

“十三五”普通高等教育规划教材

模拟电子技术 实验教程

王贞主编



含电子课件

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

模拟电子技术实验教程

主编 王 贞
参编 臧宏文 刘 丹 杨 艳
吴新燕 王 涛 宫 鹏



机械工业出版社

本书根据学生应掌握的模拟电子技术的基本理论、技术方法和实验中经常遇到的实际问题等方面,从理论和具体操作方法上由浅入深进行介绍。全书内容包括:模拟电子技术实验综述、模拟电子技术基础实验、模拟电子技术综合设计实验和电子电路的仿真与设计。

本书力图突破传统实验教材体系,实验内容分为基础实验、综合设计实验和提高创新实验三个不同层次,每个实验项目又包括基本任务和扩展任务两部分,根据各学校各专业实验学时的不同和教学要求的不同,可灵活选择实验项目。模拟电子基础实验包括单独编写的实验报告模板。

本书可作为高等院校电气信息类专业的模拟电子技术实验课程教材,也可作为广大电子行业的工程技术人员和电子爱好者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术实验教程/王贞主编. —北京:机械工业出版社,2018.7

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-60218-7

I. ①模… II. ①王… III. ①模拟电路-电子技术-实验-高等学校-教材 IV. ①TN710-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 128404 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:时 静 张莉萍 责任校对:张艳霞

责任印制:张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·12 印张·289 千字

0001-3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-60218-7

定价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:(010)88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:(010)88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书是根据高等院校电气信息类专业的“模拟电子技术课程”的教学大纲，结合多年教学实践而编写的一本实验教材。

本书突破传统的实验教学体系，建立基础实验、综合设计实验、提高创新实验和开放性学习、研究性学习模式，分层次一体化的实验课程新体系；突出时代性、先进性、适用性和通用性；更加科学化和规范化。将实验内容分成基本实验内容与综合设计创新研究实验内容，且后者所需学时数大于前者。基本实验内容丰富，通过常规基础实验的训练，使学生掌握基本实验理论、基本实验方法、基本实验技能，培养基本素质。而一个人掌握了扎实的实验基础，就有很强的适应性，随着环境的变化就会迅速学会新的实验知识与技能。综合设计创新研究实验内容，既有课程各知识点的综合，又有实验技能、测试方法的综合，提高学生对于模拟电子技术知识的综合应用能力。本书在编写中依据教学体系建设需要，充分考虑了各种教学模式和不同层次学生的需要和使用。实验内容由浅入深地进行安排，基本实验内容给出了实验电路、实验仪器与器件及实验方法步骤，写得较为详细，综合设计创新研究实验内容只提要求，让学生自行设计实验方案，独立完成实验。各学校各专业可根据实验学时和教学要求的不同，选择其中部分内容使用。

全书共4章。第1章介绍模拟电子技术实验综述，内容包括实验目的、一般过程和要求、电路调试与故障排查的一般方法，以及误差分析与数据处理。第2章介绍模拟电子技术基础实验，共11个实验项目，每个实验项目的内容均包括基本任务和扩展任务两部分。所有实验项目的报告模板附在第2章最后，以方便学生使用。第3章介绍模拟电子技术综合设计实验，包括综合设计实验的一般方法和5个综合设计课题。每个课题都是近年来学生在电子课程设计中选择较多的课题，具有通用性、综合性和实用性的特点，每个项目均提供简单的设计思路和说明。第4章介绍电子电路的仿真与设计，包括仿真软件的简介和使用入门示例。附录部分介绍了常用电子仪器的面板和使用方法等。

本书的编写是在青岛大学电工电子实验教学中心的大力支持下进行的。其中，第1、3章由王贞编写，第2章由臧宏文、杨艳、王涛、宫鹏、吴新燕共同编写，第4章由刘丹编写。全书由王贞统稿。书中所有实验电路均经过多年教学实践和学生实验验证过。本书在编写过程中还参阅借鉴了国内外相关高等院校有关的教材，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者和同行给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 模拟电子技术实验综述	1	2.3 分立元器件负反馈放大电路	
1.1 模拟电子技术实验的目的	1	实验	32
1.2 模拟电子技术实验的一般		2.3.1 实验目的	32
过程和要求	2	2.3.2 实验任务	33
1.2.1 实验准备	2	2.3.3 基本实验条件	33
1.2.2 实验操作	3	2.3.4 实验原理	33
1.2.3 实验总结	5	2.3.5 实验预习要求	36
1.3 模拟电子电路调试与故障排查的		2.3.6 实验内容及步骤	37
基本方法	6	2.3.7 实验注意事项	39
1.3.1 模拟电子电路调试的基本方法	6	2.4 差分放大电路实验	39
1.3.2 故障排查的基本方法	7	2.4.1 实验目的	39
1.4 测量误差的分析与测量数据的		2.4.2 实验任务	39
处理	8	2.4.3 基本实验条件	40
1.4.1 测量误差的分析	8	2.4.4 实验原理	40
1.4.2 测量数据的记录与处理	9	2.4.5 实验预习要求	42
第 2 章 模拟电子技术基础实验	14	2.4.6 实验内容及步骤	43
2.1 常用电子仪器的使用练习实验	14	2.4.7 实验注意事项	45
2.1.1 实验目的	14	2.5 功率放大电路实验	45
2.1.2 实验任务	14	2.5.1 实验目的	45
2.1.3 基本实验条件	14	2.5.2 实验任务	45
2.1.4 实验原理	14	2.5.3 基本实验条件	45
2.1.5 实验预习要求	18	2.5.4 实验原理	46
2.1.6 实验内容及步骤	18	2.5.5 实验预习要求	48
2.1.7 实验注意事项	22	2.5.6 实验内容及步骤	48
2.2 晶体管放大电路的研究实验	22	2.5.7 实验注意事项	50
2.2.1 实验目的	22	2.6 集成负反馈放大电路实验	50
2.2.2 实验任务	22	2.6.1 实验目的	50
2.2.3 基本实验条件	23	2.6.2 实验任务	50
2.2.4 实验原理	23	2.6.3 基本实验条件	50
2.2.5 实验预习要求	28	2.6.4 实验原理	51
2.2.6 实验内容及步骤	29	2.6.5 实验预习要求	52
2.2.7 实验注意事项	32	2.6.6 实验内容及步骤	53
		2.6.7 实验注意事项	54

