

电路测试 技术基础

DIANLU CESHI JISHU JICHU



赵莉
刘子英
主编



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

电路测试技术基础

赵莉 刘子英 编

西南交通大学出版社

·成都·

内 容 简 介

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，在总结了作者多年的电路测试技术实验课程的教学经验及原实验教材的基础上编写而成。

全书共分为八章：电路测试技术的基础知识；常用电测量指示仪表；数字仪表和常用电子仪器；电路测试技术；虚拟实验室的基本概念；电路仿真实验（5个仿真实验）；电路测试技术的基本技能实验（18个基本技能训练实验）；综合设计实验（6个综合实验）。

本书可作为全日制电工类专业电路实验课程的教材，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电路测试技术基础 / 赵莉，刘子英编. —成都：西南交通大学出版社，2004.9

ISBN 7-81057-970-3

I. 电... II. ①赵...②刘... III. 电路 - 测试技术
IV. TN707

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 092823 号

电路测试技术基础

赵莉 刘子英 编

*

责任编辑 张华敏

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

新华书店 经销

（成都二环路北一段 111 号 邮政编码：610031 发行部电话：87600564）

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本：787 mm × 1092 mm 1/16 印张：16.75

字数：410 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-970-3/TN · 357

定价：25.00 元

图书如有印装问题，本社负责退换
版权所有，盗版必究，举报电话：（028）87600562

前 言

“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专业学生学习其它各门实践课程必须具备的，因此，它在专业教学计划中应属于实践性的技术基础课，是培养电工、电子等工程技术人员的基本实验技能的重要一环，为今后从事专业技术工作和科学研究工作打好基础。为此，我们按照国家教育部工科电工教学指导委员会关于电路课程的基本要求编写了本教材，以满足电路测试技术实验课程的教学需要。

本书共分八章。前五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、电路测试技术、虚拟实验室的概念等；后三章分别介绍仿真实验、基本技能实验和综合性实验，共设计了 29 个实验（包括仿真实验）供选择，适合于不同层次、不同条件的电路实验教学需要。

全书由赵莉、刘子英主编。其中，赵莉对全书进行统稿并绘制了本书的全部插图，刘子英编写了绪论、第二章及第七章的实验 7.1 至实验 7.9，赵莉编写了第三章、第四章及第七章的实验 7.10 至实验 7.18，徐翔征编写了第一章、第八章及附录，宋平岗编写了第五章和第六章。

本书的编写工作得到华东交通大学电气与电子工程学院电工基础教学部及实验室老师的密切配合，在此表示衷心感谢。

由于编写时间仓促，编者水平所限，书中不当之处难免，敬请读者批评指正。

编 者

2004 年 8 月

目 录

绪 论	1
第一章 电路测试技术的基础知识及基本要求	4
第一节 概 论	4
第二节 测量误差	7
第三节 “电路测试技术”课程的基本要求	16
第四节 测量数据的处理与实验报告的编写	21
思考题与习题	23
第二章 常用电测量指示仪表	25
第一节 电测量指示仪表的一般知识	25
第二节 磁电系测量机构及其仪表	30
第三节 电磁系测量机构及其仪表	40
第四节 电动系测量机构和功率表	43
第五节 感应系仪表	47
第六节 测量用互感器	50
第七节 指示仪表的合理选择与正确使用	54
思考题与习题	56
第三章 数字仪表和常用电子仪器	57
第一节 数字频率计	58
第二节 直流数字电压表	60
第三节 数字万用表	62
第四节 示波器	65
第五节 晶体管毫伏表	75
第六节 函数信号发生器	77
思考题与习题	80
第四章 电路测试技术	82
第一节 电压和电流的测量	82
第二节 电路参数的测量	87
第三节 功率的测量	94
第四节 波形测试技术	99
第五章 虚拟实验室的基本概念	103
第一节 概 述	103
第二节 仿真软件 OrCAD /PSpice9 简介	106

