

Circuit & Electronics Technology Experimental Course

电路与电子技术

郎 朗 主编

实验教程

● 合肥工业大学出版社

电路与电子技术 实验教程

主 编 郎 朗

编 委 陶秀风 崔 祎 陈 欣

王正刚 邢景虎

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术实验教程/郎朗主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2012.2

ISBN 978-7-5650-0643-2

I. ①电… II. ①郎… III. ①电路—实验—高等学校—教材②电子技术—实验—高等学校—教材 IV. ①TM13-33②TN-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 274424 号

电路与电子技术实验教程

主编 郎 朗

责任编辑 陆尚军

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2012年2月第1版
地 址	合肥市屯溪路193号	印 次	2012年2月第1次印刷
邮 编	230009	开 本	787毫米×1092毫米 1/16
电 话	总编室:0551-2903038	印 张	11.75
	发行部:0551-2903198	字 数	287千字
网 址	www.hfutpress.com.cn	印 刷	合肥星光印务有限责任公司
E-mail	hfutpress@163.com	发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-0643-2

定价:20.00元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

前 言

《电路与电子技术实验教程》是高等院校工科电类专业实践性教学环节很强的一门技术基础课程。通过对该课程的学习,使学生加深理解电路与电子技术理论知识,并将理论和实际工程有机结合起来,使学生获得电路与电子技术的基本知识、基本技能和创新意识的训练,从而为后续课程的学习以及从事有关工程技术和科学研究工作打下坚实的基础。通过本实验课程的学习,不仅可以提高学生科学实验的动手能力,还可以培养学生勤奋、进取的精神和一丝不苟、严谨求实的科学研究作风。

本书根据教学大纲的要求,在以往电路与电子技术实验讲义的基础上,总结了近几年实践教学的经验并结合当前教学改革的需要而编写的。内容较为丰富充实、系统全面,实验编排科学合理,学生有较大的选择空间。每部分实验中既有基础性的,又有综合和设计性的,力求调动学生的积极性,提高对实验课的兴趣,启发学生独立思考,自己动手实验。

本书共分4章。第1章介绍了实验测量方法、数据的误差分析和处理、电路的接地分析和调试技术、实验故障分析与处理及实验要求等,注重对学生电路与电子技术实验基础知识的培养。第2~4章包括电路原理、模拟电子、数字电子三部分,共42个实验,基本覆盖了课程的内容,由浅到深、由易到难。实验既紧密联系基本理论,又开拓了基本理论的应用,众多的实验内容为因材施教提供可选的方式。附录A是常用电子仪器仪表的简介,这些测量仪表基本上可以测量课程中所涉及的电路参数,也可以满足学生自主扩展各种实验的需要。对第1章和附录A的内容要求学生结合实验自己阅读掌握,为实验做好基础知识的铺垫。对附录B~附录F的常用电子元器件的型号、特性参数及引脚排列等内容也要求学生有所了解。

本书由安徽工程大学电气工程学院部分教师编写,具体分工为:第1章由郎朗编写,第2章由陶秀凤、邢景虎编写,第3章由陈欣、王正刚编写,第4章由崔伟编写。陈永煌正高级工程师审阅了全书并提出了宝贵的修改意见。本书在编写过程中得到了安徽工程大学电气工程学院其他一些教师和实验人员的大力支持与关心,在此向他们表示衷心的感谢。本书的编写除了参考多年来摸索的教学经验外,还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。

