



高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

高频电子线路实验

主编 康小平
主审 王 荣



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

高频电子线路实验

主 编 康小平
副主编 李明琼 王康年
主 审 王 荣

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书是为高等学校电子与信息类专业和其他相关专业而编写的实验教材以无线通信系统中的基本单元电路实验为主要内容,同时还介绍了部分系统课题的设计思路和方法。

全书内容共四章,包括高频电子线路实验基础知识、常用实验仪器仪表介绍、单元电路和综合系统电路实验(如小信号谐振放大器、高频功率放大器、晶体振荡器等单元电路实验和调幅、调频收发系统实验)、课题设计与制作相关知识。

本书可作为高等学校电子工程、通信工程等专业的实验教材,也可作为相关专业技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路实验/康小平主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2009.5

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2210 - 1

I. 高… II. 康… III. 高频—电子电路—实验—高等学校—教材 IV. TN710.2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 020468 号

策 划 曹 昉

责任编辑 寇向宏 曹 昉

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 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2009年5月第1版 2009年5月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 8.5

字 数 193千字

印 数 1~4000册

定 价 12.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2210 - 1/TN · 0493

XDUP 2502001—1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。



前

言

高频电子线路是通信类、电子类专业非常重要的专业基础课，也是一门理论与实践联系很强的课程，它涉及通信理论知识、通信电路中常用的基本功能部件和实际电路，许多内容更是需要通过实验才能扎实地理解和掌握。实验教学不仅可以帮助学生运用理论处理问题，验证消化和巩固基本理论，而且能够提高学生的实际动手能力和综合应用能力。因此实验作为课程学习的重要环节，在教学中越来越得到重视。

本书是高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材，同时是王康年老师编写的《高频电子线路》(西安电子科技大学出版社 2009 年出版)的配套实验教材。本书适用于各层次相关专业的教学实验和课题设计。全书内容共分为四章，第一章介绍了高频实验基础知识，第二章介绍了常用实验仪器仪表，第三章介绍了单元电路和综合系统电路实验，第四章介绍了课题设计与制作。书末附录介绍了高频电子线路实验系统(本书实验内容是以该实验系统为写作基础的)。

本书从基础实验入手，采用循序渐进的方法，首先着重讲解高频电子线路基本工作原理和测试方法，然后逐步进入综合系统实验，最后是课题设计制作。实验内容安排上作了合理取舍，既有高频实验的经典电路(同时注重模拟与数字相结合，集成电路与分立元件电路相结合)，如高频谐振功率放大器实验，多级小信号谐振放大器实验，FM、AM 调制与解调实验等，又增设了 DDS 直接数字频率合成技术的设计等。

本书课时安排可根据教学内容来确定。一节基本实验课可安排在两个学时内完成，课题设计制作一般在 16 个学时内完成，也可根据实际情况酌情增减。

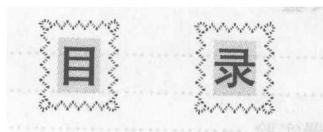
本书由康小平、李明琼和王康年编写。康小平编写了 1.3~1.7 节以及第四章和附录，并负责全书的统稿；李明琼编写了 2.1~2.3 节以及第三章；王康年编写了 1.1、1.2、2.4、2.5 节。解放军理工大学的王荣教授审阅了全书，并提出了许多宝贵的意见。

衷心感谢为本书编写付出辛勤劳动的老师，感谢西安电子科技大学出版社的大力支持和帮助。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，诚挚希望广大读者批评指正。

编 者

2008 年 12 月



第一章 高频实验基础知识	1
1.1 实验概述	1
1.1.1 科学实验的意义与地位	1
1.1.2 实验教学的目的、功能与分类	1
1.1.3 高频电子线路实验教学过程与要求	2
1.2 元器件的高频特性	3
1.2.1 导线	3
1.2.2 电阻	3
1.2.3 电感	4
1.2.4 空气芯线圈设计	5
1.3 实验测量基础	6
1.3.1 测量方式	6
1.3.2 测量方法	7
1.4 实验误差分析和仪表的准确度	7
1.4.1 误差的来源与分类	7
1.4.2 合理使用测量仪器减少测量误差	9
1.4.3 正确使用各类信号源	9
1.5 实验数据处理	9
1.5.1 有效数字	9
1.5.2 数字舍入规则	10
1.5.3 实验数据整理和表示法	10
1.6 实验故障处理	11
1.6.1 故障的原因	11
1.6.2 排除故障的原则	11
1.7 实验报告和设计报告的撰写	12
1.7.1 实验报告的撰写	12
1.7.2 实验报告编写案例	13
1.7.3 设计报告的编写	14
1.7.4 设计报告编写案例(提纲格式)	15
第二章 常用实验仪表介绍	18
2.1 TFG2030 DDS 函数信号发生器	18
2.2 COS-5020 双踪示波器	21
2.3 NFC-100 多功能计数器	22
2.4 DS1022M 数字示波器	23

