

〔美〕威廉·戴维·库珀

电子仪器与测量技术

徐荣林 赖惠 薛尚礼 译

国防工业出版社

电子仪器与测量技术

〔美〕 威廉·戴维·库珀 著

徐荣林 赖 惠 薛尚礼 译

国防工业出版社

1979年4月

内 容 简 介

本书系统而全面地论述了有关测量技术的基本概念和原理,阐述了电子测量仪器的工作原理和操作特点,并提供了典型测量仪器的应用范围及实践资料。全书共分14章,其中1~3章介绍“测量与误差”、“测量单位制”、“测量标准”;4~11章对指示仪表、电位差计、电桥、示波器及测量电路参数的各种电子仪器作了详尽的论述;12~14章介绍了电子计数器、测量用传感器及数据采集系统等先进测量技术。书中叙述简明扼要、通俗易懂,而且每章都设置了例题和习题,从理论与实践两方面帮助读者熟悉并巩固本书涉及的中心内容、重要定理、公式及计算方法。

本书可供从事电子仪器和测量技术的工程技术人员、大专院校师生及具有中等以上文化水平的自学者阅读参考。

Electronic Instrumentation & Measurement

William David Cooper

Prentice-Hall Inc., 1982

*

电子仪器与测量技术

[美]威廉·戴维·库珀 著

徐荣林 赖 惠 薛尚礼 译

*

国防工业出版社出版、发行

(北京市海淀区紫竹院南路28号)

(邮政编码: 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张16 423千字

1990年11月第一版 1990年11月第一次印刷 印数: 0,001—4,000册

ISBN 7-118-00494-4/TH·28 定价: 9.75元

译 序

随着科学技术的迅速发展,电子仪器及测量技术得到日益广泛的应用,因而在国民经济各部门起着日趋重要的作用。为了给我国从事电子仪器和测量技术工作的广大科技人员及院校师生提供一本比较系统、全面而又能适应当前技术发展水平的专业书籍,我们翻译了《电子仪器与测量技术》一书。

本书共十四章,其中一至三章介绍“测量与误差”、“测量单位制”和“测量标准”等有关基本概念。文字简练,具有一定的经典性。四至十一章约占全书篇幅的百分之六十,对指示仪表、电位差计、电桥、示波器及测量电路参数的各种电子仪器,从工作原理、使用特性到设计计算过程作了详尽的论述,并提供了典型测量仪器的使用范围和实践资料。除了经典的内容以外还介绍了一些新技术在仪器中的应用。这一部分比较注重实际,概念清楚,实用性很强。第十二至十四章介绍电子计数器、测量用传感器及数据采集系统等先进的测量技术,充分体现了电子技术在电量或非电量测量中具有灵敏度高、响应快、有利于数据处理、便于显示或记录等优点。

本书可作为高等院校师生的教学参考书,也可当作从事本专业的科技人员的工作手册,对于从事无线电电子学及其它领域的科技人员也有重要的参考价值。由于本书叙述清晰、深入浅出、避免了繁琐的推导,故很适于青年自学与进修。

本书一、二、三、九、十、十一、十二、十三、十四章由徐荣林翻译,四、五、六、七、八及十二、十三、十四章由徐荣林翻译,第十一章由薛尚礼翻译,全书由徐荣林负责审校。

限于我们的学识水平,难免有不妥和错误之处,敬请广大读者批评指正。

译 者

目 录

第一章 测量和误差	1
1.1 定义	1
1.2 准确度和精密度	2
1.3 有效数字	3
1.4 误差的种类	6
1.5 统计分析	9
1.6 误差的概率	12
1.7 极限误差	16
参考文献	17
问题	17
习题	18
第二章 测量单位制	21
2.1 基本单位和导出单位	21
2.2 单位制	22
2.3 电学和磁学单位	24
2.4 国际单位制	27
2.5 其它单位制	29
2.6 单位换算	30
参考文献	32
习题	32
第三章 测量标准	34
3.1 标准的分类	34
3.2 质量、长度和体积标准	35
3.3 时间和频率标准	36
3.4 电的标准	38
3.5 电磁标准	46
3.6 温度与发光强度标准	49