2.7 集成运算放大器的基本应用	
实验	55
2.7.1 实验目的	55
2.7.2 实验任务	55
2.7.3 基本实验条件	55
2.7.4 实验原理	56
2.7.5 实验预习要求	59
2.7.6 实验内容及步骤	60
2.7.7 实验注意事项	63
2.8 集成运算放大器的非线性应用	
(I) ——电压比较器实验	63
2.8.1 实验目的	63
2.8.2 实验任务	63
2.8.3 基本实验条件	64
2.8.4 实验原理	64
2.8.5 实验预习要求	66
2.8.6 实验内容及步骤	67
2.8.7 实验注意事项	68
2.9 集成运算放大器的非线性应用	
(II) ——波形发生电路实验	69
2.9.1 实验目的	69
2.9.2 实验任务	69
2.9.3 基本实验条件	69
2.9.4 实验原理	69
2.9.5 实验预习要求	72
2.9.6 实验内容及步骤	73
2.9.7 实验注意事项	74
2.10 RC 有源滤波电路实验	74
2.10.1 实验目的	74
2.10.2 实验任务	74
2.10.3 基本实验条件	75
2.10.4 实验原理	75
2.10.5 实验预习要求	78
2.10.6 实验内容及步骤	79
2.10.7 实验注意事项	80
2.11 直流稳压电源——集成稳压器	
实验	80
2.11.1 实验目的	80
2.11.2 实验任务	80
2.11.3 基本实验条件	80
2.11.4 实验原理	81
2.11.5 实验预习要求	82
2.11.6 实验内容及步骤	83
2.11.7 实验注意事项	85
第3章 模拟电子技术综合设计实验	86
3.1 综合设计实验方法与示例	86
3.1.1 综合设计实验的方法与步骤	86
3.1.2 综合设计实验示例	92
3.2 半导体晶体管 β 值测量仪	95
3.2.1 实验任务及要求	95
3.2.2 设计思路	95
3.2.3 主要参考元器件	96
3.3 简易集成运算放大器测试仪	96
3.3.1 实验任务及要求	96
3.3.2 设计思路	96
3.3.3 主要参考元器件	97
3.4 音响放大器	97
3.4.1 实验任务及要求	97
3.4.2 设计思路	97
3.4.3 主要参考元器件	98
3.5 频率/电压变换器	98
3.5.1 实验任务及要求	98
3.5.2 设计思路	98
3.5.3 主要参考元器件	99
3.6 逻辑信号电平测试器	99
3.6.1 实验任务及要求	99
3.6.2 设计思路	99
3.6.3 主要参考元器件	99
第4章 电子电路的仿真与设计	100
4.1 仿真软件简介	100
4.2 Multisim10 界面介绍	101
4.3 Multisim10 使用入门	107
4.3.1 建立电路	107
4.3.2 电路仿真分析	109
附录 常用电子仪器简介	114
实验报告	141
参考文献	183

第1章 模拟电子技术实验综述

实验是人们根据一定的目的要求,运用一定手段,突破客观条件限制,在人为控制、干预或模拟条件下,观察、探索客观事物本质和规律的一种科技创造方法。实验是获得第一手资料的重要方法;是探索自然奥秘和事物客观规律的必由之路;是检验真理的标准;是推动科学发展的有力手段。

实验室是现代化大学的心脏。实验教学是把科学实验引进教学领域的教学过程。实验教学是理论知识和实践活动、间接经验和直接经验、抽象思维和形象思维相结合的教学过程;是科学思想、方法、技术相结合的教学过程。实验教学具有直观性、实践性、物质性、技术性、综合性和科学性。实验教学具有传授知识、培养能力、提高素质的全面作用。

在高等学校理工科各专业学生的培养过程中,按照一定的教育计划和目标,在教师指导下,组织学生运用一定的条件观察和研究客观事物的本质和规律,以传授知识、培养能力、提高素质为目的,让学生亲自运用实验手段动脑动手独立完成实验,综合运用所学知识和技能,自主实验操作,进行系统分析、比较、归纳等思维活动,是全面推进素质教育、培养创新人才的重要组成部分。