本书得到安徽省2009年质量工程项目“电力拖动控制系统”精品课程的资助。

本书可作为高等院校工科电类专业及相近专业电路原理、模拟电子、数字电子课程的配套实验教材,也可供工程技术人员参考。

由于作者水平有限和时间仓促,书中难免会有一些错误及不妥之处,敬请使用本书的各位读者批评指正。

编 者

2012年2月

目 录

第 1 章 电路与电子技术实验基础知识	(1)
1.1 电路与电子技术实验须知	(1)
1.2 电路与电子实验测量方法	(3)
1.3 测量误差及误差分析	(4)
1.4 测量数据的处理	(7)
1.5 电路中接地的分析	(12)
1.6 电路的调试技术	(15)
1.7 实验故障分析与处理	(16)
第 2 章 电路分析实验	(19)
2.1 电位、电压的测定及电路电位图的绘制	(19)
2.2 基尔霍夫定律	(21)
2.3 叠加原理的验证	(23)
2.4 戴维南定理和诺顿定理的验证	(26)
2.5 受控源 VCVS、VCCS、CCVS、CCCS 的实验研究	(30)
2.6 典型电信号的观察与测量	(34)
2.7 RC 一阶电路的响应测试	(37)
2.8 二阶动态电路响应的研究	(40)
2.9 R 、 L 、 C 元件阻抗特性的测定	(43)
2.10 交流电路等效参数的测量	(45)
2.11 正弦稳态交流电路相量的研究	(48)
2.12 RC 选频网络特性测试	(51)
2.13 RLC 串联谐振电路的研究	(53)
2.14 双口网络测试	(56)
2.15 三相电路电压、电流、功率的测量	(60)
第 3 章 模拟电子技术实验	(66)
3.1 晶体管放大器静态调测与增益测试	(66)
3.2 单管放大电路的设计	(68)
3.3 差动放大器的研究与测试	(69)
3.4 两级阻容耦合放大电路	(71)

3.5	负反馈放大器的研究	(73)
3.6	集成运算放大器的应用:基本运算电路	(75)
3.7	RC 正弦波振荡电路	(77)
3.8	电压比较器的研究	(79)
3.9	波形发生电路	(81)
3.10	整流滤波与并联稳压电路	(83)
3.11	直流稳压电源—集成稳压器	(85)
3.12	集成运算放大器的基本应用设计	(88)
3.13	有源滤波器	(91)
3.14	OTL 功率放大电路	(93)
第 4 章	数字电子技术实验	(96)
4.1	门电路功能测试与应用	(96)
4.2	MAX+plus II 软件入门	(98)
4.3	集成逻辑门电路的参数测试	(99)
4.4	中规模组合逻辑电路的设计(一)	(101)
4.5	中规模组合逻辑电路的设计(二)	(106)
4.6	触发器功能测试与应用	(108)
4.7	移位寄存器及其应用	(111)
4.8	中规模计数器及其应用	(113)
4.9	时序逻辑电路的分析与设计	(115)
4.10	脉冲与整形电路	(117)
4.11	555 定时器的应用	(119)
4.12	高楼电梯自动控制电路的设计	(121)
4.13	交通灯控制器的设计	(122)
附录		(123)
附录 A	常用电子仪器、仪表简介	(123)
附录 B	常用电阻器、电容器介绍	(154)
附录 C	常用半导体二极管、三极管介绍	(158)
附录 D	常用集成运算放大器参数及引脚排列	(161)
附录 E	MAX+plusII 软件介绍	(163)
附录 F	集成芯片外引脚图	(176)
参考文献		(181)

第1章 电路与电子技术实验基础知识

1.1 电路与电子技术实验须知

1.1.1 电路与电子技术实验课程的目的

实验是人类认识客观事物的重要手段。很多科学成果都是通过大量探索性实验而取得的。在理工科大学里,实验课程与课堂理论讲授一样,是教学中不可缺少的重要环节。电路与电子技术实验是一门重要的实践性技术基础课程。开设本课程的目的在于帮助学生将所学的理论与实际联系起来,在老师的指导下完成教学大纲所规定的实验任务。通过学习电路与电子技术实验课程,使学生熟悉仪器、仪表的性能和使用方法,并能正确选用仪器、仪表;学习并掌握电路与电子技术实验的测量方法和专业实验技能,包括合理制订实验方案,实验现象的观察和判断;掌握正确读取和处理实验数据、分析实验结果、撰写实验报告的方法,从而启发学生分析、解决问题的能力,培养学生实事求是的科学态度以及勇于探索、创新的开拓精神。

1.1.2 电路与电子技术实验的要求

为了更好地培养学生独立分析、解决问题以及开拓创新的能力,我们对电路与电子技术实验的各阶段提出了具体的要求。

1. 实验前的准备

为了实验能够顺利地进行并达到实验目的,要求实验者应对实验内容进行预习。认真阅读实验指导书,明确实验目的,熟悉实验原理与实验内容,列出实验设备和测量仪器,拟订实验步骤。明确要测量哪些数据?如何测得?制订实验结果记录表,分析实验中的注意事项并回答预习思考题。对设计性实验,要求预习时必须设计实验电路、拟订测试方案和选择测量仪器。在完成上述工作的基础上,做出预习报告。