参考文献	50
问题	50
第四章 直流指示仪表	51
4.1 悬丝检流计	51
4.2 检流计的力矩与偏转	52
4.3 永磁动圈装置	56
4.4 检流计的灵敏度	62
4.5 直流电流表	64
4.6 直流电压表	69
4.7 电压表灵敏度	72
4.8 电压表-电流表测量法	76
4.9 串联型欧姆表	78
4.10 分流型欧姆表	82
4.11 万用表或伏-欧-毫安表(VOM)	84
4.12 直流仪表的校准	89
参考文献	90
习题	90
第五章 交流指示仪表	93
5.1 引言	93
5.2 电功率计	93
5.3 动铁式仪表	97
5.4 整流式仪表	100
5.5 热电仪表	107
5.6 静电电压表	112
5.7 用电功率计进行功率测量	114
5.8 电度表(瓦时计)	121
5.9 功率因数计	124
5.10 频率计	126
5.11 仪表变换器	128
参考文献	133
习题	133
第六章 电位差计的原理与应用	135
6.1 引言	135

VI

6.2 电位差计电路	135
6.3 分压箱	147
6.4 分流箱	148
6.5 零位检测	149
6.6 电压表与电流表的校准	151
6.7 自平衡式电位差计	153
参考文献	157
习题	157
第七章 直流电桥及其应用	160
7.1 引言	160
7.2 惠斯登电桥	160
7.3 凯尔文电桥	167
7.4 便携式试验设备的回路试验	171
7.5 惠斯登电桥的保护	175
参考文献	178
习题	179
第八章 交流电桥及其应用	181
8.1 交流电桥的一般形式	181
8.2 比较电桥	184
8.3 马克斯韦电桥	187
8.4 海氏电桥	189
8.5 谢灵电桥	191
8.6 不平衡状态	193
8.7 维恩电桥	195
8.8 瓦格纳接地	197
8.9 万用阻抗电桥	198
参考文献	201
习题	201
第九章 示波器	204
9.1 引言	204
9.2 CRO的基本原理	204
9.3 阴极射线管 (CRT)	208

9.4 垂直偏转系统	222
9.5 延迟线	229
9.6 水平偏转系统	232
9.7 CRO探头	242
9.8 李沙育图形	248
9.9 特殊用途的阴极射线示波器	253
参考文献	269
习题	270
第十章 测量电压、电流、电阻和其它电路参数的电子仪表	272
10.1 引言	272
10.2 电子电压表	273
10.3 电子万用表	280
10.4 选择模拟电压表的依据	285
10.5 差动电压表	287
10.6 数字电压表	292
10.7 Q值表	303
10.8 矢量阻抗计	312
10.9 矢量电压表	316
参考文献	320
习题	320
第十一章 产生和分析波形的仪器	322
11.1 基本振荡电路	322
11.2 脉冲和方波发生器	333
11.3 信号发生器	344
11.4 函数发生器	350
11.5 波形分析仪	353
11.6 谐波失真分析仪	356
11.7 频谱分析	362
参考文献	367
习题	368
第十二章 电子计数器及其应用	370
12.1 电子计数器的各个元件	370

12.2	十进制计数组件	370
12.3	时基发生器和有关电路	381
12.4	逻辑电路	382
12.5	通用计数器	387
12.6	测量方式	390
12.7	测量误差	396
12.8	测量应用	400
参考文献		406
习题		406
第十三章 测量系统的输入元件——传感器		407
13.1	传感器的分类	407
13.2	传感器的选择	409
13.3	应变仪	411
13.4	位移传感器	418
13.5	温度测量	428
13.6	光敏器件	443
13.7	磁测量	449
参考文献		453
习题		453
第十四章 模拟和数字数据采集系统		455
14.1	测量系统	455
14.2	磁带记录器	457
14.3	数模转换	466
14.4	模数转换	469
14.5	多路转换	483
14.6	空间编码器	486
参考文献		490
附录		491

第一章 测量和误差

1.1 定 义

测量通常是指用仪器作为一种物理手段来确定某一数量或变量。仪器作为人类技能的一种延伸，在许多情况下能使人确定一个未知量的值，这些未知量依靠人类本身的技能是无法测量的。仪器则定义为**用来确定量或变量数值或量值的一种装置**。电子仪器，顾名思义是以电气和电子原理来完成测量功能的。它可以是一种结构和原理都很简单的装置，例如直流检流计（见第四章）。随着科学技术的发展，对于更完善更准确的仪器的需求增加了，仪器的设计和应用也有了新的发展。为了灵活地使用这些仪器，人们需要了解它们的工作原理，并估计它们在使用中的适用性。

