



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

模拟电路 设计 · 仿真 · 测试

邹学玉 余新平 主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

014025660

TN710-43
154

普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

模拟电路设计·仿真·测试

邹学玉 余新平 主编

李锐 覃洪英 颜国琼 李克举 副主编



TN710-43
154

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



北航

C1711147

内 容 简 介

本书参照高等学校电子信息类专业模拟电子技术实验教学要求和 CDIO 工程教育理念编写, 全书共 6 章。第 1 章介绍模拟电子技术实验基础, 包括误差分析与实验数据处理、电子电路设计方法、安装与调试技术等基本知识; 第 2 章为模拟电路实验技术, 实验项目分基本实验和设计性实验两个层次, 实验内容包含基本内容和扩展提高内容两个部分的测试技术, 共有 8 个实验子项; 第 3 章介绍电子电路仿真与设计软件 Proteus 的使用, 以及第 2 章相关实验内容的仿真探究实验; 第 4 章为模拟电路综合设计实训; 第 5 章简单介绍了模拟电子技术实验常用电子仪器的功能及使用方法; 第 6 章为常用电子元器件。

本书可作为高等学校电子信息类专业及其他相近专业本科生模拟电子技术实验课程教材, 也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电路设计·仿真·测试 / 邹学玉, 余新平主编. —北京: 电子工业出版社, 2014.1

电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-21693-0

I. ①模… II. ①邹… ②余… III. ①模拟电路—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 246200 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 郝黎明

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13.5 字数: 346 千字

印 次: 2014 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 29.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

以培养大学生开拓创新能力和实践动手能力为核心的素质教育是当前高等教育实行工程教育教学改革的重要目标,也是培养 21 世纪需求的复合型人才的重要举措。创新能力是在扎实理论和实践知识之上的创新意识,这样才能敏锐地发现问题,并正确分析和解决问题。因此,理论教学与实验教学,是培养学生创新能力的两个重要方面。

近年来,模拟电路课程的理论与实践教学改革和教材建设取得了一定的进展,但与数字电路相比却相对滞后,尤其缺乏教育 CDIO 工程实践教育理念的模拟电路实践课教材。目前,各工科院校正致力于工程认证与实践教育的改革,目的在于促进学生重视创新能力培养,为此,希望该教材的出版有助于推进模拟电路实践课程的改革

一、本教材的改革理念与定位

本教材将模拟电路实践课采用 CDIO 的工程教育理念对课程体系与课程内容进行重新设计与规划,以实现具有较强的趣味性和实用性的电子系统为项目驱动,将基本电子系统所需要的模拟电子技术的功能电路对应的工程实践活动分解为验证、设计、EDA 仿真、电子产品开发 4 个层面的实践项目,但不局限于该电子系统所需要的功能电路,以进一步丰富实践学习内容。

本教材的 4 个层面分别定位于基础实验、设计性实验、EDA 仿真实验和项目综合实训四大部分,每个实践项目又含有基本层和扩展层,分别包含适于普通高等学校工科专业模拟电路实验课程和开放实验教学的主教材或参考读物。

二、本教材的特点

(1) 介绍常用模拟电子元器件和电子仪器的使用,让学生掌握其基本应用以及模拟电路的基本测试技术,提高实践动手能力。

(2) 减少验证性实验,增加设计性项目,通过层次化的实践项目训练,做到因材施教、层次培养,引导学生创新意识,培养学生创新能力。

(3) 以集成运算放大器为主,着重于应用设计;分立元件电路为辅,仅侧重于基本放大电路静态和动态分析测试;既保证了经典模拟电路基本理论与测试技术的学习,又强化了现代模拟电路设计与应用能力的培养。

(4) 注重电子电路 EDA 工具辅导模拟电路的设计、仿真与测试,提高学生现代电子线路设计自动化水平。

(5) 适当增加综合性设计实训项目,强化电子线路的“系统”设计意识和实践能力。

本书由武汉工程大学熊俊俏教授主审,在编写过程中,得到了长江大学教务处处长张光明教授,长江大学国家级电工电子实验教学示范中心主任余厚全教授、副主任陈永军教授,高秀娥、吴爱平、毛玉容、郑恭明、董翠敏教师以及其他同仁给予的关心和帮助,在此表示最衷心的感谢。

限于编者水平与时间仓促,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请广大师生和读者提出批评和建议。