1.1 模拟电子技术实验的目的

“模拟电子技术”是高等学校理工科各专业的一门实践性很强的专业基础课。模拟电子实验是将模拟电子技术理论用于实际的实践性活动,通过该课程的学习,使学生得到模拟电子基本实践技能的训练,学会运用所学理论知识判断和解决实际问题,加深和扩大理论知识;加强工程实际观念和严谨细致的科学作风,为本学科的专业实验、生产实践和科学研究打下基础。

模拟电子技术实验作为重要教学环节,对培养学生理论联系实际的学风、研究问题和解决问题的能力、创新能力和协作精神,以及提高学生针对实际问题进行电子设计制作的能力具有重要的作用。

模拟电子技术实验内容设置分为基础验证、综合设计和创新研究三个层次。基础验证实验,主要选择一些经典内容,以元器件特性、参数和基本单元为实验电路,验证电子技术的有关原理,巩固所学的理论知识,培养学生的基本工程素质、基本实验技能、基本分析和处理问题的能力。综合设计实验,主要结合实际应用,给定实验的部分条件,或实验电路,或方法要求,由学生自行拟定实验方案,正确选择仪器,完成电路连接和性能测试任务,估算工程误差,并能够解决实验中出现的问题(包括排除故障),培养学生对所学知识的综合应用能力,提高学生针对实际问题进行电子设计制作的能力,增强学生的工程设计与综合应用素质。创新研究实验,根据给定的实验课题或自主选择课题,由学生独立设计实验电路、实验内容和性能指标,选择合适的元器件,完成电路的组装和调试,以达到设计要求,培养学

生自主学习、系统分析、应用、综合、设计与创新的能力，从而培养学生知识更新、独立分析处理问题的能力以及创新的思维。

通过模拟电子技术实验课程的学习和实践，学生应学会识别电路图、合理布局和接线、正确测试、准确读取和记录数据，能排除实验电路的简单故障和解决实验电路中常见的问题；学会正确选择和使用常用的电子测量仪器仪表、实验设备和工具，掌握典型应用电路的组装、测量和调试方法，能够正确处理实验数据、绘制曲线图表和误差分析，具有一定的工程估算能力；学会查阅相关技术手册和网上查询资料，合理选用实验元器件（参数）；学会使用EDA仿真软件，对实验电路进行仿真分析和辅助设计；掌握常用单元电路或小系统的设计、组装和调试方法，具备一定的综合应用能力；具备独立撰写实验报告的文字表达能力；学会从实验现象、实验结果中归纳、分析和创新实验方法；提高科学素养，包括养成严谨的工作作风，严肃认真、实事求是的科学态度，勤奋钻研、勇于创新的开拓精神，遵守纪律、团结协作和爱护公物的优良品德。

而一个完整的实验过程应包括实验准备、实验操作和实验总结等环节。不论是验证实验还是设计实验，各环节的完成质量都会直接影响到实验的效果。

1.2 模拟电子技术实验的一般过程和要求

1.2.1 实验准备

实验准备即为实验预习。实验预习是关系到实验能否顺利进行和收到预期效果的重要前提，是保证实验能否顺利进行的必要步骤，是提高实验质量和效率的可靠保证。

1. 基础验证实验的实验预习

对于基础验证实验，实验预习应按以下步骤进行：

1) 仔细阅读实验指导书，了解本次实验的目的和任务，复习与实验有关的内容，熟悉与本次实验相关的理论知识，掌握本次实验的原理。

2) 根据给出的实验电路与元器件参数，进行必要的理论计算。

实验中所用的实际元器件不同于理想元器件，同一种性质（类型）的元器件会因型号和用途的不同，在外观形状上存在一定差异，在标称值和精度等内部特性方面也有很大差别。模拟电子技术实验所涉及的元器件主要包括电阻器、电感器、电容器、二极管、稳压管、晶体管、场效应晶体管、各种集成电路芯片、各种开关、各种指示灯、熔断器、继电器、接触器、变压器、电动机和传感器等。

3) 详细阅读本次实验所用仪器仪表的使用说明，熟记操作要点。

仪器设备主要有电压表、电流表、功率表、电能表、直流电源、函数发生器、示波器和计算机等。在实验前必须了解和熟悉它们的功能、基本原理和操作方法，并正确选用。通过CAI课件、MOOC课程视频等途径了解本次实验所用仪器仪表的特性、使用方法及注意事项。

4) 设计或掌握操作步骤和测量方法。

操作步骤是实验的操作流程，是培养学生良好操作习惯的重要环节。因此，为完成实验任务所设计的操作步骤必须细致，充分考虑各种因素的影响，包括每步操作的注意事项、仪

器设备和人身的安全措施、测量数据的先后顺序等。

5) 确定观察内容、测试和记录数据。

预习时应拟定好所有记录数据和有关测试内容的表格或图框。凡是要求首先进行理论计算的内容必须在预习中完成，并尽量把理论数据填写在记录实验数据的表格中，便于与记录的实验数据进行对比分析。