第六章 电路仿真实验	127
实验 6.1 受控源电路的仿真研究	127
实验 6.2 运算放大器构成的运算电路实验	130
实验 6.3 RC 网络频率特性的测试	132
实验 6.4 RLC 串联谐振电路的研究	137
实验 6.5 二阶网络的响应与状态轨迹测试	140
第七章 电路测试技术的基本技能实验	144
实验 7.1 基本电工仪表的使用与测量误差的计算	144
实验 7.2 元件伏安特性的测试	150
实验 7.3 电位、电压的测定及电路电位图的绘制	154
实验 7.4 基尔霍夫定律的验证及电源模型的等效变换	156
实验 7.5 叠加定理和戴维南定理的验证	160
实验 7.6 受控源 $VCVS$ 、 $VCCS$ 、 $CCVS$ 、 $CCCS$ 的研究	165
实验 7.7 典型电信号的观察与测量	171
实验 7.8 用三表法测量电路的等效参数	175
实验 7.9 感性负载功率因数的提高	179
实验 7.10 RC 网络频率特性的测试	182
实验 7.11 互感电路及谐振电路的研究	187
实验 7.12 单相铁心变压器特性的测试	193
实验 7.13 三相交流电路电压、电流的测量	195
实验 7.14 三相电路功率的测量及功率因数的测量	199
实验 7.15 一阶 RC 电路和二阶 RC 电路响应的研究	204
实验 7.16 双口网络测试	210
实验 7.17 负阻抗变换器和回转器的研究	215
实验 7.18 单相电度表的校验	222
第八章 综合设计实验	226
实验 8.1 负阻抗变换器应用电路的设计及测试	226
实验 8.2 移相器的设计与测试	229
实验 8.3 波形变换器的设计与测试	232
实验 8.4 补偿分压器的设计与测试	235
实验 8.5 带阻滤波器的设计、制作及测试	238
实验 8.6 万用表的设计、组装与校准	240
附录 电路实验台简介	253
参考文献	261

绪 论

进入 21 世纪后,我国社会、经济和科学技术发生了一系列重大变革,随着知识经济的全球化、科学技术革命的全球化以及我国产业结构的大调整,对高等学校的人才培养提出了更新、更高的要求,不仅要对学生实施全面素质教育,而且更重视对学生的创新能力、实践能力和创业精神进行培养。对于电类高等工程教育,则应加强工程基础学科教育,使之毕业后经过一段时间的实际工作锻炼,成为一名合格的电气或电子信息工程师。

一、实践教学环节在新世纪高等教育中的作用与地位

实践教学是学生通过自身体验,自己动手、自主完成的教学过程,相对于课堂理论教学更具有直观性、综合性、创新性,有着理论教学不可替代的作用,体现了教育与生产劳动相结合。实践教学对于提高学生的综合素质、培养学生的创新精神与实践能力具有特殊作用,因此,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之一。

二、“电路测试技术”课程的作用与地位及其教学内容

1. “电路测试技术”课程的作用与地位

“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专业的学生学习其它各门实践课程必须具备的,因此,它在专业教学计划中应属于实践性的技术基础课,是培养电工、电子等工程技术人员的基本实验技能的重要一环。

2. “电路测试技术”课程的教学内容

本课程的教学内容主要由基本实验技术理论、基本实验技能及相关实验内容、虚拟实验室等组成。

(1) 基本实验技术理论

电工类与电子、信息类等专业的学生,应学会用理论去指导自己的工程测试实践。本课程的实验技术理论包括:电气工程与电子、信息工程中涉及的一般电量的基本测试方法和调试方法;常用各种电工仪器、仪表的工作原理和使用方法;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;掌握各种电路元器件及典型应用电路的实际知识;电路的 CAD 等技术理论知识。

(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。通过本课程的学习与训练，应使学生受到一定的基本技能训练，例如，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，等等。

