适当得到老师的指导就能按要求完成实验任务。然后通过撰写实验报告，总结分析实验结果，从理论上提高对所做实验的认识。其实整个过程也是培养独立工作能力的过程。因此，本课程的学习规律是：主要通过自学来学习实验技术理论知识，课堂教学以实验为主。每个实验都要经历预习、实验和总结三个阶段。而每个阶段均有明确的任务与要求。

预习：其任务是明确实验目的、内容与要求；测试方法与原理；实验中应注意的问题；并拟定出实验方案与步骤，画出记录数据表格等。一般还要对实验结果进行定量或定性分

析，得出理论计算结果或作出估计。以便在实验时可以及时检验结果的正确性。若为上机实践，应根据电路分析的算法原理及框图，编制好程序。

实验：实验时按预习所拟定的测试方案进行测试，或上机输入自编程序，调试并运行程序。实验过程既是完成测试任务的过程，又是锻炼实验能力和培养实验作风的过程。实验过程中，既要动手，又要动脑。认真观察实验现象和正确读取数据，作好原始数据的记录，培养实事求是的科学态度。沉着、细心地分析与解决实验中所遇到的各种实际问题。

总结：在完成实验测试后，整理实验数据，正确绘制实验曲线，对测试结果作出初步分析与解释，总结实验收获与体会。写出符合要求的实验报告或上机报告。

按要求完成总结任务，有助于培养总结归纳能力和编写实验报告能力。总结作得如何，对决定实验收获的大小起着重要的作用。

2．要注意养成自觉地、主动地应用已学理论知识指导实验进行及实验后的总结。

要从理论上分析测试电路的工作原理与特性、可能出现的实验现象及实验中存在产生误差的原因等，再制订测试方案；实验中根据观察到的实验现象进行理论分析后确定调试措施；实验结果是否合乎理论逻辑及其与理论值的差异，如何确定实验结果及评价其正确度、或精密度、或准确度等等都要从理论的高度来进行分析。

3．注意实际知识与经验的积累。

许多实际知识和经验靠实践过程中长期积累才能丰富起来。实验中所用仪器与元器件，它们的型号，规格及参数，使用方法等要记录下来。实验中出现的各种现象与故障等要记住它们的特征，排除的办法。特别是实验中的经验教训，要进行认真总结。积累的文字资料，不仅实验时有用，而且是十分宝贵的资料，可供以后查阅。

4．要充分发挥自己的主观能动性，自觉地有意识地锻炼自己独立工作的能力。

实验预习、实验操作过程及实验总结所碰到的各种问题，力求自己通过自学解决，不要依赖老师指导，要有勇于克服困难的精神，经得起失败与挫折。当你经过自己的努力，将失败转变为成功时，你必定有更大的收获，积累了更多的经验。

目 录

绪论.....	1
第一章 电路测试技术的基础知识.....	5
第一节 测量的一般知识.....	5
第二节 测量误差的基本概念.....	7
第三节 系统误差的处理.....	14
第四节 随机误差的处理.....	21
第五节 测量数据的处理与实验报告的编写.....	24
第六节 供电、接地及安全用电.....	27
思考题与习题.....	29
第二章 常用电测量仪表.....	31
第一节 电测量指示仪表的基本知识.....	31
第二节 磁电系仪表.....	36
第三节 万用表.....	40
第四节 电磁系仪表.....	44
第五节 电动系仪表.....	46
第六节 机电式电测量仪表的选用.....	48
第七节 交流电桥.....	50
实验2—1 电工仪表测量误差的处理方法.....	54
思考题与习题.....	58
第三章 常用电子仪器及其使用方法.....	59
第一节 晶体管直流稳压电源.....	60
第二节 数字万用表.....	61
第三节 晶体管毫伏表.....	65
第四节 低频信号发生器.....	67
第五节 电子示波器.....	70
实验3—1 信号发生器与毫伏表的使用 信号发生器频响特性的研究.....	79
实验3—2 示波器的使用.....	81
思考题与习题.....	84
第四章 常用电路元器件及设备.....	85
第一节 电阻器.....	85
第二节 电容器.....	88
第三节 电感器.....	90