2. 设计实验的实验预习

对于设计实验，除了进行以上基本步骤外，还应在实验预习中完成以下步骤：

1) 深入理解实验题目所提出的任务与要求，阅读有关的技术资料，学习相关的理论知识。

2) 进行电路方案设计，选择电路元器件参数。

3) 使用仿真软件进行电路性能仿真和优化设计，进一步确定所设计的电路原理图和元器件参数。仿真分析是运用计算机软件对电路特性进行分析和调试的虚拟实验手段。在虚拟环境中，不需要真实电路的介入，不必顾及设备短缺和时间、环境的限制。因此，在进行实际电路搭建和性能测试之前，可以借助仿真软件对所设计的电路反复更改、调整和测试，以获得最佳的电路指标和拟定最合理的实测方案；同时对实验结果做到心中有数，以便在实物的实验中有的放矢、少走弯路、提高效率、节省资源。常用的仿真软件有 Multisim 等，应当把仿真软件作为实验的基本工具，加以掌握和应用。

4) 拟定实验步骤和测量方法，画出必要记录表格备用，选择合适的测量仪器。

3. 预习报告

在实验进行前，必须按要求进行实验预习，完成所有与本次实验相关内容的问题解答。

要特别注意，在预习阶段还要根据自身实际情况以及实验需要，尽可能通过网络、图书馆等信息资源，更多地了解相关知识，拓宽预习范围，例如各实验所需元器件的基本原理和选用知识、仪器仪表的使用方法、特殊器件的应用、实验注意事项、安全操作规范等，这对积累实验经验和培养实践能力将有很大帮助。

1.2.2 实验操作

在完成理论学习、实验预习等环节后，就可进入实验操作阶段。实验操作是在预习报告的指导下，按照操作步骤进行有条不紊的实际操作的过程，包括熟悉、检验和使用元器件与仪器设备，连接实验线路，实际测试与数据记录以及实验后的整理等工作程序。

1. 熟悉设备，检查元器件

实验开始前，指导教师要对学生的预习报告进行检查，看学生是否了解本次实验的目的、内容和方法。只有检查通过后，才能允许进行实验操作。操作前要注意两点：第一，要认真听取指导教师对实验装置的介绍，或通过 CAI 课件、MOOC 课程视频等了解本次实验所用实验设备、仪器仪表的功能与使用方法；第二，要对所用元器件与导线等进行简要的测试。为了保证在实验中使用的元器件和导线是完好的，在使用之前一定要用万用表进行简单的测试，如检查导线有没有断开、二极管是否完好等。

2. 连接实验线路

即按确定的实验线路图接线。连接实验线路是实验过程中的关键性工作，也是评判学生是否掌握基本操作技能的主要依据。通常，连接实验线路需要注意以下几点：

1) 合理摆放实验对象。

电源、负载、测量仪器等实验对象的摆放，一般原则是使实验电路的布局合理（即对象摆放的位置、距离、连线长短等对实验结果影响小），使用安全方便（即实验对象的接线、调整、测读数据均方便，摆放稳固，操作安全），连线简单可靠（即用线短且用量少，尽量避免交叉干扰，防止接错线和接触不良）。

2) 连接的顺序要根据电路的结构特点及个人熟练程度而定。

对初学者来说，一般是按电路图上的接点与各实物元器件接头的一一对应关系来顺序接线的。对于复杂的实验电路，通常是先连接串联支路，后连接并联支路；先连接主电路，后连接其他电路；先连接各个局部，后连接成一个整体。实验电路走线、布线应简洁明了，便于测量，导线的长短粗细要合适、尽量短、少交叉，防止连线短路。所有仪器设备和仪表，都要严格按照规定的接法正确接入电路（例如，电流表及功率表的电流线圈一定要串接在电路中，电压表及功率表的电压线圈一定要并接在电路中）。

3) 巧用颜色导线。

为便于查错，接线可用不同颜色的导线来区分。例如电源“+”极用红色导线，电源的“-”极用蓝色导线，“地”端用黑色导线。有接线端的地方要拧紧或夹牢，以防止接触不良或脱落。

4) 注意地端连接。

电路的公共地端和各种仪器设备的接地端应接在一起，既可作为电路的参考零点，又可避免引起干扰。在一些特殊的场合，仪器设备的外壳应接地保护或接零保护，以确保人身和设备安全。在焊接和测试 MOS 器件时，电烙铁和测试仪器均要接地，以防它们漏电而损坏 MOS 器件。在测量时，要特别注意防止因仪器和设备之间的“共地”而导致被测电路或局部短路。

5) 注意屏蔽。

对于中频和高频信号的传输，应采用屏蔽线。同时，将靠近实验电路的屏蔽线（外导体）进行单端接地，以提高抗干扰能力。

3. 实验电路通电

完成实验电路连接之后，并非就可以通电实验了，而必须进行复查。检查内容包括：

1) 连线是否正确。

即检查线路是否接错位置（或短路），是否多连或少连导线，电源的正负极、地线和信号线连接是否正确，连接的导线是否导通等。这是保证实验顺利进行、防止事故发生的重要措施。具体方法是，对照实验电路图，由左至右或由电路有明显标记处开始一一检查，不能漏掉一根哪怕是短小的连线；按照“图物对照、以图校物”的基本方法加以检查。对初学者，检查电路连线是一项很有意义的工作，它既是对电路连接的认识，又是建立电路原理图与实物安装图之间内在联系的训练机会。

