

电工 电子 实验 及课程设计

DIANGONG DIANZI SHIYAN JI KECHENG SHEJI

主 编 ○ 傅钦翠 张冬波

副主编 ○ 何珍梅



西南交通大学出版社

电工电子实验及课程设计

主 编 ◎ 傅钦翠 张冬波

副主编 ◎ 何珍梅

西南交通大学出版社

· 成都 ·

内容简介

本书根据国家教育部工科电工课程指导委员会关于电工电子课程及实验教学的基本要求,设置了验证型实验、设计型实验、综合性实验和电路仿真及课程设计。全书共分九章,主要包括:电工电子测试技术基础知识、常用电测量指示仪表、常用测试方法、数字仪表和常用电子仪器、常用电子电路元器件、Multisim10 的使用与仿真实验、常规实验、开放性实验、电子电路课程设计。本书设置的实验项目覆盖面广,取材新颖、合理。综合性实验贴近工程实际应用,设计型实验着重培养学生的创新思维。

本书可供高等理工院校电气类、机械类、材料类、化工类、建筑类、经济管理类、机电一体化类、计算机类等有关专业教学使用,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子实验及课程设计 / 傅钦翠, 张冬波主编.

—成都: 西南交通大学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5643-5727-6

I. ①电… II. ①傅… ②张… III. ①电工试验—高等学校—教学参考资料②电子技术—实验—高等学校—教学参考资料③电工技术—课程设计—高等学校—教学参考资料④电子技术—课程设计—高等学校—教学参考资料
IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 220131 号

电工电子实验及课程设计

主 编 / 傅钦翠 张冬波

责任编辑 / 穆 丰

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

(四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 17.5 字数 440 千

版次 2017 年 9 月第 1 版 印次 2017 年 9 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-5727-6

定价 36.50 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

Preface / 前言

《电工电子学》一直以来都是高校工科非电类专业基础课，而电工电子的实践教学与课程教学紧密结合，对于加深理解课堂知识、增强实践能力、培养动手能力和初步设计能力具有重要意义。本书根据国家教育部工科电工课程指导委员会关于电工电子课程及实验教学的基本要求，结合实践教学的实际编写了本教材，以满足电工电子实践教学的需要。

全书共分九章，主要内容包括：电工电子测试技术基础知识、常用电测量指示仪表、常用测试方法、数字仪表和常用电子仪器、常用电子电路元器件、Multisim10 的使用与仿真实验、常规实验、开放性实验、电子电路课程设计。

本书具有以下特点：

(1) 实用性强。本书注重理论结合实际，根据教学要求设置了常规实验、开放性实验及课程设计等章节。

(2) 便于自学。本书既注重讲解常见的仪器仪表的工作原理、常用测试方法等基础内容，又在具体实验项目上增加了相关实验原理介绍，便于学生自学。

(3) 强化能力的培养。本书的实验项目既有验证性的，又有设计性的，还有综合性的开放实验及课程设计，实验难度逐步加深。另外随着计算机的普及，我们也设置了相关仿真实验。

全书由傅钦翠、张冬波主编。其中傅钦翠对全书进行统稿并编写了绪论，第一章，第四章的第一节、第二节，第六章的第四节至第六节，赵莉、聂晖编写了第二章，第三章，第八章，徐征、王皓编写了第四章的第三节、第四节，张冬波、徐祥征编写了第五章、第七章，何珍梅、孙惠娟编写了第六章的第一节至第三节，第九章以及附录。