2. 实验操作

(1)参加实验者要自觉遵守实验室规章制度。

(2)实验一人一组,使每位同学均能受到实验技能的训练。

(3)根据实验内容正确选择所需的实验仪器、仪表并设计合理的布局方式,以方便接线、查线、现象的观察和数据的测量。按拟订的实验方案连接实验电路和测试线路,连接仪表时要特别注意量程和极性。

仔细检查,先查线路的结构,再查元件的参数、仪表的量程等,确认无误后方可通电。

(4)通电后首先观察电路工作是否正常,如有发热、冒烟、异味、火花和声响等异常现象

象,应立即断开电源,维持现状并报告老师,与老师一起查找原因,排除故障。

(5)认真记录实验数据、波形,观察出现的各种现象,注意观察仪表的指示及有关量的变化情况,与事先的估计比较,若相差得很大,就有可能是电路发生故障,必须先排除。遇到问题首先应独立思考,找出产生故障的原因及排除方法,耐心排除故障。

(6)结束本次实验后,把记录的实验数据交给老师检查,确认无误后方可拆线。

(7)实验完毕应整理好所用的仪器、仪表和元件导线等,若损坏元件、设备应立即向老师说明情况。养成严肃认真、有始有终的良好作风。

3. 实验报告的撰写与总结

实验报告是对实验工作的总结。撰写实验报告是对电路的设计方法和实验方法加以总结,对实验数据进行处理、对实验中所观察到的现象加以分析的过程。对工科学生而言,撰写实验报告也是一项基本技能训练,通过撰写实验报告,深化基础理论的认识和应用能力,加深对电子测量基本方法和电子仪器使用方法的理解,提高实验数据分析、处理能力,培养严谨的学风和实事求是的科学态度,也是对撰写科技论文能力的一种培养。同时,实验报告也是实验成绩考核的重要依据之一。实验报告要求用简明的语言表达整个实验过程,应文通字顺、字迹工整、图表清晰、结论正确、分析合理。

普通的验证性实验报告应包括以下具体内容:

- (1)实验名称,实验者姓名、专业、班级,实验日期。
- (2)实验目的。
- (3)实验原理(包括实验原理图)。
- (4)实验设备(设备的名称、规格、编号和数量)。
- (5)实验内容与步骤。根据实验记录整理成数据表格或绘制成曲线,观察数据或波形等,以便从数据或曲线中清晰地看出各物理量之间的关系和发展趋势。
- (6)实验结果分析。检查并说明实验结果是否符合相关理论。如不符或有误差,应分析其原因,提出自己的见解,说明心得体会、改进意见及遗留问题。

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个层次的实验,因此对实验报告的撰写也要有特殊的要求和步骤。

- (1)实验名称,实验者姓名、专业、班级,实验日期。
- (2)已知条件。包括主要技术指标、实验用仪器的名称、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,画出总框图,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:
 - ① 设计单元电路;
 - ② 对所设计的单元电路各元件值进行定量计算或估算;
 - ③ 电路的调试。
- (5)电路总调试与测试。当各单元电路调试正确后,按以下步骤进行电路总调试:
 - ① 测量和记录。画出测试原理图,并说明各项需测量参数的测量方法,记录并整理实

验数据,正确选取有效数字的位数。根据实验数据,进行必要的计算,列出表格,在坐标纸上画出光滑的波形或曲线。

② 故障分析及说明。说明在单元电路和电路总调试中出现的主要故障及解决方法,若有波形失真,则要分析失真的原因。

③ 绘制出完整的电路原理图,并标明调试后的各元件参数。

(6) 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。

(7) 记录电路改进意见及本次实验中的体会。

实验电路的设计方案,元器件参数的选择及测试方法都不可能完美。实验结束后,如果感到某些方面还需要作适当的修改,可进一步改善电路性能,或降低成本,或修正实验方案,或增删内容,并写进改进意见中。

1.2 电路与电子实验测量方法

1.2.1 测量的内容

测量是通过一定的方法对客观事物的某些参数进行表征的过程,也就是通过实验的方法把被测量与它的标准量进行比较的过程。电路与电子实验测量包括电量的测量和非电量的测量。

1.2.2 测量的方法

1. 按测量的途径来分

(1) 直接测量,是一种可以直接得到被测值的测量方法。如用万用表测某元件的工作电压等,这是一种最简单的测量方法。

(2) 间接测量,是利用直接测量的值与被测量值之间的某种已知函数关系,得到被测量值的测量方法。例如,测量放大电路的放大倍数 A_u ,一般是分别测量输出电压 U_o 与输入电压 U_i 后计算出 $A_u = U_o / U_i$ 。这种方法常用于被测量值不便直接测量的情况,或者间接测量值比直接测量值更准确的情况。

