

电子基础教学实验中心 编著

电子技术

基础实验

DIANZI JISHU
JICHU SHIYAN



四川大学出版社

电子基础教学实验中心 编著

DIANZI JISHU

JICHU SHIYAN

电子技术
基础实验

四川大学出版社



责任编辑:毕 潜
责任校对:陈 寒
封面设计:罗 光
责任印制:杨丽贤

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础实验 / 电子基础教学实验中心编著.
成都: 四川大学出版社, 2005.8
ISBN 7-5614-3159-7

I. 电... II. 电... III. 电子技术-实验
IV. TN-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 092967 号

内容提要

本书系统地介绍了电子技术实验基础知识、基本电子测量技术和电子技术实验项目。全书共 6 章, 包括电子技术实验基础知识、电路基础实验、模拟电子技术基础实验、数字电路实验、通信电子线路实验和 EDA 在电子技术实验中的应用。本书内容丰富, 新颖实用, 可以满足电类各专业教学的需要, 可作为高等院校电类各专业的实验教材, 也可供高等院校其他专业的师生和有关工程技术人员参考。

书名 电子技术基础实验

作 者	电子基础教学实验中心
出 版	四川大学出版社
地 址	成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行	四川大学出版社
印 刷	郫县犀浦印刷厂
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	19
字 数	483 千字
版 次	2005 年 8 月第 1 版
印 次	2005 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0 001~8 000 册
定 价	27.50 元

◆读者邮购本书, 请与本社发行科联系。电话: 85408408/85401670/85408023 邮政编码: 610065

◆本社图书如有印装质量问题, 请寄回出版社调换。

◆网址: www.scupress.com.cn

版权所有◆侵权必究

前 言

在电子技术飞速发展、广泛应用的今天，面对 21 世纪人才培养的需求，在高等教育改革和培养人才的整个过程中，“实践教学”占据了极为重要的地位。根据电子类学科发展的规律，我们对电子技术基础实验课程进行了系统改革，把《电子技术基础实验》课程按照实验能力培养的基本规律和学科发展的需要，分成三个部分，即电子技术基础实验、模拟电子技术实验和数字电子技术实验。

《电子技术基础实验》教材适用于电子类各专业实验教学，其指导思想是培养学生掌握基本的电子测试技术和实验技能。在实际工作中，电子技术人员需要分析器件、电路的工作原理，验证器件、电路的功能，对电路进行调试、分析、排除电路故障，测试器件、电路的性能指标，设计、制作各种实用电路的样机等，所有这些都离不开实验。同时，通过实验还能培养学生勤奋、进取、孜孜追求的精神和严肃认真、严谨科学的工作作风。

全书共 6 章，系统地介绍了电子电路实验的基本原理和实验方法，典型电路的测试，电子电路设计型实验的基本技术，以及现代电子电路仿真实验技术等。

第 1 章电子技术实验基础知识，包括实验教学要求、基本测量技术、常用电子仪器原理与使用、常用元器件使用知识及电路的基本测试方法。通过本章的学习，使学生掌握基本实验知识，为后续实验打下良好的基础。

第 2 章电路基础实验，包括 11 个基本实验项目，主要有常用电子测量仪器的使用、元器件识别与测量、电路基本定理研究及电路参数的测试等。通过本章的学习，使学生掌握基本实验技能。

第 3 章模拟电子技术基础实验，包括基本放大电路、场效应管放大电路及差分放大电路的静态工作电压的测试，应用各种测试方法对放大器增益、输入阻抗、输出阻抗及频率响应指标的测试，集成运算放大器的基本运算关系，应用电路及集成功率放大器特性参数的测试等。

第 4 章数字电路实验，主要介绍了以中等规模数字逻辑器件为主来完成数字逻辑电路的设计，强调应用性和实用性；以小系统为主来充分发挥数字逻辑电路的功能，并引用了可编程逻辑器件来实现数字逻辑电路的设计，使实验手段更加先进。

第 5 章通信电子线路实验，以无线电发射与接收系统为主线安排实验教学，其内容包括各单元电路基本工作原理的介绍，参数波形及电路功能的测试，使学生除了掌握电路基本工作原理外，同时建立无线电发射与接收系统的概念。

第 6 章 EDA 在电子技术实验中的应用，主要介绍了 EWB5.0、ABEL 语言、ISP Synario system 软件的使用方法，并有大量的应用实例，使学生通过该部分的学习，掌握较为先进的实验手段，从而更好地掌握电子技术基础实验的内容。

另外，附录部分列出了常用的模拟、数字集成电路的引脚排列，便于使用时查阅。

电子技术基础是一门具有工程特点和实践性很强的课程，加强工程训练，特别是技能的培养，对于提高工程人员的素质和能力具有十分重要的作用。本书融合了电路分析基础、模拟电子电路、数字电子技术等相关课程的理论，实验过程中引入内容先进、综合性强的教学模式，紧扣开放式实验教学的要求，充分调动学生的学习主动性，为后续专业课程的学习打下良好的基础。

