

Technology
实用技术

电子电路实践

任维政 苏福根 王丹志 编著



科学出版社

www.sciencep.com

电子电路实践

任维政 苏福根 王丹志 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是在总结多年教学经验的基础上,根据电子测量和电子技术实验的教学大纲编写而成的。全书共8章,主要内容包括电子测量技术的基础知识、常用电子元器件、电子系统设计基础、电子电路基本型实验、设计型实验以及综合实验。书末还给出了信号发生器、数字毫伏表、直流稳定电源以及示波器的使用方法。本书的编写力求突出重点、循序渐进、结合实际,注重对读者操作能力和实际问题能力的培养。

本书既可作为高等院校通信、电子工程等专业本专科学生的实验教材,也可作为现场工程技术人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

电子电路实践/任维政,苏福根,王丹志编著. —北京:科学出版社,2008
ISBN 978-7-03-022329-6

I. 电… II. ①任…②苏…③王… III. 电子电路-高等学校-教学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 088411 号

责任编辑:刘红梅 杨 凯 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 7 月第一次印刷 印张: 19 1/4

印数: 1—4000 字数: 382 000

定 价: 33.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

前 言

电子电路实验是高等院校通信、电子及相关专业学生的重要实践性环节,在培养学生形成认真严肃的科学作风和提高抽象思维能力、逻辑推理能力、实验研究能力、分析和解决实际问题的能力等方面起着重要作用。本书根据多年的实践教学经验,遵循认知规律,注重激发学生的学习兴趣,既强调知识与技能的融合,又强调思维与操作能力的培养。

本书以理论与实践结合、知识与能力并重的原则,在前四章介绍了电子测量技术和电子系统设计方法等实验基础知识和基本技能的原理和操作方法。通过这些内容的学习,使读者掌握电子电路实验相关的基本原理、方法与规范。在此基础上,在后面章节由浅入深地安排了基本型实验、设计型实验和综合型实验。全书的编写,力求内容充实、层次分明,希望能够对读者在电子电路实验方面的学习有所帮助。

本书的出版得益于北京邮电大学电子信息实验教学中心的实验教师长期实验教学经验和成果的积累,没有他们的宝贵经验和丰富的实验教学资源,也就没有本书的顺利出版。在本书编写过程中得到了北京邮电大学世纪学院各级领导、教务处、实验室教师和相关工程技术人员的大力支持与帮助。特别是陈凌霄老师、崔岩松老师为本书的编写提供了具体帮助和支持。在此,对给予我们帮助的所有老师和领导表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有一些不足和纰漏,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

