



高等学校电子信息类“十二五”规划教材

电工电子技术 实验教程

黄河 鲁昀 张建强 陈丹亚 编著
刘 宏 主审



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

电工电子技术实验教程

黄 河 鲁 昀 张建强 陈丹亚 编 著
刘 宏 主 审

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是为适应电工电子技术实验课程改革的需要,在总结多年的实践教学经验基础上编写的实验教材。本书共六章,主要内容包括实验基础知识,常用仪器仪表及其使用,电路基础实验,模拟电子技术实验,数字电子技术实验。书中精心设计了多个由浅入深的实验,每个实验还设计了一些拓展性的实验内容,通过实验训练,可使学生逐步养成自主学习和独立思考的习惯,并可培养学生的学习兴趣,以及提高学生的工程实践能力。

本书可作为大学非电类专业学生电工电子技术课程的实验教材,也可供相关专业的工程技术人员及科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术实验教程/黄河等编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2014.1

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3287-2

I. ① 电… II. ① 黄… III. ① 电工技术—实验—高等学校—教材 ② 电子技术—实验—高等学校—教材 IV. ① TM-33 ② TN-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 009766 号

策 划 戚文艳

责任编辑 阎 彬 王维芳

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 13.5

字 数 312千字

印 数 1~3000册

定 价 24.00元

ISBN 978-7-5606-3287-2/TM

XDUP 3579001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

编委会名单

主 编	黄 河						
编 委	张 君	张建强	王聪敏	陈丹亚	马静因	李 佳	
	鲁 昀	姬正洲	耿道田	李少娟	赵颖娟	孙中禹	
主 审	刘 宏						

前 言

电工电子技术实验是机械类各专业的一门必修基础课,其主要任务是通过理论与实践密切结合,巩固和深化已学理论知识,加强基本实验技能训练,使学生具备简单电路设计能力,掌握科学研究的基本方法,培养学生的综合素质和创新能力,树立学生的工程意识和严谨的科学作风。

本书是根据人才培养方案和课程教学的基本要求,基于网络化、数字化电工电子实验平台,结合现有的实验设备条件编写的非电类专业实验教材。本书系统地阐述了电工电子测量误差理论、仪器仪表测量及测试技术、电工和电子实验技术,主要内容包括常用电子仪器的使用、直流电路实验、日光灯线路的安装及测试、三相交流电路、功率因数的提高、单管电压放大器、运算放大器的线性应用、直流稳压电源、门电路和组合逻辑电路的设计、555 电路、数字三用表装调共三大类 24 个实验。附录主要介绍实验装置和部分常用电子仪器的使用。本书可作为高等院校非电类专业电工学、电工与电子技术课程的实验教材。

本书实验内容按其性质、目的、方式分为验证性、设计性和综合性实验。验证性实验旨在让学生了解常用元器件的性能和使用方法,巩固和加深对理论知识的理解,掌握基本实验方法和技能,培养学生观察和分析实验现象、解决实际问题的能力,为后续实验打下基础;设计性实验的重点是单元电路设计,即按照实验题目给出的实验任务 and 设计要求设计电路,并通过电路仿真、安装调试、指标测试等过程,培养学生的电路设计能力以及对现代电路实验方法、测试技术的应用能力;综合性实验注重学生对所学知识的应用和综合技能的培养,是强化学生工程实践意识和培养实践动手能力的重要手段。

本书第 1 章实验基础知识、第 2 章常用仪器仪表及其使用、第 3 章电路基础实验由黄河和张君同志编写;第 4 章模拟电子技术实验由张建强和王聪敏同志编写;第 5 章数字电子技术实验由陈丹亚、马静因和李佳同志编写;第 6 章电工电子综合设计实验由鲁昀、姬正洲和耿道田同志编写;附录部分由李少娟、赵颖娟和孙中禹同志编写。全书由黄河同志统稿。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥和疏漏之处,敬请同行和读者批评指正。