2.5 KH4116 型失真度仪	29
第三章 单元电路和综合系统实验	31
3.1 小信号谐振放大器实验	31
3.2 高频谐振功率放大器实验	36
3.3 LC、晶体、压控正弦波振荡器实验	43
3.4 振幅调制实验	51
3.5 振幅解调实验	58
3.6 频率调制实验	65
3.7 频率解调实验	73
3.8 晶体三极管混频器实验	78
3.9 单片集成锁相环实验	85
3.10 振幅调制与解调系统实验	89
3.11 接收机系统实验	90
3.12 频率调制与解调系统实验	91
3.13 频率调制与解调收发系统实验	92
第四章 课题设计与制作	94
4.1 调幅接收机的设计与制作	94
4.2 调频无线话筒的设计与制作	100
4.3 无线调频接收机的设计与制作	106
4.4 DDS 信号的设计与制作	112
附录 A 高频电子线路实验系统介绍	122
附录 B DG1353A 芯片介绍	126
参考文献	127

第一章 高频实验基础知识

1.1 实验概述

1.1.1 科学实验的意义与地位

科学实验是科学发展的基础,它一方面和科学理论密不可分,另一方面又和技术发展相辅相成。从本质上讲,科学实验就是利用科学仪器和设备等物质手段,人为地控制或模拟自然现象,使自然过程或生产过程以比较直观的方式表现出来,并通过各种方式对实验数据进行采集处理,以揭露或显示自然规律。科学实验是一种在有利条件下研究自然规律的方法,它已成为一门新的学科——实验工程学。

实验和理论是辩证的关系,两者紧密相联,不可偏废。科学理论的产生、验证和发展依赖于科学实验,科学实验离不开理论的指导。实验课题的选择、实验的构思和设计、实验方法的确定、实验数据的处理,以及由实验结果提出的科学假说、作出科学的结论等,始终受理论所支配。

高频电子线路(或通信电路)是一门非常重要的专业基础课,它涵盖知识面广,物理概念抽象,课程内容复杂,学习理解较困难。只有加强实验环节的培养,增强学生的动手能力,通过实际测量、试验、验证分析来提高学生对高频电子线路原理的理解。因此,高频电子线路实验是一个非常重要的环节。

1.1.2 实验教学的目的、功能与分类

实验教学的目的主要是通过实践的过程来提高学生的认知能力,分析问题和解决问题的能力,加强理论联系实际和创新能力的培养。作为高等学校教学活动的一个重要组成部分,实验教学对提高教学质量,培养善于应用科学实验进行创造性研究的人才,起着理论教学所不可替代的作用。

高等学校的学生限于理论与实践的知识,还不大可能自主进行科学研究,对实验仪器、种类及使用方法等的认识还有一个渐进的过程,其参加实验的过程,主要还是一个知识积累的过程,所以实验教学的主要功能分为以下几个方面。

(1) 验证功能。在实验仪器的帮助下,通过教师的演示和学生的直接操作,形成直观的印象,从而巩固和加深理论教学的内容。

(2) 综合功能。学生在掌握了一门或数门理论课程和一定的实验技能后,可以通过理论指导,遵循一定的实验规律,对实验仪器进行组合,再进行一些较为复杂的综合实验,从而比较全面地掌握理论知识和实验技术。

(3) 探索功能。学生在掌握了一定的专业知识,并通过前两种功能的完成,也掌握了必需的基础理论和比较扎实的实验技术以及一定的认识论基础后,可以独立选题,独立地进行设计、观察、记录、处理数据,归纳、深化、开拓视野,甚至发现新的理论。

(4) 品格培养功能。通过上述环节的进行,将学生培养成勤奋、进取、严谨、求实、理论联系实际,具有高素质的人才。

根据实验教学的功能和实验的性质,实验教学可分为以下三种:

(1) 验证型实验:以验证理论为主,按课堂理论教学的进度和要求安排观察和操作的实验。

(2) 综合性实验:以综合运用课堂理论和实验技术理论为目的所进行的实验。

(3) 设计型实验:以深化和开拓理论为目的,学生在选题、方案拟定等方面有一定自由度的实验。

1.1.3 高频电子线路实验教学过程与要求

通过高频电子线路基础实验的训练,应使学生具备以下五种能力:

- (1) 实验方案拟制能力。
- (2) 电路性能调测能力。
- (3) 电路故障排除能力。
- (4) 实用电路应用能力。
- (5) 实验报告撰写能力。

考虑到能力培养的渐进过程和实验内容的结构,本书将高频电子线路实验分为三个阶段。

(1) 验证性实验阶段。通过功能模块对单元电路进行验证性实验,使学生掌握高频电子线路基础实验的基本方法和技术,掌握电子仪器仪表的基本用法和实验基本规律,掌握基本电子元器件的高频特性和使用方法及单元电路基本技术参数的测量方法。

(2) 综合性实验阶段。通过功能模块灵活多变的组合,组成多功能通信系统实现综合实验,使学生逐步掌握基本单元电路组成的功能系统电路的理论设计与实践研究相结合的方法。运用典型单元电路,如调谐放大器、集中选择放大器、振荡器、混频器、数字频率合成器等电路,组成收/发系统,掌握系统调试和技术指标测量方法。

(3) 设计与制作阶段。通过高频电子线路设计与制作,使学生掌握调幅接收、调频发射与调频接收等系统的设计方法和安装调试工艺技巧。掌握电路故障排除技术,学会开发使用新器件,培养学生综合运用理论知识解决工程实际问题的能力。

为达到实验教学的目的,在组织实验教学的过程中,应注意调动学生的积极性,充分发挥学生的主动学习精神,促使学生独立思考、独立完成实验任务,引导学生充分发挥自己的潜力,提高学生的创新能力。

1.2 元器件的高频特性

在高频条件下,集总型的电阻、电容、电感、晶体管等呈现的频率响应,都有异于低频信号时,它们将不再显现纯的电阻、电容、电感特性,即使一根导线也会有高频效应。

1.2.1 导线

用于电子电路的导线,多为铜质并在表面镀以锡或银的软线,使其易于焊接及导电。这些导线一般多为单股导线,也有多股绞合而成。为使多股导线之间相互隔绝,在表面加有一层绝缘涂层。

导线在高频时的集肤效应是由于导线内部磁场的作用,将电子挤向导体的表面,使得导线的中心部分不再是一个有用的导体,且因电流集中在有限的导体表面,致使其在高频信号时的电阻,称为交流电阻随之增加。同时,由于信号频率的升高,使得电线的杂散电感所呈现的电感抗也会随之升高而显现其效应。一根导线的电感 L ,可用以下公式计算:

$$L = 2.0l \left[2.303 \lg \left(\frac{4l}{d} - 0.75 \right) \right]$$

式中: L ——导线的杂散电感(nH);

l ——导线长度(cm);

d ——导线截面直径(cm)。

导线的高频等效电路和电抗频率响应曲线如图 1-1 所示。

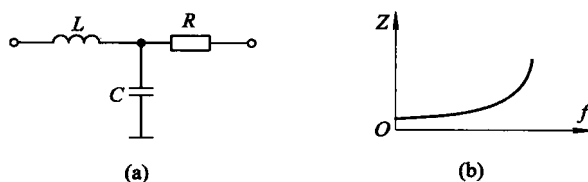


图 1-1 导线的高频等效电路及电抗的频率响应曲线

(a) 导线高频等效电路; (b) 电抗的频率响应曲线

1.2.2 电阻

图 1-2 为电阻的高频等效电路及电抗频率响应曲线。该图说明一个电阻在高频信号时,同样会呈现分布电容与引线电感的效应。这一分布电容 C 与电阻 R 并联,可对信号形成旁路,致使电阻不再是一个纯电阻,其电抗随频率上升而变化。如果电阻的结构不属于高频应用类型,或者不属于薄膜型,即使在较低的微波频段使用,其影响也会比较明显,其中,大阻值电阻比小阻值电阻的阻抗变化更大。在高频条件下,直插元件的引脚会产生分布电感,但是在表面安装(或粘贴)元件(Surface Mount Device, SMD)的电阻中,引脚很短,分布电感小,高频效应很低,因而其阻抗对电阻标示值影响很小。

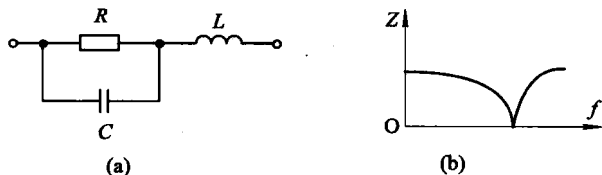


图 1-2 电阻的高频等效电路及电抗的频率响应曲线
(a) 电阻的高频等效电路；(b) 电抗的频率响应曲线

以薄膜电阻技术制作的晶片电阻(Chip Resistance)都以氧化铝等为基材，一般的频率响应较好，从直流到 2 GHz 的频段内，这类电阻的寄生电抗所产生的效应很低，常可忽略而不计。交流电阻 R_{ac} /直流电阻 R_{dc} 的频率响应曲线如图 1-3 所示。

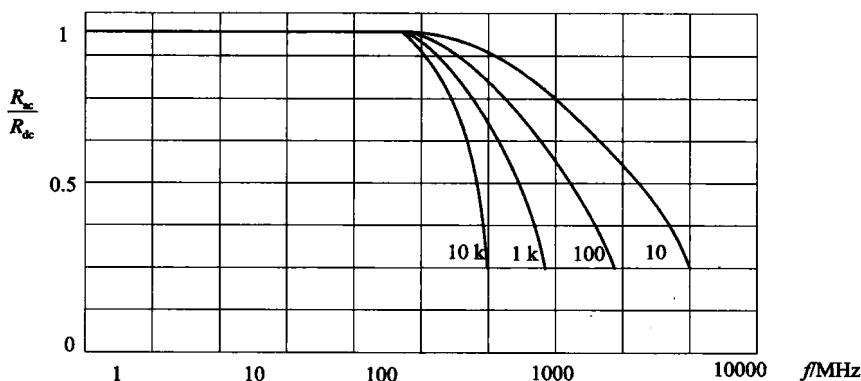


图 1-3 交流电阻 R_{ac} /直流电阻 R_{dc} 的频率响应曲线

1.2.3 电感

电感的结构十分简单，多为一根绕成螺旋状的导线，故常称之为线圈(Coils)。电感绕成螺旋状的目的在于增加线圈各匝间的磁通量，以增加导线的电感量。在实际线圈应用中，由于线圈各匝之间存在分布电容，因而会形成一个与电感并联的电容。同样，电感本身存在的电阻，在高频信号通过时，也会产生高频效应。图 1-4 为电感的高频等效电路及电抗的频率响应曲线。由图 1-4(a)可知，由于 L 、 C 及 R 的组合，必将有一个频率可使线圈电感 L 与分布电容 C 形成并联谐振，而产生很高的阻抗。实际上，这一高值阻抗，若非受到线圈上低值电阻 R 的限制，将为一无限大值。使线圈形成谐振的频率，称为电感线圈的自发谐振频率(Self Resonance Frequency, SRF)。SRF 是一个重要的参数，在设计 LC 谐振电路时，所用电感的 SRF 值应远高于电路的信号频率。

线圈长度 l 与线圈直径 d 的比值称为线架(Form Factor)。制作电感时应使线架尽量小，一般要求 $l/d \approx 1$ ，实际应用 $l/d < 2.0$ 。

不过受设计限制常会使最大电感量降低，为补偿这一缺失，通常可在线圈中置入适当铁磁材质的磁芯(Magnetic Core)，以增加其电感量。

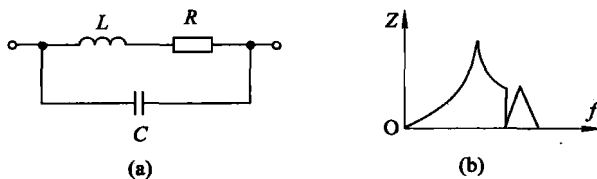


图 1-4 电感的高频等效电路及电抗的频率响应曲线

(a) 电感高频等效电路；(b) 电抗频率响应曲线

当电感用于调谐电路时，还有一个必须注意的重要参数，就是电感的品质因数 Q 。 Q 定义为某一电感在某一信号频率测试下的品质状态。线圈 Q 值是其电抗与线圈总耗损的等效电阻的比值，所谓的耗损来自直流串接电阻、磁芯耗损及集肤效应。 Q 值会随频率的上升而提高，由于频率上升，分布电容也随之增加，从而使电感特性发生改变。当信号频率为自发频率 SRF 时， Q 值降为零。 Q 值的频率响应如图 1-5 所示。线圈的直流串接电阻，由于其为导线本身的电阻，因此不仅会影响 Q 值，且在高频小信号的高值电感中，常有很高的数值，因而对直流偏压会产生较大的影响，出现这一现象需稳定偏压元件上的电压，否则会造成不良后果，从而使电路的运作不正常。因而如何选择适当的高频电感，是设计任务上的重要课题之一。前面提到导线的集肤效应会在导线上形成交流电阻，而集肤效应的计算仅能有效地应用于平直导线。而以导线绕制而成的线圈，会有更多的磁场效应，使得导线的交流电阻更大，这一现象称为接近效应 (Proximity Effect)。接近效应并不容易估计，但却不宜忽视。一般而言，用导线绕成线圈后，因接近效应而增加的电阻，约为集肤效应的 2~10 倍。通常，为降低接近效应的影响，电感线圈各匝间的间距不宜靠得太近，一般可用导线直径作为间距参考。

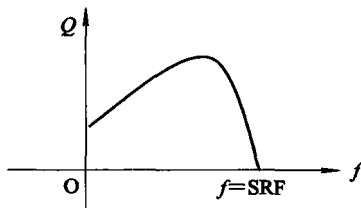


图 1-5 Q 值的频率响应

同时，在高频信号下，所用高值电感线圈的耗损问题也很重要。高频耗损除了电阻耗损外，主要还来自线架(磁芯)的磁滞、涡流及介质等的损耗。一般而言，在无线电高频电路中常用的电感线圈都以空气芯 (Air Core) 的形式为佳。

1.2.4 空气芯线圈设计

在进行无线电电路设计时，需要一些特定数值或形式的线圈。在需求量不大或是进行可行性试验时，这类线圈常需自行设计及制作。

高频电路最常用到的单层空气芯线圈可按下列公式计算所需的线圈匝数：

$$n = \frac{\sqrt{L(24r + 25l)}}{r}$$

式中： n ——线圈匝数；

L ——所需电感量(μH)；

l ——线圈长度(cm)；

r ——线圈内半径(cm)。

依据上述设计公式所制作的线圈，其电感量的精确度仅在线圈长度 l 与其半径 r 约为相等时最佳，但在信号频率高至 VHF 以上时，精确度会受到影响。同时，用以制作线圈的导线，最好选用漆线包，以避免各线匝之间因接触而短路。所需导线的型号(粗细)，可由线圈长度 l 与匝数 n 来决定。

1.3 实验测量基础

高频电子线路实验离不开电子测量，测量是指以获取被测对象量值为目的的全部操作，从电子测量结果中可获得反映研究对象特性的信息，有助于认识事物和解决问题，掌握事物发展变化的规律。

1.3.1 测量方式

测量可分为直接测量、间接测量、组合测量三种方式。

(1) 直接测量：在测量过程中能直接从仪器仪表上获得测量结果的方式。例如，用数字三用表测量 220 V 交流电压和晶体管各极电压，用温度计测量温度等，这些均可直接获得测量结果。

(2) 间接测量：被测量的数值与几个物理量存在着某种函数关系，则可通过直接测量法得到其中有关物理量的值，再由函数关系计算出被测值，这种测量方式称为间接测量。例如，要测量电阻 R 上的消耗功率，首先测量电阻两端的电压 u ，再根据公式求出 R 上的消耗功率，这一测量过程就是间接测量。

(3) 组合测量：测量中有多个未知量以不同的组合形式出现(或改变测量条件来获得不同的组合)，根据直接测量或间接测量所得的结果，通过求解联立方程来求得未知量和数字，这种测量方式称为组合测量。例如，某一有源的端口网络 A 与负载连接，要测量端口网络 A 的开路电压 u_0 和内阻 R_0 ，如图 1-6 所示。用直接测量和间接测量都无法获取结果，但是其端口与负载有伏安特性关系式：

$$u = u_0 - R_0 \cdot i \quad (1-1)$$

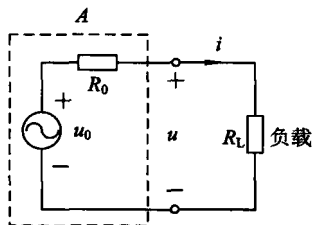


图 1-6 有源端口网络

为了测量 A 的开路电压 u_0 和等效内阻 R_0 ，可采用先后改变负载值的方法获取，两次测量的端口电压和电流分别为 u_1 、 i_1 和 u_2 、 i_2 ，将它们代入式(1-1)中，得出下列方程组：

$$\begin{cases} u_1 = u_0 - R_0 i_1 \\ u_2 = u_0 - R_0 i_2 \end{cases}$$

解出此方程组便可求出参数 u_0 和 R_0 。

1.3.2 测量方法

直接从仪器仪表上读数得到测量值的方法称为直读法。例如：用电压表测量电压，用功率表测量功率等。

将被测量与标准量直接进行比较而获得测量结果的方法称为比较测量法。例如：用电位差计测量电压，用电桥测量电阻等，此方法的特征是标准量直接参与被测量过程。其优点是测量准确，灵敏度高，适合精密测量；缺点是测量过程较为麻烦。

应当注意测量方式与测量方法概念上的区别。用电压表或功率表直接测量的方法，既是直接测量方式又属于直读法。而用电桥测量电阻则是直接测量方式，不属于直读法而属于比较测量法。

1.4 实验误差分析和仪表的准确度

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略后者。

在实际测量中，由于测量仪器仪表工具的不准确、测量方法的不完善等各种因素的影响，实验中实际测量的数值与真实值并不完全相同，这种矛盾在数值上的表现为误差。随着科学水平的提高和人们的实践经验、技巧和专业知识的丰富，这种误差被控制得越来越小。但是实验结果均有误差，误差自始至终存在于一切科学实验过程中。

1.4.1 误差的来源与分类

1. 测量误差的来源

测量误差主要来源于以下几个方面：

- (1) 仪表误差：由仪表的电气或机械性能不完善所产生的误差。
- (2) 使用误差：又称操作误差，是在使用仪表过程中，因安装、调节、布置、使用不当引起的误差。
- (3) 人身误差：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：又称为环境误差，是指温度、湿度、大气压、电磁场、机械振动、声音、光照、放射性等因素所造成的误差。
- (5) 方法误差：又称为理论误差，是指由于使用测量的方法不完善、理论依据不严密、对某些经典测量方法作了不适当的修改和简化所产生的误差。利用伏安表测量电阻时，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。

2. 测量误差分类及产生原因和处理方法

根据测量误差的性质和特点,测量误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1) 系统误差

在相同情况下,重复测量同一量时,误差的大小和符号保持不变,并按一定规律变化或在测量条件改变时,误差按某一确定的规律变化,这种误差称为系统误差。系统误差的产生原因很多,常见的有测量仪器不准确,测量设备安装、放置不适当,测量方法不完善或所依据的理论不严格,采用了不适当的简化和近似等。此外,还有测量者本身的一些不正确的习惯(如习惯于左视或右视读取仪表的数据)也必然会带来误差。

针对上述产生系统误差的原因,可以适当采取一些措施,以消除或减少系统误差,常见的措施有以下几种:

(1) 对测量仪器定期用高一级的标准仪器进行鉴定和校准,求出其修正值,以便对测量结果进行校正。例如,用某电压表测量电压,电压表的指示值为 6 V,修正值为 +0.05 V,则被测电压的准确值应为 6.05 V。

(2) 注意仪器的正确使用条件和方法。例如,仪器的放置位置、工作状态、使用环境条件及附件的连接和使用等都要符合规定,要善于正确地操作所使用的仪器仪表。

(3) 对测量者主观因素造成的系统误差,除了要提高测量者的技术水平、责任心,改变不正确的习惯外,还可以从仪器设备上进行改进。例如,采用数字式仪表代替指针式仪表。

2) 随机误差

在实际相同条件下多次测量同一个被测对象时,如果误差的绝对值和符号时正时负,时大时小无规律变化,那么这种误差称为随机误差。

随机误差主要是由那些互不相关的诸多因素造成的。例如,热骚动、噪声干扰、电磁场的微变、大地的微振等。这些测量的随机误差是无法预知的,并表现出一定的规律性,其特点是:在多次测量中,随机误差的绝对值不超过一定的界限;绝对值相等的正负误差出现机会相同;多次测量的随机误差有相互抵消的性质。

根据统计理论和大量实践证明,多次测量结果的随机误差的分布形势接近于正态分布,也有部分测量结果的随机误差属于均匀分布或其他分布。

当随机误差接近于正态分布时,其算术平均值随着测量次数的增多而趋近于零。所以,多次测量某一被测量时,可用其算术平均值来代替其真值。而随机误差的大小可以用测量值的标准差(方差)来衡量,它反映了测量数据的离散程度(精度)。

3) 粗大误差

粗大误差也称过失误差。它是一种在一定测量条件下,测量值偏离其真值的误差。通常是由测错、读错、记错、算错实验数据而引起的。当测量仪器有缺陷或测量方法出现错误时,也会引起这种误差。

粗大误差明显地歪曲了测量结果。例如,在测量所得的结果中,某些数据出现突变可称其为坏值,对于这一类测量结果,经判定应予以剔除。

1.4.2 合理使用测量仪器减少测量误差

在具体实验中,要学会恰当选用仪器仪表,对造成误差的原因要学会分析。

不论采用直接测量法测量电流,还是采用间接测量法测量电压,都要注意仪表内阻,因为仪表内阻的存在,势必带来测量误差。比如采用间接法,使用 MF47 万用表直流电压 2.5 V 挡测量某一电阻 R 两端的电压,表针正好指示为 1 V,换用 DT9202 数字万用表直流电压 2 V 挡测量时, R 两端电压指示为 1.1 V,这 10% 的误差主要是仪表内阻造成的(MF47 内阻为 20 k Ω ,DT9202 内阻为 1 M Ω),其次还包括仪表误差和测量误差等。

综上所述,针对不同电路,只有合适地使用仪器仪表,才能减少测量误差,这是做好每个实验的前提。

1.4.3 正确使用各类信号源

在进行各种实验时,不可避免地要使用信号发生器来测试、调整电子电路和仪器。信号发生器是为进行电子测量提供符合一定技术要求电信号的设备。它的输出特征一般具备输出电压范围和频率准确度、输出波形、输出阻抗、输出频谱纯度等各项指标。实验前对使用的信号源必须有所了解:

(1) 要学会选择输出波形、输出频率、输出电压等。

(2) 要注意仪表输出电压的表示方法,如用电压表头读出的数值一般是电压有效值 U_0 ,但是随着科学技术的发展,信号发生器体积越来越小,如 DDS 信号源,它去掉了体积较大的表头,直接用数字显示出来,显示的方法有的用有效值 U_0 和幅值 U_p 表示,有的用峰—峰值 U_{p-p} 表示。特别是幅值 U_p 或峰—峰值 U_{p-p} 表示法,有的表示空载电压,有的表示阻抗匹配时的电压,使用中要加以区别。有效值、幅值和峰—峰值之间的函数关系式的正弦波为

$$U_p = \sqrt{2}U_0, \quad U_{p-p} = 2\sqrt{2}U_0.$$

(3) 注意阻抗匹配。阻抗匹配是指信号源的输出内阻与实验电路输入阻抗要相等或接近,否则,从信号源读出的电压会相差甚远。

1.5 实验数据处理

实验数据处理,是指对实验测量所得数据进行计算、分析和整理,有时还要归纳成一定的表达式,或者画出表格、曲线等。数据处理是建立在误差分析的基础上,通过分析来得出正确的科学结论。数据处理的方法有有效数字及数字的舍入、非等精度测量与加权平均、最小二乘法回归分析等。

1.5.1 有效数字

由于实验中不可避免地存在误差,同时,在计算时对无理数也只能取近似值,因此,当记录或计算的数据是一个近似数时,为了将某个测量结果表示确切,通常规定近似数表示所产生的误差不得超过其末位单位数字的一半,有效数字是从近似数的左边第一个非零

数字起,直至右边最后一个数字止。利用有效数字记录测量结果时,应注意以下几点:

(1) 有效数字是指是从左边第一位非零数字开始,直到右边最后一个数字为止的所有数字。左边的“0”不是有效数字,在有效数字之间的“0”则是有效数字。例如,0.0257 MHz 中左边两个“0”不是有效数字,它是由 2、5、7 三个有效数字组成的频率值,而 8.06 V 和 4.30 A 中的“0”则是有效数字。

(2) 由于有效数字的末位数字与测量精度有关,因此当末位数字为“0”时,不能随意删除。例如,4.30 A 表明测量误差不超过 0.005 A,若随意改写为 4.3 A,则意味着误差不能超过 0.05 A,这显然不合适。如果误差已知,则有效数字的位数应与误差相一致。例如,仪表误差为 ± 0.01 V,测得电压为 11.4736 V,其结果应写成 11.47 V。

