

电气测量仪表和测量方法

〔德〕 G. 因奇 著

刘延冰 熊信良 沈祖芳

译

陈贤珍 李立娅 张日敏

内 容 提 要

本书主要分三部分：第一部分叙述了测量的基本概念、误差及其对测量结果的影响；第二部分介绍了各种电测仪表的结构、工作原理和性能；第三部分介绍了电量及非电量如电流、电压、功率、时间、绝缘、故障定位等的测量设备和测量方法；对电测放大器、记录方法、数字测量技术、遥测等先进测试技术也有简要的叙述。

本书可作为从事电测仪表设计、检验、维修的工人和技术人员的指导书，对工厂、科研单位使用电测仪表的工人、技术人员以及大专院校电测专业的师生也有参考价值。

电气测量仪表和测量方法

〔德〕G. 因奇 著

刘延冰 熊信良 沈祖芳 译

陈贤珍 李立娅 张日敏

责任编辑 王朋植

—*

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—*

开本 787×1092 1/32 印张 12 7/8

字数 297 千字 印数 1—15 000

1986年4月第一版 1986年4月第一次印刷

统一书号 15210·490

定价 2.60 元

目 录

1 测量技术概念	(1)
1.1 测量的基础	(1)
1.2 误差及其对测量结果的影响	(2)
1.3 测量仪表的规则.....	(2)
1.4 准确度要求	(3)
1.4.1 基本误差	(3)
1.4.2 影响因素	(4)
1.5 系统误差和随机误差	(6)
1.5.1 系统误差	(6)
1.5.2 随机误差	(7)
1.5.3 系统误差的综合	(8)
1.5.4 随机误差的综合	(9)
1.6 灵敏度	(10)
1.7 自耗能量	(11)
1.8 过载能力	(11)
2 直接动作式电测仪表	(13)
2.1 电测仪表的结构和性能	(13)
2.1.1 活动机构的振动特性	(13)
2.1.2 活动机构的支承	(18)
2.1.3 调整过程	(24)
2.1.4 活动机构重量和品质因数	(27)
2.1.5 加速可靠性	(28)
2.2 电测仪表的结构形式和工作原理	(32)
2.2.1 动圈式测量仪表	(32)
2.2.2 交叉动圈式测量仪表	(49)

2.2.3	电磁式测量仪表	(54)
2.2.4	动铁式测量仪表	(61)
2.2.5	铁磁电动式测量仪表	(69)
2.2.6	铁磁电动交叉动圈式测量仪表	(73)
2.2.7	无铁芯电动式测量仪表	(75)
2.2.8	感应式仪表	(80)
2.2.9	磁滞测定器	(82)
2.2.10	静电式测量仪表	(84)
2.2.11	振动物式测量仪表	(88)
2.2.12	双金属式测量仪表	(91)
2.2.13	测量仪表的过载保护装置	(95)
2.2.14	触点接通式测量仪表	(98)
3	测量设备和测量方法	(103)
3.1	测量直流电压和电流的高灵敏度测量仪表	(104)
3.1.1	镜式检流计	(104)
3.1.2	动圈式精密测量仪表	(105)
3.2	用并联电阻或串联电阻测量电流和电压	(109)
3.2.1	串联电阻和并联电阻的结构形式	(109)
3.2.2	用并联电阻测量电流	(113)
3.2.3	用多个分流电阻测量电流	(114)
3.2.4	用串联电阻测量电压	(115)
3.2.5	多量程复合式电流、电压表	(116)
3.2.6	用分压器测量电压	(117)
3.3	直流电压补偿器	(119)
3.3.1	概述	(119)
3.3.2	标准电压源	(119)
3.3.3	补偿的基本线路	(122)
3.3.4	福依斯纳补偿器	(127)
3.3.5	级联补偿器	(129)
3.3.6	迪塞尔霍兹特补偿器	(132)
3.3.7	工业用补偿器	(133)
3.3.8	自动平衡式补偿器	(135)
3.4	电阻测量方法	(138)