编 者
2013 年 12 月

目 录

第 1 章 模拟电子技术实践基础知识	1	2.3 单管共射放大器	32
1.1 概述	1	2.3.1 实验目的	32
1.1.1 模拟电子技术实践的意义	1	2.3.2 实验仪器与器件	33
1.1.2 模拟电子技术实践目的	1	2.3.3 预习要求	33
1.1.3 模拟电子技术实践要求	2	2.3.4 实验原理	33
1.1.4 模拟电子技术实践课程特点	3	2.3.5 实验内容与要求	35
1.1.5 模拟电子技术实验的学习方法	4	2.3.6 思考题	39
1.2 电子测量中的误差分析与测量数据处理	4	2.3.7 实验中常见问题	39
1.2.1 电子测量中的误差分析	4	2.4 前置放大器的设计	40
1.2.2 测量数据的处理	9	2.4.1 实验目的	40
1.3 电子电路设计的基本方法	11	2.4.2 设计任务与要求	40
1.4 模拟电子电路的组装与调试技术	12	2.4.3 预习要求	40
1.4.1 电子电路的组装	12	2.4.4 电路参考方案设计	41
1.4.2 电子电路的焊接	14	2.4.5 电路设计与元器件选择	42
1.4.3 电子电路调试和故障的检查与排除	17	2.4.6 实验仪器与器件	43
2.4.7 主要特性参数测试	43	2.4.7 主要特性参数测试	43
2.4.8 电路调试及注意事项	45	2.4.8 电路调试及注意事项	45
2.4.9 设计报告要求	45	2.4.9 设计报告要求	45
第 2 章 模拟电路实验技术	23	2.5 OCL 功率放大器	45
2.1 常用仪器使用与练习	23	2.5.1 实验目的	45
2.1.1 实验目的	23	2.5.2 实验仪器与器件	46
2.1.2 实验仪器	23	2.5.3 预习要求	46
2.1.3 预习要求	23	2.5.4 实验原理	46
2.1.4 基本原理	23	2.5.5 基础实验内容与要求	47
2.1.5 仪器的面板介绍	24	2.5.6 扩展实验内容与要求	48
2.1.6 实验内容	24	2.5.7 思考题	48
2.1.7 思考题	28	2.6 多级放大与负反馈放大器	48
2.2 集成运放的应用	28	2.6.1 实验目的	48
2.2.1 实验目的	28	2.6.2 实验仪器及器件	48
2.2.2 实验仪器与器件	28	2.6.3 预习要求	49
2.2.3 预习要求	28	2.6.4 实验原理	49
2.2.4 实验原理	28	2.6.5 基础实验内容与要求	52
2.2.5 基础实验内容与要求	31	2.6.6 扩展实验内容及要求	53
2.2.6 扩展实验内容与要求	32	2.6.7 思考题	54
2.2.7 思考题	32	2.7 音调控制电路设计	54

2.7.1	实验目的	54	3.2.4	仿真实验内容	100
2.7.2	设计任务与要求	54	3.2.5	扩展仿真实验内容	103
2.7.3	预习要求	54	3.3	单管共射放大器仿真	103
2.7.4	电路参考方案设计	54	3.3.1	仿真实验目的	103
2.7.5	电路设计与元器件选择	56	3.3.2	虚拟实验仪器与器件	103
2.7.6	实验仪器与器件	59	3.3.3	绘制仿真电路图	103
2.7.7	主要特性参数测试	59	3.3.4	仿真实验内容	104
2.7.8	设计报告要求	60	3.3.5	扩展仿真实验内容	107
2.8	信号产生与转换电路设计	60	3.4	前置放大器的仿真研究	109
2.8.1	实验目的	60	3.4.1	实验目的	109
2.8.2	设计任务与要求	60	3.4.2	虚拟实验仪器与器件	109
2.8.3	预习要求	61	3.4.3	绘制电路图	109
2.8.4	电路参考方案设计	61	3.4.4	仿真测试内容	110
2.8.5	电路设计与元器件选择	63	3.4.5	思考题	114
2.8.6	实验仪器与器件	65	3.5	OCL 功率放大器仿真	114
2.8.7	主要特性参数测试	65	3.5.1	仿真实验目的	114
2.8.8	设计报告要求	66	3.5.2	虚拟实验仪器与器件	114
2.9	集成直流稳压电源设计	67	3.5.3	绘制仿真电路图	114
2.9.1	实验目的	67	3.5.4	仿真实验内容	115
2.9.2	设计任务与要求	67	3.5.5	扩展仿真实验内容	117
2.9.3	预习要求	67	3.6	多级放大与负反馈放大器仿真	118
2.9.4	电路参考方案设计	67	3.6.1	仿真实验目的	118
2.9.5	电路设计及元器件选择	69	3.6.2	虚拟实验仪器与器件	118
2.9.6	实验仪器与器件	72	3.6.3	绘制仿真电路图	118
2.9.7	主要特性参数测试	72	3.6.4	仿真实验内容	119
2.9.8	设计报告要求	75	3.6.5	扩展仿真实验内容	122
2.9.9	注意事项	75	3.7	音调控制电路仿真研究	123
第 3 章	电子电路计算机辅助设计		3.7.1	实验目的	123
	与仿真	76	3.7.2	虚拟实验仪器与器件	123
3.1	Proteus 操作入门	76	3.7.3	绘制仿真电路图	123
3.1.1	Proteus 概述	76	3.7.4	仿真测试内容	124
3.1.2	电路原理图编辑	76	3.7.5	思考题	126
3.1.3	Proteus ISIS 的库元件简介	83	3.8	信号产生与转换电路仿真研究	126
3.1.4	Proteus 中常用仪器简介	89	3.8.1	仿真实验目的	126
3.1.5	Proteus 电路仿真方法	95	3.8.2	虚拟实验仪器与器件	126
3.2	集成运放的应用仿真	99	3.8.3	绘制仿真电路图	126
3.2.1	仿真实验目的	99	3.8.4	仿真研究与测试	127
3.2.2	虚拟实验仪器与器件	99	3.8.5	扩展仿真实验内容	129
3.2.3	绘制仿真电路图	99	3.9	集成直流稳压电源仿真研究	129
			3.9.1	仿真实验目的	129