编 者

2013 年 11 月 10 日

目 录

第 1 章 实验基础知识	1
1.1 电工电子技术实验课的特点及学习方法	1
1.1.1 电工电子技术实验课的特点	1
1.1.2 电工电子技术实验课的学习方法	2
1.1.3 电工电子技术实验课的要求	3
1.2 电子测量的内容与分类	3
1.2.1 电子测量的内容	4
1.2.2 电子测量的分类	4
1.3 基本测量方法	4
1.3.1 电压的测量	4
1.3.2 电流的测量	5
1.3.3 时间和频率的测量	5
1.3.4 输入电阻和输出电阻的测量	6
1.3.5 电压增益及频率特性测量	7
1.4 测量数据及误差处理方法	8
1.4.1 测量数据的有效数字	8
1.4.2 测量数据的处理	10
1.4.3 测量误差及其处理方法	12
1.5 常用元器件简介	15
1.5.1 无源器件	15
1.5.2 有源器件	25
第 2 章 常用仪器仪表及其使用	32
2.1 仪器仪表分类及系统组成	32
2.1.1 仪器仪表的分类	32
2.1.2 测量系统的基本组成	32
2.1.3 电子测量仪器的工作特性	33
2.1.4 仪器安全使用原则	34
2.2 数字万用表	35
2.2.1 概述	35
2.2.2 基本结构与原理	35
2.2.3 技术指标	36
2.2.4 基本功能及使用方法	36
2.3 交流毫伏表	43

2.3.1	概述	43
2.3.2	基本结构与原理	44
2.3.3	技术指标	44
2.3.4	基本功能及使用方法	45
2.4	函数信号发生器	47
2.4.1	概述	47
2.4.2	基本结构与原理	48
2.4.3	技术指标	49
2.4.4	基本功能及使用方法	50
2.5	数字存储示波器	54
2.5.1	概述	54
2.5.2	基本结构与原理	55
2.5.3	技术指标	56
2.5.4	基本功能及使用方法	56
第3章	电路基础实验	61
3.1	线性电路特性研究	61
3.2	受控源特性研究	65
3.3	一阶电路响应	69
3.4	二阶电路响应	74
3.5	RLC 串联谐振电路测试	79
3.6	RC 选频网络特性测试	83
3.7	三相交流电路的测量	87
3.8	日光灯电路及功率因数的提高	92
第4章	模拟电子技术实验	97
4.1	晶体管共发射极放大电路研究	97
4.2	负反馈放大电路的研究	103
4.3	集成运算放大器的基本应用	108
4.4	集成直流稳压电源	113
第五章	数字电子技术实验	120
5.1	门电路和组合逻辑电路	120
5.2	触发器及其应用	124
5.3	计数、译码、显示电路	130
5.4	555 时基电路及其应用	135
第6章	电工电子综合设计实验	141
6.1	综合设计性实验概述	141

6.2	RC 滤波电路的设计	145
6.3	语音功放电路的设计	147
6.4	波形发生电路的设计	151
6.5	直流稳压电源的设计	155
6.6	彩灯循环显示控制器	156
6.7	数字电子秒表逻辑电路设计	162
6.8	数字万用表装调	167
附录 A TH - DD1 电工电子实验装置		175
附录 B Multisim 10 软件介绍		189
参考文献		205

第1章 实验基础知识

1.1 电工电子技术实验课的特点及学习方法

1.1.1 电工电子技术实验课的特点

电工电子技术实验课是一门重要的技术基础课程，具有很强的实践性和鲜明的工程特点。实验中要涉及器件、电路、工艺、环境等诸多实际因素，而且理想模型和工程实际的区别使得一些实验现象和结果与书本知识、课堂讲授内容存在差异。因此，要学好这门课程，就必须了解该课程的特点。

1. 电子器件特性参数的离散性

电子器件品种繁多、特性各异，进行实验时除要求合理选择器件、了解器件性能外，还要注意相同型号的电子器件特性参数的离散性，如电子元件(电阻、电容)的元件值存在较大偏差，同型号的晶体三极管的 β 值不同，这使得实际电路性能与设计要求的有一定的差异，实验时需对实验电路进行调试。对于调试好的电路，一旦更换某个器件，则需要重新调试。