3.4.1	用电流表和电压表测量电阻	(138)
3.4.2	用电流比率计测量电阻	(142)
3.4.3	直流电桥	(146)
3.4.4	电阻测量方法一览表	(151)
3.5	静电测量方法	(151)
3.5.1	电压测量	(151)
3.5.2	电流测量	(152)
3.5.3	电阻测量	(153)
3.5.4	电容测量	(155)
3.5.5	时间测量	(157)
3.5.6	功率测量	(157)
3.6	霍尔发生器	(157)
3.6.1	霍尔效应原理	(157)
3.6.2	霍尔发生器的应用	(158)
3.7	功率测量方法	(161)
3.7.1	交流功率测量	(161)
3.7.2	三相电网中的功率测量	(163)
3.7.3	视在功率测量	(170)
3.7.4	功率因数的确定	(170)
3.8	仪用互感器	(172)
3.8.1	互感器的用途	(172)
3.8.2	电流互感器	(172)
3.8.3	电压互感器	(182)
3.8.4	交流和负载平衡的三相电流测量中互感器的误差	(188)
3.8.5	互感器的测量设备和负载的测量设备	(190)
3.9	互感器和测量仪表的配合使用	(191)
3.9.1	电流测量	(192)
3.9.2	电压测量	(195)
3.9.3	功率测量	(197)
3.9.4	频率测量	(200)
3.9.5	与互感器连接的测量仪表的结构形式	(202)
3.10	整流器式测量方法	(204)
3.10.1	干式整流器	(204)

3.10.2	附有整流器的动圈式测量仪表	(205)
3.10.3	机械式整流器	(211)
3.10.4	外部控制的干式整流器	(214)
3.11	热电变换器	(219)
3.12	交流电压补偿器	(224)
3.12.1	用电热变换器比较直流电压和交流电压的补偿线路	(224)
3.12.2	用电动式测量仪表比较直流和交流电测量值的补偿电路	(226)
3.12.3	复数交流补偿器	(229)
3.12.4	交流电桥	(231)
3.13	绝缘测量方法	(236)
3.13.1	用外部电源的绝缘测量	(236)
3.13.2	工厂中的绝缘测量	(241)
3.14	接地测量方法	(243)
3.14.1	用电流表和电压表的接地测量	(244)
3.14.2	用声音指示器的接地测量	(246)
3.14.3	补偿法接地测量	(248)
3.15	电缆故障定位法	(250)
3.15.1	通过电阻测量确定故障点	(251)
3.15.2	通过电容测量确定故障点	(259)
3.15.3	通过运行时间测量确定故障点	(263)
3.15.4	通过感应测量确定故障点	(266)
3.15.5	电缆故障定位仪的结构	(270)
3.16	电测量放大器	(274)
3.16.1	电测量放大器的用途	(274)
3.16.2	负反馈	(275)
3.16.3	共模电压和共模抑制	(279)
3.16.4	漂移、噪声、测量灵敏度和频带宽度	(281)
3.16.5	放大器输出电路	(283)
3.16.6	测量放大器的结构和特性	(284)
3.16.7	测量放大器的装置	(288)
3.17	记录方法	(290)
3.17.1	缓变量记录仪	(290)
3.17.2	速变量记录仪	(300)

3.17.3 电子示波器	(319)
3.18 数字测量技术	(327)
3.18.1 数字测量仪器的用途和基本原理	(327)
3.18.2 编码	(328)
3.18.3 模数变换器	(329)
3.18.4 数字测量电路结构	(338)
3.18.5 测量值存储和测量值输出	(343)
3.19 遥测	(352)
3.19.1 模拟方法	(353)
3.19.2 数字方法	(365)
3.20 非电量电测量方法	(369)
3.20.1 电气温度测量仪	(369)
3.20.2 电气气体分析仪	(374)
3.20.3 湿度测量方法	(381)
3.20.4 非电量的电测法	(382)
3.20.5 液体和气体的流量及总量测量	(386)
3.20.6 力、应变和振动的测量方法	(387)
3.20.7 辐射测量仪	(395)

1 测量技术概念

1.1 测量的基础

测量技术的任务就是要在给定的时间内，以适当的准确度求得一个量的真实值，或者通过连续指示或记录这样的瞬时值来得到一个过程曲线的图象。测量就是把被测量和同类的参考量进行比较，这个参考量就是所谓的测量单位，或简称单位。