(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激励下所产生的响应的一门课程，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，不能互相代替，也不是从属关系。

本教材包含了直流电路、交流电路、动态电路、有源电路及双口网络内容在内的共计 18 个基本实验，它有利于学生验证和理解电路中的重要基本概念和基本理论，熟悉电工、电子测量中的基本仪器、仪表的原理和使用，掌握一些基本的测试方法，对学生进行基本技能的训练和整个实践环节的思维与过程训练，达到工程师的基本水平。为了培养学生综合应用所学的理论知识去分析解决实际问题的能力、工程设计与独立工作的能力。本教材还有综合性、设计性的实验内容，即让学生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。

(4) 虚拟实验室

其基本思想是，用软件方法虚拟各种电路元器件及各种测试仪器和仪表，即实现“软件即仪器”、“软件即元器件”。这是当今计算机技术飞速发展的必然结果，是人们从事电路、电子与电工实验研究，实现电子设计自动化的一次新的飞跃。本教材介绍了仿真软件 OrCAD/PSpice9 的使用方法，这样不仅可以弥补实验设施的不足，而且可以更有效地激发学生的学习兴趣，提高设计能力。

总之，通过本课程的学习，应掌握电气工程与电子信息工程中所涉及的基本实验技术理论，同时受到相关的基本技能的训练，提高用基本理论分析问题与解决问题的能力，在实践中培养严肃认真的科学态度和细致踏实的工作作风，为今后的专业实验、生产实践与科学研究打下坚实的基础。

三、“电路测试技术”课程的学习方法

为了达到本课程的教学要求与目的，在学习过程中应注意以下几点。

1. 本课程是一门理论性和实践性都很强的课程

本课程不仅与实验技术理论有关，还与“电路”课程有关。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，这十分有利于培养学生的自学能力。只要认真预习，就能明确实验的任务与要求，理解实验内容，在实验中适当得到教师

的指导就能按要求完成实验任务，然后撰写实验报告，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学生独立工作能力的过程。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、总结三个阶段。

(1) 预习

实验效果的好坏与实验的预习密切相关。其任务是弄清实验原理，明确实验目的和任务，了解实验的方法和步骤，并对实验过程中要观察的现象、要记录的数据及应注意的事项做到心中有数。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做出估计。

(2) 实验

按预习方案进行测试。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。在实验中，既要动手，又要动脑。认真观察实验现象和正确读取数据，做好原始数据的记录（注意：数据不能用铅笔记录），培养实事求是的科学态度。沉着、冷静地分析和处理实验中所遇到的各种实际问题。

(3) 总结

在完成实验测试后，整理实验数据，若发现原始数据不合理，不得任意涂改，应当分析问题所在，并正确绘制实验曲线，对实验结果做出初步的分析、解释，总结实验的收获与体会，写出符合要求的实验报告。

2. 要养成自觉、主动地应用已学过的理论知识去指导实验及总结实验结果

要从理论上来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，根据实验中观察到的实验现象进行理论分析后确定调试措施，分析实验结果是否合乎理论逻辑及其与理论值的差异，确定实验结果及评价其正确度或精密度、准确度等。

3. 注意实际知识与经验的积累

许多实际知识和经验要靠实践过程中长期积累才能丰富起来。实验中所用的仪器和元器件的型号、规格及参数、使用方法等都要记录下来。要记住实验中出现的各种现象与故障的特征、排除的方法。特别是实验中的经验教训，要进行认真总结。

4. 要充分发挥自己的主观能动性，自觉地、有意识地锻炼自己的独立工作能力

实验预习、实验操作过程及实验总结所遇到的各种问题，力求自己通过自学解决，不要依赖老师指导，要有克服困难的精神，经得起失败与挫折。当学生经过自己的努力，将失败转变为成功时，必定大有收获，积累出很多的经验。