3.9.2	虚拟实验仪器与器件	129	4.5.5	思考题	158
3.9.3	绘制仿真电路图	130	第 5 章	常用电子仪器简介	159
3.9.4	仿真研究与测试	130	5.1	TDS1002 型数字式存储示波器	159
3.9.5	扩展仿真测试内容	133	5.1.1	主要性能	159
第 4 章	模拟电路综合设计实训	135	5.1.2	基本操作简介	160
4.1	卡拉 OK 放大器	135	5.1.3	菜单系统的使用	161
4.1.1	技术指标要求	135	5.1.4	垂直控制系统	162
4.1.2	设计方案	135	5.1.5	水平控制系统	162
4.1.3	设计说明与参考电路	136	5.1.6	触发控制按钮	162
4.1.4	测试内容	139	5.1.7	菜单和控制按钮	162
4.1.5	扩展实验内容及要求	140	5.1.8	连接器	163
4.1.6	选用器材及测量仪表	140	5.2	TFG6920A 函数/任意波形 发生器	163
4.1.7	思考题	140	5.2.1	主要特性	163
4.2	红外对管报警电路	140	5.2.2	基本操作简介	164
4.2.1	技术指标要求	140	5.2.3	安全事项	169
4.2.2	设计方案	141	5.3	S3323 可跟踪直流稳定电源	169
4.2.3	设计说明与参考电路	141	5.3.1	面板使用说明	170
4.2.4	测试内容	143	5.3.2	操作说明	171
4.2.5	选用器材及测量仪表	143	5.3.3	安全事项	172
4.2.6	思考题	143	第 6 章	常用电子元器件	173
4.3	12V 直流电动机驱动与转速 测量系统	143	6.1	部分电气图形符号	173
4.3.1	技术指标要求	143	6.1.1	电阻器、电容器、电感器 和变压器	173
4.3.2	设计方案	144	6.1.2	半导体管	173
4.3.3	设计说明与参考电路	144	6.1.3	其他电气图形符号	174
4.3.4	选用器材及测量仪表	146	6.2	电阻器、电容器、电感器	174
4.3.5	思考题	146	6.2.1	电阻器和电位器	174
4.4	语音信号带通滤波器	146	6.2.2	电容器	178
4.4.1	技术指标要求	146	6.2.3	电感器	180
4.4.2	设计方案	147	6.3	半导体分立器件	180
4.4.3	设计说明与参考电路	148	6.4	模拟集成电路	186
4.4.4	选用器材及测量仪表	151	6.5	运算放大器的分类与选择	189
4.4.5	测试内容	151	6.5.1	模拟运放的分类及特点	189
4.4.6	思考题	152	6.5.2	运放的主要参数	190
4.5	信号波形合成器	152	6.5.3	运算放大器的对信号放大的 影响和运放的选型	193
4.5.1	技术指标要求	152	参考文献		208
4.5.2	设计方案	153			
4.5.3	设计说明与参考电路	155			
4.5.4	选用器材及测量仪表	157			

第 1 章 模拟电子技术实践基础知识

本章介绍模拟电子电路实验课的目的、意义、特点、基本要求和学习方法，以及电子电路的基本调试测试技术和数据处理方法，为较好地完成该课程的实践训练奠定良好的基础。

1.1 概述

1.1.1 模拟电子技术实践的意义

模拟电子技术是电信类专业的一门实践性很强的专业基础课程，其对应的课程实践对学习和掌握该课程理论与技术有很重要的作用。模拟电子技术实验是根据教学、科研、生产的要求，培养学生掌握模拟电子电路的设计方法、安装与调测技术，它是将理论知识转化为实用电路或电子产品的过程。要想掌握好模拟电子技术，除了熟悉模拟电子电路的基本组成、基本原理及其分析方法外，还必须掌握模拟电子器件及其基本电路的应用技术。因此，模拟电子技术实践课是学习和掌握模拟电子技术不可缺少课程之一。

通过实践训练，促进掌握不同电子元器件构成功能电路的组成原则、电子元器件参数对模拟电路性能指标的影响规律，准确验证模拟电路理论和工程实用性，加深理解电子系统理论知识与体系结构；通过实践训练，促进掌握模拟电路的实验技术、测量技术、调试技术，进一步深化对模拟电路理论的条件性与局限性理解，促进形成解决新问题的新思路与创新意识。