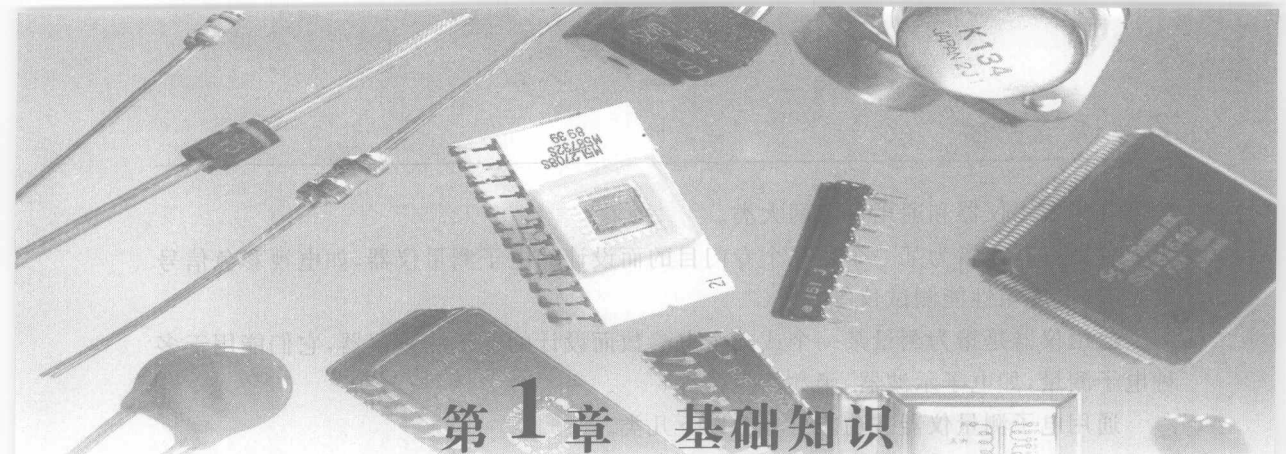
第 1 章 基础知识	1
1.1 电子测量的基础知识	1
1.1.1 电子测量的含义	1
1.1.2 电子测量的仪器	1
1.1.3 电子测量的方法	2
1.1.4 正确选择测量方法和测量仪器	3
1.2 误差的基础知识与数据处理	5
1.2.1 电子测量中产生误差的原因	5
1.2.2 误差的分类	6
1.2.3 误差的表示方法	6
1.2.4 测量数据的处理	7
1.2.5 图解分析数据	8
第 2 章 常用电子元器件	11
2.1 电阻器	11
2.1.1 电阻器的分类及命名方法	11
2.1.2 电阻器的技术指标与标识	13
2.2 电容器	15
2.2.1 电容器的分类	16
2.2.2 电容器的技术指标与标识	16
2.3 电感器	17
2.4 晶体二极管、三极管	19
2.4.1 晶体管的分类及命名方法	19
2.4.2 晶体管的主要参数	20
2.4.3 晶体二极管、三极管的检测	21
第 3 章 电子测量技术	23
3.1 电压的测量	23
3.1.1 直流电压的测量	23

3.1.2	交流电压的测量	26
3.1.3	微弱电压的测量	35
3.1.4	高电压的测量	39
3.1.5	电压稳定性的测量	39
3.2	电流的测量	40
3.2.1	直流电流的测量	40
3.2.2	交流电流的测量	42
3.3	功率的测量	42
3.3.1	用电压表、电流表测功率	42
3.3.2	数字化功率测量	42
3.4	电路元器件的测量	43
3.4.1	电阻的测量	43
3.4.2	电容的测量	45
3.4.3	电感的测量	50
3.4.4	半导体器件特性测量	54
3.4.5	LC谐振回路参数的测量	61
3.4.6	Q值的测量	64
3.5	频率、周期与时间的测量	64
3.5.1	电子计数法测量频率、周期与时间	64
3.5.2	示波法测量频率、周期与时间	67
3.5.3	谐振法测量频率	68
3.6	相位的测量	69
3.6.1	李沙育图法测量相位	70
3.6.2	双迹法测量相移	71
3.7	二端口网络传输特性测量	71
3.7.1	传输比的测量	72
3.7.2	输入阻抗测量	72
3.7.3	输出阻抗测量	73
3.7.4	阻抗匹配	73
3.7.5	幅频特性测量	74
3.7.6	相频特性测量	75
3.8	噪声测量	75
3.8.1	噪声电压的测量	76
3.8.2	噪声系数的测量	77

第 4 章 电子系统设计基础	81
4.1 电子系统概述	81
4.1.1 定 义	81
4.1.2 典型的电子系统	82
4.1.3 构成电子系统的子系统的基本类型	85
4.2 电子系统的设计方法与流程	85
4.2.1 电子系统设计的一般方法	85
4.2.2 电子系统设计的一般步骤	87
4.2.3 设计文档的作用	89
4.2.4 传统手工设计步骤	90
4.2.5 电子系统设计的 EDA 方法	91
4.2.6 电子系统设计的三要素——人才、工具、库	96
4.3 电子系统的安装与调试	97
4.3.1 电子系统的安装	97
4.3.2 电子系统的调试	98
4.4 电子系统的故障分析与排除	101
4.4.1 常见故障原因	101
4.4.2 常用故障诊断方法	101
4.4.3 常见故障及其排除	104
4.5 电子系统的抗干扰技术	109
4.5.1 常见干扰源	109
4.5.2 常见的抗干扰措施	110
第 5 章 电子电路基本型实验	115
5.1 直流非线性电阻特性测试	115
5.2 电位测量、基尔霍夫定律和叠加原理	116
5.3 无源二端口网络测试、网络等效	122
5.4 有源二端口网络等效参数的测试	127
5.5 常用电子仪器使用练习	130
5.6 正弦交流电路中的 R 、 L 、 C 元件	133
5.7 微分电路与积分电路研究	137
5.8 RC 选频网络特性测试	143
5.9 谐振电路	146
5.10 二极管电路	149
第 6 章 电子电路设计型实验	155
6.1 晶体管共射极单管放大器	155