第一章 电路测试技术的基础知识 及基本要求

第一节 概 论

一、测试技术的分类

测试技术主要研究被测量的测量原理、测量方法、测量仪器和测量数据处理等。测量就是将被测量与同类单位量进行比较。人们所要研究的内容和测量的量是非常丰富的。通常任何一个信息（或任何一种物质运动）包含着多种信号（或者说多个量），而一个信号（或量）又包含着不同信息。根据具体被测量，从不同观点出发，测试技术有不同的分类法。

测试技术所要测量的被测对象，一般分为下列几类：

- ① 有关电磁能的量，如电流、电压、功率、电能、电（磁）场强度等；
- ② 有关电信号特征的量，如频率、相位、波形参数、脉冲参数、频谱、相位关系等；
- ③ 电路参量，如电阻、电容、电感、品质因数、功率因数等，此外还有网络特性参数，如传递函数、增益、灵敏度、分辨率、频带宽度等；
- ④ 非电参量，如温度、压力、重量、速度、位移、长度、振动等。

二、电测试技术的特点

测试技术所涉及的知识面广泛，被测对象相当繁杂。但实践证明，不管是电量或非电量均采用电量测量法，这是因为电量测量法具有突出优点：

- ① 量程范围大。量程是测量范围上限值与下限值之差。一台多量程电磁仪表可达几个数量级，一台数字频率计的量程可达十几个数量级。
- ② 频率范围广。电子仪器测量频率除了针对直流电量外，还可以测量 10^{-4} Hz ~ THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) 的信号。
- ③ 测量准确度高。目前电磁仪表的误差可小到 10^{-3} ，而数字频率计准确度可达 10^{-13} 数量级。由于目前频率测量的准确度最高，人们常常把其它参数转换成频率信号再进行测量。
- ④ 测量速度快。一般电磁测量速度很容易达到 $10^2 \sim 10^3$ 次/秒，而在自动控制中的数据采集速度可高达 10^6 次/秒以上。

⑤ 易于实现多功能、多量程的测量。以微机为核心组成的智能仪器可实现自动转换量程、多路数据采集和数据处理功能，还能根据直接测量得到的结果经过换算求得其它参数的值，从而实现多功能测量。

⑥ 易于实现遥测和测量过程的自动化。由于电信号可以长距离传输，有利于远距离操作与自动控制。尤其是智能仪器，它具有自动调节、自动校准、自动记忆等功能。

三、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，结合测量的条件，进行数据处理，以求得测量结果和测量误差。

四、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，较少使用量具，而是广泛使用各种直读式仪器。

2. 仪 器

仪器是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、频率计、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，用以完成多种参量的综合测试的系统。

五、测量方法

测量方法是完成测量任务所采用的方法。从不同角度出發，测量方法的分类也不同。

从如何得到最终测量结果的角度分类，测量方法可分为直接测量法、间接测量法与组合测量法；从如何获取测量值的角度分类，测量方法分为直读式和比较式。下面分别介绍。

1. 直接测量法

借助于测量仪器将被测量与同性质的标准量进行比较，直接测出被测量的数值，称为直接测量法。这种方法的特点是所测得的数值就是被测量本身的值。其优点是测量过程简单，缺点是测量精度难于提高。例如，精度最高的磁电系电流表仅为 0.1 级。

2. 间接测量法

首先测量与被测量有确定函数关系的其它物理量，然后根据函数关系式计算出被测量，称为间接测量法。例如，导线的电阻率 ρ 不便于用直接测量法测量，这时可通过直接测量导线的电阻 R 、长度 l 和直径 d ，由式 $\rho = \pi d^2 R / 4l$ 求得电阻率的值，这种测量方法常可得到较高的测量精度，实验室中常用这种方法。

3. 组合测量法

当被测量有多个，虽然被测量与某中间量有一定函数关系，但由于关系式中有多个未知量，需要改变测试条件，测出一组数据，经过求解联立方程组才能得到测量结果，这样的测量方法称为组合测量法。