信息技术的飞速发展，推动着电子信息技术高等教育的教学改革，侧重于验证性的传统模拟电子技术实验在帮助读者学习模拟电子技术基本理论、基本分析方法和基本实验技能方面发挥了重要作用，但不能满足 21 世纪对电信类宽口径、重工程实践、复合型技术人才的需求。为提高基于 CDIO（产品研发的构思 Conceive、设计 Design、实施 Implement 和运作 Operate）工程实践能力、综合实践能力和创新意识，本课程将分为验证性实验、设计性实验、系统设计性实验、EDA 仿真研究性实验几个层面。

1.1.2 模拟电子技术实践目的

通过模拟电子技术实践环节训练，旨在培养理论联系实际的优良作风、严谨求实的科学态度和勇于创新的工程素质，为成为合格的电子工程师奠定坚实的理论基础和实践能力。具体如下。

- (1) 熟悉并掌握基本电子实验仪器、仪表的性能、使用方法与测试技术。
- (2) 掌握模拟电子电路的调试方法、系统参数的测试和调整方法、应用方法。
- (3) 能够运用理论知识对实验现象、结果进行分析和处理，解决实验中遇到的问题。

- (4) 熟悉并掌握 EDA-Proteus 工具及其在模拟电子电路仿真实验的应用。
- (5) 熟悉模拟电子系统的组成与模块设计方法, 掌握单元模块电路的设计、拟定实验步骤。
- (6) 能够综合实验数据, 分析研究实验现象, 撰写科学、严谨、求实的实验报告。

1.1.3 模拟电子技术实践要求

为取得良好的实验效果, 应做好如下几个环节。

1. 实验准备(构思与设计)

实验准备即为实验的预习阶段, 是保证实验顺利进行的必要步骤。每次实验前都应先预习, 从而提高实验质量和效率, 避免在实验时不知如何下手, 浪费时间, 完不成实验, 甚至损坏实验装置。因此, 实验前应做到以下几点。

- (1) 了解本次单元实验的目的, 预习本次实验内容, 掌握本次实验的电路原理和方法; 熟悉与本次单元实验相关的模拟电子技术理论知识, 必要时用 EDA 工具进行课外仿真。
- (2) 写出预习报告, 其中应包括实验的电子元器件清单及器件引脚图、详细电路接线图、实验步骤、数据记录表格等。
- (3) 按预习报告上的详细实验电子电路图在实验多功能板上合理布局电子元器件, 完成电路的初步安装。
- (4) 熟悉实验所用的实验测试仪器、仪表的使用方法。

2. 实验过程(实施与运作)

在完成实验准备环节后, 就可进入实验实施阶段。实验时要做到以下几点。

- (1) 实验开始前, 检查预习报告, 预习报告合格者才能开展实验。
- (2) 认真听讲, 要求熟悉本次实验使用的实验仪器仪表的功能与使用方法。
- (3) 完善实验接线后, 在通电前, 借助于万用表, 对电路连接的正确性与可靠性进行必要的自查自纠, 主要内容如下。
 - ① 合理布局实验板上的“电源”与“地”。
 - ② 串联回路从电源的某一端出发, 按回路逐项检查各实验仪器仪表、电子器件的位置、极性等是否正确, 合理。
 - ③ 并联支路则检查其两端的连接点是否可靠连接。
 - ④ 距离较近的两连接端尽可能用短导线, 避免干扰。
 - ⑤ 距离较远的两连接端尽量选用长导线直接连接, 避免多根导线过渡连接。
 - ⑥ 自查完成后, 须经指导教师认可后方可通电实验。
- (4) 实验时, 应按实验要求及步骤, 逐项进行实验和操作。改接线路时, 必须断开电源。实验中应观察实验现象, 应用理论知识分析判断实验现象是否正常, 实验测量数据是否合理, 实验结果与理论是否一致。若不一致, 分析解决问题。

完成实验内容后, 应请指导教师签字确认。实验过程结束后整理好实验仪器、仪表。

3. 实验总结

即整理实验数据、绘制波形曲线和图表、分析实验现象与数据结果、撰写实验报告。

实验报告的撰写应严肃认真、实事求是。如实验结果与理论有较大出入时，不得修改实验数据和结果，不得用凑数据的方法来向理论靠近，而是用理论知识来分析实验数据和结果，解释实验现象，找到引起较大误差的原因。

实验总结报告分一般性实验报告和设计性实验报告两类。格式如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 实验总结报告格式内容

一般性实验总结报告	设计性实验总结报告
一、实验目的	一、实验目的
二、实验仪器与器件	二、设计任务与要求
三、实验原理简介	三、电路总体方案设计
四、实验内容、步骤与测量数据	四、电路设计与元器件选择
五、实验数据整理与分析 (包括绘图、制表、误差分析)	五、实验仪器与器件
六、问答题	六、电路主要特性参数测试 (包括实验内容、步骤与测量数据)
七、总结	七、实验数据整理与分析 (包括绘图、制表、误差分析)
	八、问答题
	九、总结