(3) 组合测量,是兼用直接测量和间接测量的一种测量方法。在某些测量中,被测量值与几个未知值有关系,此时应通过改变测量条件进行多次测量,然后按被测量与未知量之间的函数关系,组成方程组,从而求出各未知量。

2. 按测量的性质来分

(1) 时域测量,主要是测量被测量随时间的变化规律,被测量是时间的函数。如交流电压、电流等。它们的稳态值和有效值多用仪表直接测量,它们的瞬时值可以用示波器来测量,同时可以观察其波形,获得它们随时间的变化规律。

(2) 频域测量,主要是测量被测量的频率特性和相位特性,此时被测量是频率的函数。比较常见的有电路的相频特性和幅频特性。

(3) 数字域测量, 是利用逻辑分析仪对数字量进行测量。它具有多个输入通道, 可以同时观测许多单次并行的数据。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”或“0”显示其逻辑状态。

(4) 随机测量, 主要是对电路中的噪声、干扰信号进行测量。在测量的过程中经常用到各种变换技术, 如变频、分频、检波、A/D 转换、D/A 转换等。

1.2.3 测量方法和测量仪器的选择

对同一元件或电路有多种不同的测量方法。测量方法与测量仪器的选择正确与否, 直接关系到测量的可行性和测量结果的可信度, 也关系到测量的经济性。不当和错误的测量方法, 除了得不到正确的测量结果外, 还会损坏测量仪器和被测设备。即使有了先进的测量仪器, 并不一定能获得准确的测量结果。必须根据测量对象、测量要求和测量条件, 选择正确的测量方法与合适的测量设备, 组成合理的测量系统。只有细心的操作, 才能得到准确的测量结果。

1.3 测量误差及误差分析

在任何测量中, 由于各种主观和客观因素的影响, 使得测量结果不可能完全等于被测量的实际值, 而只是它的近似值, 我们把测量值与被测量的实际值之差叫做测量误差。

1.3.1 测量误差的分类

根据测量误差的性质和特征, 测量误差可分为系统误差、偶然误差和疏忽误差。

1. 系统误差

系统误差是由于仪表的不完善、使用不恰当、测量方法采用了近似公式或外界因素(如温度、电场、磁场)等原因引起的。它遵循一定的规律变化或保持不变。按照误差产生的原因又可分为:

(1) 基本误差。基本误差是仪表在正常使用条件下, 由于结构上和制造中的缺陷而产生的误差, 它为仪表所固有。其主要原因是仪表的活动部分在轴承中的摩擦、游丝的永久变形、零件位置安装不正确、刻度不准确等原因引起的。

(2) 附加误差。它是由于外界因素的变化而产生的。主要原因是仪表没有在正常条件下使用, 例如温度和磁场的变化、放置方法不同等。

(3) 方法误差。因测量方法不完善或使用仪表的人在读数时因个人习惯不同而造成读数不准确, 间接测量时使用近似计算公式等, 都可能造成误差, 所有这些误差都叫做方法误差。

2. 偶然误差

这种误差是由于某些偶然因素所造成的。这些因素产生的原因有的是目前还不知道, 有的是目前还无法掌握的。例如用同一电桥对同一电阻进行多次测量, 其结果可能都不一样, 有的偏大, 有的偏小。看起来好像没有什么规律, 但把多次测量结果综合起来看, 仍是

有规律的。由数学理论可知它符合统计规律。

3. 疏忽误差

疏忽误差是由于测量中的疏忽所引起的。由于疏忽所引起的测量结果一般都严重偏离被测量的实际值。如读数错误、记录错误、计算错误或操作方法错误等所造成的误差。

1.3.2 减小或消除误差的方法

测量的目的就是要尽可能求出被测量的实际值,为达到此目的必须设法减小或消除测量误差。

1. 减小系统误差的方法

(1)对仪表进行校正,在测量中引用更正值,减小基本误差。

(2)按照仪表所规定的条件使用,减小方法误差。

(3)采用替代法测量。例如,在保持仪表读数不变的条件下,用等值的已知量去代替被测量,这样的测量结果就和测量仪表的误差、外界条件的影响无关。具体地说,比如用电桥测量电阻,先用电桥测量被测电阻,调节桥臂电阻使电桥平衡。然后以标准电阻箱代替被测电阻,调节标准电阻箱的电阻值使电桥平衡,这时标准电阻箱上的读数就是被测电阻的阻值。此方法广泛应用于测量元件参数。