2. 电子器件的非线性

模拟器件的特性大多数都是非线性的，因此，在使用模拟电子器件时，就有如何合理选择与调整工作点使其工作在线性范围、以及如何稳定工作点的问题。而工作点一般是由偏置电路确定的，因此，偏置电路的设计与调整在模拟电路中占有极其重要的位置。

3. 测试仪器的非理想特性

理论分析时一般认为测试仪器具有理想的特性，但实际上信号源内阻不可能为零，示波器和毫伏表输入阻抗也不是无穷，因此，测试时会对被测电路产生影响。了解这种影响，选择合适的测量仪器和方法进行测量，可减小测量过程带来的误差。

4. 阻抗匹配

电子电路各单元电路之间相互连接时，经常会遇到匹配问题。前后级电路间匹配不好，可能会影响电路的整体效果，使得整体电路不能正常工作。因此，在电路设计时，应该选择合适的参数或采取一定措施，尽量使前后级之间良好匹配。

5. 接地问题

实际电路中所有仪器仪表都是非对称输入和输出的，所以，一般输出电缆和测试电缆中都有接地线，通常要求仪器和电子电路要共地。特别强调，电子电路中的“地”是可以人为选定的，是整个电路系统的参考点(零电位点)。

6. 分布参数和外界电磁干扰

在一定条件下，分布参数对电路的特性可产生重大影响，甚至因产生自激而使电路不

能正常工作,这种情况在工作频率较高时更易发生,因此,元器件的合理布局和恰当连接、接地点的合理选择和地线的合理安排、必要的去耦合屏蔽措施在电子电路中是相当重要的。

7. 测试手段的多样性和复杂性

针对不同问题要采用不同的测试方法,要考虑到测试仪器接入后对电路产生的影响。

上述特点决定了电工电子技术实验的复杂性,了解这些特点,对掌握实验技术、分析实验现象、提高工程实践能力具有重要的意义。

1.1.2 电工电子技术实验课的学习方法

要学好这门课程,应该注意以下几点:

1. 掌握实验课的学习规律

实验课是以动手为主的课程,进入实验室实验时,应该做到有的放矢,应该清楚该做什么,怎么做。因此,每个实验都要经历预习、实验和总结三个阶段。

(1) 预习。预习的主要任务是搞清楚实验的目的、内容、方法及实验中必须注意的问题。通过预习,要拟定实验步骤,制定记录数据的表格,并对实验结果有一个初步的估计,以便实验时可以及时检查实验结果的正确性。预习质量的高低将直接影响到实验效果的好坏和收获的多少。

(2) 实验。实验就是按照自己预先拟定的方案进行实际操作,是提高实践能力、锤炼实验作风的过程。实验中既要动手,也要动脑,要实事求是地做好原始数据的记录,分析和解决实验中遇到的各种问题,养成良好的科学作风。

(3) 总结。总结就是实验完成后,整理实验数据,分析实验结果,对实验做出评价,总结收获。这一阶段是培养总结归纳能力和学术写作能力的重要过程。

2. 学会用理论指导实践

理解实验原理、制定实验方案需要用理论进行指导;调试电路时同样需要用理论分析实验现象,从而确定调试的方法、步骤。盲目的调试是错误的,虽然有时也能获得正确的结果,但对实验技术的掌握、调试电路能力的提高不会有帮助。另外,实验结果正确与否、实验结果与理论存在的差异也需要从理论的角度来进行分析。

3. 注意实践知识与经验的积累

实践知识和经验需要靠长期积累才能丰富起来。在实验中,对所用的仪器与器件,要记住它们的型号与规格以及使用方法;对实验中出现的各种现象与故障,要记住它们的特征;对实验中的经验教训,要进行总结。

4. 自觉提高工程实践能力

要养成主动学习的习惯,实验过程中要有意识地、主动地培养自己发现问题、解决问题的能力,不要事事问老师、过多依赖指导老师,而应该尝试自己去解决实验中遇到的各种问题,要不怕困难与失败,从某种意义上讲,困难与失败正是提高自己工程实践能力难得的机会。