1.1.4 模拟电子技术实践课程特点

与其他实验相比较，模拟电子电路实验有以下几个显著特点。

1. 理论性强

在模拟电路实验中，如果没有正确理论指导，就不可能设计性能稳定、符合技术指标要求的电路，也不可能拟定正确的实验方法和步骤，也不可能分析判断实验数据结果的正确性，更不可能有效分析和解决实验中发生的故障。因此，要较好地完成模拟电路实验，首先应学好模拟电路理论课程。

2. 工艺性强

即使有了成熟的实验电路方案，但由于电子元器件的布局、共地、装配工艺等不合理，也很难取得满意的实验结果，甚至会导致实验失败（尤其是电路处理高频信号较为突出），因此需要认真掌握电子电路工艺等技术。

3. 测试技术要求高

模拟电路功能模块电路多，不同功能电路有不同的性能指标，对不同性能指标又有不同的测试方法和测试仪器，因此应熟练掌握基本测量技术和各种测量仪器的使用方法。

1.1.5 模拟电子技术实验的学习方法

1. 掌握模拟电路实验课程的学习规律

实验课程是以实验为主体的课程，每个实验都有预习、实验、总结 3 个阶段。

(1) 预习：弄清实验的目的、实验电路、实验方法和注意事项，拟定实验步骤，绘出实验记录表格，理论估计实验结果，以便评估实验结果是否达到预期结果。只有充分预习，实验才能顺利完成并取得收获。

(2) 实验：按照预定的方案进行实验，其过程既是完成实验，也是锻炼实验能力、培养严谨实验态度的过程。在实验中，要善于动手、勤于动脑，做好原始数据的记录，用模拟电路理论知识解决实验中遇到的问题。

(3) 总结：实验完成后，通过整理实验数据，分析数据结果，撰写实验报告；通过实验数据误差分析，深刻理解理论知识的重要性，培养科学求实的实验作风和创新意识。

2. 应用模拟电路理论知识指导实践

在实验开始前，首先应从理论上研究实验电路的工作原理与功能特性，拟定出实验方案。在调测电路时，要用理论分析来评估实验数据的正确性与产生故障的原因，从而确定相应的调测措施。

3. 注意模拟电路实践经验的积累

模拟电路的实践经验需要长期积累。在实验中，应熟悉电子仪器和元器件的使用方法，熟悉实验中出现的正常现象与故障特征，熟练掌握模拟电路实验的操作步骤与电子测量技术，对实验过程中的经验教训进行总结。

4. 增强自觉提高实践工作能力的意识

要将实践工作能力的培养从被动转为主动。在实践中，通过单元模块电路实验和小型模拟电子系统实训项目培养自主学习能力，培养独立解决实验中的各种故障、困难、失败等问题，这是提高自己实践工作能力的最有效途径。

1.2 电子测量中的误差分析与测量数据处理

在电子测量中，被测量值有一个真实值，简称真值。测量的目的就是获取被测量真值，但由于受种种因素的影响，测量结果总是与被测量真实值不一致，即任何测量都不可避免存在测量误差。为减小和消除测量误差，需研究测量误差、测量不确定度及测量数据处理。

1.2.1 电子测量中的误差分析

电子测量是模拟电路实验的基础，它是用测量工具或仪器，通过一定的方法，直接或间接地得到所被测电参量的量值。

1. 有关量值的几个基本概念

1) 真值、理论真值和约定真值

真值是指在一定条件下,能够准确反映某一被测量值真实状态和属性的量值,是客观存在、实际具有的量值。真值有理论真值和约定真值两种。

理论真值是在理想情况下表征某一被测量值真实状态和属性的量值。理论真值是客观存在的,或是根据一定的理论所定义的。由于测量误差的普遍存在,一般情况下,被测量的理论真值是不可能通过测量得到的,但却是实际存在的。在模拟电路实验中,该值可用模拟电路理论分析方法估算。

约定真值就是指人们为了达到某种目的,按照约定的办法所确定的量值,通常为国际上公认的某个物理量的标准量值。例如,以高精度等级仪器的测量值约定为低精度等级仪器测量值的约定真值。

2) 实际值

在满足实际测量精度需要的前提下,其测量误差可以忽略测量结果,称为实际值。实际值在规定的精确程度内用以代替被测量的真值。例如,在标定测量仪表时,把高精度等级的标准器所测得的量值作为实际值。