下面是测量工作一些常用术语的定义。

仪器：用来确定量或变量数值或者量值的一种装置。

准确度：仪器读数与被测量真值的接近程度。

精密度：测量重复性的一种度量。例如对于某一给定值，精密度是重复测量时所得结果彼此之间一致程度的度量。

灵敏度：输出信号或仪表的响应与输入变量或被测量之比。

分辨率：仪器能够响应的被测量的最小变量。

误差：被测量的真值与测得值之差。

可以用一些技术措施来减小误差的影响。例如，为了进行精确测量，可以记录多个观测值而不是仅依赖一个值；可以改变测量的方法；可以使用不同的仪器来进行同一个量的测量，这些都可以提高测量的准确度。尽管这些技术可以通过减少环境误差和随机误差的方法来提高测量的准确度，但是它们不能消除仪器误差。

本章介绍测量中不同种类的误差及依据被测量的最可靠的值来表达误差的方法。

1.2 准确度和精密度

准确度是指测得值与被测量真值的接近程度或一致程度。精密度是指一组测量值之间或仪器之间一致的程度。

为了说明准确度和精密度的区别，可用两个构造和型号完全相同的电压表进行比较。两个电压表都具有刀锋式指针和镜面反射度盘以避免视差，其刻度亦进行过仔细的校准。这样，两个电压表即可读出相同的精密度。如果一个电压表中串联的电阻值发生了变化，其读数就会出现相当大的误差。因此这两个电压表的准确度就不尽相同（为确定哪个电压表有误差，就要用标准电压表来进行比较测量）。

精密度有两个特性：**一致性及测量所能获得的有效数字的位数**。假定有一个电阻，其真值为 1384572Ω ，而用欧姆表测量，始终重复地指示为 $1.4M\Omega$ 。观测者能否由刻度读出真值呢？他从刻度盘的读数上估计的值始终为 $1.4M\Omega$ ，这是靠估计能够读出的很接近真值的值。尽管观测值没有偏差，但由于表盘读数的限制，造成了精密度误差。这个例子表明，由于不能获得有效数字，对于精密度来说，一致性是必要的而不是充分的条件。同样，对于准确度来说，精密度是必要的而不是充分的条件。

初学者往往过分看重仪器的表盘读数。他不懂得精密度并不能保证读数的准确度。事实上，良好的测量技术要求对于测量结果的准确度持怀疑态度。

实践表明，在精密的测量中，观测者使用不同的仪器或者用不同的测量技术来进行一组独立的测量，可以避免相同的系统误差。还必须确保仪表性能正常，同时应用已知的标准对仪器进行校准，并确保没有外界因素影响测量的准确度。

1.3 有效数字

测量的精密度是由表达测量结果的有效数字的位数来表征的。有效数字是表达被测量的量值及测量精密度的实际数据。有效数字位数越多，测量的精密度就越高。

例如，如果一个电阻器的阻值定为 $68\ \Omega$ ，它的阻值应该较接近 $68\ \Omega$ 而不是 $67\ \Omega$ 或 $69\ \Omega$ 。如果阻值表述为 $68.0\ \Omega$ ，它的意思是阻值较接近 $68.0\ \Omega$ 而不是 $67.9\ \Omega$ 和 $68.1\ \Omega$ 。 $68\ \Omega$ 有两位有效数字，而 $68.0\ \Omega$ 则有三位有效数字，后者有效数字位数多，表示测量精密度比前者高。

然而，数字的总位数并不都代表测量精密度。小数点前有若干个0的大数目常常用来表示近似的人口数或钱的数目。例如，某城市人口据报道为六位数字380000。这个数据有六个有效数字，它并不表示真实的人口数是在379999与380001之间，它只说明人口数较接近380000而不是370000或390000。因此在这种场合人口数只能报道为两位有效数字。那么这么大的数目怎样来表示呢？

更适当的记数法是用10的乘幂 38×10^4 或 3.8×10^5 。这表明人口数字只准确至两位有效数字。小数点前的0造成的不确定性通常以科学计数法使用10的乘幂来解决。例如，对于任何有点技术基础知识的人来说，光速为 300000 km/s ，这不会引起任何误解，而表示为 $3 \times 10^5\text{ km/s}$ 则更为明确。