第四节 调压器、电流表插座.....	92
实验4—1 基本电路元器件的识别与检测.....	93
第五章 直流电路测试技术.....	95
第一节 直流电压和直流电流的测量方法.....	95
第二节 验证叠加定理和戴维南定理.....	101
实验5—1 元件伏安特性的测试.....	102
实验5—2 验证叠加定理和戴维南定理.....	105
实验5—3 受控源与运算放大器.....	107
第六章 正弦稳态电路测试技术.....	110
第一节 正弦交流电路各物理量的测量.....	110
第二节 正弦交流电路等效参数的测量.....	111
实验6—1 正弦交流电的相量测量.....	115
实验6—2 正弦交流电路等效参数的测量.....	117
实验6—3 感性负载功率因数的提高.....	118
实验6—4 互感的测量.....	120
第七章 网络与信号的频域测试.....	121
第一节 网络的频域测试.....	121
第二节 信号的频域测试.....	125
第三节 谐振电路的测试.....	132
实验7—1 RC网络频率特性的测试.....	136
实验 7 — 2 RLC 串 联 谐 振 电 路 的 研 究.....	140
实验7—3 无源滤波器与有源滤波器.....	141
第八章 双口网络的测试.....	146
第一节 线性双口网络参数的测定.....	146
第二节 几种常见多端元件.....	147
实验8—1 双口网络等效参数的测定.....	150
实验8—2 负阻抗变换器.....	151
实验8—3 回转器.....	153
第九章 三相交流电路的测试.....	155
第一节 三相交流供电系统.....	155
第二节 三相电路有功功率的测量.....	157
实验9—1 三相电路的电压和电流的测量.....	159
实验9—2 三相电路的功率测量.....	161
第十章 动态电路的测试.....	164
第一节 一阶RC电路响应的测试.....	164
第二节 二阶RLC电路的响应与状态轨迹.....	166
实验10—1 一阶RC电路响应的测试.....	168

实验10—2 二阶网络的响应与状态轨迹.....	169
第十一章 电路的计算机辅助分析.....	171
第一节 电路的计算机辅助分析概述.....	171
第二节 矩阵形式节点方程的建立.....	173
第三节 线性代数方程组的求解.....	176
第四节 线性网络的正弦稳态分析.....	180
第五节 动态电路的数值分析.....	183
第六节 非线性电阻网络的直流分析.....	187
第七节 梯形网络的计算机分析.....	189
实验11—1 简单电阻网络的节点分析.....	191
实验11—2 线性网络的正弦稳态分析.....	193
实验11—3 二阶动态电路的数值分析.....	194
实验11—4 非线性电阻网络直流工作点的计算.....	194
实验11—5 梯形网络分析.....	197
第十二章 综合设计实验与电路故障检测.....	198
第一节 综合设计实验.....	198
实验12—1 移相器的设计与测试.....	199
实验12—2 波形变换器的设计与测试.....	201
实验12—3 补偿分压器的设计与测试.....	204
实验12—4 带阻滤波器的设计、制作及测试.....	206
实验12—5 万用表的设计、组装与校准.....	209
第二节 电路故障及其检测.....	220
附录 1 电路分析参考程序.....	223
1—1 简单电阻网络的节点分析程序.....	223
1—2 网络的正弦稳态分析程序.....	225
1—3 动态电路的数值分析程序.....	228
1—4 非线性电阻电路直流工作点计算程序.....	229
附录 2 PC 操作简介.....	232
参考文献.....	236

第一章 电路测试技术的基础知识

本章主要介绍电气测量的一般知识，测量误差理论与电路测量中误差的处理方法，安全用电的知识及安全用电的方法，实验数据的处理方法与实验报告的编写。本章内容是学习本书后续各章节的基础，另一方面，通过后续各章节的学习有助于对本章主要内容更深入理解和熟练掌握。

第一节 测量的一般知识

科学技术的进步离不开实验。实验是人类认识客观事物的重要手段，许多科学成果都是通过大量实验而取得的；科学理论也需要通过实验验证或修正。而实验是通过各种测量和试验来完成的。可以说，没有测量就没有实验。因此，我们必须了解测量的基本知识。

现针对电路测试技术来讨论测量的一般知识。对于电测量，实际上就是将被测量的电量直接地或间接地与作为测量单位的同类量进行比较的过程。

本节介绍测量过程、测量手段以及测量方式、方法的基本概念。

一、测量过程

测量过程一般包括三个阶段。

1. 准备阶段

明确被测量的性质及测量所要达到的目的，然后，选定适当的测量方式、方法，进而选择相应的测量仪器。

2. 测量阶段

给定测量仪器所必需的测量条件，仔细按规定进行操作，认真记录测量数据。

3. 数据处理阶段

根据记录的数据，结合测量条件的情况，进行数据处理，以求测量结果和测量误差。

二、测量手段

测量要通过量具、仪器、测量装置或测量系统来实现。

1. 量具

它是体现计量单位的器具。量具中的一小部分可直接参与比较，但多数量具要用专门的设备才能发挥比较的功能。例如，利用标准电阻测量电阻，需要通过电桥。由于使用量具进行测量操作麻烦，所以，在实际工程测量中，比较少使用量具，而是广泛地使用各种直读式仪器。