3) 测量值和指示值

通过测量所得到的量值称为测量值。测量值一般是被测量真值的近似值。由测量仪表的显示部件直接显示出来测量值,称为指示值,简称示值。

4) 标称值

测量仪表上标注的量值称为标称值。因受制造、测量条件和环境变化的影响,标称值不一定是被测量的实际值,通常在给出标称值的同时,也给出它的误差范围或精度等级。

2. 测量误差的定义

测量误差是测量结果与被测量的真值之间的差异,简称误差。

误差公理认为:在测量过程中,测量误差的产生不可避免,测量误差自始至终存在于测量过程中,一切测量结果都存在误差。随着科学技术的发展和认识水平的提高,可以将测量误差控制得越来越小,但测量误差的存在仍不可避免。

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

1) 误差的表示方法

误差常用的表示方法有三种:绝对误差、相对误差和引用误差。

(1) 绝对误差。

绝对误差 Δ 为被测量的测量值 x 与真值 L 之差,即

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

绝对误差与被测量有相同单位。其值可为正,亦可为负。由于被测量的真值 L 往往无法得到,因此常用实际值 A 来代替真值,因此有

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

用校准仪表对测量结果进行修正时，常常使用的是修正值。修正值用来对测量值进行修正。修正值 C 定义为

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

修正值为绝对误差的负值。测量值加上修正值等于实际值，即 $x+C=A$ 。通过修正使测量结果更准确。

用绝对误差表示测量误差往往不能准确地表明测量质量的好坏。

(2) 相对误差。相对误差 δ 为绝对误差 Δ 与真值 L 的比值，用百分数来表示，即

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% \quad (1.2.4)$$

实际测量中真值无法得到，可用实际值 A 或测量值 x 代替真值 L 来计算相对误差。用实际值 A 代替真值 L 计算的相对误差称为实际相对误差，用 δ_A 来表示，即

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

用测量值 x 代替真值 L 计算的相对误差称为示值相对误差，用 δ_x 来表示，即

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

在实际应用中，因测量值与实际值相差很小，即 $A \approx x$ ，故 $\delta_A \approx \delta_x$ ，一般 δ_A 与 δ_x 不加以区别。

采用相对误差来表示测量误差能够较确切地表明测量的精确程度。

(3) 满度相对误差。绝对误差和相对误差仅能表明某个测量点的误差。实际测量仪表往往有一个测量范围，通常有一个满刻度值 x_m 。用满刻度相对误差表示测量仪表的精确程度，为绝对误差 Δ 与满刻度值 x_m 比值，即

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

γ_m 不能超过测量仪表的准确度等级 S 的百分值 $S\%$ (S 分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 共 7 级)。若仪表准确度等级为 S ，被测量真值为 L ，选满刻度测量 x_m ，则测量的相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta}{L} \leq \frac{x_m S\%}{L} \quad (1.2.8)$$

上式表明，当仪表的等级 S 选定后，测量值越接近于 x_m ，测量的相对误差越小。

2) 测量误差的来源

根据测量误差的来源，测量误差归纳起来有如下几个方面。

(1) 测量环境误差。任何测量都有一定环境条件，如温度、湿度、大气压、机械振动、电源波动、电磁干扰等。测量时，由于实际的环境条件与所使用的测量仪表要求的环境条件不一致，就会产生测量误差，这种测量误差就是测量环境误差。

(2) 测量仪表误差。对测量中所使用的测量仪表性能指标有一定要求。由于实际测量所使用的测量仪表性能指标达不到要求，或安装、调整、接线不符合要求，或使用不当，或因内部噪声、元器件老化等使测量仪表的性能劣化等，都会引起测量误差，这种测量误差就是测量仪表误差。

(3) 测量方法误差。由于测量方法的不合理或不完善,测量所依据的理论不严密等,也会产生测量误差,这种测量误差就是测量方法误差。例如,用电压表测量电压时,由于没有正确估计电压表内阻而引起的误差。

(4) 测量人为误差。由于测量操作人员操作经验、知识水平、操作不规范和疏忽大意等原因,也会产生测量误差。

3) 测量误差的类型

很多原因可以产生测量误差,按不同的角度进行分类。

(1) 系统误差、随机误差和粗大误差。根据测量误差的性质和表现形式,可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

① 系统误差。在相同的条件下,对同一被测量物进行多次重复测量时,所出现的数值大小和符号都保持不变的误差,或者在条件改变时,按某一确定规律变化的误差,称为系统误差。其主要特征是固定不变或按一定规律变化的误差。

系统误差的产生原因比较复杂,它可能是一个因素在起作用,也可能是多个因素同时起作用。主要是由测量仪表误差(如测量仪表制造和安装的不正确,没有将测量仪表调整到理想状态等)、环境误差(如环境温度、湿度变化等)造成的。

由于系统误差产生原因比较复杂,对测量的影响不易发现,因此首先应对测量仪表、测量对象和测量数据进行全面分析、检查和判定。若存在系统误差,应找出系统误差的根源,并采取一定的措施来消除或减小系统误差。