1.1.3 电工电子技术实验课的要求

为确保实验顺利完成,达到预期实验效果,培养学生良好作风,充分发挥学生的主观能动性,对学生应有如下要求:

1. 实验前要求

(1) 预习充分。认真阅读实验教材,清楚实验目的,充分理解实验原理,掌握主要参数的测试方法。

(2) 认真学习教材中介绍的仪器仪表的使用,熟悉要使用仪器仪表的性能和使用方法。

(3) 对实验数据和结果有初步估算。

2. 实验中要求

(1) 按时进入实验室,遵守实验室规章制度。

(2) 严格按仪器仪表操作规程使用仪器仪表。

(3) 按照科学的方法进行实验,要求接线正确,布线整齐、合理。

(4) 实验中出现故障,应利用所学知识进行分析,并尽量独立解决问题。

(5) 细心观察实验现象,真实、有效地记录实验数据。

3. 实验后要求

实验完成后要撰写实验报告,实验报告的撰写有以下要求:

(1) 注明实验环境和实验条件。如实验日期、使用仪器仪表名称等。

(2) 整理实验数据,描绘测试波形,列出数据表格并画出特性曲线。

(3) 对实验结果进行必要的理论分析,得到实验结论,并对本次实验做出评价。

(4) 分析实验中出现的故障和问题,总结排除故障、解决问题的方法。

(5) 实验的收获和对改进实验的意见与建议。

(6) 回答思考题。

1.2 电子测量的内容与分类

著名科学家门捷列夫指出,“没有测量就没有科学”。在世界科学技术高度发展的今天,电子测量已经成为信息获取、处理和显示的重要手段,是信息工程的源头和重要组成部分。

电子测量技术广泛应用于人类生活的多个方面,无论是科学研究、工业制造,还是现代军事装备的研制和维护,都离不开先进的电子测量工具。电子测量技术及仪器水平已经成为衡量一个国家科技发展和生产技术水平的重要标准,也是军事实力的重要体现。另一方面,电子测量技术与电子技术相伴而生,电子科学的知识和技术在电子测量工程上得到了最全面、最广泛的应用。对电子测量技术涉猎的深浅,反映了一个电子工程师综合素质的高低。电子测量如此重要,我们必须下功夫掌握好这门具有无限发展前景的科学与技术。

1.2.1 电子测量的内容

测量是以确定被测对象量值为目的的全部操作。在测量过程中,人们借助于专门的设备,依据一定的理论,通过实验的方法来确定被测量的量值。量值的大小是由数值和计量单位的乘积所表示的,没有计量单位的数值是不能作为量值的,也是没有物理意义的。电子测量主要包括五个方面:

- (1) 电能量的测量:包括电流、电压、功率、电场强度等的测量。
- (2) 电子元件和电路参数的测量:包括电阻、电容、电感、阻抗、品质因数、电子器件参数等的测量。
- (3) 电信号特性和质量的测量:包括波形、频率、周期、时间、相位、失真度、状态等的测量。
- (4) 电路性能的测量:包括增益、衰减、灵敏度、通频带、噪声系数、滤波器的截止频率和衰减特性等的测量。
- (5) 基本电子电路特性曲线的测量:包括放大器幅频特性曲线与相频特性曲线等的测量。

1.2.2 电子测量的分类

电子测量方法多样,为了便于分析和研究,一般分为以下几类:

- (1) 时域测量:测量被测信号幅度与时间的函数关系。
- (2) 频域测量:测量被测信号幅度与频率的函数关系。
- (3) 调制域测量:测量被测信号频率随时间变化而变化的特性。
- (4) 数据域测量:测量数字量或电路的逻辑状态随时间变化而变化的特性。
- (5) 输入电阻和输出电阻的测量:测量二端网络输入、输出伏安关系的特性。
- (6) 电压增益及频率特性的测量:测量网络的信号传输特性。

此外,还可以按测量手段把电子测量分为直接测量、间接测量和组合测量;按测量的统计特性,把电子测量分为平均测量和抽样测量。在实际测量过程中,上述的多种测量形式或者互相补充,或者组合运用,以完成特定的电子测量任务。