2. 仪器

仪器是泛指一切参与测量工作的设备。它包括各种直读仪器、仪表、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，电流表，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，用以完成某种测量任务的整体，称为测量装置。

4．测量系统

它是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的系统。

三、测量结果的表示

测量结果有数据、波形、曲线等。不论用哪种形式表示测量结果，都应该包含数值、单位和误差。也就是说，在表示出量值的同时，还要注明测量误差的数值或范围。

四、测量方式、方法的选择

由于电路中的电量是多种多样，电路中的现象也各有所异，测量仪器种类又繁多，因此所采取的测量方式、方法也不一样。例如，测量一个电阻器的电阻值，可以用伏安法间接测量，也可用电桥法比较测量，还可以用万用表的欧姆档直接测量。由此可知在具体测量之前，应根据被测量的性质、测量条件以及对准确度的要求等，选择合适的测量方式、方法。

从获得测量结果的过程来分类，一般有直接测量、间接测量和组合测量三种方式

1．直接测量

直接测量是指将被测量与已知的标准量直接比较，或将被测量产生的效应与同一种类的标准量产生的效应比较，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，用电压表测电压；用电桥测电阻等。

需要指出，直接测量并不只包含用直读式仪器进行的测量，往往比较式仪器（如电桥、Q表、电位差计等）进行的测量也属于直接测量。

直接测量所用的设备简单，操作也方便，但有些情况下准确度不高。

2．间接测量

间接测量是通过对被测量有函数关系的其它量进行直接测量，然后通过函数式计算获得被测量。例如，直接测量出电阻 R 的阻值及其两端的电压 U ，由公式 $I = U / R$ 计算出流过电阻 R 的电流 I 值。

一般是在直接测量很不方便时；或直接测量误差较大；或缺乏直接测量的仪器等情况下采用间接测量。显然，间接测量需要测量的量较多，使测量和计算工作较大，引起误差的因素也较多，如果对测量误差事先进行分析，并选择和确定具体的优化的测量方法；同时使之在比较好的条件下进行测量，可提高间接测量的准确度。

3．组合测量

组合测量是当被测量有数个，而这些被测量能用某些可测量组合成的函数关系式（或方程式）表示时，通过直接测量和间接测量获得这些可测量，然后求解联立方程组得出被测量的值，这种测量方式称为组合测量方式。

测量方式确定之后，应根据对测量准确度的要求，实验条件和仪器设备的不同特点，在以下两种测量方法中选择一种。按所用测量设备进行分类有直读测量法和比较测量法。

1. 直读测量法

直读测量法是指直接根据仪器的读数来确定测量结果的方法，例如，用电压表测电压，用欧姆表测量电阻等。

直读测量法的特点是所用设备简单，操作也方便，但测量准确度受所用仪表准确度等级的限制而不够高。

2. 比较测量法

比较测量法是指被测量与已知标准量通过比较式仪器进行比较来确定测量结果的方法。例如，用电位差计测量电压，就是将被测电压与标准电池的电动势进行比较来确定被测电压的大小。

比较测量法的特点是测量准确度和灵敏度都高，适用于精密测量。但是所用仪器、设备比较复杂，操作也比较麻烦。

比较测量法中有常用的零值法、较差法和替代法等三种方法。此三种比较测量方法，主要用于消除因指示仪表不准而造成的系统误差的测量中。

第二节 测量误差的基本概念

不论用什么测量方法，用任何的量具或仪器来进行测量，总存在误差。即测量结果总不可能准确地等于被测量的真值，而是它的近似值。也就是说误差自始至终存在于一切测量过程中。因此，应根据误差的性质及其产生的原因，采取措施使误差降低到最小。为此，必须具备误差的基本知识。

一、测量误差的表示方法

被测量的真实数值称为真值。它是客观存在的、确定的数值。但是在测量时，由于对客观规律认识的局限性，或测量仪器的准确度有限，或是测量方法不完善，也可能由于测量工作中的疏忽或错误等因素的影响，使测量结果与真值有所差别，这种差别就是测量误差。