4. 直读式

用指示仪表直接读取被测量的数值，称为直读式测量法。用这种方法测量时，标准量具不直接参与测量过程，而是先用标准量具对仪表刻度进行校准，然后以间接方法实现被测量与标准量的比较，如用磁电系电压表测量直流电动机的端电压。这种测量方法的测量过程简单、方便，但测量精度较低。在工程测量中广泛采用此测量方法。

5. 比较法

根据被测量与标准量进行比较时的特点不同，比较法又可分为零位法、微差法和替代法等。

(1) 零位法

在测量系统（或装置）中用指零仪表将被测量与标准量进行比较，并连续改变标准量使指零仪表指示为零（即测量装置处于平衡）的测量方法称为零位法。例如，用天平测重就是属于零位法。

零位法的优点是测量精度比较高，但测量过程较复杂，不适合于测量变化迅速的信号。

(2) 微差法

用测量未知的被测量与已知的标准量之差值，来确定被测量数值的测量方法，称为微差法。通常使标准量 N 与被测量 X 很接近，因此若选用灵敏度高的直读式仪表来测量差值 Δ ，即使测量 Δ 的精度不高，也能达到较高的测量精度。例如，若 $\Delta \approx 0.01X$ ，而测量 Δ 的误差为百分之一，那么总的测量误差仅为万分之一。

微差法的优点是反应快，测量精度高，特别适合于在线控制参数的测量。

(3) 替代法

在测量装置中，调节标准量，使得用标准量来代替被测量时测量装置的工作状态保持不变，用这样的办法来确定被测量称为替代法。

替代法大大地减小了内部和外部因素对测量结果的影响，使测量结果准确度仅取决于标准量的准确度和测量装置的灵敏度。

第二节 测量误差

任何测量，不论是直接测量还是间接测量，都是为了得到某一物理量的真值，但由于受测量工具准确度的限制、测量方法的不完善、测量条件的不稳定以及经验不足等原因，任何物理量的真值是无法得到的，测量所能得到的只是其近似值，此近似值与真值之差称为误差。即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。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。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

测量误差通常用绝对误差与相对误差两种方法表示。

1. 绝对误差 Δx

绝对误差又称为绝对真值误差。它可表示为被测量的给出值 x 与其真值 A_0 之差

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.2.1)$$

在测量中给出值 x 一般就是被测量的测得值，但它也可以是仪器的显示值、量具或元件的标称值（或名义值）、近似计算的近似值等。

在某一确定的时空条件下，被测量的真值是客观存在的，但真值很难完全确定，而只能尽量接近它。在一般的测量工作中，如某值达到了规定要求（其误差可忽略不计），则可用此值来代替真值。实际工作中，一般把标准表（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 来代替真值 A_0 。除了实际值可用来代替真值使用外，还可以用已修正过的多次测量的算术平均值来代替真值使用。

由此可见，绝对误差的实际计算式为

$$\Delta x = x - A \quad (1.2.2)$$

绝对误差可能是正值或负值，当 x 大于 A 时， Δx 是正值；当 x 小于 A 时， Δx 是负值。

我们定义与绝对误差 Δx 大小相等，符号相反的量值为修正值 c ，即

$$c = -\Delta x = A - x \quad (1.2.3)$$

在比较准确的仪器中，常用表格、曲线或公式的形式给出修正值，供使用者在获得给出值后，根据式（1.2.3）加以修正以求出实际值。对于智能化仪器，其修正值可以先编成程序存储在仪器中，在测量时智能化仪器可以对测量结果自动进行修正，即

$$A = x + c \quad (1.2.4)$$

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

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

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，但实际上它们是不同的。通常需要把所读的数值经过简单计算，查曲线或数表才能得到示值。例如，一只线性刻度为 0~100 分格、量程为 500 μA 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