2. 减小偶然误差的方法

从统计学规律看,把同一测量重复多次,取其算术平均值作为被测量的值,即可减小偶然误差。测量次数越多,偶然误差越小;测量次数趋于无穷大,则偶然误差趋于零。

3. 消除疏忽误差的方法

由于疏忽误差是明显的错误,比较容易发现,测量后要进行详细的分析。凡是由于疏忽所测量的数据都应抛弃,因为它是不可信的。这种误差是应该避免的。

1.3.3 测量误差的表示方法

1. 绝对误差

测量值 A_x 和被测量的实际值 A_0 之间的差值叫做绝对误差,用 Δ 表示,即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-1)$$

在计算时,可用标准表的指示值作为被测量的实际值。

【例1】用一只标准电压表来鉴定甲、乙两只电压表时,读得标准表的指示值均为70V。甲表读数为71V,乙表读数为69.5V,求它们的绝对误差。

解:甲表的绝对误差 $\Delta_{\text{甲}} = A_x - A_0 = 71 - 70 = +1(\text{V})$

乙表的绝对误差 $\Delta_{\text{乙}} = A_x - A_0 = 69.5 - 70 = -0.5(\text{V})$

可见,绝对误差有正负之分,正的表示测量值比实际值偏大,负的表示测量值比实际值偏小。另外,甲表偏离实际值较大,乙表偏离实际值较小,说明乙表的测量值比甲表准确。

所谓准确度,就是与实际值接近的程度。与实际值越接近,准确度越高。因而,仪表的

准确度越高,测量结果越准确。

2. 相对误差

在测量不同大小的被测量时,不能简单地用绝对误差来判断其准确度,例如,甲表测 100 V 电压时,绝对误差 $\Delta_{\text{甲}} = +1 \text{ V}$;乙表测 10 V 电压时,绝对误差 $\Delta_{\text{乙}} = +0.5 \text{ V}$,从绝对误差来看,甲表绝对误差大于乙表。但从仪表误差对测量结果的相对影响来看,却正好相反,因为甲表的误差只占被测量的 1%,而乙表的误差却占被测量的 5%,即乙表误差对测量结果的相对影响更大,所以在工程上通常采用相对误差来衡量测量结果的准确度。相对误差就是绝对误差与被测量的实际值之比,通常用百分数来表示,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

【例 2】 已知甲表测 100 V 电压时,其绝对误差为 $\Delta_{\text{甲}} = +2 \text{ V}$;乙表测 20 V 电压时,其绝对误差为 $\Delta_{\text{乙}} = -1 \text{ V}$ 。试求它们的相对误差。

解:甲表的相对误差 $\gamma_{\text{甲}} = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% = \frac{+2}{100} \times 100\% = +2\%$

乙表的相对误差 $\gamma_{\text{乙}} = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% = \frac{-1}{20} \times 100\% = -5\%$

可以看出,甲表的准确度高于乙表的准确度。

1.3.4 仪表的准确度等级

仪表的基本误差是它本身所固有的。基本误差越小,测量所引起的这一方面的误差就越小,测量就越准确。

所谓仪表的准确度就是仪表在正常工作条件下,仪表全量程范围内的最大绝对误差 Δ_m 与该量程 A_m 之比的百分数值,即

$$\pm K = \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% \quad (1-3)$$

按国家标准规定,仪表的准确度共分为 7 级,见表 1-3-1 所列。

表 1-3-1 仪表的准确度分级

准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5
基本误差(%)	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5

【例 3】 用 0.5 级、0~10 V 的电压表和 0.2 级、0~100 V 的电压表测量 8 V 电压,问哪一块表测量的准确度高?