全书由成都信息工程学院电子基础教学实验中心集体编写，参加《电子技术基础实验》内容编写和项目设计的有刘心田、张宏富、阎守华、高胜东、龚一光、窦文、王建波、吴启满等老师，他们对实验装置的设计和研制做了大量的工作。在此谨向他们和其他关心、帮助本书编写工作的同志们表示衷心感谢。本书的编写除了多年教学经验的积累外，还借鉴和参阅了大量的参考资料，在此一并向这些作者表示诚挚的谢意。

本书由成都信息工程学院杨明欣副教授主审，并提出了许多宝贵意见和修改建议，对此表示由衷的感谢。

由于时间仓促，且编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，恳切希望广大读者给予批评指正。

编 者

2005年7月于成都

目 录

第1章 电子技术实验基础知识	(1)
1.1 电子技术实验基本知识	(1)
1.2 基本电子仪器原理与使用	(11)
1.3 常用电子元器件使用知识	(36)
第2章 电路基础实验	(54)
2.1 常用电子仪器的使用	(54)
2.2 常用元器件的识别与检测	(57)
2.3 电路基本定理的研究	(59)
2.4 RC 一阶动态电路暂态过程的研究	(63)
2.5 RC 网络频率特性研究	(67)
2.6 谐振电路	(73)
2.7 仪器性能研究	(78)
2.8 特殊(幅度、频率)信号的测量(选做)	(79)
2.9 音频分路电路的设计与实现	(79)
2.10 衰减及阻抗匹配网络的设计(选做)	(80)
2.11 可变电阻网络设计与实现	(82)
第3章 模拟电子技术基础实验	(84)
3.1 阻容耦合放大器的设计与调测	(86)
3.2 场效应管放大电路设计	(91)
3.3 差动放大电路设计实验	(95)
3.4 负反馈放大器的设计与调测	(103)
3.5 集成运放在信息运算方面的应用	(108)
3.6 集成运放在信号处理方面的应用——有源滤波器的设计与调试	(112)
3.7 函数信号发生器电路设计	(116)
3.8 集成功率放大器电路研究	(121)
3.9 语音信号放大器	(125)
3.10 直流稳压电源设计	(130)
第4章 数字电路实验	(136)
4.1 集成数字器件	(136)

4.2	组合逻辑电路	(137)
4.3	时序逻辑电路	(138)
4.4	实验过程中故障检测与排除	(140)
4.5	TTL 和 CMOS 门电路参数的测试	(142)
4.6	组合逻辑电路的设计	(148)
4.7	集电极开路门 (OC 门) 和三态输出门 (TS 门) 的应用	(154)
4.8	触发器及其应用	(161)
4.9	计数器 (分频器) 的设计及其应用	(167)
4.10	集成计数器、译码器及其应用	(171)
4.11	寄存器、移位寄存器及其应用	(177)
4.12	脉冲波的产生与整形	(181)
4.13	555 定时电路及其应用	(192)
4.14	小型数字系统设计 (交通灯控制—EWB 仿真)	(200)
4.15	小型数字系统设计 (数字时钟—EWB 仿真)	(205)
4.16	用 GAL 器件设计一个具有六种基本逻辑功能的门电路	(209)
4.17	用 GAL 器件设计一个具有四选一逻辑功能的多路转换器	(216)
第5章	通信电子线路实验	(218)
5.1	高频小信号调谐放大器	(218)
5.2	高频小功率放大器 (丙类)	(223)
5.3	石英晶体振荡器	(225)
5.4	调幅与检波	(230)
5.5	频率调制与解调	(234)
5.6	模拟乘法器	(240)
5.7	无线通信系统联调实验	(246)
5.8	高频实验板电路介绍	(246)
第6章	EDA 在电子技术实验中的应用	(254)
6.1	EWB 的应用	(254)
6.2	ABEL 语言简介	(274)
6.3	ISP Synario system 的使用与 GAL 编程	(286)
附录	(291)
附录 1	数字实验箱简介	(291)
附录 2	集成电路	(293)
参考文献	(298)

第1章 电子技术实验基础知识

1.1 电子技术实验基本知识

1.1.1 电子技术实验课的学习方法

为了学好电子技术实验课，在学习时应注意以下几点。

1. 掌握实验课的学习规律

实验课是以实验为主的课程，每个实验都要经历预习、实验和总结三个阶段，每个阶段都有明确的任务与要求。

(1) 预习。预习的任务是弄清实验的目的、内容、要求、方法及实验中应注意的问题，并拟定出实验步骤，画出记录表格。此外，还要对实验结果做出估计，以便在实验时可以及时检验实验结果的正确性。预习得是否充分，将决定实验能否顺利完成和收获的大小。

(2) 实验。实验的任务是按照预定的方案进行实验。实验的过程既是完成实验任务的过程，又是锻炼实验能力和培养实验作风的过程。在实验过程中，既要动手，又要动脑，要养成良好的实验作风，要做好原始数据的记录，要分析与解决实验中遇到的各种问题。

(3) 总结。总结的任务是在实验完成后，整理实验数据，分析实验结果，总结实验收获，写出实验报告。这一阶段主要是培养总结、归纳的能力和编写实验报告的能力。一次实验收获的大小，除取决于预习和实验外，总结也具有重要的作用。