分析产生系统误差的根源,一般可从以下5个方面着手。

- a. 所采用的测量仪表是否准确可靠;
- b. 所应用的测量方法是否完善;
- c. 测量仪表的安装、调整、放置是否正确合理;
- d. 测量仪表的工作环境是否符合规定条件;
- e. 测量操作人员的操作是否合乎规范。

消除或削弱系统误差的方法如下。

a. 从产生系统误差的根源上消除系统误差,这是最根本的方法。在测量之前,测量人员要详细检查测量仪表,并且调整到最佳状态。在测量过程中,应防止外界干扰,尽可能减少产生系统误差的环节。

b. 在测量结果中利用修正值消除系统误差。对于已知的系统误差,通过对测量仪表的标定,事先求出修正值,实际测量时,将测量值加上相应的修正值就可得到被测量的实际值,消除或减小系统误差。对于变值系统误差,设法找出系统误差的变化规律,给出修正曲线或修正公式,实际测量时,用修正曲线或修正公式对测量结果进行修正。此种方法不能完全消除系统误差,但系统误差会被大大削弱。

c. 采用能消除系统误差的典型测量方法。找出系统误差变化规律后,在测量过程中采用相应能消除或减小系统误差的方法进行测量,可以避免或减小系统误差。

② 随机误差。在相同的条件下,对同一被测量进行多次重复测量时,所出现的数值大小和符号以不确定方式变化的误差,称为随机误差。其主要特性是随机性。

在实际测量中,系统误差和随机误差之间不存在明显的界限,两者在一定条件下可以相互转化。如某项具体误差,在一定条件下为随机误差,在另一条件下可为系统误差,反之亦然。

随机误差是在测量过程中,许多独立、微小的随机因素对测量造成干扰而引起的综合结果。这些影响因素既有测量仪表因素,也有环境因素和人为因素。由于对这些影响因素很难把握,一般也无法控制。因而对随机误差不能用简单的修正值来校正,也不能用实验的方法来消除。

单个随机误差的出现具有随机性,即它的大小和符号都不可预知,但是,当重复测量次数足够多时,随机误差的出现遵循统计规律。由此可见,随机误差是随机变量,测量值也是随机变量,因此可借助概率论和数理统计原理对随机误差进行处理,做出恰当评价,并设法减小随机误差对测量结果的影响。

③ 粗大误差。明显偏离被测量真值的测量值所对应的误差,称为粗大误差。粗大误差的产生,有操作人员的主观原因,如读错数、记错数、计算错误等,也有客观外界原因,如外界环境突然变化等。含有粗大误差的测量值称为坏值。坏值必然会歪曲测量结果。为避免或消除测量中产生粗大误差,首先要保证测量条件稳定,增强测量人员责任心并以严谨的态度对待测量任务。

对粗大误差的处理原则是:利用科学方法对可疑值做出正确判断,对确认的坏值予以剔除。

(2) 基本误差和附加误差

任何测量仪表都有正常工作所要求的环境条件。根据测量仪表实际工作的条件,可将测量所产生的误差分为基本误差和附加误差。

① 基本误差:测量仪表在规定使用条件下工作所产生的误差。

② 附加误差:在实际工作中,由于外界条件变化,测量仪表不在规定使用条件下工作,从而产生额外的误差。

在实际测量过程中,应尽量避免产生附加误差。

(3) 静态误差和动态误差

根据被测量随时间变化的速度,可将误差分为静态误差和动态误差。

① 静态误差:在测量过程中,测量误差稳定不变。

② 动态误差:在测量过程中,测量误差随时间发生变化。

在实际测量过程中,被测量往往是变化的。当被测量随时间变化很缓慢时,这时所产生的误差也近似可认为是静态误差。

3. 测量的精度

为了定性描述测量结果与真值的接近程度和各个测量值分布的密集程度,引入了测量的精度。测量的精度包含了准确度、精密度和精确度这3个概念。

1) 测量的准确度

测量的准确度表征了测量值和真值的接近程度。准确度越高则表征测量值越接近真值。准确度反映了测量结果中系统误差的大小程度,准确度越高,则系统误差越小。

2) 测量的精密度

测量的精密度表征了多次重复测量时,各个测量值分布的密集程度。精密度越高则表征

各测量值彼此越接近,即越密集。精密度反映了测量结果中随机误差的大小程度,精密度越高,则随机误差越小。

3) 测量的精确度

测量的精确度是准确度和精密度的综合,精确度高则表征了准确度和精密度都高。精确度反映了系统误差和随机误差对测量结果的综合影响,精确度高,则反映测量结果系统误差和随机误差都小。

对于具体测量,精密度的准确度不一定高;准确度高的,精密度不一定高;但是精确度高的,精密度和准确度都高。

在应用准确度、精密度和精确度时,应注意它们都是定性概念,不能用数值作定量表示。

1.2.2 测量数据的处理

1. 直接测量数据的有效数字及近似数运算

在进行各种测量和数字计算时,大多数测量值和数字计算的结果均是近似数,其中包含有误差,应该用几位数字来表示测量值和数字计算的结果,这是一个有效数字的问题。在测量数据时,不能简单认为小数点后面位数越多就越准确。