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

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° 。

2. 相对误差 γ

绝对误差的表示具有直观的优点，但其大小往往不能确切地反映测量的准确程度，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 10 V，绝对误差为 0.5 V，另一个是 100 V，绝对误差为 1 V。仅根据绝对误差的大小无法比较这两个测量结果的准确度。第一个绝对误差小，但占示值的 5%；而第二个绝对误差大，却只占示值的 1%。为弥补绝对误差不能表示测量精度的不足，人们提出了相对误差的概念。相对误差又分为实际相对误差、示值相对误差、引用相对误差（或满度相对误差）等。

工程上，凡是要计算出测量结果的，一般都用相对误差表示。

实际相对误差是用绝对误差 Δx 与被测量的实际值 A 之比的百分数来表示，记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.2.5)$$

示值相对误差是用绝对误差 Δx 与被测量的测得值 x 之比的百分数来表示，记为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.2.6)$$

引用相对误差（或满度相对误差）是用绝对误差 Δx 与仪器的满刻度值 x_m 之比的百分数来表示，记为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.2.7)$$

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

$$\gamma_{\text{nm}} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1.2.8)$$

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》的规定，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工作条件下测量时，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。

表 1.2.1 仪表的准确度等级与其基本误差

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 (1.2.1) 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

$$\Delta x_m = \pm x_m \cdot a\% \quad (1.2.10)$$

测量的最大相对误差

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x} \times 100\% = \frac{\pm a\% \cdot x_m}{x} \times 100\% \quad (1.2.11)$$

这里特别要说明两个问题：

① 从式 (1.2.9) ~ 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。

② 当选定了准确度等级为 a 的仪表后，被测量的值 x 越接近 x_m (即满量程)，则相对误差就越小，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 10 V 的电压，现有两块电压表，一块量程为 150 V、1.5 级，另一块量程为 15 V、2.5 级。选用哪块电压表合适呢？

若选第一块电压表，示值 U_x 的绝对误差

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

若选第二块电压表，示值 U_x 的绝对误差

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

由此计算结果说明，应选量程为 15 V、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 10 V，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。

1. 系统误差

在相同测量条件下多次测量同一被测量时，误差的绝对值和符号保持恒定，或在条件改变时按某种确定规律变化的误差，称为系统误差。

产生系统误差的原因可能有以下几个方面：

① 由于测量所用的仪器设计和制造上的固有缺点而引起的测量误差，例如，仪表准确度等级所决定的误差。常用的电测量指示仪表、电子测量仪器的示值都有一定的系统误差。

② 装置、附件产生的误差。为测量创造必要的条件，或为使测量方便地进行而使用的装置、附件引起的误差。例如，电源波形失真程度；三相电源的不对称程度；连接导线、转换开关、活动触点等的使用；测量仪表零点未调准等都会引起误差。

③ 由于测量时的环境因素影响而产生的误差，称为环境误差，如温度、湿度、气压、震动、电磁场、风效应、阳光照射、空气中含尘量等环境条件引起测量仪表指针指示不准而引起误差。

仪器、仪表按规定的正常工作条件使用所产生的示值误差是基本误差（即由仪表准确度等级决定的误差），当使用条件超出规定的正常工作条件而增加的误差是附加误差（即环境误差）。

④ 由于观测者生理、心理上的特点和固有习惯的不同，所引起的误差，称为人身误差。例如，生理上的最小分辨角、记录某一信号时滞后或超前的趋向、读数时习惯地偏向一个方向等人为因素都会引起测量误差。

⑤ 由于测量方法不完善或理论不严密所引起的误差。例如，当用电压表和电流表根据伏安法测电阻时，若没有计及接入仪表对测量结果的影响，则计算出的电阻值中必定含有此测量方法所引起的误差。

系统误差的最大特点是有一定的规律性，一旦掌握了其规律，就可通过改变测量方法或仪器的结构等技术途径加以消除或削弱；另一个特点是重现性，即在相同条件下，进行多次测量，重现出保持恒定的绝对值和符号的系统误差。