解:用 0.5 级、0~10 V 电压表测量,可能出现的最大绝对误差为:

$$\Delta_m = \pm K \times A_m = \pm 0.5\% \times 10 = \pm 0.05 \text{ V}$$

可能出现的最大相对误差:

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_0} \times 100\% = \frac{\pm 0.05}{8} \times 100\% = \pm 0.625\%$$

用 0.2 级、0~100 V 电压表测量,可能出现的最大绝对误差为:

$$\Delta_m = \pm K \times A_m = \pm 0.2\% \times 100 = \pm 0.2 \text{ V}$$

可能出现的最大相对误差:

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_0} \times 100\% = \frac{\pm 0.2}{8} \times 100\% = \pm 2.5\%$$

从计算结果可以看出,用 0.5 级、0~10 V 的电压表测量 8 V 电压的准确度高。

由此看出,测量的准确度既取决于仪表的准确度,又取决于仪表的量程。被测量值越接近满量程,测量准确度就越高。因而在测量时,除正确选择仪表的准确度等级外,还应正确选择仪表的量程。通常被测量值为满量程的 2/3 以上较为合适。

1.4 测量数据的处理

实验中要对所测量的值进行记录、计算、分析和整理,从中得到最后的实验结果,并找出实验的规律,这个过程称为数据处理。

在测量和数字计算中,用几位数字来表示测量或计算结果是很重要的,它涉及有效数字和计算规则的问题。

1.4.1 测量结果的记录与运算

任何测量总存在误差,所以一个完整的测量结果记录应包括测量数据和误差两部分,这样才能从测量结果中得知数据的可靠性。

1. 测量数据的记录

测量数据的记录方法应是:所记录的数据中,除末位数是估计数字外,其他各位数字都应是确定的数。这样一个数既反映了被测量的大小,又与测量误差出现的位数一致。所以作为一个测量数据,即使“0”出现在末尾,也不能不写。如 3.70 为三位有效数字的测量数据,末位的零写上,意味着这个“0”是估计数字,而前面的“7”是确定数字,若将“0”舍去不写,则该数变为 3.7,意味着“7”是估计数字。

2. 测量数据的运算

根据上述道理,对几个数据进行运算时,运算结果只能保留参加运算的所有测试数据中小数点后面位数最少的一位。例如: $3.1 \times 5.72 \times 0.384 = 6.809$

运算结果应记为 6.8。它与参加运算的数 3.1 小数点后面的位数一样多。

3. 测量结果的图解分析

一个测量结果,除了用数值的大小表示外,还经常用各种曲线来表示。所谓图解分析,就是研究如何根据实验结果作出一条尽可能反映真实情况的曲线(包括直线),并对该曲线进行定量分析。如频率变化时,放大器的输出电压随频率变化而变化的情况,可用频率特性曲线表示。图解分析两个(或几个)物理量的关系,比用数字、公式表示更形象、直观。

1.4.2 测量结果误差的估计

在任何测量过程中,误差总是存在的。因此,在测量工作完成以后,不仅要确定测量结果的数值,而且还要确定测量结果的准确程度。在工程测量中,由于疏忽误差是一个错误的测量结果,当然应当舍去,因而在误差估算中不加以考虑。在测量中,我们所取的测量结果一般都是多次测量的算术平均值,偶然误差与系统误差相比较,偶然误差对测量结果的影响很小,故可略去不计,所以在工程测量中只考虑系统误差的影响。下面分别讨论直接测量和间接测量中系统误差的估算方法。

1. 直接测量中系统误差的估算方法

系统误差包含仪表的基本误差、附加误差和方法误差,所以测量中的最大误差等于上述误差之和。

(1)仪表基本误差的估算方法:根据仪表的准确度等级和所选的量程来计算。设在测量中所使用的仪表准确度为 α 级,选用的量程为 A_m ,测量的读数为 A_x ,则测量结果可能出现的最大相对误差为:

$$\gamma_m = \pm \frac{\alpha \cdot A_m}{A_x} \times 100\% \quad (1-4)$$

这里需要说明的是,前面我们说的相对误差是指绝对误差与被测量的实际值之比。这里我们用的是测量的读数 A_x ,而不是被测量的实际值 A_0 。由于被测量的实际值和仪表的指示值相差不大,所以在工程上当不能确定实际值 A_0 时,常用仪表的指示值 A_x 近似地代替 A_0 进行计算。

【例 4】 现用一电流表测量电流,仪表的准确度为 1.5 级,量程为 30 A,其读数为 20 A,试求由于仪表结构不完善所引起的基本误差。

解:利用式(1-4)可求得:

$$\gamma_m = \pm \frac{\alpha \cdot A_m}{A_x} \times 100\% = \pm \frac{1.5\% \times 30}{20} \times 100\% = \pm 2.25\%$$

