

现代电子测量基础

张 伦 丁明清 孙 续 编

中国计量出版社

(京)新登字 024 号

图书在版编目(CIP)数据

现代电子测量基础/张伦,丁明清,孙续编. —北京:中国计量出版社,1995. 8

ISBN 7-5026-0736-6/TB·457

I. 现… II. ①张…②丁…③孙… III. ①电子测量-基础理论
②电子测量设备-基础理论 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 14122 号

现代电子测量基础

张 伦 丁明清 孙 续 编

责任编辑 谢济安

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

北京市怀柔县燕文印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

开本 850×1168/32 印张 13.75 字数 311 千字

1995 年 8 月第 1 版 1995 年 8 月第 1 次印刷

*

印数 1—5000 定价:15.00 元

出版前言

为使我国经济得到迅速发展,必须振兴机械电子、石油化工、汽车制造和建筑业,并使之成为国民经济的支柱产业。因此,加速发展电子技术是实现科技现代化的一个重要环节。电子测量仪器在国民经济领域中,对加强质量管理和提高产品质量方面起着重要的保障作用,而先进的测量技术则是保证科学技术达到高度现代化的重要手段。

为帮助广大会员和电子工业战线上的广大工程技术人员系统掌握有关现代电子测量仪器和测量技术的知识,全面了解这个技术领域的发展现状,电子工业部第十二研究所高级工程师、中国电子学会高级会员张伦同志组织编写了《现代电子测量基础》一书,该书内容系统完整、取材精炼、叙述概念清晰,很适于作自学参考书和培训班教材。书的出版发行将对从事电子技术和计量测试工作的广大工程技术人员以及高等院校和中等专业学校有关专业的师生提供一本良好的参考读物。

在本书的出版过程中,得到了北京市电子工艺技术研究中心、北京大华微波公司、北京无线电技术研究所以及北京无线电仪器二厂的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

北京电子学会电子测量专业
委员会主任 华成璞

编 者 的 话

电子仪器和测量技术在现代社会的各个领域中起着越来越大的作用。可以认为,目前任何一个重要部门都与它们有着或多或少的联系。因此,熟悉、掌握这方面的知识并熟练应用到实践中,就成为一项十分迫切而重要的任务。

本书是一本论述现代电子仪器和测量技术的基础性读物。尽管论述这个题材的书籍已先后出版过若干种,但适于自学的参考书或作为培训教材的书籍则尚不多见,本书试图弥补这一不足。关于本书的特点,可以大致归纳如下:

首先,本书具有教材特点,书中在叙述方式上力求循序渐近、由浅入深、概念完整。为了使读者易于掌握书中所述内容,在论述每个问题时尽可能举出实例。每章结束附有若干习题提供练习,因而适于自学使用。

其次,本书主要是供中级技术人员或大专院校低年级学生阅读,因此,在选材上没有过份追求“高、精、尖”,而是着重于基础理论和基本技术的介绍,并尽可能与实际应用相联系。读者掌握了这些基本知识之后,就不难向更高层次深入扩展。

本书的内容涉及测量单位、测量误差和数据处理及自动化测试系统的许多方面。读者由此即可清楚地看出现代电子仪器和测量技术的大致面貌和今后发展的趋势。

本书的第十五章由北方交通大学通信与控制工程系孙续教授编写。中国计量出版社倪伟清编审对书稿做了许多斧正,并编写了第二章。

北京电子学会电子测量专业委员会对本书的出版给予了大力

支持,并作为学会的工作内容之一。主任委员华成璞同志、委员连长戌同志、学会秘书胡奎英同志为使本书顺利出版做了大量筹划工作,这里一并向他们表示最衷心的感谢。

编 者
谨识于北京
1994. 4

目 录

第一章 测量和误差基本知识	(1)
1—1 基本术语	(1)
1—2 准确度和精密度	(2)
1—3 有效数字	(3)
1—4 误差的类型	(6)
1—5 统计分析	(10)
1—6 误差的概率	(12)
1—7 极限误差	(16)
习 题	(18)
第二章 测量(计量)单位	(20)
2—1 量和单位基本概念	(20)
2—2 国际单位制	(22)
2—3 我国的法定计量单位	(25)
2—4 单位换算	(27)
习 题	(30)
第三章 几种重要的测量标准	(32)
3—1 标准的分类	(32)
3—2 质量、长度和体积的标准	(34)
3—3 时间和频率标准	(35)
3—4 电学标准	(37)
3—5 温度和发光强度的标准	(43)
3—6 IEEE 标准	(44)
习 题	(45)

第四章 电测量指示仪表	(46)
4—1 动圈式检流计	(46)
4—2 检流计的扭矩和偏转	(46)
4—3 永磁动圈机构	(50)
4—4 直流电流表	(56)
4—5 直流电压表	(59)
4—6 电压表的灵敏度	(61)
4—7 串联型欧姆表	(65)
4—8 并联型欧姆表	(69)
4—9 万用表(VOM)	(72)
4—10 直流仪表的校准	(74)
4—11 交流指示仪表	(76)
4—12 热电式仪表	(85)
4—13 电动式功率仪表	(87)
4—14 电能表(电度表)	(89)
4—15 功率因数表	(91)
4—16 仪用变换器	(93)
习 题	(96)
第五章 电桥	(98)
5—1 概述	(98)
5—2 惠斯顿电桥	(98)
5—3 开尔文电桥	(104)
5—4 加保护的惠斯顿电桥	(107)
5—5 交流电桥及其应用	(110)
5—6 麦克斯韦电桥	(113)
5—7 海氏电桥	(115)
5—8 西林电桥	(117)
5—9 失衡电桥	(119)
5—10 维恩电桥	(121)
5—11 华格纳(Wagner)接地连接	(123)
习 题	(124)
第六章 基本参数测量仪	(126)

6—1	概述	(126)
6—2	带放大的直流仪表	(127)
6—3	利用整流器的交流电压表	(130)
6—4	真有效值响应的电压表	(134)
6—5	电子万用表	(135)
6—6	选择模拟电压表应考虑的因素	(139)
6—7	数字电压表	(142)
6—8	元件测量仪器	(155)
6—9	Q 表	(161)
6—10	矢量阻抗表	(171)
6—11	矢量电压表	(174)
6—12	射频功率和电压测量	(178)
	习 题	(180)
第七章	示波器及其在测量中的应用	(181)
7—1	概述	(181)
7—2	示波器的方框图	(181)
7—3	阴极射线管	(182)
7—4	CRT 电路	(197)
7—5	垂直偏转系统	(198)
7—6	延迟线	(204)
7—7	多迹线	(207)
7—8	水平偏转系统	(209)
7—9	示波器探头和传感器	(213)
7—10	示波器技术	(216)
7—11	几种特殊的示波器	(221)
	习 题	(241)
第八章	信号发生器	(242)
8—1	概述	(242)
8—2	正弦波发生器	(242)
8—3	频率合成信号发生器	(253)
8—4	分频发生器	(258)
8—5	信号发生器的调制	(261)

8—6	扫频发生器	(261)
8—7	脉冲和方波发生器	(265)
8—8	函数发生器	(274)
8—9	音频信号发生器	(277)
	习 题	(278)
第九章	信号分析仪	(280)
9—1	概述	(280)
9—2	波形分析仪	(280)
9—3	谐波失真分析仪	(284)
9—4	频谱分析仪	(289)
	习 题	(311)
第十章	频率和时间间隔测量	(313)
10—1	简易频率计数器	(313)
10—2	测量误差	(324)
10—3	扩展计数器的频率范围	(328)
10—4	自动计数器和计算计数器	(332)
	习 题	(333)
第十一章	传感器	(335)
11—1	概述	(335)
11—2	传感器的选择	(336)
第十二章	数据采集系统	(340)
12—1	仪器系统	(340)
12—2	传感器同电子控制系统和电子测量系统的连接	(342)
12—3	多路转接	(352)
第十三章	计算机控制的测试系统	(360)
13—1	概述	(360)
13—2	对音频放大器进行测试	(360)
13—3	对无线电接收机进行测试	(362)
13—4	计算机控制的测试系统中所使用的仪器	(366)
13—5	IEEE488 接口	(371)
13—6	数字控制说明	(374)
13—7	以微处理器测量信号定时的实例	(375)

习 题	(376)
第十四章 光纤测量	(377)
14—1 概述	(377)
14—2 源和检测器	(382)
14—3 光纤功率测量	(384)
14—4 稳定的已校光源	(387)
14—5 光纤系统损耗的端点间测量	(388)
14—6 光时域反射计	(388)
习 题	(392)
第十五章 VXI 总线系统	(393)
15—1 VXI 总线的产生及有关规范	(393)
15—2 VXI 系统的组成结构	(398)
15—3 VXI 系统的总线、器件和通信规程	(406)
15—4 自动测试系统的发展	(413)
附录 有关电子测量仪器产品	(422)

第 一 章

测量和误差基本知识

1—1 基本术语

测量一般涉及用仪器作为确定一个量或一个变量的一种实际手段。仪器起着扩大人的能力的作用,能帮助人们去测定一个未知量。因此,仪器可以定义为“用来测定一个量(或变量)的数值(或大小)的装置”。电子仪器,顾名思义,其测量功能系建立在电学原理或电子学原理的基础上。电子仪器可能是结构比较简单的或并不复杂的装置,如基本的直流电流表(见第四章)。然而,随着技术的向前发展,人们要求更精巧、更准确的仪器,从而在仪器的设计和应用方面开拓了崭新的局面。为了灵巧自如地使用这些仪器,需要理解它们的工作原理以及评价它们对于预期应用的适用性。

测量工作要用到若干术语,在此应对它们作出定义。

仪 器: 用来确定一个量(或变量)的数值(或大小)的装置。

准确度: 仪器的读数接近被测变量的真值的程度。

精密度: 测量的重复性的量度。即给定一个量的固定值时,相继测量彼此之间不一致程度的量度。

灵敏度: 仪器的输出信号或响应与输入或被测变量的变化之比。

分辨力: 仪器能作出响应的被测值的最小变化。

误 差: 与被测变量真值的偏差。

为了将误差的影响减至最小,可以采用好几种方法。例如,在进行精密测量时,应记录一系列观察数据,而不只依靠一次观察数据。更换测量方法以及使用不同的仪器来完成同一实验,是提高准确度的一种良好方法。这些方法有助于靠减小环境误差或随机误差来提高测量的精密度,但还不能说明仪器误差。

本章将介绍测量中的各种误差类型以及利用被测之量的最可靠值来表示误差的方法。

1—2 准确度和精密度

准确度(accuracy)指的是在测量条件下与真值接近或符合的程度。精密度(precision)指的是在一组测量或仪器之间的一致程度。

为了具体说明准确度与精密度之间的差别,可以对相同厂家和型号的两个电压表进行比对。两个电压表都有刀形指针和带镜面的刻度盘,以避免视差。这些刻度盘都经过仔细校准,因此它们可用相同的精密度读数。如果一个电压表中的串联电阻的值明显改变,则它的读数可能有很大的误差。因此,两个电压表的准确度可能截然不同(为了确定哪一个电压表存在误差,应当与一个标准电压表进行比对测量)。

精密度包含两个特性,即一致性和进行测量可能达到的有效数字的位数。例如,考察一个真实阻值为 $1\,384.572\Omega$ 的电阻器,该电阻器用一个欧姆表测量时始终重复指示 $1.4\text{M}\Omega$ 。但是,测试人员能否从刻度盘上“读出”真值呢?测试人员根据刻度盘读数作的估计,始终给出 $1.4\text{M}\Omega$ 的值。这是测试人员靠估计来计读刻度盘所能达到的最接近真值的数值。尽管没有偏离观察值,但刻度盘读数的局限性所造成的误差则是精密度误差。这个例子说明,一致性是精密度的必要、但不是充分条件,因为缺乏可以获得的有效数字。类似,精密度是准确度的必要、但不是充分条件。

低年级学生往往习惯于从表面上接受仪器的读数。他不理解

读数的准确度并不一定是由它的精密度来保证。事实上,优良的测量方法要求对结果的准确度抱持续不断的怀疑态度。

对于重要的测量,测试人员应该利用不同的仪器或不同的测量方法进行几次独立的测量,以免受到相同的系统误差的影响。测试人员还必须确信仪器功能正常,且已用标准器进行了校准,以及没有外部因素影响测量准确度。

1—3 有效数字

测量的精密度是用表示结果的有效数字位数来表征。有效数字反映一个量的大小和测量精密度的实际信息。有效数字越多,测量的精密度越高。

例如,如果规定一个电阻器具有 68Ω 的电阻,则它的电阻应比 67Ω 或 69Ω 更接近于 68Ω 。如果电阻器的值描述为 68.0Ω ,这意味着它的电阻比 67.9Ω 或 68.1Ω 更接近 68.0Ω 。 68Ω 有两位有效数字, 68.0Ω 有三位有效数字。后者测量的精密度比前者要高。

然而,总的数字位数往往不代表测量的精密度。小数点前含零的大数常用于近似表示人口数或钱数。例如,某个城市的人口是 380 000,用 6 位数字进行报道。这可能意味着人口的真值处在为 6 位有效数字的 379 999 与 380 001 之间。然而,通常的意思是人口更接近 38 万,而不是 37 万或 39 万。在这种情况下,人口只需报道到两位有效数字,这样大数又怎样来表示呢?

一种技术上正确的表示法是采用 10 的幂次方 38×10^4 或 3.8×10^5 。这表明人口数字只准确到两位有效数字。因此,一个数由小数点左方的零所引起的不确定性,通常采用 10 的幂次方的科学表示法来解决。

通常,我们习惯用最接近于真值的全部数字来记录一次测量。例如,对一个电压表读数,电压读为 117.1V。这表示由测试人员最佳估计读出的电压更接近于 117.1V,而不是接近于 117.0V 或 117.2 V。另一种表示这个结果的方法是,指出可能误差的范围。

电压可以表示为 $117.1 \pm 0.05 \text{ V}$, 它表示电压的值介于 117.05 与 117.15 之间。

当进行若干次独立的测量, 试图获得最佳的可能答案(最接近真值)时, 结果往往表示为所有读数的算术平均。将可能误差的范围表示为与平均值的最大偏离。这一点在例 1-1 中做了具体说明。

例 1-1 已知由四个测试人员进行的一组独立电压测量的记录值为 117.02, 117.11, 117.08 和 117.03V。试计算(a)平均电压;(b)误差范围。

解

$$\begin{aligned} \text{(a)} E_{av} &= \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{N} \\ &= \frac{117.02 + 117.11 + 117.08 + 117.03}{4} = 117.06 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\text{(b)} \text{误差范围} = E_{\max} - E_{av} = 117.11 - 117.06 = 0.05 \text{ V}$$

而且还有

$$E_{av} - E_{\min} = 117.06 - 117.02 = 0.04 \text{ V}$$

因此, 平均误差范围为

$$\frac{0.05 + 0.04}{2} = \pm 0.045 = \pm 0.05 \text{ V}$$

当将两个或多个具有不同准确度的测量值相加时, 其结果只能是准确度最低的那个测量值的准确度。假定两个电阻像例 1-2 那样串联相加。

例 1-2 已知两个电阻器 R_1 和 R_2 相串联。利用数字式万用表测量各个电阻给出 $R_1 = 18.7 \Omega$ 和 $R_2 = 3.624 \Omega$ 。试计算总电阻(到适当的有效数字)。

解

$$R_1 = 18.7 \Omega (\text{三位有效数字})$$

$$R_2 = 3.624 \Omega (\text{四位有效数字})$$

$$R_T = R_1 + R_2 = 22.324 (\text{五位有效数字}) = 22.3 \Omega$$

在将 R_1 和 R_2 相加时, 和值中的最后三位是可疑数字。无论怎样, 保留最后两位数(2 和 4)都没有什么意义, 因为一个电阻只能准确到三位有效数字

或 0.1Ω 。因此,结果应缩减到三位有效数字或小数点后的第一位,即 22.3Ω 。

乘法中的有效数字位数可能大为增加,但答案中仍只保留适当的数字,如例 1-3 中所示。

例 1-3 计算电压降,已知对 35.68Ω 的电阻记录下 3.18 A 的电流。试将电阻器两端的电压降计算到适当的有效数字位数。

解 $E=IR=(3.18)\times(35.68)=113.4624=113\text{ V}$

由于乘法中包含了三位有效数字,故答案最多只能写成三位有效数字。

在例 1-3 中,电流 I 有三位有效数字, R 有四位有效数字,相乘的结果只有三位有效数字。这说明答案的准确度不可能高于乘数因子中最差的准确度。还应指出,如答案中累积额外的数字,则它们应舍弃或四舍五入。在日常工作中,如果被舍弃的第一位(最小有效位)数字小于 5,则这个数字连同后面的数字应从答案中除去。在例 1-3 中便是这样做的。如果被舍弃的第一位数字是 5 或更大的数字,则前一位数字加 1。因此,对于三位数字的精密度, 113.46 应四舍五入到 113 ,而 113.74 应四舍五入到 114 。

例 1-4 中说明具有可疑数字的相加。

例 1-4 试将 826 ± 5 与 628 ± 3 相加。

解

$$N_1=826\pm 5(=\pm 0.605\%)$$

$$N_2=628\pm 3(=\pm 0.477\%)$$

$$N_1+N_2=1454\pm 8(=\pm 0.55\%)$$

在例 1-4 中可以看出,可疑部分被加在一起,因为 $\pm$ 符号意味着一个数可能大,另一个数可能小。答案中应取可疑范围的最坏可能组合。原始数字 N_1 和 N_2 的百分可疑与最终结果的百分可疑没有重大差别。

如果相同的两个数相减(如例 1-5),则对加法和减法在可疑范围方面进行比较是颇有意义的。

例 1-5 试从 826 ± 5 中减去 628 ± 3 ,并将答案中的可疑范围表示成百分比。

$$N_1 = 826 \pm 5 (= \pm 0.605\%)$$

$$N_2 = 628 \pm 3 (= \pm 0.477\%)$$

$$N_1 - N_2 = 198 \pm 8 (= \pm 4.04\%)$$

在例 1-5 中,可疑部分采用与例 1-4 的同样原因相加。将例 1-4 和例 1-5 中对相同数字相加与相减的结果进行比较即可看出,当表示成百分比时,结果的精确度迥然不同。相减后的最终结果表明,百分比可疑较之加法后的百分比可疑有显著增大。即使在数字之间的差别相当小的情况下,百分比可疑也要增大。现在来考察例 1-6 中所列举的情况。

例 1-6 试从 462 ± 4 中减去 437 ± 4 ,并将答案中的可疑范围表示为百分比。

解

$$N_1 = 462 \pm 4 (= \pm 0.87\%)$$

$$N_2 = 437 \pm 4 (= \pm 0.92\%)$$

$$N_1 - N_2 = 25 \pm 8 (= \pm 32\%)$$

例 1-6 清楚地说明,应当避免采用与实验结果相减有关的测量方法,因为最终结果的可疑范围可能显著增大。

1—4 误差的类型

测量不可能具有理想的准确度,但重要的是要找出准确度是多少以及不同的误差是怎样容到测量中。研究误差是找出减小误差的途径的第一步。这种研究还允许我们确定测试结果的准确度。

误差可能来自不同的误差源,通常分为以下三大类:

粗大误差：主要是人为误差，其中包括对仪器的错误读数、仪器的不正确调节和不适当应用以及计算错误。

系统误差：仪器的缺陷(如有故障的或磨损的零件)和周围环境对设备或使用者的影响。

随机误差：这是由测量的参数或系统中的随机变化而不能直接确定下来的一些原因所引起的误差。

我们将扼要讨论这几类误差中的每一类，并提出减小或消除它们的一些方法。

1—4.1 粗大误差

这类误差主要涉及在计读或使用仪器以及在记录和计算测量结果时的人为误差。只要有人介入，就不可避免地会出现某些粗大误差。尽管完全消除粗大误差或许不可能，但应当设法预先估计到并加以改正。某些粗大误差很容易发觉，而另一些粗大误差则可能十分难以捉摸。测量工作中的新手经常造成的一种共通的粗大误差是不适当地使用仪器。通常，当将指示仪器接入一个完整的电路中时，会使状态发生某些变化，所以测得的量会随所采用的方法而变。例如，一个经良好校准的电压表在跨接到高阻电路的两点上时，可能给出使人误解的读数(例 1-7)。同样的电压表接入低阻电路时，则可能给出较可靠的读数(例 1-8)。这两个例子说明电压表对电路有“加载效应”，会因测量过程而改变原有的状态。

例 1-7 一个灵敏度为 $1\,000\Omega/\text{V}$ 的电压表与毫安表相串联跨接到一个未知电阻器的两端时，在电压表的 150V 刻度盘上读出 100V 。其时，毫安表的读数为 5mA 。试计算：(a)未知电阻器的视在电阻；(b)未知电阻器的实际电阻；(c)由电压表“加载效应”引起的误差。

解

(a)电路的总电阻为

$$R_T = \frac{V_T}{I_T} = \frac{100\text{ V}}{5\text{ mA}} = 20\text{ k}\Omega$$

忽略毫安表的电阻时，未知电阻器的值是 $R_X = 20\text{k}\Omega$ 。