

高等学校教材

电子技术 基础实验

— 电子电路实验·设计·仿真 —

(第二版)

华中理工大学电子学教研室 编

陈大钦 主编

883

TN702-43
C44(2)

高等学校教材

电子技术基础实验

——电子电路实验·设计·仿真

(第二版)

华中理工大学电子学教研室

陈大钦 谢世辉 编
高洁 罗杰

陈大钦 主编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是参照原国家教委 1993 年批准的《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》和 1995 年批准的《高等工程专科电子技术基础课程教学基本要求》，并考虑面向 21 世纪教学改革的要求而修订的。全书分为四篇和五个附录。

第一篇为电子电路调式与实验基础知识。第二篇是将原有实验内容改编而成的基础实验（含模拟和数字实验 24 个）。此外，新增加了电子电路设计与设计性综合实验和计算机辅助分析与设计两篇内容，增加实验 27 个，其中包括设计性综合实验、仿真实验和在系统可编程逻辑器件实验。实验内容、题量和难易程度覆盖了不同层次的教学要求，各任课教师可灵活选用。

为适应电子技术实验独立设课和不独立设课的不同要求，本教材中每个实验都附有实验原理、参考电路和思考题。

本书可作为高等学校本科电气信息类和高等学校工程专科电气类、电子类专业电子技术基础实验教材（含小型课程设计教材和开展第二课堂活动的参考书）。也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电子技术基础实验：电子电路实验、设计、仿真/陈大
钦主编：谢世辉等编. —2 版. —北京：高等教育出版
社，2000

ISBN 7—04—007985—2

I. 电… I. ①陈…②谢… III. ①电子电路—设
计②电子电路—计算机仿真 IV. TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2000）第 14278 号

电子技术基础实验——电子电路实验·设计·仿真（第二版）

华中理工大学电子学教研室 编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010—64054588

传 真 010—64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 煤炭工业出版社印刷厂

版 次 1994 年 4 月第 1 版

开 本 787×1092 1/16

2000 年 6 月第 2 版

印 张 29

印 次 2000 年 6 月第 1 次印刷

字 数 710 000

定 价 22.90 元

凡购买高等教育出版社图书，如有缺页、倒页、脱页等
质量问题，请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

第一篇 电子电路调试与实验基础知识

第一章 电子技术基础实验须知

1.1 电子技术基础实验的目的和意义

众所周知，科学技术的发展离不开实验，实验是促进科学技术发展的重要手段。我国著名科学家张文裕在为《著名物理学实验及其在物理学发展中的作用》一书所写的序言中，精辟论述了科学实验的重要地位。他说：“科学实验是科学理论的源泉，是自然科学的根本，也是工程技术的基础”。又说“基础研究、应用研究、开发研究和生产四个方面如果结合得好，经济建设和国防建设势必会兴旺发达。要把上述四个环节紧密贯穿在一起，必须有一条红线，这条红线就是科学实验。”

1993年原国家教委批准的《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》和1995年原国家教委批准的《高等学校工程专科电子技术基础教学基本要求》都明确指出，电子技术基础是一门实践性很强的课程，它的任务是使学生获得电子技术方面的基本理论、基本知识和基本技能，培养学生分析问题和解决问题的能力。为此，应加强各种形式的实践环节。

对于电子技术基础这样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，对于培养工程人员的素质和能力具有十分重要的作用。

在电子技术飞速发展、广泛应用的今天，实验显得更加重要。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。所有这些都离不开实验。此外，实验还有一个重要任务，要养成我们勤奋、进取、严肃认真、理论联系实际的作风和为科学事业奋斗到底的精神。

电子技术实验，按性质可分为验证性和训练性实验、综合性实验、设计性实验三大类。

验证性和训练性实验主要是针对电子技术本门学科范围内理论验证和实际技能的培养，着重奠定基础。这类实验除了巩固加深某些重要的基础理论外，主要在于帮助学生认识现象，掌握基本实验知识，基本实验方法和基本实验技能。

综合性实验属于应用性实验，实验内容侧重于某些理论知识的综合应用，其目的是培养学生综合运用所学理论的能力和解决较复杂的实际问题的能力。

设计性实验对于学生来说既有综合性又有探索性，它主要侧重于某些理论知识的灵活运用。例如，完成特定功能电子电路的设计、安装和调试等。要求学生在教师指导下独立进行查阅资料、设计方案与组织实验等工作，并写出报告。这类实验对于提高学生的素质和科学实验

能力非常有益。

自 90 年代以来,电子技术发展呈现出系统集成化、设计自动化、用户专用化和测试智能化的态势,为了培养 21 世纪电子技术人才和适应电子信息时代的要求,我们认为除了完成常规的硬件实验外,在电子技术实验教学中引入电子电路计算机辅助分析与设计的内容(其中包括若干仿真实验和通过计算机来完成设计的小系统)是必须的,也是很有益的。

总之,电子技术实验应当突出基本技能、设计性综合应用能力,创新能力和计算机应用能力的培养,以适应培养面向 21 世纪人才的要求。

1.2 电子技术基础实验的一般要求

尽管电子技术各个实验的目的和内容不同,但为了培养良好的学风,充分发挥学生的主动精神,促使其独立思考、独立完成实验并有所创造。我们对电子技术实验的准备阶段、进行阶段、完成阶段和实验报告分别提出下列基本要求。