1) 有效数字

当用一个数来表示某测量值时,若误差不超过其末位数字单位的一半,那么,从该数左起第一个非零数字起到最末一位数字止,都称为有效数字。

显然,在一个数的有效数字中,仅最末一位数字是欠准确的,其余数字都是准确的。

一个数的全部有效数字所占有的位数称为该数的有效位数。

对于“0”这个数字,可能是有效数字,也可能不是有效数字。“0”是否是有效数字的判定准则是:处于数中间位置的“0”是有效数字;处于第一个非零数字前的“0”不是有效数字;处于数后面位置的“0”则难以确定,这时应采用科学记数法。

例如,0.524mH、2.06V、98.7Hz、1.20mA、 1.30×10^{-3} F 均为3位有效数字。尤其是1.20mA和 1.30×10^{-3} F的末位“0”不能随意删除。

有效数位不能因单位变化而变化。2.06V不能记作为2060mV,而应该记为 2.06×10^3 mV。

2) 数据的舍入规则

判定数据应取的有效位数后,就应把数据中的多余数字舍弃。为减小因舍弃多余数字引起误差,应按有效数字舍入原则进行舍弃。基本原则是4舍6入5凑偶,具体做法如下。

(1) 若判定应舍弃数字的第一位数字小于5,则将应舍弃该舍弃数字(即4舍);

(2) 若判定应舍弃数字的第一位数字大于5,则将应舍弃该舍弃数字,并把应保留部分的末位数字加1(即6入);

(3) 若判定应舍弃数字的第一位数字是5,则要按不同情况区别对待:

① 若5后面的数字不全是0,则将应舍弃数字舍弃,并把应保留部分的末位数字加1;

② 若5后面的数字全是0或5后面没有数字,则要看应保留部分的末位数字是奇数还是偶数。若为奇数,则将应舍弃数字舍弃,并把应保留部分的末位数字加1,使有效数字末位

成为偶数；若为偶数，则将应舍弃数字舍弃，应保留部分的末位数字不加 1，使有效数字末位仍为偶数（即 5 凑偶）。

(4) 要一次性舍弃，不能逐位舍弃。

3) 有效数字的运算规则

在不同有效数字运算中，数据的有效位数应按以下几条准则来判定。

(1) 多项有效数字的加、减运算，应以数据中有效数字末位数的数量级最大者为准，其余各数均向后多取一位有效数字，项数过多时可向后多取两位有效数字，最终结果的有效数字末位数的数量级应该与有效数字末位数的数量级最大者一致。

例如，求 $987.5+0.2354\approx 987.5+0.24=987.74\approx 987.7$ 。

(2) 近似数进行乘、除运算，应以数据中有效位数最少者为准，其余各数多取一位有效数字，最终结果的有效位数应该与有效位数最少者一致。

例如，求 $15.235\times 4.52\approx 15.24\times 4.52=68.8848\approx 68.9$ 。

(3) 对一个有效数进行开方或乘方运算时，运算结果的位数应比原数的有效位数多 1 位。

(4) 进行近似数对数运算时，所取对数的位数应与原数的有效位数相等。

2. 间接测量的误差传递

在实际测量中，对于不能直接测量的量，采用间接测量的方法，即通过对与被测量有确定函数关系的几个量进行直接测量，然后将测量结果代入函数关系式，经过计算得到所需要的测量结果。由于直接测量的测量结果含有测量误差，则根据函数关系计算得到的测量结果中也有一定的误差。误差的传递实质上就是要解决间接测量的误差问题，即如何根据各直接测量量的误差来评定间接测量结果的误差。

在间接测量中，被测量和直接测量量之间的函数关系可以表示为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (1.2.9)$$

式中， y 是间接测量的被测量； x_j 是各个直接测量量。

由微分知识可得

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} dx_m$$

用间接测量量 y 的误差 Δy 代替 dy ，用直接测量量 x_j 的误差 Δx_j 代替 dx_j ，则有

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} \Delta x_m = \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial x_j} \Delta x_j = \sum_{j=1}^m f'_{x_j} \Delta x_j = \sum_{j=1}^m D_j \quad (1.2.10)$$

该式称为间接测量误差传递的基本公式， $f'_{x_j} = \frac{\partial f}{\partial x_j}$ 称为 x_j 的误差传递系数， $D_j = f'_{x_j} \Delta x_j =$

$\frac{\partial f}{\partial x_j} \Delta x_j$ 称为 x_j 的部分误差。

如果将式 (1.2.10) 用相对的形式表示，则有：

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{\Delta x_1}{y} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \frac{\Delta x_2}{y} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \frac{\Delta x_n}{y} = \frac{1}{y} \sum_{j=1}^m f'_{x_j} \Delta x_j = \frac{1}{y} \sum_{j=1}^m D_j \quad (1.2.11)$$