6.2	差动放大器	161
6.3	集成运算放大器的基本应用	164
6.4	负反馈放大器	169
6.5	射极跟随器的特性及测试方法	172
6.6	OTL 低频功率放大器	175
6.7	RC 正弦波振荡器的设计与调试	179
6.8	电压比较器的设计与调试	181
6.9	有源滤波器	184
6.10	占空比可调的脉冲和锯齿波发生器	188
第 7 章	电工基础实验	191
7.1	精密全波整流电路	191
7.2	电压-电流及电压-频率转换电路	193
7.3	温度检测及控制电路	196
7.4	用运算放大器组成万用电表的设计与调试	201
第 8 章	电子电路综合实验	205
8.1	函数信号发生器的设计与调试	205
8.2	示波器功能扩展电路的设计与实现	210
8.3	晶体管放大倍数 β 检测电路的设计与实现	214
8.4	指数运算电路的设计与实现	218
8.5	自动增益控制电路的设计与实现	223
8.6	阶梯波发生器的设计与实现	227
8.7	扩音机电路的设计与实现	229
8.8	红外通信收发系统的设计与实现	234
8.9	热电阻温度测量系统的设计与实现	238
8.10	音调控制电路设计与测试	248
附录 A	TFG2000 系列信号发生器使用指南	259
A.1	前面板	259
A.2	后面板	260
A.3	用户界面	261
附录 B	SM1020 数字毫伏表使用指南	265
B.1	前面板	265
B.2	后面板	267
B.3	开 机	267
B.4	RS232 接口	268

附录 C	SS 系列可跟踪直流稳定电源使用指南	271
C.1	前面板	271
C.2	操作说明	273
C.3	调 整	275
C.4	通用指标	277
附录 D	GOS-6051/50/31/30 示波器使用指南	279
D.1	产品介绍	279
D.2	使用前的注意事项	279
D.3	面板介绍	280
D.4	操作方法	287
参考文献		295



第1章 基础知识

1.1 电子测量的基础知识

1.1.1 电子测量的含义

测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。在这个过程中常借助专门的设备,把被测对象直接或间接地与同类已知单位进行比较,取得用数值和单位共同表示的测量结果。测量结果必须由数值和单位两部分组成,如 815.6Ω , $7.2V$ 等。电子测量是测量学的一个重要分支。从广义上,凡是利用电子技术进行的测量都可以说是电子测量;从狭义上来说,电子测量是指在电子学中测量有关电的量值。模拟电路的测量,它包括的内容主要是:

- ① 电能量的测量,即测量电流、电压、电功率、电场强度等。
- ② 元件和电路参数的测量,即对元器件的测量,如电阻、电感、电容、电子管、晶体管、场效应管、集成电路等;对电路性能的测量,如频率响应、通频带、阻抗、品质因数、相移量、延时、增益和衰减等。
- ③ 电信号的特性及所受干扰的测量,包括信号的频率、相位、失真度、脉冲参数、调幅度、频谱及噪声、干扰等的测量。

与其他测量相比,电子测量具有以下几个明显特点:

- ① 测量频率范围宽。
- ② 测量精确度高。
- ③ 测量的量程很广。
- ④ 测量速度快,灵活性高。
- ⑤ 易于实现遥测和长期不间断的测量。
- ⑥ 易于实现测量过程的自动化和测量仪器的微机化。