2) 元器件安装是否正确。

即检查元器件引脚之间有无短路，连接处有无接触不良，二极管、晶体管、集成电路和电解电容极性 etc 是否连接有误。

若电路经过检查，确认无误后，可接通电源。

4. 测量数据, 观察现象

接通电源后, 先将设备大致调试一遍, 观察各被测量的变化情况和出现的现象是否合理, 若不合理, 应切断电源, 查找原因, 进行改正。如数据出现时有时无的变化, 可能是实验电路的接线松动、虚焊、连接导线出现隐藏断点或仪器仪表工作不稳定; 预测数据与理论数据相差很大, 可能是实验电路接线错误、(局部) 碰线或元器件参数选择不当等问题。只有消除隐患, 才能确保实验电路正常工作。

仪表读数时, 思想要集中, 姿势要正确。对于数字式仪表, 要注意量程、单位和小数点位置; 对于指针式仪表, 要求眼、针、影成一线, 及时变换量程使指针指示于误差最小的范围内。变换量程要在切断电源情况下操作。

5. 数据记录与分析

将所有数据记在原始记录表上, 数据记录要完整、清晰, 力求表格化, 一目了然, 合理取舍有效数字, 并注明被测量的名称和单位。重复测试的数据应记录在原数据旁或新数据表中, 要尊重原始记录, 实验后不得涂改, 养成良好的记录习惯, 培养工程意识。交实验报告时, 应将原始记录一起附上。

在测量过程中, 应及时对数据做初步分析, 以便及早发现问题, 立即采取必要措施以达到实验的预期效果。例如对被测量变化快速的区域, 应增加测试点以获取更多的变化细节; 对变化缓慢的区域, 可以减少测试点, 以加快测试速度, 提高效率; 对于关键点的数据不能丢失, 必要时要多次测量, 取用它们的平均值以减小误差。

6. 完成实验

完成本次实验全部内容后, 应先断电, 暂不拆线, 待认真检查实验结果无遗漏和错误后, 方可拆除接线。整理好连接线、仪器工具, 使之物归原位。

实验过程中应特别注意人身安全与设备安全。改接线路和拆线一定要在断电的情况下进行, 严禁带电操作。使用仪器仪表要符合操作规程, 切勿乱调旋钮、档位。发现异常情况, 立即切断电源, 查找故障, 排除后再继续进行。

1.2.3 实验总结

实验的最后阶段是实验总结, 即对实验数据进行整理, 绘制曲线图和图表, 分析实验现象, 撰写实验报告, 每次实验参与者都要独立完成一份实验报告。实验报告的编写应持严肃认真、实事求是的科学态度, 如实验结果与理论有较大出入时, 不得随意修改实验数据和结果, 不得用凑数据的方法来向理论靠拢, 而是用理论知识来分析实验数据和结果, 解释实验现象, 找出引起较大误差的原因。

基础实验报告中一般要包括如下内容:

- 1) 实验名称。
- 2) 实验目的。
- 3) 实验仪器设备及元器件: 仪器设备和元器件清单, 包括仪器设备以及元器件的名称、型号规格和数量等, 并对这些设备在实验过程中的使用状况做出说明, 便于统计和维修。
- 4) 仿真结果: 包括选用的仿真工具和仿真结果(数据、表格和波形等)。
- 5) 实验数据: 测试所得到的原始数据和曲线等。注意标注数据的单位。

6) 测量数据的分析与处理: 实验总结的主要工作是对实验原始记录的数据进行处理。此时要充分发挥曲线和图表的作用, 其中的公式、图表、曲线应有符号、编号、标题、名称等说明, 以保证叙述条理的清晰。为了保证整理后数据的可信度, 应有理论计算值、仿真数据和实验数据的比较、误差分析等。对实验数据的处理, 要合理取舍有效数字。报告中的所有图表、曲线均按工程化要求绘制。对与预习结果相差较大的原始数据要分析原因, 必要时应对实验电路和测试方法提出改进方案以及重新进行实验。

7) 存在问题的分析与处理: 对于实验过程中发现的问题(包括错误操作、出现故障), 要说明现象、查找原因的过程和解决问题的措施, 并总结在处理问题过程中的经验与教训。

8) 回答思考题: 按要求有针对性地回答思考题, 它是对实验过程的补充和总结, 有助于对实验内容的深入理解。

9) 实验的收获和体会: 实验能力和综合素质上有哪些收益, 掌握了哪些基本操作技能, 对该实验有哪些改进体会以及建议。

总之, 一个高质量的实验来自于充分的预习、认真的操作、可靠的数据和全面的实验总结。每个环节都必须认真对待、真实可信, 才能达到预期的实验效果。

1.3 模拟电子电路调试与故障排查的基本方法

1.3.1 模拟电子电路调试的基本方法

在进行模拟电子电路实验过程中, 由于元器件值误差、元器件参数分散性、电路寄生干扰和仪器设备精度等复杂的客观因素, 往往一个模拟电子电路即使按照成熟的电路结构和参数进行安装, 也可能出现一些不能顺利正常工作的现象。这就需要对电路进行必要的调试。因此, 对于从事电子技术及相关领域工作的人员来说, 掌握模拟电子电路调试的技能尤为重要。