在记录测量值时我们通常记下最接近真值的所有数字，例如，电压表的读数为 117.1 V 。它表明这是观测者读得的最佳估计值，电压值较接近 117.1 V 而不是 117.0 V 或 117.2 V 。另外一种表达方式是误差范围。电压值表示为 $117.1 \pm 0.05\text{ V}$ ，表明电压值在 117.05 V 与 117.15 V 之间。

在一组独立的测量值中，为获得最佳答案（最接近真值），测量结果通常用所有读数的算术平均值以及偏离平均值的误差范围来表示，如例1-1所示。

例1-1 由四个观测者测得的一组独立的电压值为117.02 V, 117.11 V, 117.08 V和117.03 V。计算: (a) 平均电压; (b) 误差范围。

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

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

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

平均误差范围等于:

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

当两个或多个准确度不同的测量值相加时, 所得结果的准确度与准确度最低的测量值一致。例1-2用两个串联电阻阻值相加的方法来说明上述结论。

例1-2 两个电阻 R_1 和 R_2 串联在电路中。用惠斯登电桥分别测得 $R_1 = 18.7 \Omega$, $R_2 = 3.624 \Omega$ 。计算总阻值的近似有效数字。

解 $R_1 = 18.7 \Omega$ (三位有效数字)

$R_2 = 3.624 \Omega$ (四位有效数字)

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

黑体字是不可靠数字, 它表示 R_1 和 R_2 相加, 总数里最后三位数是不可靠数字。由于有一个阻值只准确到三位有效数字, 即十分之几欧姆, 因此保留结果中的最后两位数字(2和4)是没有意义的, 结果减少至三位有效数字即22.3 Ω 。

在乘法中有效数字的位数会增加很多, 但在结果中只保留适当的位数, 例如1-3所示。

例1-3 在阻值为35.68 Ω 的电路中电流为3.18 A, 求电阻的电压降。所得结果保留适当位数的有效数字。

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

由于乘数中有一个是三位有效数字，结果最多只能有三位有效数字。

在例1-3中，电流 I 有三位有效数字，电阻 R 有四位有效数字，乘的结果只能有三位有效数字。这表明结果的准确度不能高于乘数中最低的准确度。如果结果中有多余的数字，就要进行化整。通常，如果（最低位有效）数字小于5，它及其后的数字就要从结果中舍去，如例1-3所示。如果这个数字大于或等于5，前一位数则加1。例如对于三位有效数字的精密度，113.46记为113，而113.74记为114。

用误差范围表示的数字的加法见例1-4。

例1-4 826 ± 5 加上 628 ± 3 。

解 $N_1 = 826 \pm 5 (= \pm 0.605\%)$

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

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

注意，由于 $\pm$ 号表示一个数的上下限，例1-4的不可靠部分相加。结果的误差范围是最坏可能的组合。原始数据 N_1 和 N_2 的百分误差与最终结果的百分误差相差不大。

由例1-5可见，两数相减与两数相加时的误差范围形成了明显的对比。

例1-5 826 ± 5 减去 628 ± 3 ，所得结果用百分数表示误差范围。

解 $N_1 = 826 \pm 5 (= \pm 0.605\%)$

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

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

例1-5与例1-4一样将不可靠部分相加。比较两个例题，加法与减法所得结果的百分误差精密度相差很大。用百分误差表示的结果，减法比加法有较大增加。当两数相差很小时，百分误差增加得更多，如例1-6所示。

例1-6 462 ± 4 减去 437 ± 4 ，所得结果用百分数表示误差范围。

$$\text{解 } N_1 = 462 \pm 4 (= \pm 0.87\%)$$

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

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

例1-6清楚地表明，在测量中应当尽量避免用减法来求未知量，因为这样做最后结果的误差范围会有很大的增加。

1.4 误差的种类

若想达到绝对的准确，测量是无法进行的。重要的是确定切实可行的准确度，并找出测量中各种误差产生的原因。要想减少误差，首先要研究误差，这种研究也使我们能够确定最终结果的准确度。