(3) 有效数字的位数不因采用单位的改变而变。例如,测量电流以“A”为单位,测得结果为 2 A,若以 mA 为单位,则可以写为 2×10^3 mA,不能写成 2000 mA。因为 2 A 和 2000 mA 对应的测量精度是不同的。如果测量结果为 2.000 A,则改写成 2000 mA 是允许的,因为两者有效数字位数相同,对应的测量精度是一致的。

1.5.2 数字舍入规则

目前,较广泛采用的舍入规则并不是古典的“四舍五入”法则,当要保留有效数字时,为了不产生较大的累计误差,应按下述规则舍入:

(1) 若 $n+1$ 位及其后面的数字小于第 n 位单位数字的一半,则舍去;若大于第 n 位单位数字一半,将第 n 位数字进 1。

(2) 若 $n+1$ 位及其后面的数字恰好等于第 n 位单位数字的一半,则当第 n 位数字为偶数或者为零时,就舍去后面的数字;当第 n 位数字为奇数时,则第 n 位数字进 1。

下面是根据上述法则保留三位有效数字的几个例子:

35.46: 因 0.06 大于 0.05,所以末位进 1,写为 35.5。

18.041: 因 0.041 小于 0.05,故舍去,写为 18.0。

373.5: 舍去 0.5,恰好是第三位单位数字的一半,而第三位数字是奇数,故进 1,写为 374。

57850: 舍去 50,恰好是第三位单位数字 100 的一半,而第三位数字 8 为偶数,故舍去,写为 578×10^2 。

上面的舍入规则可简单地概括为:小于 5 舍,大于 5 入,等于 5 时取偶数。

用这些规则对测量数据或计算结果的多余的位数进行处理,实际上是从不确定处对齐截断,这样做既能正确反映被测量的真实和可信程度,又可使数据的表达不过于冗长和累赘。

1.5.3 实验数据整理和表示法

1. 实验数据整理

在实验中所记录的原始测量数据,需要加以整理,进一步分析、评估,给出切合实际的结论。通常希望将记录的原始数据按顺序排列、剔除偏差较大的坏值和粗大误差,补充缺损数据。

测试中有时会出现偏差较大的数据,一种是随机误差,一种是粗大误差,这两种误差必须剔除。在数据处理过程中,有时会遇到缺损的数据,可以在实验中及时补充。

2. 实验数据表示方法

实验测量所得到的数据,只有经过整理、运算、分析和处理后,才能得出实验规律或结果。常用的实验数据表示方法有列表法和图形表示法。

列表法是常用的实验数据表示方法。其特点是形式紧凑,便于数据的比较和检验。图形表示法是将数据在图纸上绘制成图形,也是实验数据的一种表示方法。绘图法的优点是直观、形象,能清晰地反映出变量间的函数关系和变化规律。

1.6 实验故障处理

在实验过程中,实验器材和实验仪器仪表故障的出现是常有的事。分析和排除故障,是培养同学们综合分析问题、解决问题能力的一个重要方面。要做好一个实验,同学们要有一定的理论基础和较熟练的实验操作技能。实验中应该尽可能地及时对数据做初步分析,以便及时发现问题,当即采取措施,从而提高实验质量,培养学生分析问题、解决问题的能力以及实际动手能力。

1.6.1 故障的原因

做通信实验时产生故障的原因很多,一般可归纳为以下几点:

(1) 电源接线错误、正负电源接反、电压过高或过低,造成电路器件烧毁或者电路不能正常工作。

(2) 测试错误,使用的仪表操作不当,例如:万用表挡位错误,如用电流挡测量电压,示波器测量探头接反等,同样也会造成仪表损毁、器件烧坏、电路不能正常工作等。

1.6.2 排除故障的原则

通常,排除故障应遵循以下原则:

(1) 出现故障时应立即切断电源,避免故障扩大。

(2) 根据故障现象,判断故障原因。实验中出现的故障原因大致可以分为两大类:一类是破坏性故障,对仪器、设备、实验电路造成损坏,现象常常是冒烟、有焦味、器件严重发热等;另一类是非破坏性故障,现象是稳压电源无电压指示、仪器指示灯不亮、实验板上无电压、实验输出波形不正常等。

(3) 根据故障性质,确定故障的检查方法。对破坏性故障,不能采用通电方法检查,在不能查明原因时,应请指导老师帮助排除。对非破坏性故障,也应切断电源观察,确定通电没有问题再采用通电检查的方法,进行检查时首先应知道正常情况下,电路各处的电压、电流、波形等,做到心中有数,再用仪表进行检查,逐步缩小故障范围,直到找到故障点。