1.1.2 电子测量的仪器

用于检测或测量一个量或为测量目的提供给一个量的器具称为测量仪器。利用电子技术测量电或非电量的测量仪器称为电子测量仪器。电子测量仪器种类繁多,一

般可分为专用仪器和通用仪器两大类。

专用仪器是指为某一个或几个专门目的而设计的电子测量仪器,如电视彩色信号发生器、电冰箱性能测试仪等。

通用仪器是指为测量某一个或几个电参数而设计的电子测量仪器,它们能用于多种电子测量,如电子示波器、函数发生器等。

通用电子测量仪器按功能可分为以下几类。

(1) 信号发生器 用于产生各种测试信号,如音频、高频、脉冲、函数、扫频等信号发生器。有的信号发生器还具有调制的功能,可以产生调幅、调频、调相及脉宽调制等信号。

(2) 电压表及万用表 用于测量电压、电阻和电流,如模拟电压表、数字电压表、各种万用表、毫伏表等。

(3) 信号分析仪器 用于观测、分析、记录各种信号,如示波器、波形分析仪、逻辑分析仪等。

(4) 频率、时间和相位测量仪器 如频率计、相位计、频谱分析仪等。

(5) 电路特性测试仪 如扫频仪、阻抗测量仪、网络分析仪、失真度测试仪等。

(6) 元器件测试仪 如RLC测试仪、晶体管测试仪、Q表、晶体管图示仪、集成电路测试仪等。

(7) 其他仪器 用于和上述仪器配合使用的辅助仪器,如各种放大器、衰减器、滤波器。

按显示特性可分为以下三类。

(1) 模拟式 将被测试的电参数通过一定措施转换为机械位移,通过指针、标尺刻度指示出测量数值。理论上模拟式指示是连续的,但由于标尺刻度有限,实际分辨率不高。如各种指针式电压表、电流表、频率计等。

(2) 数字式 将被测试的连续变化的模拟量通过A/D变换,转换成离散的数字量,通过数显装置直接显示测量结果。数字显示具有读数方便、分辨率高、精确度高的特点,已成为现代测试仪器的主流。如各种数字电压表、频率计等。

(3) 屏幕显示 通过示波管、显示器等将信号波形或电参数的变化显示出来,如各种示波器、图示仪、扫频仪等。

电子测量仪器的种类繁多,用途也各不相同,在测量中应合理选择使用。

1.1.3 电子测量的方法

为实现测量目的,正确选择测量方法是极其重要的,它直接关系到测量工作能否正常进行和测量结果的有效性。测量方法的分类方法大致有以下几种。

(1) 按测量性质分类

① 时域测量。测量与时间有函数关系的量,它们有瞬态量和稳态量,前者用示波器显示其变化规律,后者用指示仪表测量。

② 频域测量。测量与频率有函数关系的量,如测量线性系统的频率特性和信号的频谱分析。

③ 数字域测量。对数字逻辑量进行测量,利用逻辑分析仪对数字量进行的测量。

④ 随机测量。主要是指对各种噪声、干扰信号等随机量的测量以及利用噪声源等进行的动态测量。

(2) 按测量手段分类

① 直接测量。用预先按已知标准量定度好的测量仪器,对某一未知量直接进行测量,从而得到被测量值的测量方法。

测量时,考虑电表输入阻抗、量程、频率范围,尽量使被测电压的指示值在仪表的满刻度量程的 $2/3$ 以上。这样可以减少测量误差。

② 间接测量。对一个与被测量有确切函数关系的物理量进行直接测量,然后通过代表该函数关系的公式、曲线或表格,求出被测量值的方法。

③ 组合测量。在某些测量中,被测量与多个未知量有关,测量一次无法得出完整的结果,则可改变测量条件进行多次测量,然后按照被测量与未知量之间的函数关系,组成联立方程,最后求解,得出各未知量。