调试包括测试和调整。所谓模拟电子电路的调试, 就是对模拟电子电路进行一系列的测量→判断→调整→再测量的反复过程。模拟电子电路调试的目的, 就是在预定的工作条件下实现电路的技术指标。

调试方法通常采用先分调后联调(总调)。任何复杂电路都是由一些基本单元电路组成的。调试时, 可以按照信号的流向, 逐级调整单元电路, 使其参数基本符合技术指标。各单元电路调试好后, 再逐步扩大调试范围, 最终完成总体电路的调试。

交直流并存是模拟电子电路工作的一个重要特点。因此, 模拟电子电路的调试分为静态调试和动态调试。

1. 静态调试

它是指在没有加入信号的条件下的调试工作, 使电路各输入和输出的参数都符合设计要求, 所以也称为直流调试。例如, 通过静态测试放大电路的静态工作点, 可以及时发现已经损坏的元器件, 判断电路工作情况, 并及时调整电路参数, 使电路工作状态符合要求。对于运算放大器, 静态调试除了测量正、负电源是否正确外, 还包括调零的检测, 即电路输入为零时, 输出端是否接近零电位。若运算放大器输出直流电位始终接近正电源电压值或负电源电压值, 说明运算放大器处于阻塞状态, 可能是外电路没有接好, 也可能是运算放大器

已经损坏。

2. 动态调试

动态调试是指在静态正常条件的基础上加入信号的调试工作，使电路各种输入和输出的交流参数都符合设计要求。对于模拟电子电路，主要是借助仪器观测信号波形、幅值、相位、频率等参数；对于数字电路，可借助电压（平）表、发光管、数码管和蜂鸣器来判断逻辑功能。

无论是静态调试还是动态调试，如果不符合要求，均应调整甚至更换相应的元器件，直至达到要求。然后进行技术指标测试，它是借助仪器仪表所进行的测试。如果发现测试结果与设计要求存在较大差异，就需要找出原因，及时调整甚至修正设计方案，以得到满意的实验电路以及可靠的数据。

1.3.2 故障排查的基本方法

在正常的情况下，连接好实验电路即可进行测试或调试。但也常常会出现一些意想不到的故障，导致数据测试不正确甚至实验不能正常进行。遇到故障不一定是坏事，在实验中通过排除故障的锻炼，将有助于实验技能的不断提高。一旦遇到故障，切忌轻易拆掉线路重新安装，而是要运用所学知识，认真观察故障现象，仔细分析故障原因，最后查找到故障部位，排除故障，使实验得以继续进行。故障的检查通常采用以下几种方法：

1. 断电检查法

当实验接错线，造成电源或负载短路或严重过载，特别是发现实验电路或设备的异常现象（如有声响、冒烟火、焦臭味以及发烫等）将导致故障进一步恶化时，应立即关断电源进行检查。一是对照原理图，对实验电路的每个元器件及连线逐一进行外部（直观）检查，观察元器件的外观有无断裂、变形、焦痕和损坏，引脚有无错接、漏接或短接；观察仪器仪表的摆放、量程选择、读数方式是否正确。二是使用万用表的“ Ω ”档，检查各支路是否连通，元器件是否良好。对于电容、电感（包括电动机和变压器）元件，可用电桥测量；对于集成电路，需要专用仪器测试或用好的芯片替换来判断。

2. 通电检查法

这是使用测试仪器检测电路参数来判断故障部位的在线检查方法。一般是先直观检查，再进行参数测试。

(1) 直观检查法

直观检查法是电路在通电状态下对工作状况进行直接观察检查的方法，包括听各种声音、看显示数值、查运行状态、手感外表温度、嗅现场气味等外部现象，来确认电路是否正常。有时还要配合不同操作动作，使呈现的现象更明显。

(2) 参数测试法

参数测试法最常见的是利用万用表进行电压测量，主要检查电源供电系统从电源进线、刀开关、熔断器到电路输入端有无电压，电子类仪器仪表有无供电，输入和输出信号是否正常，各元器件和仪器的电压是否符合给定值等。对于动态参数，多数借助示波器观察波形及可能存在的干扰信号，有利于故障分析。

(3) 替换法

替换法是当故障比较隐蔽时，在对电路进行原理分析的基础上，对怀疑有问题的部分可

用正常的模块或元器件来替换。如果故障现象消失了，电路能够正常工作，则说明故障出现在被替换下来的部分，以缩小故障范围，便于进一步查找故障原因和部位。

(4) 断路法

断路法是在实验电路中通过断开某部分电路，可以起到缩小故障范围的作用。例如直流稳压电源，接入一个带有局部短路故障的电路，其输出电流明显过大。若断开该电路中的某条支路时恢复了正常，说明故障就是这条支路，进一步查找即可发现故障部位。

值得一提的是，目前有不少仿真软件都能够用于设置各种故障源，为工程人员借助软件仿真来重现故障现象，了解故障产生的原因及后果，直观认识工程现场，提供了安全、无损和便捷的工具。因此，应很好地加以掌握和利用仿真工具，可以达到事半功倍的效果。