2. 应用已学理论知识指导实验的进行

首先要从理论上研究实验电路的工作原理与特性，然后再制定实验方案。在调试电路时，也要用理论来分析实验现象，从而确定调试措施。盲目调试是错误的，虽然有时也能获得正确的结果，但对调试电路能力的提高不会有什么帮助。实验结果的正确与否及与理论的差异也应从理论的高度来进行分析。

3. 注意实际知识与经验的积累

实际知识和经验需要靠长期积累才能丰富起来。在实验过程中，对所用的仪器与元器件，要记住它们的型号、规格和使用方法；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。为此，可准备一本“实验知识与经验记录本”，及时记录与总结。这不仅对当前有用，而且可供以后查阅。

4. 增强自觉提高实际工作能力的意识

要将实际工作能力的培养从被动变为主动。在学习过程中，应有意识、主动地培养自己的实际工作能力。不应依赖教师的指导，而应力求自己解决实验中的各种问题。要不怕困难和失败，从一定意义上来说，困难与失败是提高自己实际工作能力的良机。

1.1.2 电子技术实验的一般要求

为了使实验能够达到预期效果，确保实验的顺利完成；为了培养学生良好的工作作风，充分发挥学生的主观能动作用，对学生提出下面一些基本要求。

1. 实验前的要求

(1) 实验前要充分预习,包括认真阅读理论教材及实验教材,深入了解本次实验的目的,弄清实验电路的基本原理,掌握主要参数的测试方法。

(2) 阅读实验教材中关于仪器使用的章节,熟悉所用仪器的主要性能和使用方法。

(3) 估算测试数据、实验结果,并写出预习报告。

2. 实验中的要求

(1) 按时进入实验室认真听课,注意指导教师的讲解及提出的应注意的问题,并在规定时间内完成实验任务。遵守实验室的规章制度,实验后整理好实验台。

(2) 严格按照科学的操作方法进行实验,要求接线正确,布线整齐、合理。

(3) 按照仪器的操作规程正确使用仪器,不得野蛮操作。

(4) 实验中出现故障时,应利用所学知识冷静分析原因,并能在教师的指导下独立解决。对实验中的现象和实验结果能进行正确的解释。要做到脑勤、手勤,善于发现问题、思考问题、解决问题。

(5) 测试参数时要心中有数,细心观测,做到原始记录完整、清楚,实验结果正确。

3. 实验后的要求

撰写实验报告是整个实验教学中的重要环节,是对工程技术人员的一项基本训练,一份完美的实验报告是一项成功实验的最好答卷。因此,实验报告的撰写要按照以下要求进行:

(1) 对于普通的验证性实验报告的要求。

① 实验报告用规定的实验报告纸书写,上交时应装订整齐。

② 实验报告中所有的图都用同一颜色的笔书写,画在坐标纸上。

③ 实验报告要书写工整,布局合理、美观,不应有涂改。

④ 实验报告内容要齐全,应包括实验任务、实验原理、实验电路、元器件型号规格、测试条件、测试数据、实验结果、结论分析及教师签字的原始记录等。

(2) 对于设计性实验报告的要求。

设计性实验是实验内容中比验证性实验高一层次的实验,因此对实验报告的撰写有特殊的要求和步骤。

① 标题:包括实验名称,试验者的班级、姓名、实验日期等。

② 已知条件:包括主要技术指标、实验用仪器(名称、型号、数量)。

③ 电路原理:如果所设计的电路由几个单元电路组成,则阐述电路原理时,最好先用总体框图说明,然后结合框图逐一介绍各单元电路的工作原理。

④ 单元电路的设计与调试步骤。

⑤ 测量结果的误差分析:用理论计算值代替真值,求得测量结果的相对误差,并分析误差产生的原因。

⑥ 思考题解答与其他实验研究。

⑦ 电路改进意见及本次实验中的收获和体会。

1.1.3 实用电子测量技术及数据处理

1. 电子测量的分类

(1) 按测量的方法分类。

① 直接测量法。直接测量法一般是借助测量工具直接从测量工具上测出所需要的数据。例如,用电压表测量放大电路的工作电压,用欧姆表测量电阻等。

② 间接测量法。间接测量法一般通过实际测量的参数与所需要结果的函数关系，计算其结果。例如，测量电阻上的功率 $P=U \times I = \frac{U^2}{R}$ ，可以通过直接测量电阻上的电压降、电阻的方法，求出其功率。又如，求放大器放大倍数 $A_v = \frac{U_o}{U_i}$ ，其方法是利用毫伏表（或示波器）测量其输入和输出电压，从而求出放大倍数。