测量误差通常用绝对误差与相对误差两种方法表示。

(一) 绝对误差

当被测量真值为 A_0 ，而用仪器测量得的示值为 x ，则测量的绝对误差 Δx 为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-2-1)$$

由于真值无法获得，故式(1-2-1)只有理论上的意义。实际工作中，常用标准表(即用来检定工作仪表的高准确度仪表)的示值作为实际值 A 代替真值 A_0 。由于标准表也存在误差(通常标准表的误差与工作仪表的误差相比，小于1/5时，则可认为标准表的示值是工作仪表所测之量的实际值)，所以 A 并不等于 A_0 ，但是 A 总比 x 更接近于 A_0 。

把 x 与 A 之差称为仪器的示值误差，记为

$$\Delta x = x - A \quad (1-2-2)$$

由于式(1-2-2)是以代数差的形式给出误差的绝对值大小及其符号，通常又将它称为绝对误差。

与绝对误差大小相等，符号相反的量称为修正值，用 C 表示，即

$$C = -\Delta x = A - x \quad (1-2-3)$$

通过检定，可以由标准仪器给出受检仪器的修正值。利用修正值便可求出用该仪器所测之量的实际值 A ，即

$$A = x + C \quad (1-2-4)$$

例如，某电流表的量程为1mA，通过检定而得出其修正值为-0.002mA。若用它来测量某一未知电流，得示值为0.78mA，由此便可得被测电流的实际值为

$$A = 0.78 + (-0.002) = 0.778 \text{mA}$$

修正值给出的方式有的是具体的数值，而在某些较为准确的仪器中，常以表格、曲线、公式的形式给出。有些自动测量仪器还将修正值存贮在仪器中，测量时对测量结果自动进行修正。

值得注意的是，仪器的示值与仪器的读数往往容易混淆，实际两者是不同的。读数是指从仪器的刻度盘、显示器等读数装置上直接读到的数字，而示值则是该读数所代表的被测量的数值，有时，读数与示值在数字上相同，但一般情况下它们是不同的。通常需要把所读的数经过简单计算，查曲线或数表才能得到示值。例如，一只线性刻度为0~100，量程为500 μ A的电流表，当指针指在85分刻度位置时，读数是85，而示值却是

$$x = \frac{85}{100} \times 500 = 425 \mu \text{A}$$

因此，在记录测量结果时，为避免差错和便于查对，应同时记下读数及其相应的示值。

有时还用理论计算值代替真值 A_0 ，例如，正弦交流电路中理想电容和电感上电压与电流的相位差为90°。

(二) 相对误差

绝对误差只能表示测量值与真值差多少，而无法比较两个测量结果的准确程度。例如，测量两个电压的结果：

一个是200V，绝对误差为2V

另一个是10V，绝对误差为0.5V

仅从绝对误差的大小，无法比较这两个测量结果的准确度。第一个绝对误差大，但只占示值的1%；而第二个绝对误差小，却占示值的5%。因此，又定义了相对误差。工程上，凡是要计算出测量结果的，一般都用相对误差表示。

相对误差的形式较多，这里介绍电测量中常用的三种。

1. 示值相对误差与实际相对误差

示值相对误差是绝对误差 Δx 与仪器示值 x 的比值，

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-2-5)$$

由于示值中也存在着误差，所以这种表示方式并不很严格，只是在误差较小时的一种近似计算。不适用于误差较大时的情况。故有时也用实际相对误差，即用实际值A代替真值 A_0 ，绝对误差 Δx 与实际值A之比，即

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-2-6)$$

2. 引用误差(满度相对误差)

示值相对误差虽然可以用来衡量测量结果的准确程度，但是还不能用它来评价指示仪表的准确度。这是因为，一般仪器是用来测量某一规定范围(量程范围) 的被测量，而不是只能测量某一固定大小的被测量。在某量程内，被测量可以是不同的数值。用式(1-2-5)计算相对误差时，随着被测量的不同，式中的分母也不同，而分子所示的绝对误差却在整个量程内变化并不大，近似于一个常数，因此求得的相对误差就会随着被测量大小的不同而有变化。例如，一只量程为0V ~ 250V的电压表，当在标度线为“ 200V ” 处的绝对误差为 +2V，则该处的测量误差为

$$\gamma_1 = \frac{2}{200} \times 100\% = +1.0\%$$

当在标度线为“ 10V ” 处的绝对误差为+1.8V，则该处的相对误差为

$$\gamma_2 = \frac{1.8}{10} \times 100\% = +18\%$$

由此可见，一块仪表在某量程内不同标度线处的绝对误差相差并不大，但相对误差却相差较大，所以用示值相对误差不能衡量仪表基本误差的大小，也即不能用示值相对误差来衡量仪表的准确度。