1.3 基本测量方法

1.3.1 电压的测量

电子技术领域中,电压是最基本的电参数之一,电路的工作状态和特性大多是以电压参数来表示的,所以电压测量是电子测量的基础。电压的测量方法一般有电压表测量法和示波器测量法两种。

1. 电压表测量法

将电压表并联于被测电路的两端直接读数的方法称为电压表测量法。这种方法简便、直观,是电压测量最基本的方法。用电压表测量电压时应注意,要根据被测电压的特点(如电压频率的高低和幅度的大小等)和被测电路的状态(电路内阻的大小等)来选择电压表。

通常以电压表的使用频率范围、测量电压范围和输入阻抗的高低作为电压表的选择依据。对电压表的基本要求如下：

(1) 输入阻抗高。当电压表输入阻抗与被测电路阻抗为同一数量级时，就会造成较大的测量误差。为减小测量仪表对被测电路的影响，要求电压表输入阻抗应尽可能高些。

(2) 电压表的频率范围。测量仪表都有确定的频率限制(即频带限制)，超过此限制进行测量会带来很大的测量误差。通常，测量电路直流工作点或工频电压，可选用数字三用表；测量放大器频率响应特性，可选用交流毫伏表或示波器；测量射频电路电压，可选用高频毫伏表。

(3) 有较高精度。指针式仪表精度按满度相对误差分为 0.05、0.1、0.2、0.5、1.5、2.5、5.0 等几个等级，如 2.5 级精度的满度相对误差为 $\pm 2.5\%$ 。在较高精度的电压测量中，一般采用数字式电压表。一般直流数字式电压表的测量精度为 $10^{-4} \sim 10^{-8}$ 数量级，交流数字式电压表的测量精度为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 数量级。

2. 示波器测量法

电子电路中电压的波形种类很多，常用的有正弦波、矩形波、三角波、阶梯波等。大部分电压表是按测量正弦波有效值设计的，因此，用电压表测量上述非正弦波电压会产生很大的测量误差。另外，电子电路中的许多电压波形交、直流并存，即交流叠加在直流电压之上，这样的电压不能用一般的电压表进行简单测量，而要用示波器进行测量。用示波器进行电压测量的特点是能正确、简便地测定某些非正弦波形的峰值或波形某部分的大小，数字式示波器还能直接给出电压值。

1.3.2 电流的测量

测量直流电流通常采用三用表电流挡，测量时电流表串联接入被测电路中。为减小对被测电路工作状态的影响，要求电流表的内阻越小越好，否则会产生较大的测量误差。

测量交流电流通常采用磁电式电流表，由于交流电流的分流与各支路的阻抗有关，而且阻抗分流也很难做到精确，所以通常使用电流互感器来扩大交流电流表的量程。钳形电流表就是用互感器扩大电流表量程的实例。

要特别强调的是，在工程实践中，电流的测量一般采用间接的方法，如图 1.1 所示。通过测量被测支路中电阻两端的电压来计算电流，从而得到被测支路中电流的大小。测量时，电路中 R 的选择应尽量小，当它串入被测电路中时，应对被测电路无影响。

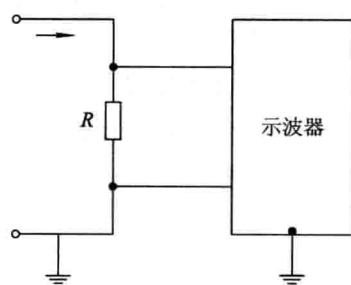


图 1.1 测量电流示意图

1.3.3 时间和频率的测量

1. 时间的测量

时间测量就是对信号的时间参数进行测量，如信号的周期、脉冲的宽度、上升时间和下降时间等。现在使用的数字示波器，可以用自动测量法和游标测量法进行时间的测量。

自动测量法可自动测量任意通道信号的周期、上升时间、下降时间等参数；游标测量法可测量任意两点间的时差，并可直接读数。

2. 频率的测量

可通过测量信号周期计算频率，同样也可以用自动测量法和游标测量法进行频率的测量。

1.3.4 输入电阻和输出电阻的测量

图 1.2 所示是一个典型的线性含源二端网络，其输入端接激励信号源，输出端接负载。图中， U_s 、 R_s 分别为信号源的电压和内阻， R_L 是电路的负载电阻， $\dot{U}_i$ 、 $\dot{I}_i$ 分别是网络的输入电压和电流， $\dot{U}_o$ 、 $\dot{I}_o$ 分别是网络的输出电压和电流。