③ 组合测量法。组合测量法是兼用直接与间接测量方法，即在某些测量中，被测量与几个未知量有关，需要通过建立联立求解各函数的关系式来确定被测量的大小。

例如，为了测量电阻的温度系数，可利用以下公式：

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2$$

式中， α 、 β 为电阻的温度系数， R_{20} 为电阻在 20 °C 时的电阻值， t 为测试温度。

当 R_{20} 、 α 、 β 都为未知时，需要用组合测量方法。改变测试温度，分别在 t_1 、 t_2 、 t_3 三种温度下测出对应的电阻值 R_{t_1} 、 R_{t_2} 、 R_{t_3} ，然后代入式中，列一组联立方程：

$$R_{t_1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2$$

$$R_{t_2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2$$

$$R_{t_3} = R_{20} + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2$$

解此联立方程式后，便可求得 α 、 β 。

上述三种方法中，每种方法各有自己的优缺点。直接测量法的优点是简单快速，在工程上应用比较广泛。间接测量法比较费时，在缺乏直接测量仪器、不便于直接测量或直接测量误差较大时采用。组合测量法复杂且更费时，适合于不能单独用直接测量法或间接测量法解决的问题。

(2) 按被测量的性质分类。

① 时域测量。时域测量被测量以时间为函数，如电流和电压等，它们有稳态量和瞬态量。对于瞬态量，可以用示波器观察其波形，以便显示其波形的变化规律；对于稳态量，则用仪表测量其有效值。

② 频域测量。频域测量被测量以频率为函数，如测量线性系统的频率特性和相位特性等。

③ 数据域测量。数据域测量是指对数据进行测量时，利用逻辑分析仪对数字量进行测量的方法。例如，微处理器的地址线、数据线、控制线等的信号可以利用逻辑分析仪对其进行分析，测量其数据。

④ 随机测量。随机测量主要是对各类干扰信号、噪声的测量和利用噪声信号源等进行的动态测量。

2. 基本参数的测量方法

(1) 电压测量。

在电压测量中，要根据被测电压的性质、工作频率、波形、被测电路阻抗、测量精度等来选择测量仪表。交、直流电压的测量方法有直接测量法和比较测量法。

① 直接测量法。用数字万用表可直接测量交、直流电压的各主要参数。测量时尽可能使电压表的量程与被测量的电压接近，以提高数据的有效位数。

用毫伏表测量信号电压时，应尽量选择适合的量程，使被测电压的指示值超过满刻度的三分之二，这样可以减小测量误差。

用示波器测量交流电压时，通道灵敏度应尽可能高，以便测出的数值更接近于真值。

② 比较测量法。

a. 示波器测直流电压。将示波器的通道灵敏度的微调置于校准位置，同时将输入耦合方式 AC—GND—DC 开关置于 GND，并将时基线与屏幕的某刻度线重合作为参考零电压值，然后将开关置于 DC，这时时基线会上移或下移，根据偏离值就可计算出直流电压值，即

$$\text{直流电压值} = \text{偏离值}(\text{cm}) \times V/\text{div}$$

式中，V/div 为示波器面板上通道灵敏度的值。时基线上移测出的电压为正，否则为负。

b. 示波器测交流电压。将示波器的微调置于校准位置，这时屏幕上出现如图 1-1 所示的波形，其被测电压的幅值为

$$\text{被测电压的幅值} = \text{通道灵敏度} \times 6$$

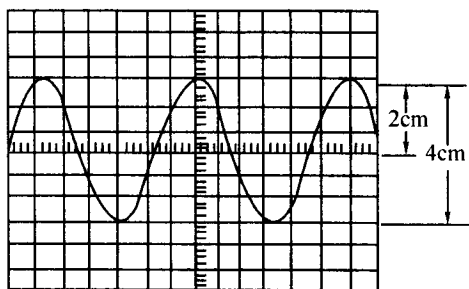


图 1-1 电压波形

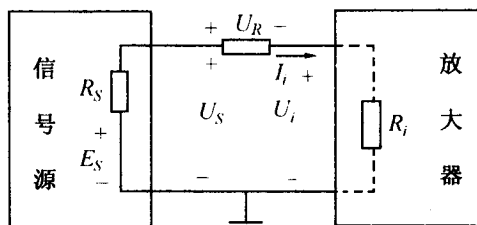


图 1-2 测量电路

(2) 电流测量。

电流测量首先也是选择仪表和测试方法。对于直流电流的测量，要选用直流电流表（实验室中一般用万用表电流挡）。测试方法是将被测电路串联到被测电路中（注意将电表正极端接电路的高电位端），此法叫直接测量法，其优点是读数准确，缺点是要断开电路。

实际中常采用利用取样电阻的间接测量法，即在被测支路中串入一个适当的取样电阻 R ，通过测量其上电压而得到电流值，如图 1-2 所示。如果该支路有已知电阻，则可通过测该电阻上的压降来得到电流值，而不必再串入另外的电阻。

间接测量法对测量直流大电流和交流电流特别适用，因为在一般实验室中，没有大量程的直流电流表和交流电流表。

(3) 输入阻抗测量方法。

当被测电路的输入阻抗不太高时，可以采用如图 1-3 所示的电路进行测量，即在信号发生器与放大器的输入端之间接入一已知的串联电阻 R ，用毫伏表分别测量 A 点和 B 点的信号电压 U_{01} 和 U_{02} 的值，则