(3) 按测量方式分 有替代法、指零法、差值法等。

(4) 按与被测量的距离分 有原位测量和远距离测量。

测量方法是多种多样的,测量者应根据测量任务的要求,进行认真分析确定切实可行的测量方法,然后选择合适的测量仪器组成测量系统,进行实际测量。

1.1.4 正确选择测量方法和测量仪器

进行测量之前,应根据被测量的特点、所需的测量准确度、环境条件以及具有的测量设备等进行综合考虑,确定采用哪种测量方法及选择哪些测量设备。只有这样才能保证不损坏被测对象和所用仪器,减小测量误差。

如果测量方法或测量仪器选择不当,可能引起各种各样问题。

(1) 测量数据不准确,误差大,测得结果不可信 如图 1.1 所示,用内阻为 $R_V = 100\text{k}\Omega$ 的模拟电压表,采用直接测量法测量有源二端口网络的等效电动势,测量结果为 4V ,而该等效电动势的实际值为 $E_0 = 6\text{V}$,测量结果的误差很大,相对误差达 33% 。引起这种情况的原因是所用电压表的内阻值与被测网络内阻值相比不够大,测量时被测网络内阻分压明显,使测量结果误差很大。

此时应改用内阻高的电子电压表,如果只有内阻不高的普通电压表,就应采用零示法或其他方法进行测量,而不能用直接测量法。

又如,用直流电压灵敏度为 $10\text{k}\Omega/\text{V}$ 的万用表 2.5V 挡去测量如图 1.2 所示放大器中晶体管发射结电压 U_{BE} ,用直接测量法测得 U_{BE} 为 -0.32V ,而用间接即分别测得 U_B 、 U_E 的值,然后用 $U_{BE} = U_B - U_E$ 计算 U_{BE} 得 0.04V 。

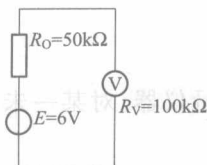


图1.1 直接测量法测量二端口网络等效电动势

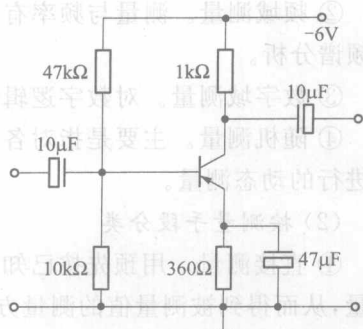


图1.2 单级放大器电路

根据电路特点， U_{BE} 为 $-0.32V$ ，则放大器工作在放大状态，而 U_{BE} 为 $0.04V$ ，放大器必然处于截止状态。可见，不同的测量方法得到了相反的结论，原因是万用表 $2.5V$ 挡的内阻为 $25k\Omega$ ，采用间接测量测 U_B 时，万用表并联在基极与地之间，减小了电路的下偏置电阻，测出的 U_B 值比实际值小得多。而测 U_E 时由于发射极输出阻抗低，万用表内阻的影响小而接近实际值。因此用 $U_{BE} = U_B - U_E$ 计算 U_{BE} 时，得到的 U_{BE} 比实际值小得多。可见，此时不应用间接测量方法，而是用直接测量法直接测基极与发射极之间的电压 U_{BE} 。

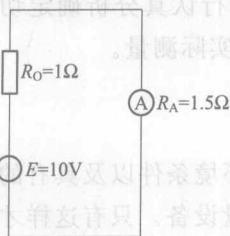


图1.3 测量有源二端口网络的短路电流

(2) 损坏测量仪器 若被测量的大小超出测量仪器的量程，就容易损坏测量仪器。例如，测量有源二端口网络的等效电阻可以用开路电压短路电流法。但如果有源二端口网络的内阻很小就不宜采用此方法。例如，用内阻 $R_A = 1.5\Omega$ 的电流表测图1.3所示有源二端口网络的短路电流，理论上应有 $I = 4A$ 的电流流过电流表，但一般电流表的量程都是毫安级的， $4A$ 的电流大大超过其量程，很容易使电流表损坏。