1. 输入电阻的测量

网络的输入阻抗 Z_i 为

$$Z_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$$

当输入信号频率较低时，网络近似为纯电阻性电路，此时可用输入电阻 R_i 代替输入阻抗 Z_i ，即

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$$

测量输入电阻的原理图如图 1.3 所示。在被测电路的输入回路中串入电阻 R_1 ，分别测量电阻 R_1 两端的对地电压 U_1 和 U_2 ，由公式不难求出输入电阻为

$$R_i = \frac{U_2}{U_1 + U_2}$$

注意：选取的电阻 R_1 的阻值应与 R_i 的阻值接近，以减小测量误差。

2. 输出电阻的测量

线性含源二端网络的输出端可以等效为一个电压源，如图 1.4 所示，等效电压源的内阻就是电路的输出阻抗。

测量输出电阻的方法是先将负载开路（开关 S 断开），测量电路的开路输出电压 $\dot{U}_{oc}$ ；然后闭合开关 S，测量负载电阻 R_L 两端电压 U_{OL} ，即可计算出输出电阻 R_o 为

$$R_o = \left(\frac{U_{oc}}{U_{OL}} - 1 \right) R_L$$

注意：测量时 R_L 取值应与 R_o 接近，以减小误差。

当被测电路输出电阻 R_o 很小时，不能采用这种方法测量 R_o ，否则会因输出电流过大而损毁元器件。

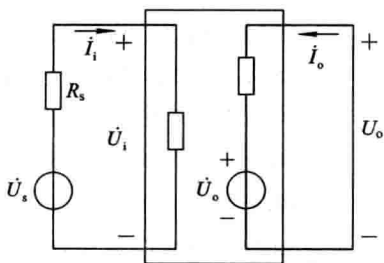


图 1.2 线性含源二端网络

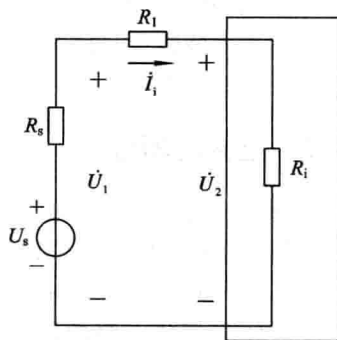


图 1.3 测量输入电阻原理图

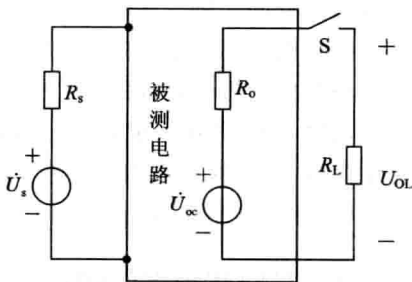


图 1.4 测量输出电阻原理图

1.3.5 电压增益及频率特性测量

1. 电压增益

增益是网络传输特性的重要参数, 定义为输出电压与输入电压的比值, 即

$$A_u = \frac{U_o}{U_i}$$

分别测量出输出电压和输入电压, 即可计算出电压增益。

2. 频率特性的测量

当电路中含电抗元件时, 输出电压 U_o 随频率变化而变化, 相应的电压增益 A_u 是频率的函数, 表示为

$$\dot{A}_u = A_u(f) \angle \varphi(f)$$

其中, $A_u(f)$ 称为幅频特性, $\varphi(f)$ 称为相频特性。

1) 幅频特性测量

放大电路的典型幅频特性曲线如图 1.5 所示, 分为高、中、低三个区域。在中频区, 增益 $|A_u|$ 基本不变, 其值可用 $|A_{um}|$ 表示; 在高频区, 增益 $|A_u|$ 随着频率升高而下降; 在低频区, 增益 $|A_u|$ 随着频率下降而下降。当电压增益下降到 $|A_{um}|/\sqrt{2}$ 时, 对应的频率分别称为上限截止频率和下限截止频率, 分别用 f_H 、 f_L 表示, f_H 与 f_L 之间的频率范围称为通频带, 通常用 BW 表示。