本书的编写工作得到了华东交通大学电气与自动化工程学院电工电子教学部及实验室老师的密切配合，再次表示衷心感谢。

由于时间仓促和水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2017 年 6 月

Contents / 目录

绪 论 1

第一章 电工电子测试技术基础知识 4

 第一节 概 述 4

 第二节 测量误差 6

 第三节 测量数据的处理 12

第二章 常用电测量指示仪表 15

 第一节 电测量指示仪表的一般知识 15

 第二节 磁电系测量机构及其仪表 20

 第三节 电磁系测量机构及其仪表 31

 第四节 电动系测量机构和功率表 34

 第五节 感应系仪表 37

 第六节 测量用互感器 41

 第七节 指示仪表的合理选择与正确使用 45

第三章 常用测试方法 47

 第一节 电压和电流的测量 47

 第二节 电路参数的测量 51

 第三节 功率的测量 58

 第四节 波形测试技术 63

第四章 数字仪表和常用电子仪器 67

 第一节 数字万用表 67

 第二节 晶体管毫伏表 71

 第三节 数字示波器 73

 第四节 任意波形信号发生器 87

第五章 常用电子电路元器件 93

 第一节 电阻器 93

 第二节 电容器 97

 第三节 电感器 102

 第四节 半导体器件 103

 第五节 半导体集成电路 111

第六章 Multisim10 的使用与仿真实验	116
第一节 Multisim10 概述和基本操作	116
第二节 元器件库及仪器仪表库	123
第三节 Multisim10 的分析功能及操作方法	137
第四节 串联谐振电路的仿真实验	141
第五节 单管电压放大器的仿真实验	142
第六节 集成计数器的应用电路仿真实验	145
第七章 常规实验	149
实验一 设计简易电压表	149
实验二 戴维宁定理验证	152
实验三 交流电路等效参数的测量	155
实验四 日光灯电路	158
实验五 R 、 L 、 C 串联谐振电路	160
实验六 三相异步电动机的启动与控制	162
实验七 单管电压放大器	164
实验八 集成运算放大器的应用	168
实验九 直流稳压电源	170
实验十 组合逻辑电路的设计	172
实验十一 简易数字计时(数)器	174
实验十二 555 集成定时器及其应用	176
第八章 开放性实验	179
实验一 照明电路的安装	179
实验二 三相异步电动机的使用	181
实验三 三相异步电动机的综合控制	183
实验四 三相异步电动机的断相保护	185
实验五 波形发生器电路	186
实验六 OTL 功率放大器	189
实验七 555 时基电路的综合应用	191
第九章 电子电路课程设计	194
第一节 电子电路的一般设计方法	194
第二节 电子电路中常用的单元电路设计	202
第三节 课题设计举例	213
第四节 课程设计题目	237
参考文献	253
附录 部分常用集成电路外部管脚图及功能	254

绪 论

实验就是将事物置于特定的条件下加以观测，它是对事物发展规律进行科学认识的必要环节，也是科学理论的源泉、自然科学的根本和工程技术的基础，任何科学技术的发展都离不开实验。

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而言更具有直观性、综合性、创新性，有着理论教学不可替代的作用，是体现教育与生产劳动相结合的重要途径。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位置。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所关注的核心问题之一。

一、实验在电工电子学课程中的地位和作用

电工电子学是一门实践性很强的学科，实验的目的不仅在于帮助学生巩固和加深对所学理论知识的理解，更重要的是训练和培养学生的工程实践能力、基本技能及素质，树立工程实践观点和严谨的科学作风，同时激发学生的创新思维能力、观察能力、表达能力、动手能力等。加强实验训练特别是技能的训练，具有十分重要的意义。

电工电子实验，按性质可分为基础性实验、综合性实验和设计性实验。

基础性实验是针对电工电子学基础理论而设置的，通过实验可使学生获得对基础理论知识的感性认识，验证和巩固重要的基础理论，同时使学生掌握测量仪器的工作原理和使用规范，熟悉常用元器件的工作原理和性能，掌握其参数的测量方法以及元器件的使用方法。通过基础性实验，学生应能掌握基本实验知识、基本实验方法和基本实验技能。

综合性实验侧重于对一些理论知识的综合应用和实验的综合分析，其目的是培养学生综合应用理论知识的能力和解决较为复杂的实际问题的能力，包括实验理论的系统性、实验方案的完整性、可行性等综合应用。