(3) 损坏被测对象 在测量电路参数时，若不考虑测量仪器接入电路后的影响，就可能因过大的电流或电压，损坏被测对象。例如，微安表表头所允许流过的电流很小，一般都在微安级，如果用万用表的欧姆挡直接测量微安表的内阻，则流过被测表头的电流就可能超过其所能承受的最大电流，从而损坏被测表头。

因而，合理选择测量方法和测量仪器是电子测量的基本问题，是能够顺利进行测量的关键。

1. 选择电子测量仪器的一般原则

① 测量仪器的工作误差应远小于被测参数要求的误差。一般要求仪器误差小于被测参数要求的 $1/10$ 。

② 仪器的测量范围和灵敏度应覆盖被测量的数值范围。例如某待测信号源频率

为 $10\text{Hz}\sim 1\text{MHz}$, 选用 10MHz 以上的普通示波器可满足要求。

③ 仪器输入输出阻抗要符合被测电路的要求。例如测量一个阻抗为 $10\text{k}\Omega$ 的电路电压, 如果用普通指针式万用表(阻抗为 $20\text{k}\Omega/\text{V}$ 以下)测量误差就很大。

④ 仪器输出功率应大于被测电路的最大功率。一般应大一倍以上。

以上几条是基本原则, 实际应用可根据现有资源和产品要求灵活应用。

2. 电子测量仪器使用的注意事项

① 正确选择仪器功能。例如用示波器观测脉冲波形时, 示波器探头一般带有 $1:1$ 和 $10:1$ 两种衰减挡位的选择。

② 合理接线。对测量仪器的接线, 一个最基本而又重要的要求是: 顺着信号传输方向, 力求最短。

③ 保证精度。保证测量精度最简单有效的方法是对有自校装置的仪器, 每次使用开始时都进行一次自校。对没有自校装置的仪器, 可以利用精度足够高的标准仪器, 校准精度较低的仪器。

最根本的方法还是要按产品要求定期到国家标准计量部门进行校准。

④ 谨防干扰。检测仪器使用不当会引入干扰, 轻则使测试结果不理想, 重则使测试结果与实际相比面目全非或无法进行测量。因此在进行电子测量时, 应采取防止干扰的措施, 最基本的如可靠接地、信号输入输出分离、电源(尤其是 220V 交流电源)远离信号线等。

1.2 误差的基础知识与数据处理

在电子测量的过程中, 由于测量方法、测量仪器以及测量人等各方面的因素, 使得测量结果与客观实际值之间存在差异, 这种差异称为测量误差。测量误差是不可避免的, 但是可以通过合理选择测量仪表和测量方法, 尽量减小误差, 获得符合要求的测量结果。为此, 必须了解有关测量误差和数据处理的相关知识。

1.2.1 电子测量中产生误差的原因

分析电子测量中的误差产生的原因, 有助于测量人员采取适当措施, 减小测量误差。影响误差的因素可以从以下几方面考虑:

① 仪表的因素。仪器仪表本身及附件电气和机械性能的不完善, 例如仪表选择不当、仪表安装摆放不当、仪表零位偏移、刻度的不准确等原因都会引起测量误差。

② 环境的因素。外界环境如温度、湿度、光照、电磁场、机械振动、放射性等因素的影响, 会给电子测量带来误差。

③ 测量方法的因素。由于测量方法选择不当或依据的理论不严格, 计算过程使用近似公式、近似值都会引起测量误差。测量过程中不按照技术规范操作也会使测量误差增大。

④ 人为因素。测量过程中测量者本身的原因, 如分辨能力、工作习惯、疲劳程度

以及责任心等也是引起误差的重要因素。

1.2.2 误差的分类

根据误差的性质和来源,可以将测量中的误差分为以下几种:

(1) 系统误差 由于测量仪器或工具本身的局限、测量原理或测量方法的缺陷、实验操作及实验人员的心理、生理条件的制约带来的测量误差,称为系统误差。

系统误差的特点是在相同测量条件下、重复测量,所得测量结果总是偏大或总是偏小,且误差数值一定或按一定规律变化。

减小系统误差通常可以通过改变测量工具或测量方法,也可以对测量结果考虑修正值。

(2) 随机(偶然)误差 由于偶然的或不确定的因素所造成的每一次测量值的无规则变化(涨落),叫做偶然误差,或随机误差。产生偶然误差的原因很多,例如观测时机不对,读数不准确,周围环境的偶然变化或电源电压的波动等因素的影响等,使观察值不按方向性和系统性而随机地变化。随机误差服从正态分布,可以用多次测量结果取算术平均值的方法减小随机误差。

(3) 粗大(过失)误差 指在一定的测量条件下,测量值明显偏离真实值形成的误差。粗大误差产生的原因可能是读错刻度、记错数字、计算错误以及方法错误等,可以通过提高测量者的测量技术和责任心加以避免。

1.2.3 误差的表示方法

在介绍误差的表示方法之前,为表述的方便,首先了解两个术语。

真值:指被测量的客观实际值。在不同的时间空间等客观环境下,真值也往往是不同的,但在确定的时空条件下,真值是客观存在的。

约定真值:计量学上的真值是不能得到的,但可以用高级或数级的标准仪器或计量器具所测得的数值,或者理论值来代替真值,称为约定真值,简称真值。

常用的误差表示方法如下。

(1) 绝对误差 在测量过程中得到的被测参数的测量值 X 与其真值 A_0 之间的差称为绝对误差,用 ΔX 表示。

绝对误差 $\Delta X = X - A_0$ 。

一般用约定真值 A 代表真值,这时绝对误差为 $\Delta X = X - A$ 。

(2) 相对误差 相对误差是绝对误差与真值的比值,取百分数形式,用 γ 表示:

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

用绝对误差无法比较不同测量结果的可靠程度,但用相对误差可以评价这种可靠程度,例如用欧姆表测量两个阻值分别是 $10\text{k}\Omega$ 和 100Ω 的电阻,两次测量的绝对误差

都是 2Ω , 从绝对误差来看, 对两次测量的评价是相同的, 但是前者的相对误差为 0.2% , 后者则为 2% , 后者的相对误差是前者的 100 倍。

(3) 容许误差(最大误差) 一般测量仪表准确度常用容许误差表示。它是根据技术条件规定某一类仪器的误差不应超过的最大范围。通常仪器(包括量具)技术说明书所标明的误差, 都是指容许误差。在指针式仪表中, 容许误差就是满刻度相对误差, 我国电工仪表的准确度用等级表示, 分别为 0.1 、 0.2 、 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.5 和 5 共七级。一只满度为 10V 、准确度为 1.5 级的电压表, 测量时的最大绝对误差为

$$10\text{V} \times (\pm 1.5\%) = \pm 0.15\text{V}$$

若表头示值为 6V , 则被测电压的真值在 $6\text{V} \pm 0.15\text{V} = 5.85 \sim 6.15\text{V}$ 范围内; 若表头示值为 2V , 则被测电压的真值在 $2\text{V} \pm 0.15\text{V} = 1.85 \sim 2.15\text{V}$ 范围内。

在元器件参数里也常用容许误差表示元器件标称值与实际值间的误差, 例如电阻标称值为 $10\text{k}\Omega$ 容许误差为 5% 的电阻器, 它的最大绝对误差为 $10\text{k}\Omega \times (\pm 5\%) = \pm 0.5\text{k}\Omega$, 它的实际阻值应在 $10\text{k}\Omega \pm 0.5\text{k}\Omega = 9.5 \sim 10.5\text{k}\Omega$ 范围内。

1.2.4 测量数据的处理

1. 有效数字的概念

在对测量数据进行记录以及利用测量数据进行计算的过程中, 涉及如何用合理的近似数恰当表达测量结果的问题, 即有效数字的问题。

有效数字是从数据的左边第一个不为 0 的数字算起, 直到右边最后一位数字为止的所有各位数字, 这些数字的个数就是有效数字的位数。例如 0.100V 、 $330\text{k}\Omega$ 、 1.05mA 都是三位有效数字。

2. 有效数字与测量误差的关系

测量过程中, 数据的有效数字位数的保留方法有:

① 和误差保持一致, 误差不超过有效数字末位单位数字的一半。

例如一只满度为 10V 、准确度为 0.5 级的电压表, 测量时的最大绝对误差为

$$10\text{V} \times (\pm 0.5\%) = \pm 0.05\text{V}$$

如果指示值为 5.33V , 则实际值范围为 $5.28 \sim 5.38\text{V}$, 根据误差不超过有效数字末位单位数字的一半的原则, 可以记录为 5.3V 。但人们习惯上使数据的末位与绝对误差对齐, 因此一般还是记录为 5.33V 。

② 直接测量值的有效数字取决于读数时能读到哪一位。

如量程为 50V 的电压表, 它的最小刻度是 1V , 因读数只能读到小数点后第一位, 如 30.3V 时, 有效数字是三位。若测量时指针正好位于 12V 刻度上, 则数据应记为 12.0V , 仍然是三位有效数字(不能记为 12V)。所记录的有效数字中, 必须有一位而且只能是最后一位是在一个最小刻度范围内估计读出的, 而其余的几位数是从刻度上准确读出的。

由此可知, 在记录直接测量值时, 所记录的数字应该是有效数字, 其中应保留且只

能保留一位是估计读出的数字。

3. 有关有效数字的注意事项

单位变换时数据的有效位数不能改变。例如被测电压记为 1000mV 时,是四位有效数字,表示精确到 mV 级,进行单位变换时不能写成 1V,因为 1V 的写法只有一位有效数字,并且只能表示精确到 V 级。所以,1000mV 应该写为 1.000V,不改变有效数字位数,也不改变精确度。

用“10”的方幂来表示数据时,符号“ $\times$ ”前面的数字都是有效数字。例如 $3.50 \times 10^2 \text{ V}$ 、 $0.521 \times 10^4 \text{ mW}$ 都是三位有效数字。

4. 数据的舍入规则

当只需要 N 位有效数字时,对第 $N+1$ 位及其后面的各位数字就要根据舍入规则进行处理,而通常所说的“四舍五入”规则有一定的不合理性,因为“5”是 1~9 的中间数字,只入不舍显然不合理,应该有舍有入。现在普遍采用的舍入规则是“四舍六入”,具体规则是:

① 第 $N+1$ 位为小于 5 的数时,舍掉第 $N+1$ 位及其后面的所有数字;若第 $N+1$ 位为大于 5 的数时,舍掉第 $N+1$ 位及其后面的所有数字的同时第 N 位加 1。

② 当第 $N+1$ 位恰为“5”时,若“5”之后有非 0 数字,则在舍 5 的同时第 N 位加 1;若“5”之后无数字或为 0 时,则由“5”之前的数的奇偶性来决定舍入,如果“5”之前为奇数则舍“5”且第 N 位加 1,如果“5”之前为偶数则舍“5”,第 N 位不变。

5. 有效数字的运算

当需要对多个测量结果进行运算时,有效数字的保留原则上取决于误差最大即小数点后有效数字位数最少的那一项。

(1) 加减运算 先将各数据小数点后的位数处理成与小数点后有效数字位数最少的数据相同后再进行计算。要尽量避免两个相近数的相减,以免对计算结果产生很大的影响,非减不可时,应多取几位有效数字。

(2) 乘除运算 先将各数据处理成与有效数字位数最少的数据相同或多一位后再进行计算,运算结果的有效数字位数也应处理成与有效数字位数最少的数据相同。注意:在乘除运算中,有效数字的取舍与小数点无关。

(3) 乘方与开方运算 运算结果应比原数据多保留一位有效数字。

(4) 对数运算 取对数前后的有效数字位数应相等。

1.2.5 图解分析数据

在处理测量结果时,有时需要将测量随某个或几个因素的变化规律用曲线表示出来。用曲线表示形象直观,便于分析。要作出一条符合客观规律、反映真实情况的曲线应注意以下几点:

① 合理选用坐标系。最常用的是直角坐标系,也有用极坐标或其他坐标系的。