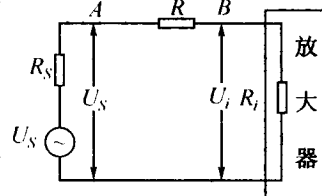


图 1-3 测量电路

$$R_i = \frac{R}{\frac{U_S}{U_i} - 1}$$

注意选 R 与 R_i 为同一数量级，若过大，易引起干扰；若过小，测量误差将增大。

当被测电路的输入阻抗比较大时，其测量电路如图 1-4 所示，由于毫伏表的内阻与放大器的内阻 R_i 相当，所以不能用上面的方法测量，可在输入端串联一个已知的与 R_i 的数量

级相当的电阻 R 。由于 R 的接入，在放大器的输出端引起输出电压 U_0 的变化，这时用毫伏表分别测量当 K 合上和 K 断开时的输出电压 U_{01} 、 U_{02} ，则

$$R_i = \frac{U_{02}}{U_{01} - U_{02}} R$$

(4) 输出阻抗测量方法。

当放大器电路没有接负载时，用毫伏表测量其输出电压 U_0 ；当放大电路接上负载 R_L 时，用毫伏表测量其输出电压 U_L ，然后计算 R_0 ，即

$$R_0 = \left(\frac{U_0}{U_L} \right) R_L$$

(5) 频率的测量。

① 李沙育图形法测量频率。用双踪示波器将扫描速率开关置外接，于是 CH2 为 x 轴，CH1 为 y 轴。将标准信号接入 CH1 通道，被测信号接 CH2 通道，在示波器上将显示如图 1-5 所示的李沙育图形。图形中被测信号频率为 f_x ，标准信号为 f_y 。在李沙育图形中画一条不通过交点的水平线，计算其交点数 N_x ；画一条不通过交点的垂直线，计算其交点数 N_y ，则

$$f_y : f_x = N_x : N_y$$

例如， $f_y : f_x = 2 : 1$ 。

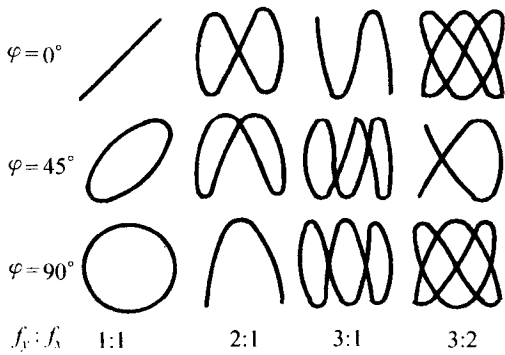


图 1-5 李沙育图形

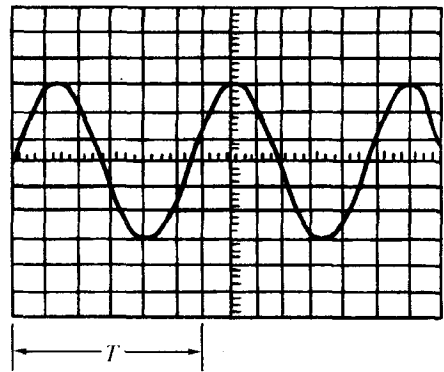


图 1-6 示波器测量信号周期

② 周期法测频率。因为 $f = \frac{1}{T}$ ，在要求不太高的情况下，一般采用示波器直接测量信号的周期 T ，如图 1-6 所示，其周期 T 为

$$T = \text{扫描速率} \times \text{水平距离}$$

(6) 时间的测量。

方法同上面的周期测量法。

(7) 相位的测量。

相位的测量实际上是相位差的测量。在电子技术中，主要测量 RC 网络、LC 网络、放大器相频特性以及依靠信号相位传递信息的电子设备。

相位差的测量方法很多，用示波器测量相位差虽然精度较低，但却非常方便和直观，在电子电路测量中被广泛地使用。这里主要介绍两种常用的示波器测量法。

① 双踪示波法（截距法）。利用示波器的多波形显示，是测量相位差最直观、最简便的方法。测量时将被测的两个信号分别接到示波器的两个垂直通道，示波器垂直方式选择“双踪”显示方式，最好使示波器的两通道的零基线重合，调节有关旋钮，使荧光屏上显示两条大小适中的稳定波形，如图 1-7 所示。利用荧光屏上的坐标测出信号的一个周期在水平方向所占的长度 $X(\text{div})$ ，然后再测出两波形上过零基线的对应点 A、B 之间的水平距离（截距） X_1 。由于正弦波一个周期为 360° ，则测出的相位差为

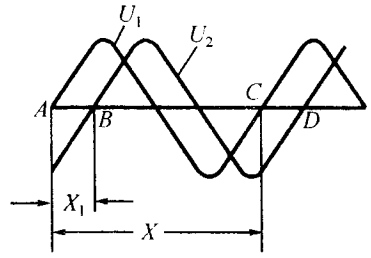


图 1-7 双踪示波法

$$\varphi = \frac{X_1}{X} \times 360^\circ$$

② 沙育图形法。将扫描速率开关置于外接，CH1 通道输入标准信号，CH2 通道输入被测信号，在示波器上将显示如图 1-8(a)、(b) 所示的李沙育图形，从图 1-8(a) 可知，相位差为

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{B}{A}\right)$$

式中， B 为椭圆与纵轴相截的距离， A 为 Y 向的最大偏转距离。

图 1-8(b) 显示了两个同频率正弦信号之间的相位差从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化时的李沙育图形的变化规律。

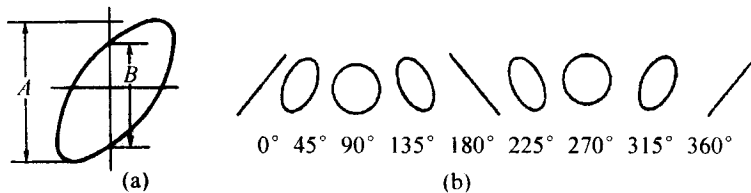


图 1-8 李沙育图形

3. 实验数据的采集与处理

(1) 实验数据的采集。

实验数据的采集包括实验的观察、实验数据的读取和记录。

① 观察。在实验过程中，要聚精会神地注视全部细节，并尽可能地做好观察记录，这是一条基本而又重要的原则。切不可把观察到的现象与本人对现象的解释混为一谈。

② 实验数据的读取。实验中应读取哪些数据，如何读取，这是实验者应注意的实际问题。

首先应十分明确所研究的电路指标是通过哪些电量来体现的（或计算得出），这些电量又是通过电路中哪些节点来测量的，要思路清晰，目的明确，以免丢掉应采集的数据。

读取的数据必须是电路处于正常工作状态下所表现出来的有用数据。这既要保证输出是输入的响应（不是干扰或自激信号），又要保证是所要求的测试条件下（如不失真等）的测试数据；否则，盲目地测出一系列数据，最后一分析检查，发现错误，又要重测，就会浪费大量时间。

电子电路实验是可再现的、可重复的，而且为了减少测量误差，应进行多次重复测量（防止偶然失误），来反映出电路的本质。如 A_v 的测量，可在同一静点、同一频率而幅度不同的输入信号作用下，多次测量 U_0 。

在实验中用模拟式仪表读数时要有正确的读取方法。一般在读取数据时，要读出可靠数字再加上一位不可靠数字，这些数字就是读数的有效数字。例如，刻有 100 条线的 10 V 电压刻度线，两线之间的电压差为 0.1。如果指针在 41 线上，读取的数为 4.1 V；指针在 42 线上，则为 4.2 V。如果指针指在 41 和 42 线之间，应读为 4.15 V，其中 4.1 V 是可靠数字，0.05 V 是不可靠数字，4.15 V 是三位有效数字。

通常规定以第一个不等于零的数字位及其右边的所有位数作为有效数字的位数。例如，2.03 是三位有效数字，0.6800 是四位有效数字，0.008 是一位有效数字等。

有效数字表示读取数据的准确度，不能随意增减，即使在进行单位转换时，也不能增加或减少有效数字。例如，0.8600 V 表示不可靠数字是在 10^{-4} 数量级上。如果变成 0.86 V，表示不可靠数字在 10^{-2} 数量级，读数的准确度相差两个数量级。同理，对 1 A 也不能写成 1000 mA，而应写为 1×10^3 mA。

有效数字还表示仪表误差的大小，并用最后一位有效数字的半个单位值表示仪表的最高误差，又称为 0.5 准则。当末位数字是在个位上时，则仪器包含的误差绝对值应不大于 0.5 ($\frac{1}{2} \times 1 = 0.5$)；如果末位数字是在十位上，则仪器包含的误差绝对值应不大于 5 ($\frac{1}{2} \times 10 = 5$)。

③ 数据记录。对实验数据做好真实全面的记录是对实验者的一项基本要求。

对实验现象和数据必须以原始形式做好记录，不要做近似处理（不要将读取的数 0.254 记录成 0.25），也不要记录经计算或换算后的数据。数据必须真实。

实验数据记录应全面，包括实验条件、实验中观察到的现象及各种影响，甚至失败的数据或认为与研究无关的数据。因为有些数据可能隐含着解决问题的新途径或作为分析电路故障的参考依据。同时，应注意记录有关波形。

数据记录一般采用表格方式，既整齐，又便于查看，并一律写入预习报告表格中，作为原始实验数据。切不可随便写到一张纸上，这样既不符合要求，又易丢失。

在记录实验数据时，应及时做出估算，并与预期结果（理论值）进行比较，以便及时发现数据正确与否，及时纠正。

(2) 实验数据的处理。

在实验中，由于测试难免存在误差，测量数据不可能完全准确。如何使实验数据更接近实际值，需要对实验结果进行数据处理。这是一个去粗取精、去伪存真的加工制作过程。

数据处理是从测量所得到的原始数据中求出被测量的最佳估计值，并计算其精确度。在数据处理的过程中，要对测量数据进行加工、整理，并通过分析得出正确的科学结论，必要时还要把测量数据绘制成曲线或归纳成经验公式。

① 有效数字的修约规则。在实验中，常常需要对测量的数据进行某些运算。为了使计算结果反映测量误差，在运算前需要对某些读取的数据进行有效数值的取舍。一般是保留有用的位数，舍去那些超过仪表准确度范围的位数，这一方法称为有效数字的修约。根据国家有关规定，有效数字的修约规则如下（需要保留 n 位有效数字）：

a. 保留位数（ n 位）以后的最左一位的数字大于 5，则舍去除保留数以外的所有数字，并将保留数加 1。

b. 保留位数 (n 位) 以后的最左一位的数字小于 5, 则舍去除保留位数以外的所有数字, 保留数不加 1。

c. 保留位数 (n 位) 以外的最左一位的数字等于 5, 且 5 以后的各位不全部为零, 则舍去除保留位数以外的所有数字, 将保留数加 1。若保留位数以外最左一位的数字等于 5, 且 5 以后的各位全部为零, 舍去保留位数以外的所有数字, 若最后一位保留数是奇数, 则保留数加 1; 是偶数或零, 则不加 1。

例如, 保留以下各数的三位有效数字:

26.849 \rightarrow 26.8 ($4 < 5$, 保留数不加 1);

0.13080 \rightarrow 0.131 ($8 > 5$ 保留数加 1);

76850 \rightarrow 768 $\times 10^2$ (因第四位为 5, 第三位为偶数, 舍去);

34.75 \rightarrow 34.8 (因第四位为 5, 第三位为奇数, 加 1)。

注意: 有效数字的修约应一次进行, 不能按位连续进行。例如, 要留 183.458 中的三位有效数字, 正确方法是: 183.458 \rightarrow 183, 不正确的方法是: 183.458 \rightarrow 183.46 \rightarrow 183.5 \rightarrow 184。

② 实验数据的图解处理。测量结果除了用数字方式表示外, 还用各种曲线表示。实验数据的图解处理就是研究如何根据已测得的数据绘制出一条尽可能反映真实情况的曲线。用图解处理实验数据直观、方便, 特别是当研究两个 (或 n 个) 物理量之间的关系时非常方便。通过对各种实验曲线的形状、特征、变化趋势的分析, 人们可以给出它们的数学模型, 甚至可对尚未认识的问题进行预测。

作图时要注意以下方面:

a. 坐标的选择。为了表示两个变量的关系 $y=f(x)$, 常选用直角坐标 (笛卡尔坐标), 也可用极坐标。

b. 自变量的选择。一般将误差可以忽略不计的量当作自变量, 并以横坐标表示; 另一变量以纵坐标表示。

c. 坐标分度及比例选择。在直角坐标中常用线性分度和对数分度, 如放大器的幅频特性的横坐标就是用单对数分度。分度比例选择的原则如下:

- 当自变量变化范围很宽时, 如放大器频率特性的频率一般是在几个数量级变化, 因而采用对数坐标分度。

- 横纵坐标的比例不一定一致, 应根据特性频率的具体情况进行选择, 例如, 对于图 1-9(a) 中的图形, 当比例选择不当时, 会描绘成如图 1-9(b) 所示的图形。

- 坐标分度和测量误差一致。分度过细会夸大测量误差, 过粗会牺牲原有测量精度, 增加作图误差。

- 测量点 (实验数据) 多少的选择。测量点应在实验曲线上分布均匀, 一般来说, 在曲线变化急剧的地方测量点应选密一些。

由于在测量过程中不可避免存在误差, 特别是随机误差, 其变化规律无法掌握。因此, 在坐标纸上获得的所有数据点不可能全部落在一条光滑的曲线 (或直线) 上, 这就要求从包含误差的测量数据中确定出一条最理想的光滑曲线 (或直线)。这一工作过程称为曲线 (直线) 的拟合 (或修匀)。曲线拟合的方法如下:

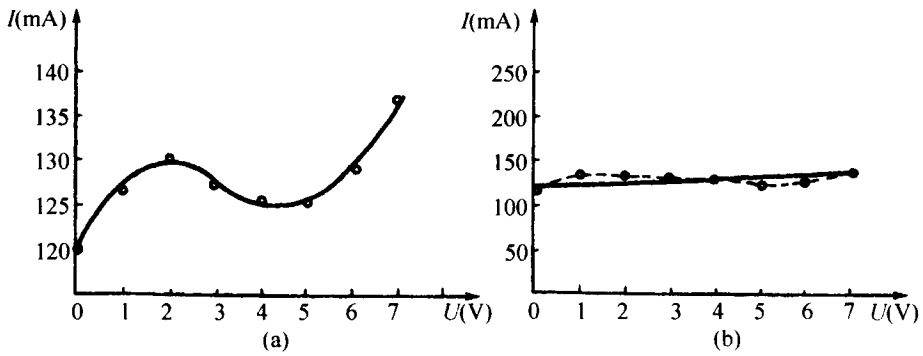


图 1-9 横纵坐标比例选择的对比

a. 平滑法。将实验得到的数据 (x_i, y_i) 标在直角坐标上，再把各坐标点用折线相连接。保持下列等量关系：

$$\sum S_i = S'_i$$

作出一条平滑曲线，式中 S_i 和 S'_i 是折线和曲线所围成的面积， S_i 是曲线以下的面积， S'_i 是曲线以上的面积，如图 1-10 所示。

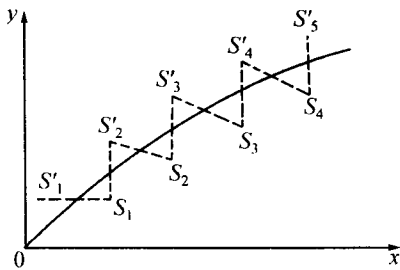


图 1-10 平滑法

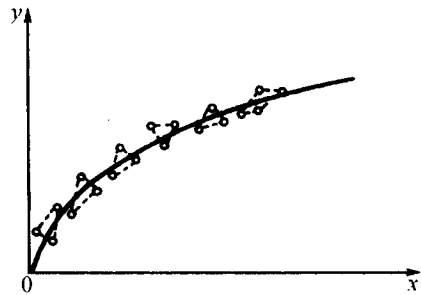


图 1-11 分组平均法

b. 分组平均法。将数据点 (x_i, y_i) 标在坐标上，然后将各数据点按顺序分成若干组，每组可包含 2~4 个数据点。每组数据点可以不相等，估取各组的几何重心，再将这些重心用光滑的曲线连接起来，如图 1-11 所示。

4. 误差及误差分析

(1) 测量误差。

在实际测量中往往会出现误差，这是不可避免的，它主要是受测量精度、测量方法、环境条件或人为的因素等限制。测量值与真实值之间不可避免的存在差别，这种差别称为测量误差。

在测量的要求内，必须研究和分析测量可能产生误差的原因、性质，以合理选择测量仪器和测量方法，力求减小测量误差。

按测量误差出现的规律，可以分为以下三类：

① 系统误差。这是一种在同一条件下、对同一量进行多次测量时，其误差值保持不变或按一定规律变化的误差。一般包含测量仪器的误差、测量方法的误差、测量条件的误差，通过分析研究可以将误差消除。

② 随机误差。此误差是在相同条件下多次重复测量同一量时，其误差的大小和符号均发生变化，且无变化规律。为了消除随机误差，可采用增加重复测量次数，然后取其算术平均值的方法来达到目的。

③ 疏失误差。这是一种过失误差。在测量中最好先用已知量对电路和读数进行验证，以便发现由于某种过失造成测量结果的错误。

(2) 误差表示方法。

为了定量研究误差，按误差表示方法，可分为绝对误差和相对误差两种。

① 绝对误差。绝对误差又叫绝对真误差，等于给出值与其真值的差，即

$$\Delta X = X - X_0$$

式中，给出值 X 为测量时的测出值（指示值）、近似计算中的近似值，真值 X_0 为被测参量的客观存在值。

绝对误差可正可负，且与被测量有相同的量纲。把 X_0 写成

$$X_0 = X + (-\Delta X) = X + C$$

式中， $C = -\Delta X$ ，称为修正值。由此可见，修正值和绝对误差大小相等而符号相反。引进修正值后，就可以对仪表指示值进行校正，以便减小误差。修正值常以表格、曲线或公式的形式给出。在自动测量仪器中，修正值被编成程序，对测量结果自动进行修正。

② 相对误差。用绝对误差表示时，由于在测量不同大小的被测量值时，不能简单地用它来判断准确程度。例如，在测 100 V 电压时， $\Delta X_1 = +1$ V，在测 10 V 电压时， $\Delta X_2 = +0.5$ V。虽然 $\Delta X_1 > \Delta X_2$ ，但实际上 $\Delta X_1 = +1$ V，只占被测量的 1%，而 $\Delta X_2 = +0.5$ V，却占被测量的 5%。显然，在测 10 V 时，其误差对测量结果的相对影响更大。为此，在工程上通常采用相对误差来比较测量结果的准确程度。

相对误差定义为绝对误差与真值之比，即

$$A = \frac{\Delta X}{X_0}$$

通常，相对误差用百分数表示，即

$$A = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\%$$

当被测量的真值和仪表的指示值相差不太多（误差较小）时，也常用仪表的指示值 X 代入上式，即

$$A = \frac{\Delta X}{X} \times 100\%$$

相对误差是一个只有大小和符号而无量纲的量。

一个仪器，其误差有时采用绝对形式和相对形式共同表示。例如，某脉冲信号发生器输出脉冲宽度为 $0.1 \mu\text{s} \sim 10 \mu\text{s}$ ，共 20 挡，误差为 $\pm 10\% \pm 0.025 \mu\text{s}$ ，即脉宽的绝对（实际）误差由两部分组成： $\pm 10\%$ 是相对部分， $\pm 0.025 \mu\text{s}$ 是与输出脉宽无关的绝对部分。显然，输出脉冲宽度窄时，绝对部分起主要作用；反之，输出脉冲宽度宽时，相对部分起主要作用。

③ 引用误差。虽然相对误差可以表示不同测量结果的准确程度，但它的不足之处是不能反映连续刻度仪表本身的准确性能。因按公式 $A \approx \frac{\Delta X}{X} \times 100\%$ 计算相对误差时，随着 X 值不同， A 值也不同。例如，一只测量范围为 $0 \sim 250$ V 的电压表，在测量 200 V 电压时，