1.4 测量误差的分析与测量数据的处理

1.4.1 测量误差的分析

1. 测量误差的表示方法

(1) 绝对误差

测量结果 X 与被测量的真值 A 之差称为绝对误差 Δ 。公式为

$$\Delta = X - A$$

Δ 是一个具有大小、符号和单位的值，反映的是测量结果与真值的偏差程度，但不能反映测量的准确程度。

(2) 相对误差

绝对误差 Δ 与真值 A 之比的百分数，称为相对误差 β 。公式为

$$\beta = \Delta / A \times 100\%$$

相对误差反映了测量的准确度。

2. 测量误差的分类

测量误差按其性质可分为如下三类：

(1) 系统误差

在相同条件下，多次测量同一量时，误差的绝对值和符号保持恒定或遵循一定规律变化的误差，称为系统误差。产生系统误差的主要原因有仪器误差、使用误差、影响误差、方法和理论误差。消除系统误差主要应从消除产生误差的来源着手，多用零示法、替代法等，用修正值是一种减小系统误差的好方法。

(2) 随机误差

在相同条件下进行多次测量，每次测量结果出现无规则的随机性变化的误差，称为随机误差。随机误差主要由外界干扰等原因引起，可以采用多次测量取算术平均值的方法来消除随机误差。

(3) 粗大误差

在一定条件下，测量结果明显偏离真值时所对应的误差，称为粗大误差。产生粗大误差

的原因有读错或记错数、测量方法错误、测量仪器有缺陷等，其中人身误差是主要的，这可通过提高测量者的责任心和加强对测量者的培训等方法来解决。

3. 测量误差的来源

(1) 仪表误差

由于仪器本身及附件的电气和机械性能不完善而引入的误差称为仪表误差。如仪器零件位置安装不正确、刻度不完善等，这是仪器固有的误差。

(2) 参数误差

由于使用的元器件精度不高，其实际参数与标定数值不符所产生的误差，或者由于元器件老化产生的误差，称为参数误差。减小此类误差的方法是精选元器件或对元器件进行老化处理后使用。

(3) 使用误差

由于仪器的安装、布置、调节和使用不当等所造成的误差，称为使用误差。如把要求水平放置的仪器垂直放置、接线太长、未按阻抗匹配连接、接地不当等都会产生使用误差。减小这种误差的方法是严格按照技术规程操作、提高实验技巧和对各种现象的分析能力。

(4) 影响误差

由于受外界温度、湿度、电磁场、机械振动、光照、放射性等影响而造成的误差，称为影响误差。

(5) 人身误差

由于测量者的分辨能力、工作习惯等原因引起的误差，称为人身误差。对于某些借助人耳、人眼来判断结果的测量以及需要进行人工调谐等的测量工作，均会产生人身误差。

(6) 方法和理论误差

由于测量方法或仪器仪表选择不当所造成的误差称为方法误差；测量时，依据的理论不严格或用近似公式、近似值计算等造成的误差称为理论误差。

1.4.2 测量数据的记录与处理

1. 测量误差的有效数字

在测量中对数据进行记录时，并非小数点后的位数越多越精确。由于误差的存在，测量的数据严格来说只是一个近似值。因此，测量的数据就由“可靠数字”和“欠准数字”两部分构成，两者合起来称为有效数字。例如用量程 100 mA 的电流表去测量某支路电流时，读数为 72.4 mA，前面的“72”称为“可靠数字”，最后的“4”称为“欠准数字”（即估计读数），则 72.4 mA 的“有效数字”是 3 位。

1) 记录测量数据时，一般只保留 1 位欠准数字。因此，在记录的测量数据中，只有最后 1 位有效数字是欠准数字，它表明被测量可能在最后 1 位数字上变化 ± 1 个单位。例如测得某个电压为 12.4 V，“4”是欠准数字，它是估读出来或末位进舍的结果，有可能是“3”，也有可能是“5”。

2) “0”在数字中间和数字末尾都算为有效数字，而在数字的前头，则不算为有效数字。有效数字的位数与小数点的位置无关，例如 100、3.50、0.0210 和 0.123 等，它们都是 3 位有效数字。

3) 在欠准数字中要特别注意“0”的情况。例如,测量某电阻的数值表示为10.200 k Ω ,表明前面4位都是准确数字,最后1位“0”是欠准数字,则有效数字是5位;如果改写成10.2 k Ω ,则表明前面2位“10”是准确数字,最后1位“2”是欠准数字,有效数字是3位。虽然这两种写法表示同一个数值,但实际上却反映了不同的测量准确度。所以对于读数末位的“0”(即欠准数字)不能任意增减,而是由量具的准确度来决定。

4) 大数值与小数值要用幂的乘积形式表示。例如,测得某电阻为二万三千欧,当有效数值的位数取3位时,则应记为 $2.30 \times 10^4 \Omega$,不能记为23000 Ω 。因为23000表示的是5位有效数字。

5) 表示常数的数字如 π 、 e 、 $\sqrt{2}$ 、 $\frac{1}{3}$ 等,它们在计算式中的有效数字位数没有限制,可以按需要确定其有效数字的位数。