γ_1 与 γ_2 相差甚大的原因在于，计算相对误差时分子接近于一个常数，而分母却是一个变化较大的数的缘故。为此，现将仪表的量程 X_m (即满度值) 作分母，则示值相对误差公式变为

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{X_m} \times 100\% \quad (1-2-7)$$

式(1-2-7)称为引用误差，引用误差为绝对误差与仪表量程比值的百分数。

实际上，由于仪表各示值的绝对误差并不相等，其值有大有小，符号有正有负，为了能唯一地评价仪表的准确度，将式(1-2-7)中分子用仪表标度尺工作部分所出现的最大绝对误差 ΔX_m 来代替 Δx ，则式(1-2-7)变为

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta X_m}{X_m} \times 100\% \quad (1-2-8)$$

式(1-2-8)中 γ_{nm} 称为最大引用误差。用它来衡量仪表的基本误差。根据国家标准(GB776-76《 电测量指示仪表通用技术条件》) 规定，用最大引用误差表示电工仪表的基本误差，也即表示电工仪表的准确度等级。

所谓仪表的准确度等级是指仪表在规定的条件下测量时，在它的标度尺工作部分的所有分度线上可能出现的最大基本误差的百分数值。各准确度等级的指示仪表在规定的条件下使用时的基本误差不允许超过仪表准确度等级的数值关系，如表1-2-1所示。

仪表的准确度等级与其基本误差 表1-2-1

仪表的准确度等级 a	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差%	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

从表中可见，准确度等级的数值越小，允许的基本误差就越小，表示仪表的准确度就越高。从式(1-2-8)可知，在只有基本误差影响的情况下，仪表的准确度等级的数值 a 与最大引用误差的关系为

$$a\% = \frac{|\Delta X_m|}{X_m} \times 100\% \quad (1-2-9)$$

若用准确度等级为 a 的仪表，在规定的工作条件下进行测量的最大绝对误差一定满足下式

$$\Delta X_m = \pm X_m \cdot a\% \quad (1-2-10)$$

测量的最大相对误差

$$\begin{aligned} \gamma_m &= \frac{\Delta X_m}{x} 100\% \\ &= \frac{\pm a\% \cdot X_m}{x} 100\% \end{aligned} \quad (1-2-11)$$

这里特别要说明两个问题。

第一，从式(1-2-9)到式(1-2-11)可看出，仪表的准确度对测量结果的正确度影响很大。在一般的情况下，仪表的准确度并不等于测量结果的正确度，后者与被测量的大小有关，当被测量较大使仪表指示偏转为满刻度偏转时，测量结果的正确度才等于仪表的准确度，因此，不能把仪表的准确度与测量结果的正确度混淆。

第二，当选定了准确度等级 a 的仪表后，被测量的值 x 愈接近 X_m (即满量程)，则相对误差就愈小，故实际测量中，应合理选择仪表的量程，使指针尽可能工作在满刻度的2/3以上的区域。也就是说，尽量不要用大量程去测量小的电量。

例如，要测量约10V的电压，现有两块电压表，一块量程为150V，1.5级，另一块量程为15V，2.5级。选用哪块电压表合适呢？

若选第一块电压表，测量结果的绝对误差

$$\Delta U = U_m \times (\pm a\%) = 150 \times (\pm 1.5\%) = \pm 2.25 \text{ V}$$

若选第二块电压表，测量结果的绝对误差

$$\Delta U = U_m \times (\pm a\%) = 15 \times (\pm 2.5\%) = \pm 0.375 \text{ V}$$

由此计算结果说明，应选量程为15V，2.5级的电压表去测量，绝对误差更小，其被测电压示值若为10V，则被测电压的测量结果应为

$$(10 \pm 0.375) \text{ V}$$

此例说明，在实际测量工作中，不能片面地追求高准确度等级的仪表，而应根据被测量的大小，兼顾仪表的量程、准确度等级两个因素，合理选用仪表。

二、误差的分类及其产生的原因

根据测量误差的性质及其特点，一般将其分为系统误差、随机误差与粗大误差三类。

(一) 系统误差