系统误差的大小可反映出测量结果偏离真值的程度，系统误差越小，测量结果就越正确，因此，系统误差可决定测量结果的正确度。

2. 随机误差

随机误差是在实际相同的测量条件下多次测量同一被测量时，误差的绝对值与符号以不可预定方式变化的误差。

产生随机误差的原因主要是由那些对测量值影响微小，又互不相关的多种偶然因素所引起的。诸如电网电压的变化，环境（如热扰动、噪声干扰、电磁场的微变、空气扰动、大地的微震等）的偶然变化，测量人员感觉器官的各种无规律的微小变化，等等，都会使测量结果存在随机误差。

由于这些因素的影响，尽管从宏观上看测量条件没有什么变化，比如仪器准确度相同、周围环境相同，测量人员同样的细心工作，等等，但只要测量仪表灵敏度足够高，就会发现各次测量结果都有微小的不同，这种不同就说明测量结果中含有随机误差。

在任何一次测量中都不可避免地会有随机误差，并且在相同条件下进行多次重复测量，随机误差时大时小，时正时负，完全是随机的。目前，人们对它还没有足够的认识，因此，它没有规律，不可预定也不能控制，无法用实验的方法来消除它。

一次测量的随机误差没有规律，但在多次测量中随机误差是服从统计规律的。因此可以通过统计学的方法来估计其影响。欲使测量结果有更大的可靠性，应把同一种测量重复多次，取多次测量值的平均值作为测量结果来削弱随机误差对测量结果的影响。

随机误差服从统计规律，其主要特点是：

- ① 有界性。在一定的测量条件下，随机误差的绝对值不会超过一定的界限。
- ② 单峰性。在多次测量中，绝对值小的随机误差出现的概率大，而绝对值大的随机误差出现的概率小。
- ③ 对称性。绝对值相等的正负随机误差出现的概率相同。
- ④ 抵偿性。在等精度的无限多次测量中，随机误差的代数和为零（即抵偿）。

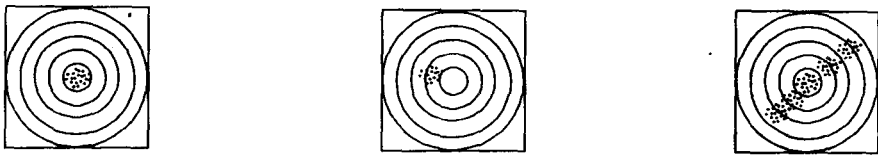
3. 粗大误差（也称疏忽误差）

在一定的测量条件下明显地歪曲测量结果的误差称为粗大误差，产生它的主要原因是测量中操作错误，如读错、记错、算错、测量方法错误、测量仪器有缺陷等。

含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值，正确的测量结果不应该含有粗大误差，所有的坏值均应剔除，在进行误差分析时要考虑的误差只有系统误差与随机误差两类。

为了更直观地了解上述三种误差，常以打靶为例来说明。图 1.2.1 给出了打靶时可能出现的三种情况。

图 1.2.1 (a) 中，弹着点都密集于靶心，说明只有随机误差而不存在系统误差，在靶角上的点是粗大误差造成的。图 1.2.1 (b) 中，弹着点密集之处偏于靶心的一边，这是系统误差存在的结果。图 1.2.1 (c) 中，弹着点中心不断有规律地变化，这是变化的系统误差造成的。



(a) 有随机误差和粗大误差的情况 (b) 有恒定系统误差的情况 (c) 有变化系统误差的情况

图 1.2.1 用弹着点分布情况说明误差的性质

从图 1.2.1 中还可以看出，一个精密度高（相当于弹着点非常密集）的测量结果，有可能是错误的（未消除系统误差），只有消除了系统误差之后，精密测量才能获得正确的结果。

要进行精密测量，必须消除系统误差，剔除粗大误差，采用多次重复测量取平均值来消除随机误差的影响，从而得到测量结果的最可信赖值。