6) 表示相对误差时的有效数字,通常取1~2位,例如 $\pm 1\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 等。

7) 当测量结果需要进行中间运算时,有效数字的取舍原则上取决于参与运算的各数中精度最差的那个数据的有效位数。例如,对10.6、0.056、101.664这3个数据进行运算时,小数点后最少位数(即精度最差)的数据是10.6,所以应将其他数据按四舍五入原则修约到小数点后1位数,即 $0.056 \approx 0.1$, $101.664 \approx 101.7$,然后再进行运算。对于乘方或开方的运算结果可以比原数据多保留1位有效数字,例如, $\sqrt{2} = 1.41$ 。

2. 测量数据的读取与记录

实验过程中,读取和记录数据是实验非常重要的环节。根据数据的显示方式,可分为数字显示、模拟(指针)显示和波形显示。

(1) 数字式仪表的读数与记录

数字式仪表通常是将测量数据以十进制数字显示出来的,所以可以直接读出被测量的数值,并予以记录而无须再经过换算。需注意的是,在使用数字式仪表时,若量程选择不当则会丢失有效数字,降低测量精度。例如,用数字电压表测量真值为1.7 V的电压,在不同量程时,其显示结果及对应的有效数字位数见表1.4.1。

表 1.4.1 不同量程时的显示值及有效数字位数

量程选择/V	2	20	200
显示结果/V	1.680	01.68	001.7
有效数字的位数	4	3	2

由表1.4.1可见,选择“2 V”的量程最恰当,其他量程都会损失有效数字且误差变大。因此,在实际测量时,一般应使被测量的数值小于但接近于所选择量程,而不可选择过大(或过小)的量程,以免扩大误差。

(2) 模拟式仪表的读数与记录

与数字式仪表不同,模拟式仪表的指示值一般并不是被测量的数值,而是要经过指针读数、计算仪表常数和换算过程,才可以得到的测量结果。

1) 指针读数。

它是直接读出仪表指针所指出的标尺值，用格数 (DIV) 表示。图 1.4.1 所示是指针在均匀标尺上读取有效数字的示意图，量程均选择 30V (用 X 表示) 档。其中，图 1.4.1a 是测量第一个电压的指针读数，为 19.1 DIV；图 1.4.1b 是测量第二个电压的指针读数，为 117 DIV，它们的有效数字位数分别为 3 位和 4 位。测量时应首先记录上述的指针读数。

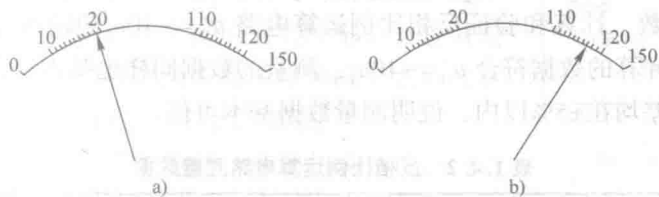


图 1.4.1 从指针仪表上读取有效数字

2) 计算仪表常数。

在指针式仪表的标尺上每分格所代表的被测量的大小称为仪表常数，记为 C 。它与指针仪表选择的量程 X 及标尺的满刻度格数 A 有关，即 $C = \frac{X}{A}$ 。

在图 1.4.1 中，由于 (量程) $X = 30\text{V}$ ，且满刻度读数都是 150，则 $C = \frac{X}{A} = \frac{30}{150} \text{V/DIV} = 0.2\text{V/DIV}$ 。

值得注意的是，对于同一个仪表，如果选择的量程或刻度尺不同，则仪表常数也不同。

3) 换算过程。

被测数据 = 表示指针读数 \times 仪表常数。所以，对于图 1.4.1a，指针所处位置的测量数据为 $U_1 = 19.1\text{DIV} \times 0.2\text{V/DIV} = 3.82\text{V}$ 。

同理，可得到图 1.4.1b 的测量数据为 $U_2 = 117\text{DIV} \times 0.2\text{V/DIV} = 23.40\text{V}$ 。

换算时要注意，测量数据的有效数字位数应与仪表读数的有效位数一致。

(3) 波形的读取与记录

在实验过程中，常用示波器观察电信号的波形。波形的读取和记录可按以下过程进行：

1) 用示波器观察的电信号，首先应不失真地重现该信号的波形，并在显示屏上将波形的幅值、周期以及起点位置调整合适，具体可参照后面第 2 章和书后附录中示波器的有关内容操作。

2) 在坐标纸上标出合适的横坐标、纵坐标的单位及坐标原点，并注意正确反映波形与基线的相对位置。

3) 在坐标系上标出能够反映波形变化趋势的关键点及其坐标值。关键点是指原点、波形变化中的转折点或断点、坐标轴上的截距点、波峰和波谷的对应点等。

4) 将各关键点用光滑线连续描绘出来，形成完整的波形图。注意，所描绘的波形图要能够正确地反映被测电信号之间的幅值、相位和周期关系。

3. 测量数据的处理

由实验所得到的数据，往往还是看不出实验规律或结果，因此必须对这些实验数据进行整理、计算和分析，才能从中找出实验规律，得出实验结论。常用的实验数据处理法为列表