$$BW = f_H - f_L$$

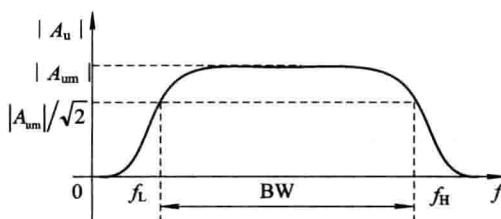


图 1.5 幅频特性曲线

测量幅频特性的常用方法有逐点法和扫频法两种。

(1) 逐点法。将信号源加到被测电路输入端, 保持输入电压幅度不变, 改变信号的频率用示波器或毫伏表测量电路输出电压; 然后将所测频率点的电压增益绘制成曲线即为被测电路的幅频特性曲线。

(2) 扫频法。用扫频仪提供一个幅度保持不变、频率随时间变化的电压信号(扫频信号)加到被测电路输入端, 将电路输出电压送至示波器 Y 轴, 示波器显示波形即为电路的幅频特性曲线。

2) 相频特性测量

相频特性的测量是指测量电路输出信号与输入信号的相位差, 通常是测量两个同频率信号之间的相位差。测量时, 示波器用双通道模式分别测量输入和输出信号波形, 选定其中一路信号作为示波器触发源, 得到两个稳定波形如图 1.6 所示。图中, T 表示波形的一个周期, τ 表示输入和输出波形的时延, 则两个波形的相位差为

$$\varphi = \frac{\tau}{T} \times 360^\circ = \varphi_o - \varphi_i$$

注意：测量电压、电流、电压增益、频率特性等参数时必须保证信号不失真，只有在信号不失真的条件下，测得的数据才是有意义的，因此要合理选择信号的大小。

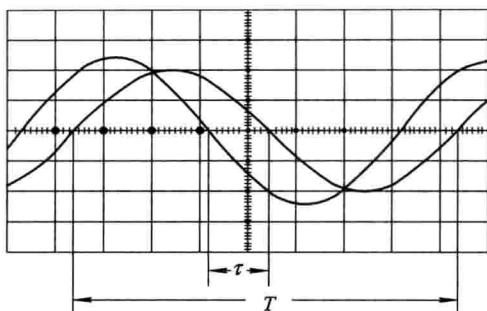


图 1.6 相频特性测量示意图

1.4 测量数据及误差处理方法

1.4.1 测量数据的有效数字

实验离不开测量，测量借助仪器读取数据，测量的结果总有误差，那么，实验中如何读取数据？测得的数据如何进行运算？测量结果如何正确表示？这些就是有效数字及其运算所要讨论的问题。

1. 有效数字的概念

由于测量中误差的存在或者测量仪器分辨力的限制，测量数据从某位起以后的数据是欠准确的估计数字，称为存疑数字。欠准确数字左边的数字称为准确数字。

所谓有效数字，是指从最左边一位非零数字算起到右边第一位存疑数字为止的所有准确数字，包括中间的数字 0。例如，测得的频率为 0.0234 MHz，它是由 2、3、4 三个有效数字表示的，其左边的两个零不是有效数字，通过单位变换，可将这个数字写成 23.4 kHz。其末位数字 4，通常是在测量中估计出来的，因此称它为欠准确数字，其左边的有效数字为准确数字。

2. 有效数字的确定

(1) 有效数字中，只应保留一位欠准确数字。因此，在记录测量数据时，只有最后一位有效数字是欠准确数字。

(2) 如果欠准确数字为 0，要特别注意不能随意删除掉。例如，测某电阻的大小为 136.0 kΩ，这表明前面位数 1、3、6 是准确数字，最后一位数 0 是欠准确数字。如果改写成 136 kΩ，则表明前面两位数 1、3 是准确数字，最后一位数 6 是欠准确数字。这两种写法尽管表示同一个数值，但实际上却反映了不同的测量准确度。