误差有许多来源，通常可归纳为以下三个主要的方面。

粗差：大多是指实验者的粗心造成的误差。如判读错误、调整误差、仪器使用不当及计算错误等。

系统误差：仪器的故障，如零件有缺陷或损坏，以及环境对设备和实验者的影响。

随机误差：由于外部参数和测量系统的随机变化而无法预先确定的误差。

这里简要地讨论一下各类误差，并提出一些减少或消除误差的方法。

1.4.1 粗差

这类误差主要是**实验者**读错、记错、算错测量结果，以及仪器使用不当造成的。由于有人的参与，有些粗差是不可避免的。尽管完全消除粗差是不大可能的，但应当尽量避免和纠正。有些粗差易于发现，有些则难于检出。最常见的一类粗差是初学者在测量中使用仪器不当造成的。一般地说，指示仪表接入复杂电路时会有某种程度的变化，使得被测量因所用的测量方法不同而异。例如，一块经校准的电压表接入高阻值的电路时会读出错误的结

果（见例1-7），而同样是这块电压表，当接入低阻值的电路时，就可得出较为可靠的结果（例1-8）。这些例子说明，在电路中，电压表有负载效应，测量的方法不同会改变其原有的状态。

例1-7 有一块电压表，灵敏度为 $1000\Omega/V$ 。当跨接一未知电阻并串联一块毫安表时，在150V刻度盘上读数为100V。当毫安表读数为5mA时，计算：（a）未知电阻的测定值；（b）未知电阻的实际值；（c）由负载效应引起的电压表误差。

解 （a）电路的总阻值为：

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

忽略毫安表的阻值，未知电阻的阻值 $R_x = 20\text{k}\Omega$ 。

（b）电压表的阻值为：

$$R_V = 1000 \frac{\Omega}{V} \times 150\text{V} = 150\text{k}\Omega$$

由于电压表与未知电阻是并联的，因此：

$$R_x = \frac{R_T R_V}{R_V - R_T} = \frac{20 \times 150}{130} = 23.05\text{k}\Omega$$

$$\text{（c）百分误差} = \frac{\text{实际值} - \text{测定值}}{\text{实际值}} \times 100\%$$

$$= \frac{23.05 - 20}{23.05} \times 100\% = 13.23\%$$

例1-8 已知条件同例1-7。当毫安表读数为800mA，电压表的150V刻度盘上的读数为40V时，求 R_T 、 R_V 、 R_x 和百分误差。

$$\text{解 （a） } R_T = \frac{V_T}{I_T} = \frac{40\text{V}}{0.8\text{A}} = 50\Omega$$

$$\text{（b） } R_V = 1000 \frac{\Omega}{V} \times 150\text{V} = 150\text{k}\Omega$$

$$R_x = \frac{R_T R_V}{R_V - R_T} = \frac{50 \times 150}{149.95} = 50.1\Omega$$

$$\text{（c）百分误差} = \frac{50.1 - 50}{50.1} \times 100\% = 0.2\%$$

合理选用仪表可以避免由负载效应引起的电压表的误差。例如，低阻值的电压表不能用来测量真空管放大器，对于这种特殊用途需要使用高输入阻抗电压表（如电子管电压表或晶体管电压表）。

大量的粗差是由于粗心或者不良习惯造成的。如读错、记错测试结果、调错仪表等。在多量程电压表中，不同的电压量程使用不同的刻度标记，这样，在使用电压表时，有时会造成所判读的刻度与量程开关不对应的错误。在测量前仪表未调零，也会引起粗差，在这种情况下所有读数均偏离实际值。

粗差不能通过数学方法处理，只有仔细地读数、记数才可避免。可靠的测量要求在测量某一数量时，多测几个数值，最好是由不同的观测者读数，决不能仅仅依赖于一个读数，而至少要有三个读数，这三个读数最好是在使仪表反复接通，断开的情况下测得。

1.4.2 系统误差

这种误差通常分为两类：（1）仪器误差，即仪器的缺陷所造成的误差；（2）环境误差，由于外界条件影响测量而产生的误差。

仪器误差是测量仪器固有的误差，是由仪器的机械结构造成的。例如达松伐尔机构各种活动元件内轴承的摩擦会造成判读错误。由于误动作或仪器超载，会造成游丝的张力不均匀、游丝张力或拉力减小，这些都会引起误差。其它的仪器误差如校准误差会引起仪器读数偏高或偏低（测试之前调零不当也会引起类似误差）。

所用仪器型号不同，仪器误差的类型也不同。测试者应随时采取预防措施，确保所使用的仪器性能正常而不出现过度的误差。仪器的故障可以通过检验测试结果的漂移性、稳定性和重复性而查出。快速而简易地检测仪器的方法是与性能相同的仪器进行比较，或者与准确度更高的仪器进行比较。