设计性实验对学生来说，既有综合性又有探索性。它主要侧重于对某些理论知识的灵活运用。要求学生在教师的指导下独立完成资料查阅、方案设计与实验组合等工作，并完成实验报告。

二、电工电子学实验的过程与方法

(1) 课前预习、进行实验和课后完成实验报告（总结）三个阶段。

大部分实验技术理论的学习和对实验内容的理解，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。整个实验过程也即是培养独立工作能力的过程，每个实验都要经历预习、实验、总结三个阶段。

预习：实验效果的好坏与实验的预习效果密切相关。其任务是阅读实验指导书，弄清实验原理，明确实验目的和任务，了解实验的方法、步骤及实验中应注意的问题，查找必要的资料，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，必要时可拟出实验步骤，画出记录表格，一般还要对实验结果进行预先的定量或定性分析，得出理论计算结果或做出估计，以便实验时及时检验结果的正确性。有些仪器、设备仅凭阅读资料难以掌握其使用方法，必要时需要到实验室进行预习。

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，更要动脑，应认真观察实验现象和正确读取数据，做好原始数据的记录，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。

总结：在完成实验测试后，应整理实验数据，若发现原始数据不合理，不得任意涂改，应当认真分析可能存在的问题；并正确绘制实验曲线，对实验结果做出初步的分析、解释，总结实验收获与体会，写出符合要求的实验报告。

(2) 要养成自觉地、主动地应用已学理论知识去指导实验及实验后总结的习惯。

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的产生误差的原因等；实验中应根据观察到的实验现象进行理论分析，并依此确定调试措施；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，都要从理论的角度来进行分析。

(3) 注意知识与经验的积累。

知识和经验的丰富要靠实践过程中的长期积累。实验中所用仪器和元器件的型号、规格及参数、使用方法等要记录下来，还应记录实验中出现的各种现象与故障的特征，及排除的方法，应认真总结实验中的经验教训。

(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。

应力求通过自学解决实验预习、实验操作过程及实验总结中所遇到的各种问题，不依赖于老师的指导，要有克服困难的精神，经得起失败与挫折。当经过自己的努力将失败转变为成功时，必定会大有收获，并积累更多的经验。

三、学生实验技能的具体要求

在“电工技术”部分，对学生实验技能训练的具体要求是：

- (1) 能使用常用的电工仪表、仪器和电工设备。
- (2) 能按电路图接线、查线和排除简单的线路故障。
- (3) 能进行实验操作，测取数据和观察实验现象。
- (4) 能整理、分析实验数据，绘制曲线并写出整洁的、条理清楚的、内容完整的实验报告。

在“电子技术”部分，对学生实验技能训练的具体要求是：

- (1) 能使用常用电子仪器。
- (2) 学习查阅手册，掌握常用的电子元器件的基本知识及使用方法。
- (3) 初步学会使用二极管、晶体管、集成运算放大器、集成稳压器、门电路、触发器、寄存器、计数器及七段译码器等中、小规模集成电路。

- (4) 能根据电路图连接简单的电子线路, 并进行实验。
- (5) 能准确读取数据, 观察实验现象, 测绘波形、曲线。
- (6) 能整理、分析实验数据, 写出整洁的、条理清楚的、内容完整的实验报告。

四、实验报告的编写

实验报告分预习报告和总结报告两部分。

预习报告中应写明:

- (1) 实验目的。
- (2) 实验仪表设备。
- (3) 实验内容(分步骤扼要摘抄, 画出实验电路及记录表格, 预选电表量程, 给出必要的理论计算式、计算值, 必须回答的预习问题, 特殊注意事项等)。

总结报告的内容应包括下面几个部分:

- (1) 经整理后的实验数据, 计算数据。
- (2) 实验波形、曲线。
- (3) 对数据、曲线的分析、说明、结论等。
- (4) 误差的分析及实验现象的解释。
- (5) 回答相关问题。

总结报告是实验工作的全面总结, 应简明地将实验结果完整、真实地表达出来。编写实验总结报告要秉承实事求是的科学态度、一丝不苟的作风和勤于思考的精神。每次做完实验后, 都应根据实验结果独立编写实验总结报告。

五、实验时的安全用电知识

实验过程中应随时注意安全, 包括人身与设备的安全。

实验时, 要杜绝电击现象。电击是人体中通过电流时产生的一种剧烈的生理反应, 轻则触电部位麻木、痉挛, 重则造成严重烧伤、甚至死亡。实验中引起电击的主要原因, 是由于用电设备破损或故障, 以及实验操作者操作不当而误触 220 V、380 V 电压。此外, 对于已充电的电容器(尤其是高电压、大容量), 即使已断开电源, 触及时仍可能发生电击。

因此, 实验中应注意以下几点:

- (1) 弄清实验电源系统, 以便在发生电击时及时切断电源。
- (2) 当电源接通进行正常实验时, 不能用手触及带电部分; 改接或拆除电路时必须先切断电源。
- (3) 使用仪器仪表设备时, 必须充分了解其性能和使用方法。切勿违反操作规程乱拨乱调旋钮, 更要注意使用时不得超过仪表的量程和设备的额定值。
- (4) 如果实验中用到调压器、电位器以及可变电阻器等设备时, 在电源接通前, 应将其调节端放在使电路中的电流最小的地方, 然后接通电源, 再逐步调节电压、电流, 使其缓慢上升, 一旦发现异常, 应立即切断电源。
- (5) 实验时, 电路连好后必须经指导教师检查后方可通电, 并在通电前通知同组同学。
- (6) 实验完毕, 必须先断开电源开关, 经教师检查数据并签字后, 再拆线整理。

第一章 电工电子测试技术基础知识

第一节 概 述

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)都包含着多种信号(或者说多个量),而一个信号(或量)又包含着不同信息。从不同观点出发,测试技术有不同的分类方法。

测试技术所要测量的被测量,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、电量测量法的特点

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,不管是电量还是非电量均采用电量测量法,这是因为电量测量法具有以下突出优点:

(1) 量程范围大。量程是指仪器测量范围上限值与下限值的差值。一台多量程电磁仪表的量程可达几个数量级,一台数字频率计的量程可达十几个数量级。

(2) 频率范围广。电子仪器除了可以测量直流电量外,还可以测量 10^{-4} Hz ~ 1 THz (1 THz = 10^{12} Hz) 的信号。

(3) 测量准确度高。现代电磁仪表的测量误差可小到 10^{-3} 数量级,而数字频率计准确度可达 10^{-13} 数量级。由于目前频率参量的测量准确度最高,人们常常把其他参量变换成频率信号再进行测量。

(4) 测量速度快。一般电磁测量速度能达到 $10^2 \sim 10^3$ 次/秒,而在自动控制系统中的数据采集速度可达 10^6 次/秒以上。

(5) 易于实现多功能、多量程的测量。以微处理器为核心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的功能,还能根据直接测量得到的结果换算得到其他参数的值,从而实现多功能测量。

(6) 易于实现遥测及测量过程的自动化。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。而智能仪器,它还具有自动调节、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和方
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，仔细的按规定进行操作，认真记录测量
的数据。

(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

测量是通过量具、仪器、测量装置或测量系统来实现的。

1. 量 具

量具是用固定形式复现量值的计量器具，如标准电池、标准电阻。多数量具要连同辅助设
备一起用以进行测量。例如，利用标准电阻测量电阻值，需要通过电桥才能实现。由于使用量
具进行测量操作较麻烦，所以，在实际工程的测量过程中，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

由多台测量仪器及有关设备组成，用以完成某种测量任务的整体，称为测量装置。

4. 测量系统

测量系统是由若干不同用途的测量仪器及有关辅助设备组成，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。从不同角度出发，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、间接测量法和组合测量法；从
如何获取测量值的角度分类，测量方法分为直读式测量法和比较式测量法。下面分别介绍上述
五种测量方法。

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价值。其优点是测量过程简单，缺点
是测量精度难以提高。例如，磁电系电流表精度最高仅达 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他物理量，然后根据函数关系式计算出被测量的值，

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，这种测量方法可得到较高的测量精度，是实验室中常用的测量方法。

3. 组合测量法

当被测量有多个时，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，则需要不断改变测试条件，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. 直读式测量法

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，而是用于对仪表刻度的校准，然后再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. 比较式测量法

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，不适用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间的差值，来确定被测量数值的测量方法，称为微差法。通常选用的标准量 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， $\Delta \approx 0.01X$ ，且测量 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，特别适合于实时控制参数的测量。

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被称为替代法。

替代法大大地减小了内部和外部因素对测量结果的影响，使测量结果的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

任何测量方法，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，任何物理量的真值都是无法得到的，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，而是尽量逼近真值的近似值。因此，应根据误差的性质及其产生的原因，采取适当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，即

$$\Delta x = x - A_0 \tag{1.1}$$

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

$$\Delta x = x - A \tag{1.2}$$

绝对误差可能是正值，也可能是负值，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

$$c = -\Delta x = A - x \tag{1.3}$$

测量结果比较准确的仪器，常以表格、曲线或公式的形式给出其修正值，供使用者在获得给出值后，根据式（1.3）加以修正以求出实际值。对于智能化仪器，其修正值可以预先编成程序存储在仪器中，在测量时就可以对测量结果自动进行修正，即

$$A = x + c \tag{1.4}$$

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，由此可得被测电流的实际值为

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

值得注意的是，仪器的示值与仪器的读数容易混淆，但两者实际是不同的。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，或查曲线、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

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

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，也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。虽然第一个测量结果的绝对误差小，但它却占示值的 5%；而第二个测量结果的绝对误差虽然大，但它却只占示值的 1%。为了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。在实际工程中，凡是要计算出测量结果的，一般都用相对误差表示。

(1) 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

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \tag{1.5}$$

(2) 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

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \tag{1.6}$$

(3) 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

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \tag{1.7}$$

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 (1.7) 中分子 Δx 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，则式 (1.7) 变为

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \tag{1.8}$$

式 (1.8) 中， γ_{nm} 称为最大引用误差，用来衡量仪表的基本误差。根据国家标准《电测量指示仪表通用技术条件》(GB 776—76) 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进行测量时，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。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对应的数值关系，如表 1.1 所示。

表 1.1 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

如表 1.1 所示, 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。由式 (1.8) 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

$$a = \frac{|\Delta x_m|}{x_m} \times 100\% \quad (1.9)$$

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, 其最大绝对误差为

$$\Delta x_m = \pm x_m \cdot a\% \quad (1.10)$$

最大相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x} \times 100\% = \frac{\pm a\% \cdot x_m}{x} \times 100\% \quad (1.11)$$

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) 测量所用的仪器在设计和制造上的固有缺点引起的测量误差。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, 或为使测量工作更方便地开展而使用的装置、附件所引起的误差。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) 测量时因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的误差。

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) 因观测者生理、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, 若没有考虑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, 能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的定方式变化的误差。

产生随机误差的原因主要是那些对测量值影响微小，又互不相干的多种偶然因素。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，就会使得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。

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，应把同一种测量过程重复多次。取多次测量值的平均值作为测量结果以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：

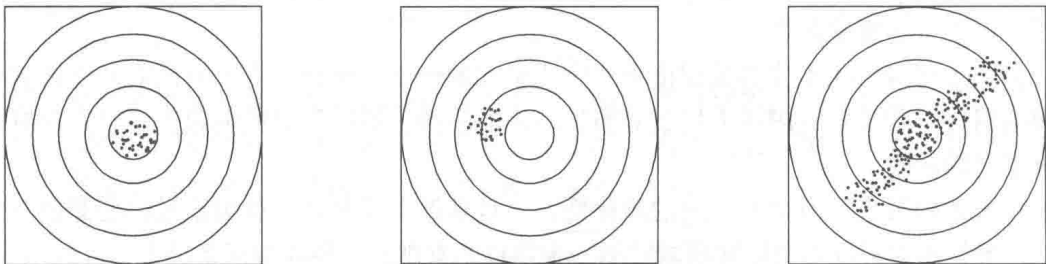
- (1) 有界性。在一定的测量条件下，随机误差的绝对值不会超过一定的界限。
- (2) 单峰性。在多次测量中，绝对值小的随机误差出现的概率大，而绝对值大的随机误差出现的概率小。
- (3) 对称性。绝对值相等的正负随机误差出现的概率相同。
- (4) 抵偿性。在等精度的无限多次测量中，随机误差的代数和为零（即抵偿）。

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过程中的错误操作，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。如图 1.1 所示给出了打靶时可能出现的三种情况。



(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 1.1 用弹着点分布情况说明误差的性质

如图 1.1 (a) 所示, 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。如图 1.1 (b) 所示, 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。如图 1.1 (c) 所示, 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。

由此还可以看出, 一个精密度高 (相当于弹着点非常密集) 的测量结果, 有可能是不正确的结果 (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。

三、测量的正确度、精密度与准确度

测量技术中常用来描述测量结果与被测量真值之间相互关系的有三个术语, 即测量的正确度、精密度与准确度。

正确度表示测量结果中系统误差大小的程度, 指在规定的测量条件下所有系统误差的综合。系统误差越小, 表示测量值偏离被测量的实际值越小, 正确度越高。

精密度表示测量结果中随机误差大小的程度, 指在一定的测量条件下进行多次测量时所得各测量结果之间的符合程度。随机误差越小, 重复测量时所得的结果越接近, 测量的精密度越高。

准确度是测量结果中所有系统误差与随机误差的综合, 表示测量结果与真值的一致程度。

在某一具体测量中, 可能会出现正确度与精密度一致或不一致的情况: ① 正确度高而精密度低; ② 正确度低而精密度高; ③ 正确度与精密度都低; ④ 正确度与精密度都高。前三种情况准确度都低, 只有第四种情况的准确度高。

不同性质的测量, 允许测量误差的大小是不同的, 但随着科学技术的发展, 对减少测量误差的要求越来越高。在某些情况下, 误差超过一定的限度不仅没有意义, 而且还会给工作造成影响甚至危害。

研究误差理论的目的, 就是要分析误差的来源和大小, 确定误差的性质, 为科学处理测量结果, 消除或减小误差提供依据, 并建立切实可行的测试技术方案, 正确评定测量结果。对于电路测试技术来说, 必须通过误差理论的分析, 使我们更合理地选择测试技术方案, 使测试电路参数设计得更合理, 能正确使用测量仪器, 从而取得最优的测量结果。

四、系统误差的消除方法

在测量过程中, 不可避免地存在系统误差, 如何采取技术措施尽可能地减少系统误差? 即使采取了一定措施, 测试结果中的系统误差是否能减小到可忽略不计? 若不能忽略, 如何估算误差? 这些都是进行误差分析时必须考虑的问题。

根据系统误差具有明显规律性的特点和实践经验, 可以通过实验技术措施减少或消除系统误差。常用的方法有以下几种。

1. 引入修正值, 对测试结果进行修正

在测量之前, 对测量中所要使用的仪器、仪表和度量器用更高准确度的仪器、仪表和度量器进行检定, 即将所要使用的仪器、仪表和度量器在不同测量值时的系统误差 (修正值) 测出, 画出它们的修正曲线或修正表格。在测量时, 根据这些曲线、表格, 对测得示值按式 (1.4) 进