(2)仪表附加误差的估算方法:由于附加误差起源于工作条件的变化,所以保证仪表在规定的正常条件下使用,附加误差即可消除。如果仪表的使用不符合所规定的正常条件,则所引起的附加误差按表 1-4-1 计算。

表 1-4-1 根据工作条件的变化计算附加误差

工作条件的变化	变化规定	附加误差
工作位置倾斜角	自规定的工作位置任一方向倾斜角(0.5~1.0级)变化 20°	等于基本误差
工作温度	环境温度自额定温度变化,每变化 10°C	
工作频率	自额定频率变化 $\pm 10\%$ (对单相相位表为 $\pm 2\%$,对单相无功功率表为 $\pm 5\%$)	
工作电压	工作电压自额定值偏离 $\pm 10\%$ (对比率表)、 $\pm 15\%$ (对整流式仪表)、 $\pm 20\%$ (对其他仪表)	
辅助电源的电压和功率	电压自额定值偏离 $\pm 10\%$,频率自额定值偏离 $\pm 2\%$	等于基本误差的一半

例如在例4中,若规定的工作温度为 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,而测量时的工作温度为 30°C ,可见超出了所规定的温度范围,但小于 10°C 。由表1-2可知,在测量中所出现的附加误差等于基本误差,即 $\pm 2.25\%$ 。因而在这种情况下测量,总的最大误差为上述两种误差之和,即 $\pm (2.25\% + 2.25\%) = \pm 4.5\%$ 。

(3)方法误差的估算方法:方法误差是由于测量方法不完善或因计算公式近似而引起的。如果需要考虑时,应根据具体情况进行分析计算。

2. 间接测量中系统误差的估算方法

在间接测量中,被测量是通过直接测量值的计算而得到的,因而测量误差与直接测量值的误差有关。

现假设被测量值 y 与直接测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 满足关系式:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-5)$$

则被测量值 y 的测量结果所含绝对误差等于该函数的全微分,即

$$\mathrm{d}y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \mathrm{d}x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \mathrm{d}x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \mathrm{d}x_n \quad (1-6)$$

其相对误差为:

$$\gamma_y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \frac{\mathrm{d}x_1}{y} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \frac{\mathrm{d}x_2}{y} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \frac{\mathrm{d}x_n}{y} \quad (1-7)$$

式中, $\mathrm{d}x_1, \mathrm{d}x_2, \dots, \mathrm{d}x_n$ 分别为各直接测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的测量所含的绝对误差。下面讨论常用的几种典型情况。

(1)被测量为直接测量值之和。

$$\text{设} \quad y = Ax_1 + Bx_2 \quad (1-8)$$

$$\text{则} \quad dy = Adx_1 + Bdx_2 \quad (1-9)$$

$$\text{所以} \quad \gamma_y = A \frac{dx_1}{y} + B \frac{dx_2}{y} = A \frac{x_1}{y} \cdot \frac{dx_1}{x_1} + B \frac{x_2}{y} \cdot \frac{dx_2}{x_2} \quad (1-10)$$

$$\gamma_y = A \frac{x_1}{y} \cdot \gamma_{x_1} + B \frac{x_2}{y} \cdot \gamma_{x_2} \quad (1-11)$$

式中, γ_{x_1} 、 γ_{x_2} 分别为直接测量值 x_1 、 x_2 的相对误差。

在最不利的情况下, 最大误差将发生在各直接测量的误差符号相同时, 所以估算误差时, 对上两式各项均取绝对值, 即

$$|dy| = |Adx_1| + |Bdx_2| \quad (1-12)$$

$$|\gamma_y| = \left| A \frac{x_1}{y} \gamma_{x_1} \right| + \left| B \frac{x_2}{y} \gamma_{x_2} \right| \quad (1-13)$$

(2) 被测量为直接测量值之差。设 $y = Ax_1 - Bx_2$

则绝对误差为:

$$dy = Adx_1 - Bdx_2 \quad (1-14)$$

相对误差为:

$$\gamma_y = A \frac{x_1}{y} \cdot \gamma_{x_1} - B \frac{x_2}{y} \cdot \gamma_{x_2} \quad (1-15)$$