1. 实验前准备

为避免盲目性,参加实验者应对实验内容进行预习。要明确实验目的要求,掌握有关电路的基本原理(设计性实验则要完成设计任务),拟出实验方法和步骤,设计实验表格,对思考题作出解答,初步估算(或分析)实验结果(包括参数和波形),最后做出预习报告。

实验前,教师要检查预习情况,并对学生进行提问,预习不合格者不准进行实验。

2. 实验进行

(1) 参加实验者要自觉遵守实验室规则。

(2) 根据实验内容合理布置实验现场。仪器设备和实验装置安放要适当。按实验方案搭接实验电路和测试电路。

(3) 要认真记录实验条件和所得数据、波形(并进行分析判断所得数据、波形是否正确)。发生故障应独立思考,耐心排除,并记下排除故障过程和方法。

(4) 发生事故应立即切断电源,并报告指导教师和实验室有关人员,等候处理。

师生的共同愿望是做好实验,保证实验质量。这里所谓做好实验,并不是要求学生在实验过程中不发生问题,一次成功。实验过程不顺利,不一定是坏事,常常可以从分析故障中增强独立工作能力。相反,“一帆风顺”也不一定有收获。所以做好实验的意思是独立解决实验中所遇到的问题,把实验做成功。

3. 实验完成

实验完成后,可将记录送指导教师审阅签字。经教师同意后才能拆除线路,清理现场。

4. 实验报告

作为一个工程技术人员必须具有撰写实验报告这种技术文件的能力。

(1) 实验报告内容

① 列出实验条件,包括何日何时与何人共同完成什么实验,当时的环境条件,使用仪器名称及编号等。

② 认真整理和处理测试的数据和用坐标纸描绘的波形,并列出表格或用坐标纸画出曲线。

③ 对测试结果进行理论分析,作出简明扼要结论。找出产生误差原因,提出减少实验误

差的措施。

④ 记录产生故障情况，说明排除故障的过程和方法。

⑤ 对本次实验的心得体会，以及改进实验的建议。

(2) 实验报告要求

文理通顺，书写简洁；符号标准，图表齐全；讨论深入，结论简明。

* 1.3 误差分析与测量结果的处理

在科学实验与生产实践的过程中，为了获取表征被研究对象的特征的定量信息，必须准确地进行测量。而为了准确地测量某个参数的大小，首先要选用合适的仪器设备，并借助一定的实验方法，以获取必要的实验数据；其次是，对这些实验数据进行误差分析与数据处理。但人们往往重视前者而忽视后者。

众所周知，在测量过程中，由于各种原因，测量结果(待测量的测量值)和待测量的客观真值之间总存在一定差别，即测量误差。因此，分析误差产生原因，如何采取措施减少误差，使测量结果更加准确等，对实验人员及科技工作者是应该了解和掌握的。

1.3.1 误差的来源与分类

一、测量误差的来源

测量误差的来源主要有以下几种

1. 仪器误差

此误差是由于仪器的电气或机械性能不完善所产生的误差，如校准误差、刻度误差等。

2. 使用误差

使用误差又称操作误差。它是指在使用仪器过程中，因安装、调节、布置、使用不当引起的误差。

3. 人身误差

人身误差是由于人的感觉器官和运动器官的限制所造成的误差。

4. 影响误差

影响误差又称环境误差。它是指由于受到温度、湿度、大气压、电磁场、机械振动、声音、光照、放射性等影响所造成的附加误差。

5. 方法误差

方法误差又称理论误差。它是指由于使用的测量方法不完善、理论依据不严密、对某些经典测量方法作了不适当的修改简化所产生的，即凡是在测量结果的表达式中没有得到反映的因素，而实际上这些因素又起作用所引起的误差。例如，用伏安法测电阻时，若直接以电压表示值与电流表示值之比作测量结果，而不计电表本身内阻的影响，就会引起误差。又如，测量并联谐振的谐振频率时，常用近似公式为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

若考虑 L 、 C 的实际串联损耗电阻 r_L 、 r_C 时，实际的谐振频率应为

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{1-r_L^2(C/L)}{1-r_C^2(C/L)}}$$

则有 $\Delta f = f'_0 - f_0$

上述用近似公式带来的误差称为方法误差。

二、测量误差的分类

按误差性质和特点可分为系统误差、随机误差和疏失误差三大类。

1. 系统误差

是指在相同条件(人员、仪器及环境条件)下重复测量同一量时, 误差的大小和符号保持不变, 或按照一定的规律变化的误差。系统误差一般可通过实验或分析方法, 查明其变化规律及产生原因, 因此这种误差是可以预测的, 也是可以减少或消除的(例如仪器的零点没有调整好, 可以采取的措施消除)。

2. 随机误差(偶然误差)

在相同条件下多次重复测量同一量时, 误差大小, 时正时负, 其大小和符号无规律变化的误差称为随机误差。随机误差不能用实验方法消除。但在多次重复测量时, 其总体服从统计规律, 从随机误差的统计规律中可了解它的分布特性, 并能对其大小及测量结果的可靠性作出估计, 或通过多次重复测量, 然后取其中算术平均值来达到目的。

3. 疏失误差(粗差)

这是一种过失误差。这种误差是由于测量者对仪器不了解、粗心, 导致读数不正确而引起的, 测量条件的突然变化也会引起粗差。含有粗差的测量值称为坏值或异常值。必须根据统计检验方法的某些准则^① 去判断哪个测量值是坏值, 然后去除。

1.3.2 误差表示法

按误差表示方法可分为绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

设被测量的真值为 A_0 , 测量仪器的示值为 X , 则绝对误差为

$$\Delta X = X - A_0$$

在某一时间及空间条件下, 被测量的真值虽然是客观存在的, 但一般无法测得, 只能尽量逼近它。故常用高一级标准仪表测量的示值 A 代替真值 A_0 , 则

$$\Delta X = X - A$$

在测量前, 测量仪器应由高一级标准仪器进行校正, 校正量常用修正值 C 表示。对于被测量, 高一级标准仪器的示值减去测量仪器的示值所得的值, 就是修正值。实际上, 修正值就是绝对误差, 只是符号相反

$$C = -\Delta X = A - X$$

利用修正值便可得该仪器所测量的实际值

$$A = X + C$$

^① 参阅潘洪福等编著《电子测量技术与仪表》(第 173~175 页), 科学技术文献出版社重庆分社, 1991.2。

例如，用电压表测量电压时，电压表的示值为 1.1 V，通过检定得出其修正值为 -0.01 V。则被测电压的真值为

$$A = 1.1 + (-0.01) = 1.09 \text{ V}$$

修正值给出的方式可以是曲线、公式或数表。对于自动测量仪器，修正值则预先编制成有关程序，存于仪器中，测量时对误差进行自动修正，所得结果便是实际值。

2. 相对误差

绝对误差值的大小往往不能确切地反映被测量的准确程度。例如，测 100 V 电压时， $\Delta X_1 = +2 \text{ V}$ ，在测 10 V 电压时， $\Delta X_2 = +0.5 \text{ V}$ ，虽然 $\Delta X_1 > \Delta X_2$ ，可实际 ΔX_1 只占被测量的 2%，而 ΔX_2 却占被测量的 5%。显然，后者误差对测量结果的相对影响大。因此，工程上常采用相对误差来比较测量结果的准确程度。

相对误差又分为实际相对误差、示值相对误差和引用(或满度)相对误差。

实际相对误差，是用绝对误差 ΔX 与被测量的实际值 A 的比值的百分数来表示的相对误差，记为

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

示值相对误差，是用绝对误差 ΔX 与仪器给出值 X 的百分数来表示的相对误差，即

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

引用(或满度)相对误差，简称满度误差。它是用绝对误差 ΔX 与仪器的满刻度值 X_m 之比的百分数来表示的相对误差，即

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\%$$

电工仪表的准确度等级就是由 γ_m 决定的。如 1.5 级的电表，表明 $\gamma_m \leq \pm 1.5\%$ 。我国电工仪表按 γ_m 值共分七级：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。若某仪表的等级是 S 级，它的满刻度值为 X_m ，则测量的绝对误差为

$$\Delta X \leq X_m S\%$$

其示值相对误差为

$$\gamma_X \leq \frac{X_m S\%}{X}$$

在上式中，总是满足 $X \leq X_m$ 的，可见当仪表等级 S 选定后， X 愈接近 X_m 时， γ_X 的上限值愈小，测量愈准确。因此，当我们使用这类仪表进行测量时，一般应使被测量的值尽可能在仪表满刻度值的二分之一以上。

例如，测量一个 10 V、50 Hz 的电压，现用 1.5 级表，可选用 15 V 或 150 V 的量程。如何选择量程？

用量程 150 V 时，测量产生的绝对误差为

$$\Delta V = V_m S\% = 150 \times (\pm 1.5\%) = \pm 2.25 \text{ V}$$

而用量程为 15V 时，测量产生的绝对误差为

$$\Delta V = V_m S\% = 15 \times (\pm 1.5\%) = \pm 0.225 \text{ V}$$

显然，用 15 V 量程测量 10 V 电压，绝对误差小得多。

1.3.3 测量结果的处理

测量结果通常用数字或图形表示。下面分别进行讨论。

一、测量结果的数据处理

1. 有效数字

由于存在误差，所以测量数据总是近似值，它通常由可靠数字和欠准数字两部分组成。例如，由电流表测得电流为 12.6 mA，这是个近似数，12 是可靠数字，而末位 6 为欠准数字，即 12.6 为三位有效数字。

对有效数字的正确表示，应注意以下几点

(1) 有效数字是指从左边第一个非零的数字开始，直到右边最后一个数字为止的所有数字。例如，测得的频率为 0.024 6 MHz，它是由 2、4、6 三个有效数字组成的频率值，而左边的两个 0 不是有效数字，因而它可以通过单位变换写成 24.6 kHz，这时有效数字仍为 3 位，6 是欠准数字未变。但不能将 0.024 6 MHz 写成 24 600 Hz，因为后者的有效数字变为 5 位，最右边的“0”为欠准数字，两者意义完全不同。

(2) 如已知误差，则有效数字的位数应与误差相一致。例如，设仪表误差为 ± 0.01 V，测得电压为 11.373 5 V，其结果应写作 11.37 V。

(3) 当给出误差有单位时，测量数据的写法应与其一致。

2. 数据舍入规则

为使正、负舍入误差出现的机会大致相等，现已广泛采用“小于 5 舍，大于 5 入，等于 5 时取偶数”的舍入规则。即

(1) 若保留 n 位有效数字，当后面的数值小于第 n 位的 0.5 单位就舍去；

(2) 若保留 n 位有效数字，当后面的数值大于第 n 位的 0.5 单位就在第 n 位数字上加 1；

(3) 若保留 n 位有效数字，当后面的数值恰为第 n 位的 0.5 单位，则当第 n 位数字为偶数(0,2,4,6,8)时应舍去后面的数字(即末位不变)，当第 n 位数字为奇数(1,3,5,7,9)时，第 n 位数字应加 1(即将末位凑成为偶数)。这样，由于舍入概率相同，当舍入次数足够多时，舍入的误差就会抵消。同时，这种舍入规则，使有效数字的尾数为偶数的机会增多，能被除尽的机会比奇数多，有利于准确计算。

3. 有效数字的运算规则

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一项。一般应遵循以下规则：

(1) 当几个近似值进行加、减运算时，在各数中(采用同一计量单位)，以小数点后位数最少的那一个数(如无小数点，则为有效位数最少者)为准，其余各数均舍入至比该数多一位，而计算结果所保留的小数点后的位数，应与各数中小数点后位数最少者的位数相同。

(2) 进行乘除运算时，在各数中，以有效数字位数最少的那一个数为准，其余各数及积(或商)均舍入至比该因子多一位，而与小数点位置无关。

(3) 将数平方或开方后，结果可比原数多保留一位。

(4) 用对数进行运算时， n 位有效数字的数应该用 n 位对数表。

(5) 若计算式中出现如 e 、 π 、 $\sqrt{3}$ 等常数时，可根据具体情况来决定它们应取的位数。

二、曲线的处理

在分析两个(或多个)物理量之间的关系时,用曲线比用数字、公式表示常常更形象和直观。因此,测量结果常要用曲线来表示。

在实际测量过程中,由于各种误差的影响,测量数据将出现离散现象,如将测量点直接连接起来,将不是一条光滑的曲线,而是呈波动的折线状,如图 1.3.1 所示。但我们运用有关的误差理论,可以把各种随机因素引起的曲线波动抹平,使其成为一条光滑均匀的曲线。这个过程称为曲线的修匀。

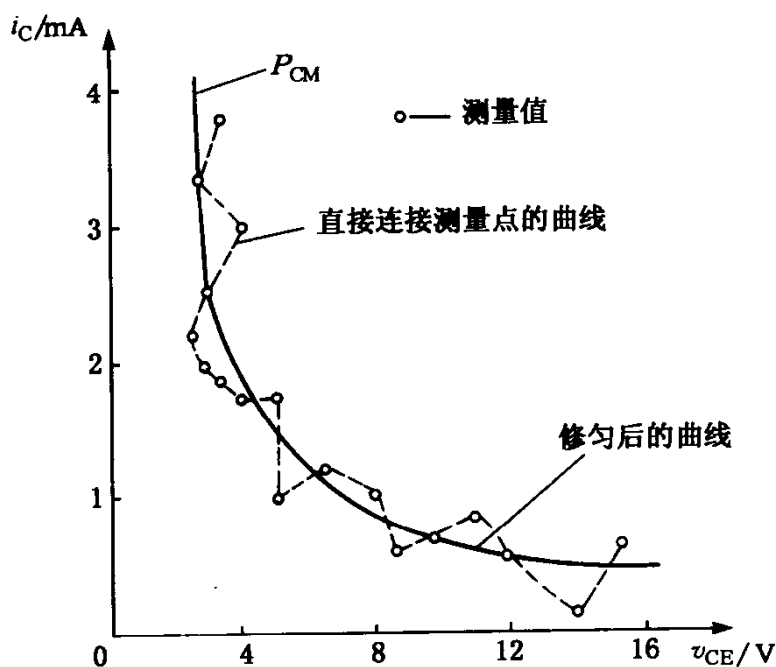


图 1.3.1 直接连接测量点时
曲线的波动情况

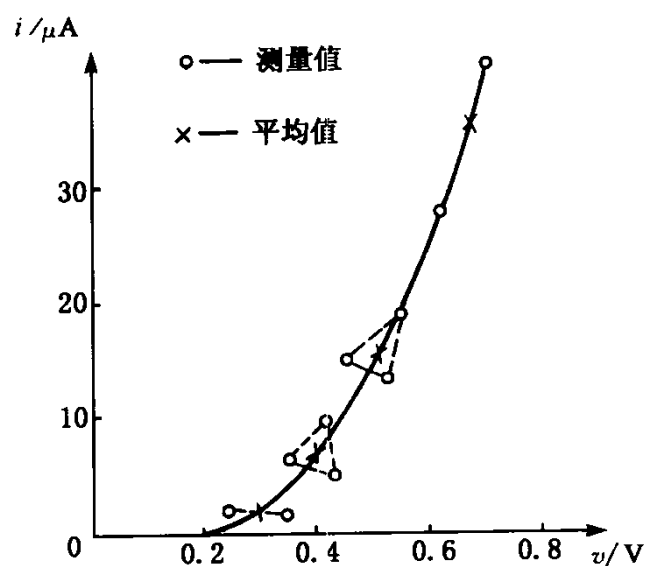


图 1.3.2 分组平均法
修匀的曲线

在要求不太高的测量中,常采用一种简便、可行的工程方法——分组平均法来修匀曲线。这种方法是将各数据点分成若干组,每组含 2~4 个数据点,然后分别估取各组的几何重心,再将这些重心连接起来。图 1.3.2 就是每组取 2~4 个数据点进行平均后的修匀曲线。这条曲线,由于进行了数据平均,在一定程度上减少了偶然误差的影响,使之较为符合实际情况。

三、对电子电路实验误差分析与数据处理应注意几点

1. 实验前应尽量做到“心中有数”,以便及时分析测量结果的可靠性。
2. 在时间允许时,每个参量应该多测几次,以便搞清实验过程中引入系统误差的因素,尽可能提高测量的准确度。
3. 应注意测量仪器、元器件的误差范围对测量的影响,通常所读得的示值与测量值之间应该有

$$\text{测量值} = \text{示值} + \text{误差}$$

的关系,因此测量前对测量仪器的误差及检定、校准和维护情况应有了解,在记录测量值时要注明有关误差,或决定测量值的有效位数。

4. 正确估计方法误差的影响

电子电路中采用的理论公式常常是近似公式,这将带来方法误差,其次计算公式中元件的

参量一般都用标称值(而不是真值), 这将带来随机性的系统误差, 因此应考虑理论计算值的误差范围。

5. 应注意剔除粗差

例如测量仪器没有校准, 没有调零, 对弱信号引线过长, 或没有屏蔽等等都会带来测量误差。又如做放大器实验时, 放大器的输入信号 V_i 通常是由信号产生器供给的, 如果把在信号产生器输出端开路时测出的信号作为放大器的输入信号 V_i 值, 则由于信号产生器有内阻, 同时放大器的输入电阻又不为 ∞ , 故两者联接后, 信号产生器实际供给放大器的输入信号将小于上述测出的 V_i 值, 这样在测试放大器的 A_v 、 R_i 等动态指标时将造成误差。

第二章 基本测量技术

2.1 概述

一个物理量的测量可以通过不同的方法来实现，而电子测量技术是一门发展十分迅速的学科，它涉及到电量及各种非电量的测量，这里只简要介绍基本电量测量技术中的共性问题。

一、测量方法的分类

1. 直接测量与间接测量

(1) 直接测量

顾名思义，这是一种可以直接得到被测量值的测量方法。例如用电压表测量稳压电源工作电压等。

(2) 间接测量

与直接测量不同，间接测量是利用直接测量的量与被测量之间已知函数关系，得到被测量值的测量方法。例如，测量放大器的电压放大倍数 A_v ，一般是分别测量输出电压 V_o 与输入电压 V_i 后再算出 $A_v = V_o/V_i$ 。这种方法常用于被测量不便于直接测量，或者间接测量的结果比直接测量更为准确的场合。

(3) 组合测量

这是一种兼用直接测量和间接测量的方法，将被测量和另外几个量组成联立方程，最后通过求解联立方程来得出被测量的大小。这种方法用计算机求解比较方便。

2. 直读测量法与比较测量法

(1) 直读测量法

它是直接从仪器仪表的刻度线(或显示)上读出测量结果的方法。例如，用电流表测量电流就是直读法，它具有简单方便等优点。

(2) 比较测量法

这是一种在测量过程中，将被测量与标准量直接进行比较而获得测量结果的方法。电桥利用标准电阻(电容、电感)对被测量进行测量就是一个典型例子。

应当指出，直读法与直接测量、比较法与间接测量并不相同，二者互有交叉。例如，用电桥测电阻，是比较法，属于直接测量；用电压、电流表法测量功率，是直读法，但属于间接测量等等。

3. 按被测量性质分类

虽然被测量的种类很多，但根据其特点，大致可分为以下几类。

(1) 频域测量

频域测量技术又称为正弦测量技术。测量参数多表现为频域的函数，而与时间因素无关，

测量时，电路处于稳定工作状态，因此又叫稳定测量。

这种测量技术用的信号是正弦信号，线性电路在正弦信号作用下，所有电压和电流量都有相同的频率，仅幅度和相位有差别。利用这个特点，可以实现各种电量的测量，如放大器增益、相位差，输入阻抗和输出阻抗等。此外，还可以观察非线性失真。其缺点是，不宜用于研究电路的瞬态特性。

(2) 时域测量

时域测量技术，与频域测量技术不同，它能观察电路的瞬变过程及其特性，如上升时间 t_r 、平顶降落 δ 、重复周期 T 和脉宽 t_p 等。

时域测量技术采用的主要仪器是脉冲信号产生器和示波器。

(3) 数据域测量

这是用逻辑分析仪对数字量进行测量的方法。它具有多个输入通道，可以同时观测许多单次并行的数据。例如微处理器地址线、数据线上的信号，可以显示时序波形，也可以用“1”、“0”显示其逻辑状态。

(4) 噪声测量

噪声测量是属于随机测量。在电子电路中，噪声与信号是相对存在的，不与信号大小相联系来讲噪声大小是无意义的。因此工程技术中，常用噪声系数 F_N 来表示电路噪声的大小，即

$$F_N = \frac{\text{输入信噪比}}{\text{输出信噪比}} = \frac{P_{iS}/P_{iN}}{P_{oS}/P_{oN}} = \frac{1}{A_p} \cdot \frac{P_{oN}}{P_{iN}}$$

式中 P_{iS} 、 P_{iN} 表示电路输入端的信号功率与噪声功率；

P_{oS} 、 P_{oN} 表示电路输出端的信号功率与噪声功率；

$A_p = P_{oS}/P_{iS}$ 表示电路对信号的功率增益。

若 $F_N=1$ ，则说明该电路本身没有产生噪声。一般放大电路的噪声系数都大于 1。放大电路产生的噪声越小， F_N 就越小，放大微弱信号的能力就越强。

测量方法还可以根据测量的方式分为自动测量和非自动测量，原位测量和远距离测量等。

此外，在电子测量中，还经常用到各种变换技术。例如，变频、分频、检波（如测交流电压有效值的原理就是首先利用各种检波器将交流量变成直流量，然后再测量）、斩波、A/D、D/A 变换等。有关这方面的问题，这里不详细讨论。

二、选择测量方法的原则

在选择测量方法时，应首先研究被测量本身的特性及所需要的精确程度、环境条件及所具有的测量设备等因素，综合考虑后，再确定采用哪种测量方法和选择哪些测量设备。

一个正确的测量方法，可以得到好的结果，否则，不仅测量结果不可信，而且有可能损坏测量仪器、仪表和被测设备或元器件。下面举例加以说明。

【例 2.1.1】 用万用表的 $R \times 1$ 挡测试半导体三极管的发射结电阻或用图示仪显示输入特性曲线时，由于限流电阻较小，而使基极电流过大，结果可能使三极管在测试过程中被损坏。

【例 2.1.2】 测量图 2.1.1 所示放大电路中场效应三极管 T 的漏极电位时，设在漏极与“地”之间用一只内阻为 $10 \text{ M}\Omega$ 的数字电压表来测量，其值为 $V_d = 10 \text{ V}$ ，而用 $20 \text{ k}\Omega/\text{V}$ 的万用表直流电压 6 V 挡测量，其值 $V'_d = 5 \text{ V}$ （仪表的准确度影响不计）。为什么相差这么大？试分析一下。

解：由于万用表的内阻

$$R_V = 20 \text{ k}\Omega/\text{V} \times 6 \text{ V} = 120 \text{ k}\Omega$$

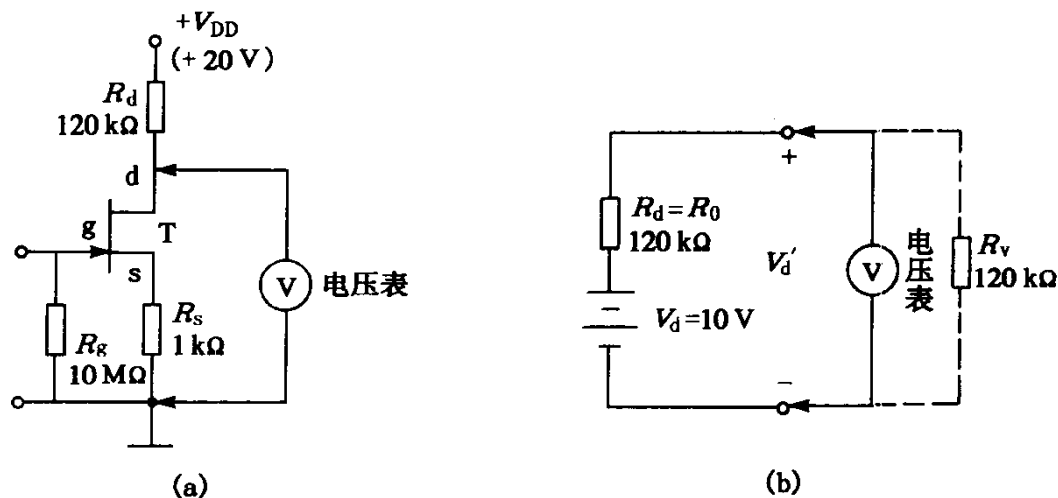


图 2.1.1 用万用表测高内阻回路电压

(a) 测试电路 (b) 等效电路

显然， R_V 与等效电阻 $R_0 = R_d$ 对 $V_d = 10 \text{ V}$ 的分压就是万用表的示值 V'_d 。因此有

$$\begin{aligned} V'_d &= \frac{R_V}{R_d + R_V} \cdot V_d \\ &= \frac{120}{120 + 120} \cdot 10 \text{ V} \\ &= 5 \text{ V} \end{aligned}$$

【例 2.1.3】一测量电流电路如图 2.1.2 所示，当未串接测量仪表时，回路的实际电流（即真值）为 $I = V/R$ ，串接测量仪表后，由于仪表内阻 r_i 的影响，实际的测量值为

$$I' = \frac{V}{R + r_i} = \frac{I}{1 + \frac{r_i}{R}}$$

只有当 $r_i \ll R$ ，测量值 I' 才近似接近真值 I ，否则误差很大。

【例 2.1.4】在实际测量中，常希望测量更精确些，这就有一个最佳方案选择问题。设现有条件下，电流、电压和电阻的测量精度分别为

$$\frac{\Delta I}{I} = \pm 2.5\%$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \pm 2\%$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \pm 1.0\%$$

可用下述三种方案进行间接功率的测量

- (1) $P = IV$
- (2) $P = V^2/R$
- (3) $P = I^2R$

试选择一种具有测量误差最小的最佳测量方

案。

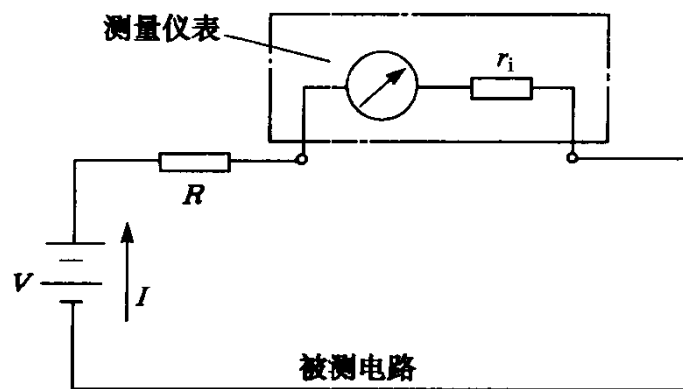


图 2.1.2 测量电流电路示意图

解：根据现有条件，采用不同方案进行测量，其误差分别为

$$(1) \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta V}{V} = \pm 4.5\%$$

$$(2) \frac{\Delta P}{P} = 2 \frac{\Delta V}{V} - \frac{\Delta R}{R} = \pm 5.0\%$$

$$(3) \frac{\Delta P}{P} = 2 \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R} = \pm 6.0\%$$

可见第一种方案具有最小合成误差，为最佳选择方案。为了获得准确的测量结果，正确的选择测量方法、仪器设备以及拟订测试程序是十分重要的。

2.2 电压测量

在电子测量领域中，电压是基本参数之一。许多电参数，如增益、频率特性、电流、功率、调幅度等都可视为电压的派生量。各种电路工作状态，如饱和、截止等，通常都以电压的形式反映出来。不少测量仪器也都用电压来表示。因此，电压的测量是许多电参数测量的基础。电压的测量对调试电子电路可以说是必不可少的。

电子电路中电压测量的特点是：

1. 频率范围宽

电子电路中电压的频率可以从直流到数百兆赫范围内变化，对于甚低频或高频范围的电压测量，一般万用表是不能胜任的。

2. 电压范围广

电子电路中，电压范围由微伏级到千伏以上高压，对于不同的电压档级必须采用不同的电压表进行测量。例如，用数字电压表，可测出 10^{-9} 伏数量级的电压。

3. 存在非正弦量电压

被测信号除了正弦电压外，还有大量的非正弦电压。如用普通仪表测量非正弦电压，将造成测量误差。

4. 交、直流电压并存

被测的电压中常常是交流与直流并存，甚至还夹杂有噪声干扰等成分。

5. 要求测量仪器有高输入阻抗

由于电子电路一般是高阻抗电路，为了使仪器对被测电路的影响减至足够小，要求测量仪器有高的输入电阻。

此外，在测量电压时，还应考虑输入电容的影响。

上述情况，如果测量精度要求不高，用示波器常常可以解决。如果希望测量精度要求较高，则要全面考虑，选择合适的测量方法，合理选择测量仪器。

2.2.1 高内阻回路直流电压的测量

在例 2.1.2 中曾提到，用普通万用表 6 V 挡 ($20 \text{ k}\Omega/\text{V}$) 测量一个内阻为 $120 \text{ k}\Omega$ 的 10 V 等效电源电压时，其测量值为 5 V，造成了很大的误差。如果要想提高测量精度，就必须选用内阻比被测电路等效电阻高得多的仪表才行。

一般来说,任何一个被测电路都可以等效成一个电源电压 V_0 和一个阻抗 Z_0 相串联。例如,由 V_s 、 Z_1 、 Z_2 组成的图 2.2.1 (a) 所示电路,当接入电压表时,相当于将仪表的输入阻抗 Z_i 并联在被测电路上。对于图 2.2.1 (a) 所示被测电路,可以用 V_0 和 Z_0 组成的串联电路来等效,式中 $Z_0 = Z_1 // Z_2$, $V_0 = Z_2 / (Z_1 + Z_2) \cdot V_s$ 。

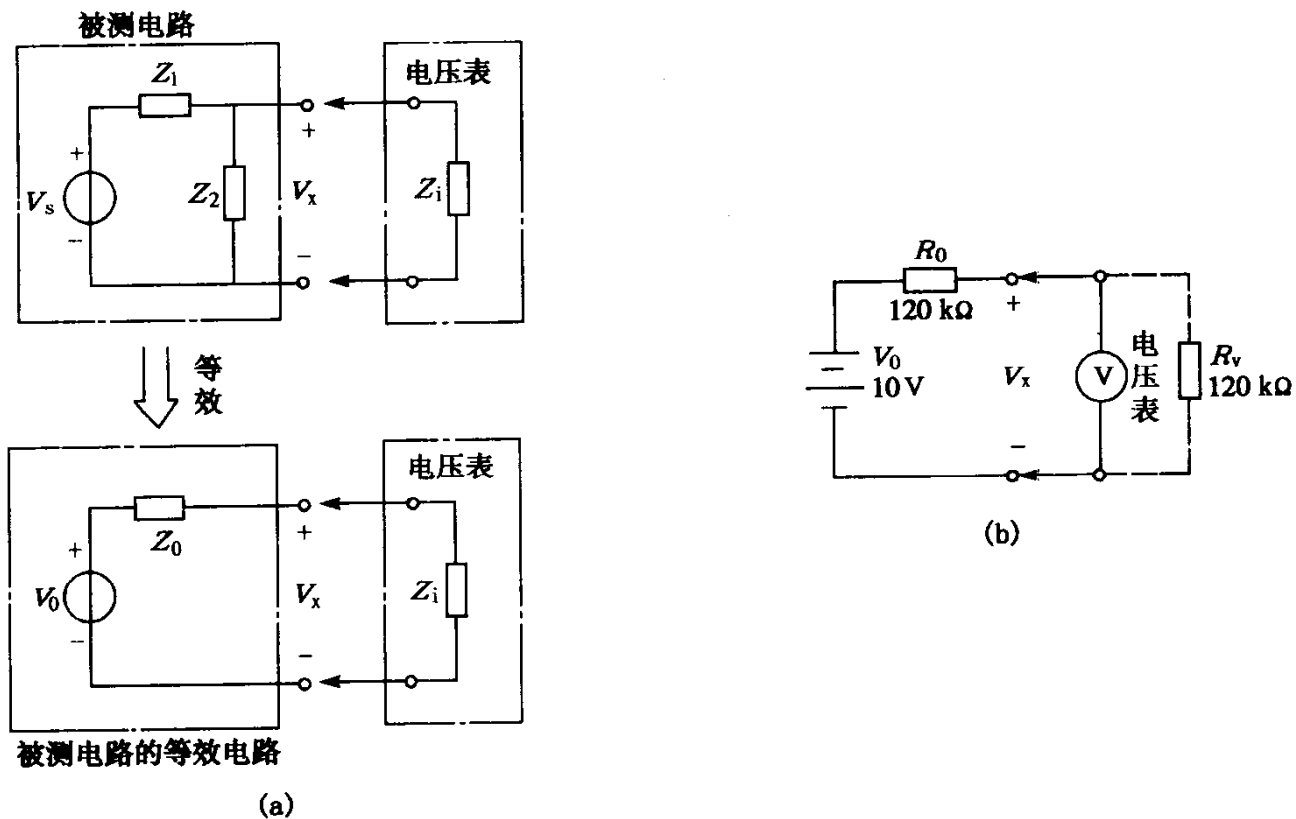


图 2.2.1 电压表输入阻抗对被测电路的影响
(a) 被测电路 (b) 考虑电压表输入电阻后图 2.1.1 等效电路

设电路参数和电压表输入阻抗 Z_i 如图 2.2.1 (a) 所示,则考虑电压表输入阻抗(即仪表内阻)的等效电路如图 2.2.1 (b) 所示。由图可见,电压表的指示值 V_x 等于仪表内阻 $R_v (= Z_i)$ 与电路阻抗 $Z_0 = R_0$ 对等效电源电压的分压,即

$$V_x = \frac{R_v}{R_v + R_0} \cdot V_0$$

绝对误差

$$\Delta V = V_x - V_0$$

相对误差

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_x - V_0}{V_0} = \frac{R_v}{R_0 + R_v} - 1 = -\frac{R_0}{R_0 + R_v}$$

因此,可算出图 2.2.1 (b) 所示的相对误差为

$$\gamma = -\frac{120}{120 + 120} = -50\%$$

显然,要减小误差,就必须使电压表的输入电阻 R_v 远大于 R_0 。

电子电路中,为了提高仪表输入电阻和有利于弱直流信号电压的测量,在电压表中常加入

集成运算放大器构成集成运放型电压表，如果再加上场效应管电路作输入级，则可构成一种高内阻电压表。

2.2.2 交流电压的测量

一、电子式交流电压表

电子式交流电压表有模拟型和数字型两大类，这里只讨论模拟型。

根据电子电路电压测量的特点，对仪器的输入阻抗、量程范围、频带和被测波形都有一定要求。

电子式交流电压表，一般为有效值刻度，而电表本身多为直流微安表，因此需要进行转换。电子式交流电压表的最基本结构形式有

1. 检波放大式电压表

其电路结构如图 2.2.2 所示。由图可见，它是先将被测电压 v_x 通过检波(整流)变成直流电压，再将直流信号送入直流放大器放大并驱动微安表偏转。由于放大器放大的是直流电压，对放大器的频率响应要求低，测量电压的频率范围主要决定于检波电路的频率响应。如果采用高频探头进行检波，其上限工作频率可达 1 GHz，通常所用的高频毫伏表即属于此类。

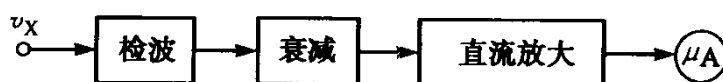


图 2.2.2 检波放大式电压表的组成

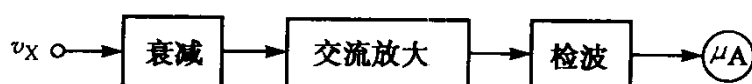


图 2.2.3 放大检波式电压表的组成

这种结构的主要缺点是，检波二极管导通时有一定起始电压(死区电压)，使刻度呈非线性；此外，还存在输入阻抗低、直流放大器有零点漂移。因此，仪表的灵敏度不高，不适宜于测小信号。

2. 放大检波式电压表

放大检波式电压表的电路结构如图 2.2.3 所示。被测交流电压先经放大再检波，由检波后得到的直流电压驱动微安表偏转。

由于结构上采用先放大，就避免了检波电路在小信号时所造成的刻度非线性和直流放大器存在的零点漂移问题，灵敏度较高，输入阻抗也高些。缺点是，测量电压的频率范围受放大器的频带的限制。这种电压表的上限频率约为兆赫级，最小量程为毫伏级。

为了解决灵敏度和频率范围的矛盾，结构上还可以采取其它措施进行改进，例如采用调制式电压表和外差式电压表的结构，可以进一步使电压表上限频率提高，最小量程减小(例如可测微伏级)。

二、三种检波方式及其电压表工作原理

1. 均值表原理

测量 1 MHz 以下的低频电压，多用平均值电压表。电压平均值的定义是

$$V_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$

对于纯正弦交流电压，这里的 V_{AV} 是指经过全波整流后的平均值，因此有