(3) 有效数字的科学表示法。如果用 10 的幂来表示一个数据，10 的幂前面的数字都是有效数字。例如， $13.60 \times 10^3 \Omega$ ，表明该电阻的有效数字有四位。

(4) 对于 π 、 $\sqrt{2}$ 等常数, 具有无限位数的有效数字, 在运算时可根据需要取适当的位数。

(5) 有效数字“四舍六入五去偶”的规则。当保留 n 位有效数字时, 若后边要舍去的数字大于 5 则进位 1。若后边要舍去的数字小于 5 则舍去不进位。若后边要舍去的数字刚好是 5, 则按下面规则处理: 若 5 后还有数字, 则可舍 5 进 1; 若 5 后没有其他数字, 看 5 前面的数字: 若 5 之前的数字为奇数则舍 5 进 1, 若 5 之前的数字为偶数(含零)则舍去不进位。

例如, 以下是几个把有效数字保留到小数点后第二位的数据(左边为原始数据, 右边为经过处理的数据)。

$$\begin{array}{ll} 73.9504 \rightarrow 73.95 & 3.22681 \rightarrow 3.23 \\ 523.745 \rightarrow 523.74 & 617.995 \rightarrow 618.00 \end{array}$$

3. 有效数字的运算规则

在进行计算时, 有效数字保留过多无意义, 运算复杂容易出错; 有效数字保留太少, 又会影响实验的测量精度。所以, 有效数字的运算必须符合一定的规则。

(1) 有效数字的加减运算: 对于整数进行加减运算时, 和普通加减法一样; 对于小数加减运算, 应以小数点后位数最少的数作为标准, 将其他数据进行处理, 然后再进行加减运算。

例如, 求 0.53 V 与 0.3565 V 之和, 0.53 作为标准数, 则按上述规则 $0.3565 \rightarrow 0.36$, $0.53 \text{ V} + 0.3565 \text{ V} = 0.89 \text{ V}$ 。

(2) 有效数字的乘、除运算: 运算前, 对各数据的处理应以有效数字位数最少的数作为标准, 所得积或商的有效数字的位数应与此相同。

例如, 计算 $0.0121 \times 25.645 \times 1.5782$ 之积, 0.0121 有三位有效数字, 有效位数最少, 所以应对另两个数据加以处理, 即

$$25.645 \rightarrow 25.6 \quad 1.5782 \rightarrow 1.58$$

最后的计算结果为

$$0.0121 \times 25.645 \times 1.05782 = 0.3283456 \rightarrow 0.328$$

(3) 有效数字的乘方、开方运算: 乘方、开方运算时, 运算结果的有效数字位数应比原数据多保留一位。

(4) 有效数字的对数运算: 对数运算时, 运算结果与原数据应有相同的有效位数。

4. 有效数字与误差

实验中电子测量数据经常是只测量一次, 即单次测量。单次测量数据所具有误差的估计, 即单次误差估算, 通常规定为其仪表最小刻度的一半, 或者不得超过实验数据末位单位数字的一半。

例如, 若末位数字是个位, 则包含的绝对误差值小于 0.5; 若末位是十位, 则包含的绝对值误差小于 5。

对于未标注误差的数字, 从左起第一位不是零的数字起, 直到右边最后一个数字止, 都是有效数字。有效数字的最低位含有误差, 称为欠准确数字, 如有效数字 3.142, 2 为欠准确数字, 3、1、4 都为准确数字。

注意: 数字的不同表示, 其含义是不同的。例如, 写成 30.50, 表示最大绝对误差不大于 0.005; 写成 30.5, 表示最大绝对误差不大于 0.05。再如, 某电流的测量结果写成 2000 mA, 表示绝对误差不大于 0.5 mA; 写成 2 A, 表示绝对误差不大于 0.5 A; 写成 2.000 A, 其绝