从最严重的情况考虑, 最大误差发生在两直接测量误差符号相反时, 其数值用绝对值表示:

$$|dy| = |Adx_1| + |Bdx_2| \quad (1-16)$$

$$|\gamma_y| = \left| A \frac{x_1}{y} \gamma_{x_1} \right| + \left| B \frac{x_2}{y} \gamma_{x_2} \right| \quad (1-17)$$

(3) 被测量为直接测量值的积或商。设

$$y = x_1^n \times x_2^m \times x_3^p \quad (1-18)$$

n 、 m 、 p 为任意常数。对上式两边取对数,

$$\text{则} \quad \ln y = n \ln x_1 + m \ln x_2 + p \ln x_3 \quad (1-19)$$

再微分得:

$$\frac{dy}{y} = n \frac{dx_1}{x_1} + m \frac{dx_2}{x_2} + p \frac{dx_3}{x_3} \quad (1-20)$$

故相对误差:

$$|\gamma_y| = |n\gamma_{x_1}| + |m\gamma_{x_2}| + |p\gamma_{x_3}| \quad (1-21)$$

这里需要说明, 指数越高, 对误差的影响越大。直接测量时所用仪表的准确度等级应选高一些。

通过上面的分析可以看出,间接测量的准确度较低。所以能够直接测量的就不要采用间接测量。如果条件不允许,非采用间接测量不可时,对所需的直接测量以及它们与被测量之间的关系,还有所用的仪表准确度等级、量程范围等问题,都要认真选择,否则,即使仪表准确度等级很高,也可能出现不可信赖的测量结果。

1.4.3 有效数字

1. 有效数字的概念

在测量中,当读取数据时除末位数字欠准确外(末位数字是估计出来的,因为指针指在两条刻度线之间,读数是不确定的),其余各位数字都是准确可靠的。例如:用一块 50 V 的电压表(每小格为 1 V)测量电压时,指针指在 32 V 和 33 V 之间,可读取 32.4 V,其中数字“32”是准确可靠的,称为可靠数字,而最后一位“4”是估计出来的不可靠数字,称为欠准数字,两者结合起来称为有效数字。对于“32.4”这个数字,有效数字是三位。

对可疑数字的解释,目前有两种,在无特殊规定的情况下,允许被测量的实际值在可疑数字位置上有 ± 0.5 或 ± 1 个单位的变动。比如,32.4 V 所代表的电压,可以认为它的实际值在 32.35~32.45 V 之间,也可以认为实际值在 32.3~32.5 V 之间。

有效数字位数越多,测量准确度越高。如果条件允许的话,能够读成“32.40”,就不应记为“32.4”,否则降低了测量准确度。反过来,如果只能读作“32.4”,就不应记为“32.40”,后者从表面来看,提高了测量准确度,但是实际上小数点后面的第二位是不准确的,因为小数点后第一位就是估计出来的可疑数字,第二位就没有什么意义了。在读取和处理数据时,有效数字的位数要合理选择,使所取的有效数字的位数与实际测量的准确度一致。

2. 有效数字的正确表示法

(1)记录测量数值时,只允许保留一位可疑数字。

(2)数字“0”在数中可能是有效数字,也可能不是有效数字。例如 0.0415 kV,前面的两个“0”不是有效数字,它的有效数字是三位。0.0415 kV 可以写成 41.5 V,它的有效数字仍然是三位,可见前面的两个“0”仅与所用单位有关。又如 30.0 V 有效数字是三位,后面两个“0”都是有效数字。必须注意末位的“0”不能随意增减,它是由测量设备的准确度来决定的。

(3)大数值与小数值要用幂的乘积形式来表示。例如,测得某电阻的阻值是 15 000 Ω ,有效数字为三位,则记为 $1.50 \times 10^4 \Omega$ 或 $150 \times 10^2 \Omega$,不能记为 15 000 Ω 。

(4)在计算中,常数(如 π , e 等)及乘子(如 $\sqrt{2}$ 、 $\frac{1}{2}$ 等)的有效数字位数没有限制,需要几位就取几位。

3. 有效数字的修约规则

当有效数字位数确定后,多余的位数应一律按四舍五入的规则舍去。

4. 有效数字的运算规则

处理数据时,常常需要运算一些准确度不相等的数值,按照一定的规则计算,既可以提高计算速度,也不因数字过少而影响计算结果的准确度。常用规则如下: