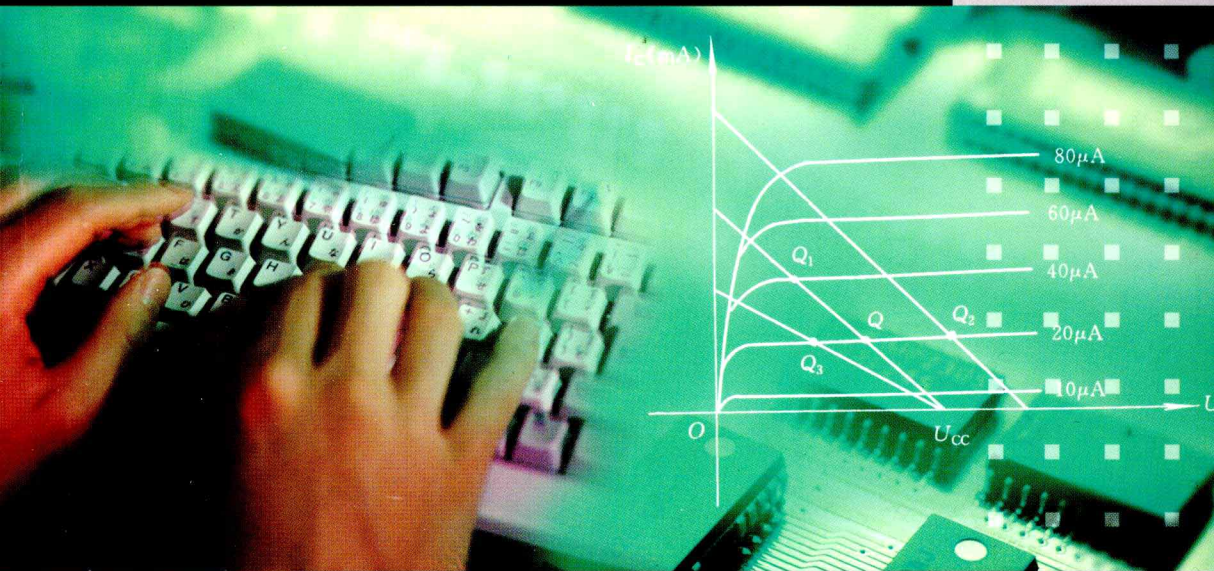


总主编 秦杏荣 张保华

21世纪电工电子实验系列教材



(第2版)

MONIDIANLUSHIYANJICHU

模拟电路实验基础

主编 张保华 副主编 施正一 刘静

21 世纪电工电子实验系列教材

总主编 秦杏荣 张保华

模拟电路实验基础

(第 2 版)

主 编 张保华

副主编 施正一 刘 静



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书为同济大学、安徽大学等 10 余所高等院校共同编著的电工电子实验系列教材之一。全书共分 4 章,内容包括模拟电子技术测量基本知识(含元器件附录)、模拟电子技术的实验仿真技术(含 Multisim 软件介绍)、常用电子仪器及使用以及模拟电子实验技术。其中实验模块设置 20 多个项目,涉及内容全面,并增加了设计性、综合性内容和计算机仿真要求。

本书可作为高等院校工科电子、通信、自动化、电气类各专业的模拟电子技术实验课程教材,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

模拟电路实验基础/张保华主编.--2 版.--上海:同济大学出版社,2011.2

ISBN 978-7-5608-4498-5

I. ①模… II. ①张… III. ①模拟电路—实验—高等学校—教材 IV. ①TN710-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 011197 号

21 世纪电工电子实验系列教材

模拟电路实验基础(第 2 版)

主编 张保华 副主编 施正一 刘 静

责任编辑 姚焯铭 责任校对 徐春莲 封面设计 潘向葵

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 14.25

印 数 1—4100

字 数 285000

版 次 2011 年 2 月第 2 版 2011 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-4498-5

定 价 25.00 元

《21 世纪电工电子实验系列教材》编委会

主任委员 严隽薇

总 主 编 秦杏荣 张保华

编 委 (以下以姓氏笔画为序)

冯伟国 刘锦高 李荣正 陈泉林

陈军宁 张 浩 周政新 郑晓东

杨万枫 高卫东 钱 平 钱剑敏

廖晓纬

总 主 审 朱承高

策 划 张平官

序

高等学校是培养社会主义建设人才的主渠道,尤其在科学技术高速发展的今天,如何培养学生的实践能力、创业能力、创新能力和国际竞争能力是我们每个教育工作者都必须认真思考的主题.传统意义上的实验教学模式显然已经不能为飞速发展的时代所接受,为此,全面推行教学改革,实施新的教学方案,编撰新的实验教材已成为我们每个致力于实验教学的教师的新课题.

本系列教材是在各参编学校多年来实验教学研究、改革和实践的基础上,吸取各兄弟院校近年来实验改革的经验编撰而成的.它是集体的智慧,更是众人的成果.

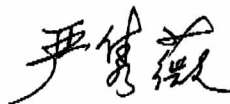
与以往形式单一、内容陈旧的实验教材不同,本系列教材中除保留了部分传统的验证性实验外,增加了设计性、研究性的实验内容和计算机仿真内容.考虑到在实施本系列教材时的学生还处在低年级阶段,其所学和掌握的理论 and 实践知识的局限性,新编实验教材在其内容和形式上都按照循序渐进的要求进行.本系列实验教材既考虑到与理论课教材的衔接、呼应和配套,又不失实验教材的自身独立体系.在编写实验项目时已经顾及所用实验仪器、设备和实验器材的通用性及实验装置的开放性.

实验计划时数可参照2004年修订的“高等学校电工电子课程教学基本要求”适当放宽,以便于教师实施本教材时根据实际情况酌情选用.

参加本系列实验教材编纂的学校有同济大学、华东师范大学、华东理工大学、东华大学、上海海事大学、上海大学、上海电力学院、上海工程技术大学、上海应用技术学院、上海第二工业大学和安徽大学、中国人民解放军电子工程学院、中国人民解放军炮兵学院、淮南师范学院等.

本实验系列教材从筹划到出版,自始至终得到了同济大学出版社和各参编学校领导的鼎力相助和大力支持,在此我们谨以编委会的名义向他们致以崇高的敬意和衷心的感谢.

限于作者的业务水平和各校初次合作,书中难免存在一些不妥之处,敬请各使用者批评斧正.



2005年9月21日

前 言

《模拟电路实验基础》基于教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教育指导分委会 2004 年修定的“高等学校电工电子课程教学基本要求”，在汲取各参编院校近年来实验教学改革的经验基础上编撰而成。

本教材特色之一，涉及面较广，实验内容按从易到难、由浅入深、循序渐进的原则编写，既有传统的基础性内容，也有设计、综合性项目。实验指导教师可根据学生的实际情况，对实验内容进行选择。

本教材特色之二，在多数实验项目的预习题中增加了计算机仿真内容。学生在进行实验前通过计算机仿真，对实验状况有大概的了解，便于学生在实验中对测量结果进行比较、设备正确选用、测量点合理选取，从而掌握电子技术仿真手段。

本书在第 1 版的基础上，作了部分修改，共分 4 章，第 1 章模拟电子技术测量基本知识及附录，由施正一编写；第 2 章模拟电子技术的实验仿真技术，由刘静编写；第 3 章常用电子仪器及使用，由施正一、张保华编写；第 4 章模拟电子实验技术，设置 20 多个实验项目，介绍实验和设计方法，其中，4.1~4.5、4.7、4.10、4.12~4.14、4.17、4.18 由张保华编写；4.6、4.15 由刘静编写；4.8、4.9、4.11、4.16、4.19~4.22 由施正一编写。此外，王芬芳、张力、高璐、何瑞来等也参与了部分内容的编写。全书由张保华统稿。

本书在编写过程中，得到了同济大学出版社和参编学校相关老师的大力支持和帮助。同济大学戚火彬教授严格而又细致地审阅了本教材原稿，并提出了许多极其宝贵的修改意见，在此一并表示诚挚的感谢。本书由安徽大学电工电子实验教学中心张保华任主编，上海电力学院施正一、上海海事大学刘静任副主编。

由于编者的水平有限，本书的初版中存在一些疏漏和不妥之处，在本次修订中，我尽可能做了弥补和更正，但书中仍难免存在不足，敬请读者、尤其使用本教材的老师和同学批评指正。

编 者

2010 年 7 月

目 录

序 前言

1 模拟电子技术测量基本知识	(1)
1.1 测量误差分析与实验数据处理	(1)
1.2 模拟电子技术实验基本测量技术	(10)
2 模拟电子技术的实验仿真技术	(15)
2.1 仿真软件介绍	(15)
2.2 Multisim 2001 仿真工具的应用	(25)
2.3 仿真实验范例	(37)
3 常用电子仪器及使用	(42)
3.1 函数发生器	(42)
3.2 双踪示波器	(47)
3.3 直流稳压电源	(63)
3.4 交流毫伏表	(65)
3.5 失真度测量仪	(67)
3.6 频率特性测试仪	(69)
3.7 晶体管特性图示仪	(71)
4 模拟电子实验技术	(77)
4.1 常用电子仪器的使用	(77)
4.2 晶体管特性及主要参数的测试	(84)
4.3 恒流源电路的研究	(94)
4.4 单管交流放大电路的研究	(99)
4.5 三种基本组态放大电路性能比较	(106)
4.6 场效应管放大器	(111)
4.7 负反馈放大电路的研究	(115)
4.8 OTL 功率放大器	(119)
4.9 集成功率放大器	(124)

4.10	差分放大电路的研究	(129)
4.11	集成运算放大电路参数的简易测试	(135)
4.12	集成运算放大电路的应用(一)	(141)
4.13	集成运算放大电路的应用(二)	(145)
4.14	集成运算放大电路的应用(三)	(152)
4.15	直流稳压电源的设计	(157)
4.16	有源滤波电路的研究	(162)
4.17	自动增益控制电路	(167)
4.18	温度监测及控制电路	(170)
4.19	晶闸管可控整流电路	(175)
4.20	函数发生器的设计	(179)
4.21	自动充电器设计	(189)
4.22	其他应用电路的设计	(192)
附录 模拟电子技术实验中常用的元器件		(201)
参考文献		(215)

1 模拟电子技术测量基本知识

1.1 测量误差分析与实验数据处理

在电子技术实验中,必须使用设备仪器对各种电量进行测量,以得到相应的数据.测量任一物理量,不管采用什么方法,由于测量仪器、测量程序、环境条件和测量人员的能力,都不是绝对完善的,因此不可避免地在测量值与该被测量的真实值(简称真值)之间存在差异,这个差异就是测量误差(简称误差).

由此可见,测量值只是被测量的真值的近似值,测量技术和仪器的先进,只能使测量值更精确些,误差更小些,而不可能完全等于真值.所以,测量中存在误差是绝对的,而精确都是相对的,在电子测量中当然也不例外.

既然测量中必定有误差,那么,怎样设法减小测量误差,怎样计算误差,从而正确估计测量结果的准确度,以及如何最有效地采用计算数据?研究这些问题可以正确指导我们的测量工作,所以我们需要了解一些有关误差的知识和测量数据处理的方法.

1.1.1 测量误差的定义

测量误差常用绝对误差、相对误差和容许误差来表示.

1. 绝对误差

如用 x 表示测量值,用 x_0 表示真值,绝对误差 Δx 定义为测量值与被测量的真值之间的差值,可表示为

$$\Delta x = x - x_0.$$

绝对误差 Δx 之值可正也可负,但是被测量的真值实际上是不知道的(因为任何测量都难免有误差,真值是无法得出的),所以我们在实际工作中,是用标准仪器对被测量的测量值来代表它的真值,为了和真值区别开,称它为实际值 x_s .

例如,为了检定出某台仪表的测量误差,必须使用标准仪表来对比.在检定时,将一被测量同时输给被检表和标准表,标准表的指示值为 x_s ,被检表的指示值为 x ,则 $x - x_s = \Delta x$ 为被检表在这一点上的绝对误差.

绝对误差表示法有下列特点:

① 绝对误差为一有单位的实数,因此误差大小与单位有关.例如误差为 10Ω ,也可写成 $0.01\text{k}\Omega$;误差为 1kHz ,也可写成 $1 \times 10^3 \text{Hz}$.

② 能反映出误差的大小及方向.

③ 但是,绝对误差不便于比较两个以上测量值的准确度.例如:测量两个信号频率,信号“1”的频率 $f_1 = 500\text{MHz}$,测量的绝对误差 $\Delta f_1 = 500\text{Hz}$;信号“2”的频率 $f_2 = 500\text{Hz}$,测量的绝对误差 $\Delta f_2 = 0.5\text{Hz}$.从绝对误差角度来看 $\Delta f_2 \ll \Delta f_1$,但因 $f_1 \gg f_2$,不能认为对 f_1 的测量准确度就比对 f_2 的测量准确度差,可见不能用绝对误差进行这样的比较.由于绝对误差无法表示测量的准确度,因此需引入相对误差.

2. 相对误差

相对误差 δ_x 定义为绝对误差与被测量的真值之比,用百分数表示,可表示为

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\%.$$

若被测量的真值仍用实际值 x_s 代替,所以又称为实际相对误差 δ_s .例如,用标准晶体振荡器来校准频率计,标准晶体振荡器的频率 $f_{\text{标}} = 100\text{kHz}$,用被检频率计去测量为 $f_{\text{测}} = 101\text{kHz}$,求实际相对误差 δ_s . $f_{\text{标}}$ 为被测量的实际值, $x_s = 100\text{kHz}$, $f_{\text{测}}$ 为被测频率计的测量值, $x = 101\text{kHz}$,则

$$\delta_s = \frac{\Delta x}{x_s} \times 100\% = \frac{101 - 100}{100} \times 100\% = 1\%.$$

相对误差还有另外两个表示形式:

(1) 标称相对误差 δ_b

它表示绝对误差 Δ 与测量值 x 之比,可表示为

$$\delta_b = \frac{\Delta}{x} \times 100\%.$$

例如:上述被校频率计的误差,用标称相对误差表示:

$$\delta_b = \frac{\Delta}{x} \times 100\% = \frac{101 - 100}{101} \times 100\% = 0.99\%.$$

(2) 引用相对误差(或称额定相对误差、满度相对误差) δ_y

其定义为绝对误差 Δ 与仪表测量上限(即满刻度读数) x_m 之比,可表示为

$$\delta_y = \frac{\Delta}{x_m} \times 100\%.$$

引用相对误差主要用来表示指针式仪表的准确度.采用这一误差形式的主要原因,在于某些仪表的误差主要取决于仪表结构与制造精度,误差大小与测量的大小关系不大,所以只能用引用相对误差来表示.

例如,电工仪表的准确度采用相对误差来表示,分为 0.1、0.2、0.5、1.5、2.5、5 共 7 个级别,其含义举例解释如下:一个满刻度为 150V 1.5 级电压表,在测量时产生的最大绝对误差将不会超过满刻度的 $\pm 1.5\%$,也就是小于 $150 \times (\pm 1.5\%) = \pm 2.25\text{V}$.这个误差值的大小和被测量的大小没有什么关系.如用这个表测量某个电

压,指示为 100V 时,则该被测电压的真值在 100 ± 2.25 之间,即在 97.75~102.25V 之间;若测量某电压为 10V,则其真值为 10 ± 2.25 V,即在 7.75~12.25V 之间.由此看来,测量值越小,相对误差越大.所以电工仪表必须使用在满刻度以内 $1/3$ 区域和不要用大量程来测量小数据.

相对误差有下列特点:

- ① 相对误差是无名数,仅是个比值,所以与单位大小无关.
- ② 相对误差仍然能够反映出误差的大小和方向.
- ③ 相对误差能够确切反映出测量的准确度.

例如,上述绝对误差的特点③中的例题: $f_1 = 500\text{MHz}$, $\Delta f_1 = 500\text{Hz}$, $f_2 = 500\text{Hz}$, $\Delta f_2 = 0.5\text{Hz}$,求各自的相对误差 δ_1 、 δ_2 .

$$\delta_1 = \frac{\Delta f_1}{f_1} \times 100\% = \frac{500}{500 \times 10^6} \times 100\% = 1 \times 10^{-4}\%$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta f_2}{f_2} \times 100\% = \frac{0.5}{500} \times 100\% = 0.1\%$$

显然, $\delta_1 \ll \delta_2$,即 f_1 的测量准确度比 f_2 的测量准确度要高得多.

3. 最大误差(容许误差)

一般测量仪器的准确度指示经常使用最大误差的形式来表示.其含义是:给定一个误差范围,在各次测量中所产生的误差都不应超出这个范围的最大数值.这个最大误差数值界限可以表示为最大绝对误差或最大相对误差.

测量仪器的允许误差采取哪种形式来表示,如 DA22 型超高频毫伏表基本误差为 mV 档 $\leq \pm 10\%$, 3mv 档 $\leq \pm 5\%$,其余各档 $\leq \pm 3\%$ (均指满度值的百分数);某些标准元件(作为度量用具)有时用绝对误差表示,如某标准电容器的允许误差为 ± 1 微微法;无线电测量采用较多的是实际相对误差的形式,如 XFC—6 型标准信号发生器载波频率误差为 $\pm 1\%$;还有用相对误差和绝对误差相结合的形式表示的(在仪器的最小量程中常常如此表示),如 XFC—6 型标准信号发生器的电压衰减器的误差为 ± 2 分贝 ± 0.1 微伏.

1.1.2 测量误差的分类

我们根据误差产生的原因,通常把误差分为系统误差、偶然误差和疏失误差三类.

1. 系统误差

这种误差是由于仪器的不完善,使用得不恰当,或测量方法采用了近似公式以及外界因素(如温度、电场、磁场等)等原因所引起的.这类误差在进行反复测量时,其大小保持不变,或遵循一般规律变化.由于它并有规律性,就有可能通过试验和研究来发现它并找出其原因,从而设法防止和消除,有的可以计算出来加以改正.

系统误差虽然具有一定的规律性,但是需要通过试验和研究分析来找出它们,然后加以防止和消除.系统误差的危险性就在它没有被发觉的时候最大.所以在进行测量之前,必须预先研究系统误差的所有可能来源,并采取措施消除之,或确定它的大小.系统误差的种类很多,并没有千篇一律的消除方法,原则上可以根据发生的原因来设法防止.有时也可以按它出现的性质采用适当的方法消除.

根据不同的发生原因,系统误差可分四类.

① 工具误差,是指由于测量设备的构造上的缺点所引起的误差,如仪器本身校准不好,定义不准确等.这类误差的消除方法是预先校准好量具和仪器,纠正存在的毛病,防止误差的产生或确定其本身的误差值,然后在测量值中引入适当的补值来消除它.

② 装置误差,是由于测量仪器和其它设备的放置和安排不当,或使用得不正确所造成的误差,以及由于外界环境条件的改变(如温度、湿度、气压、电磁场等)所引起的误差.对这类误差的消除方法是:测量仪器、设备的安放必须遵守使用规定(如水平或垂直放置,电表之间应适当远离,并注意避开过强的外部电磁场).但是,外界条件对于仪器、设备的影响由于它变化规律颇为复杂,通常都须进行专门的试验、研究,才能做出适当的校正公式或曲线,然后加以修正.

③ 人身误差,是由于测量者个人特点所引起的误差.如有些人对时间或信号的记录习惯于超前或滞后,读指示刻度时,有人习惯于超过或欠少.又如用差拍法测量频率时,由于人自身对 20Hz 以下的振动不易辨别,就产生 20Hz 的绝对误差;采用谐振法进行的测量,有时由于视觉的缺陷或手腕运动不够灵活,总不能调到回路的真正谐振点,从而产生一定的测量误差等.对于这类误差的消除方法应从测量者本身提高测量技巧、工作细心严格等主观方面去解决.对于一些不易纠正的个人癖病,可以采用更换人员的方法来发现和纠正.

④ 方法误差或理论误差,是由于所采用的测量方法本身而带来的误差.如测量方法所依据的理论不够严格,对所用方法探讨不够,对某些伴随测量所发生的情况不够了解,采用了不适当的简化后近似的公式等,都会引起测量结果的不正确.总之这是由于方法和理论上的不完善造成的,对这类误差要靠细致的分析研究加以消除.例如:用伏安法测电阻时,若直接以伏特计的示数对安培计的示数之比作为测量结果,而不计及电表本身电阻的影响,则这个方法本身便包含有理论误差.

系统误差按其表现特性来看,又可分为固定和变化的两种.

固定的系统误差在测量过程中重复出现时,其大小和方向都不变化,对于测量结果的影响只有一个固定值.变化的系统误差随测量过程发生变化,但是这种变化具有一定的规律,如周期性的变化,或其它规律的变化等.

对于固定性的系统误差,如不能用简单的方法确定或消除,还有可能用下列几种特殊测量方法来加以抵消.

① 替代法 在测量时,先对被测量进行测量,然后用一已知标准量替代被测量,

并改变已知标准量的数值,使测量装置恢复到原来(测量被测量时的)状态,则这时已知标准量的数值,就是被测量的数值.采用这种方法来测量,如替代后确能保证测量装置恢复到原来状态,则由于仪器内部结构及各种外界因素所引起的误差对测量结果将不起作用,因此可以消除由于仪表不准确和装置不妥善所引起的系统误差.

② 正负误差抵消法 即在不同情况下进行两次测量,使两次所发生的误差等值而异号,然后取两次结果的平均值,便可将误差抵消.例如在有外磁场的影响,可以将电流表转动 180° 再测量一次,取这两次结果的平均值,就可以消除掉有磁场引起的误差.

2. 偶然误差

偶然误差是指那些由于偶然而杂乱出现的,不带任何规律性的误差.产生的原因一般不详,因而也就无法控制,即使在同一条件下对同一被测量进行多次重复测量,所得结果也往往互不相同,但是只要测量次数足够多,就可以发现偶然误差完全服从统计规律,误差的大小及正负的出现,完全由机率决定,因此,随着测量次数的增加,偶然误差的算术平均值逐渐接近于零.所以,多次测量结果的算术平均值将更接近于真值.

偶然误差较小,我们在实践中一般不考虑,如果加以考虑时,可采用重复测量多次取平均值的方法来减少误差对测量结果的影响.

3. 疏失误差

是由于测量人员的偶然疏忽而造成的过大错误.例如测量时,由于粗枝大叶、过度疲劳或操作不正确,从而读错刻度、记错数字或计算误差等.这类误差一般很容易看出,对于显然包含有疏忽、误差的观测结果,应该舍去不计.至于疏失误差,在测量中一定要认真仔细,严格要求,防止犯这样的错误.

4. 基本误差和附加误差

(1) 基本误差

基本误差是指仪器在规定条件下工作时,在它测量范围内可能出现的最大误差.无线电测量仪器按照国家规定,其使用条件(称定标条件)一般包括下列内容:

- ① 环境条件 温度、相对温度、大气压力等.
- ② 电源条件 交流供电电源电压、频率、波形;直流供电电压与纹波.

其他还有预热时间、工作位置,以及有些仪器对工作条件还有特殊的要求,如工作频率、负载、波形等.

对上述这些影响仪器特性的基本条件,规定了一个基准值和允许公差范围.检定仪器的允许误差时,都应该在这些规定条件之下进行.换句话说,仪器所给出的各项允许误差值,一般都是指此规定条件下的最大误差值,叫做基本误差.

(2) 附加误差

当仪器工作在定标条件的一项或几项变化了的情况下(但仪器仍在允许工作范

围内),这时仪器所产生的误差称为附加误差.附加误差都要指明是由哪一个因素所产生的,如频率附加误差,温度附加误差等.

无线电测量仪器的附加误差基本上分两类:一类是使用条件变化造成的附加误差,如温度、湿度、电源等;一类是指被测对象参数变化造成的附加误差,如频率、波形失真、负载阻抗等.

附加误差也经常用最大误差的形式表示.

例如,DA22型超高频毫伏表有几条关于附加误差的指示如下:

- ① 频率附加误差 $5\text{kHz}\sim 500\text{MHz}\leq\pm 5\%$; $500\text{MHz}\sim 1000\text{MHz}\leq\pm 30\%$.
- ② 温度附加误差 当环境温度超出正常条件时,增加附加误差为每 10°C 增加 $\pm 2\%$ (1mV 档增加 5%).
- ③ 使用附件 $100:1$ 分压器时,本仪器总误差 $\leq\pm 12\%$.
- ④ 电源 $220\text{V}\pm 10\%$ 时,附加误差 $\pm 1\%$ (1mV 档 $\pm 2\%$).

1.1.3 实验数据的处理

在大多数工程测量中,通常总是根据实际需要,对测量结果的误差预先规定一个限度,例如 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1\%$ 等.只要不超过这个限度就可以满足,并不要求确定实有的误差大小,没有必要不切实际地对测量准确度提出苛刻的要求.因此在这种测量中,只须注意选用准确度(或允许误差)能满足所要求的测量准确度的仪器来测量就行了,而且测量通常只进行一次.在这样的情况下,只要根据测量仪器的允许误差,估计出测量结果中可能包含的最大误差,看它是否超过所要求的限度.对于其中实有的系统误差一般就不必作具体的分析与改正.而偶然误差,由于只进行了一次测量,也就无法加以计算.

下面介绍几种简单情况下,对于一次测量的误差的估计方法.

(1) 当测量是用直读仪器按直接法进行时,最大测量误差可按下述方法估计.

① 若所用仪器的允许误差是绝对误差或相对误差的形式表示,则测量误差的最大可能数值便等于仪器的允许误差的数值.

② 若所对仪器的允许误差是用满度相对误差的形式表示,则测量结果的最大误差须根据仪器允许误差和仪器的读数求出.

设所用仪表的度盘上或其出厂说明书上标明的允许满度相对误差为 γ_m ,则按定义可得

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_{\text{最大}}}{x_m} \times 100\%,$$

式中, $\Delta x_{\text{最大}}$ 为仪表的最大绝对误差; x_m 为仪表量程的满度值.

由上式可得,在仪表盘的任意点上所有可能的最大绝对误差为

$$\Delta x_{\text{最大}} = \frac{\gamma_m x_m}{100\%}.$$

将最大可能绝对误差与被测之量的测得值 x 之比,用百分数表示,便得到最大可能的相对测量误差为

$$\delta_m = \frac{\Delta x_{\text{最大}}}{x} \times 100\% = \frac{\gamma_m x_m}{100\%} \times \frac{100\%}{x} = \gamma_m \frac{x_m}{x}.$$

由上式可以看出,最大相对测量误差不仅决定于仪表的允许误差 γ_m 而且与仪表示数对其满度值之比有关.当仪器的示数较其满度值为甚小时,测量误差将远较仪表的允许误差大.因此,正如前面谈到满度误差时曾经指出过的,在使用指针式仪表时,应正确地选择仪表量程,使被测之量的数值尽量出现在接近满度值的区域内为好.

(2) 当被测之量是用间接测量法测出,它的测量误差可按以下方法估计:

先用上述方法估计出每一直接测量之量的最大可能误差,然后根据被测之量与直接测量诸量之间的函数关系找出被测之量的最大可能误差.设被测之量为 Y ,直接测得各量为 $X_1, X_2 \dots$ 函数关系为 $Y = f(X_1, X_2 \dots)$,则根据下式可求得 Y 的测量误差为

$$\Delta Y = \frac{\delta_f}{\delta_{X_1}} \Delta X_{X_1} + \frac{\delta_f}{\delta_{X_2}} \Delta X_{X_2} + \dots$$

下面以两种比较常见的具体函数为例说明:

① 被测量等于多个量的积或商,即

$$A = B^m C^n D^p,$$

式中, A 为被测之量; B, C, D 为直接可测的量; m, n, p 都可能是正或负的整数或分数.为了求得误差的关系式,将上式两边取对数得

$$\lg A = m \lg B + n \lg C + p \lg D,$$

此式微分得

$$\frac{dA}{A} = m \frac{dB}{B} + n \frac{dC}{C} + p \frac{dD}{D}.$$

将微分 dA, dB, dC, dD 分别用增量 $\Delta A, \Delta B, \Delta C, \Delta D$ (可当作绝对误差) 代替,得到:

$$\frac{\Delta A}{A} = m \frac{\Delta B}{B} + n \frac{\Delta C}{C} + p \frac{\Delta D}{D},$$

或写成:

$$\gamma_A = m \gamma_B + n \gamma_C + p \gamma_D.$$

此式即可表示 A 量的相对误差与 B, C, D 诸量的相对误差之间的关系,当已知 B, C, D 各量的最大可能误差时,就可求出 A 量的最大可能误差. B, C, D 各量的误差可能为正或负,但求 A 量的最大可能误差,应取最不利的情况,即应令 $\gamma_B, \gamma_C, \gamma_D$ 取这样的符号,使 γ_A 的绝对值达到最大,从此式中还可以看出,当要求 A 量达到某种预先规定的准确度时, B, C, D 各量应该达到怎样的准确度才行.

举例:根据关系式 $W = V^2 R^{-1} t$ 来测量消耗于导体内的电能,则直接测量导体两

端的电压 V 和导体电阻 R , 以及时间 t , 设 V, R, t 的测量误差分别为

$$\gamma_V = \pm 1\%, \quad \gamma_R = \pm 0.5\%, \quad \gamma_t = \pm 1.5\%.$$

则 W 的最大可能误差为

$$\begin{aligned} \gamma_W &= 2\gamma_V + (-1)\gamma_R + \gamma_t = 2 \times 1\% + (-1)(-0.5\%) + 1 \times 1.5\% \\ &= \pm 4\%. \end{aligned}$$

② 被测量等于两个量的和或差, 即

$$A = B \pm C \quad (1-1)$$

令: A, B, C 分别取微增量 (即绝对误差) $\Delta A, \Delta B, \Delta C$,

得:
$$A + \Delta A = (B + \Delta B) \pm (C + \Delta C) \quad (1-2)$$

用式(1-2)减式(1-1), 并注意选择符号使得 ΔA 最大, 得

$$\Delta A = \Delta B + \Delta C. \quad (1-3)$$

可见, 无论 A 是等于 B 与 C 的和还是差, A 的最大可能误差都等于 B, C 的最大可能误差的算术和。

欲求相对误差, 则用式(1-3)除以式(1-1), 得

$$\gamma_A = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta B + \Delta C}{B + C} \quad (1-4)$$

由式(1-4)应注意到: 在 $A = B - C$ 的情况下, A 的相对误差等于 B, C 的绝对误差之和除以 $(B - C)$ 。这样, A 的相对误差便可能达到很大的数值, 尤其当 B, C 二量很接近的时候。所以在选择测量方法时, 应尽量避免用两个量的差来求第三个量, 尤其不要采用两个很接近的数量之差来求第三个量。

举例: 设用准确度为 $\pm 1\%$ 的频率计测出回路通频带的下界频率为 $f_1 = 10\text{MHz}$, 上限频率 $f_2 = 11\text{MHz}$, 则该回路通频带的宽度为 B :

$$B = f_2 - f_1 = 11 - 10 = 1\text{MHz}.$$

由于所用频率计的准确度 (即允许相对误差) 为 $\pm 1\%$, 所以 f_1 和 f_2 的最大相对测量误差都应估计为 $\pm 1\%$, 即

$$\gamma_{f_1} = \frac{\Delta f_1}{f_1} \times 100\% = \pm 1\%,$$

$$\gamma_{f_2} = \frac{\Delta f_2}{f_2} \times 100\% = \pm 1\%.$$

$$\Delta_{f_1} = \pm 1\% \times \frac{1}{100} = \pm 0.1\text{MHz},$$

$$\Delta_{f_2} = \pm 1\% \times \frac{f_2}{100} = \pm 0.11\text{MHz}.$$

根据式(1-4)得

$$\gamma_B = \frac{\Delta B}{B} \times 100\% = \frac{\Delta_{f_1} + \Delta_{f_2}}{f_2 - f_1} \times 100\% = \pm 21\%.$$

所得结果相对误差远比 f_1 和 f_2 的相对误差大。

1.1.4 实验曲线的绘制

实验技术中经常要绘制一些实验曲线. 实验数据经数据处理后在平面坐标中是一些离散点(借助曲线板等工具), 将这些离散点光滑地连接起来即可得到实验曲线. 为了保证所绘制的实验曲线的精度, 在曲线变化较大处应多取一些试验点, 在曲线变化较小处可少取一些试验点. 例如, 测试绘制 PN 结正向特性曲线时, 在曲线转折点(死区电压)处应多取些测试点, 如图 1-1 所示.

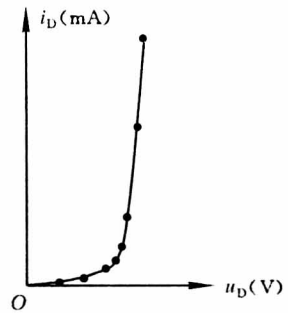


图 1-1 二极管特性曲线绘制

在绘制放大电路频率特性时通常采用对数坐标. 例如, 在绘制放大电路幅频特性时就使用双对数坐标, 以频率的对数为横坐标, 以放大倍数对数(分贝)为纵坐标, 如图 1-2 所示. 图中中频增益在 20~40dB 之间, 即放大倍数在 10~100 倍之间, 下限频率小于 10Hz, 上限频率大于 10kHz. 在测试绘制幅频特性时, 上下限频率处应多取些测试点以便较准确地反映该曲线段的细节, 而平坦中频特性段用少量测试点即可较准确地绘制出中频特性.

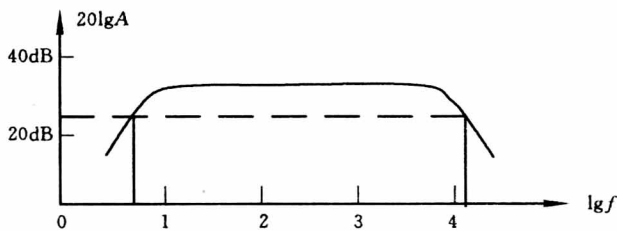


图 1-2 用双对数坐标绘制幅频特性

在绘制实验曲线时可根据具体情况选用不同的坐标系. 如图 1-1 和图 1-2 所示的直角坐标系, 又如天线方向图则采用极坐标系. 实验曲线坐标点的数据可以是一次测量结果, 也可以是多次测量的统计数据, 即按数据处理后的结果标注.