我们把不变的、国际上所承认的单位作为可复现的、通用的、可比较测量结果的基础。国际单位制是以长度、质量、时间、电流强度、温度、物质的量以及光强度为基础的。众所周知，对应的基本单位就是：米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)、摩尔(mol)和坎德拉(cd)。基本单位是以国际权度代表大会的国际协定为基础而采用的。在国际单位制中，对于每个量有一个单位，并且只有一个单位。

度量单位的原器，也就是基准器，保存在国际上特许的实验室里。尽管如此，人们仍努力用原子参数和任何地方都能测量的基本物理常数来复现这些单位。为了使测量单位的定义不断适应当时自然科学的状况，基础研究始终是围绕着发展新的测量方法来进行的。由此产生一些方法，根据这些方法来描述没有体现的单位，体现度量的单位在时间上是不

变的，并与体现度量单位的原器无关。当借助已经符合法定标准所规定的误差来建立校准工业仪表用的校准标准时，它所带来的不可避免的误差在大多数情况下，相对于测量仪表和测量方法的比较大的不确定度是可以忽略的。

1.2 误差及其对测量结果的影响

测量误差是由测量仪表的基本误差、环境引起的附加影响效应、测量方法误差以及观察者的个人误差组成的。

外界环境因素，例如：温度、空气压力、湿度、电压、频率、外部电场或外部磁场对测量结果均有影响。影响测量结果的个人误差是与观察者的注意力、熟练程度、视力和目测能力等有关的。

因为要涉及到灵敏度、准确度、自耗、频率范围、温度范围、曲线形状、分辨率、过载能力等等，所以在每次测量时都要仔细地选择最合适的测量方法和测量仪表，并且通过所给定的数据逐渐认识所期望的测量结果的准确度。

1.3 测量仪表的规则

由于电气测量仪表有多种性能，通过几个数据来表征一部测量仪表的性能是不容易的。实际上，即使是同类型的、具有相同准确度和同样过载能力的测量仪表，相互之间都会有很大的差别。为了避免厂商与用户之间的任意成交，以保证产品质量和运行的可靠性，所有工业国家都对测量仪表结构作了规定，并给符合这些规定的测量仪表加上特殊的标志。

在国际上，电气测量仪表的推荐标准由国际电气技术委员会制订。

德意志联邦共和国标准委员会 (DNA) 中的电工标准委员会 (FNE) 和德意志联邦共和国电工规程制定委员会 (VDE)——这两者现在都属于德意志联邦共和国电工委员会 (DKE)——决定, 在德国*的标准和规范中统一采用国际电工委员会 (IEC) 的推荐标准。

另外, 本书还引用了德国工业标准 (DIN) 和德国电气工程师协会 (VDE) 的规定, 以帮助理解。但使用电气测量仪表还必须熟悉那些有效的规范和标准。

1.4 准确度要求

1.4.1 基本误差

即使是一个经过十分细致调整的测量仪表所指示的数值也不是测量的真值, 而是一个含有或大或小误差的值。我们把仪表指示的值和真值之间的差值称为绝对误差 F 。当测量仪表的读数大时, 这个误差为正。

绝对误差 = 测量值 - 真值 = 实际值 - 额定值

相对误差是:

$$F_{r.01}\% = \frac{\text{实际值} - \text{额定值}}{\text{额定值}} 100\% = \frac{\text{测量值} - \text{真值}}{\text{真值}} 100\%$$

为了确定测量仪表的准确度, 基本误差是用参考值的百分数来表示的。参考值是根据德国工业标准 (DIN) 43781 来定的, 如测量范围终端值。

$$F_{r.01}\%_E = \frac{\text{实际值} - \text{额定值}}{\text{参考值}} 100\%$$

在带有非线性密集刻度的测量仪表中没有单独的线性刻度,

* 本书中“德国”均指德意志联邦共和国, 以下同。——译者注

参考值与刻度长度相符合。

基本误差是由于调整不十分准确，所使用的测量仪表在测量原理或在测量装置结构上的差错，以及摩擦和偶然性而产生的。在测量时，通过采取某些预防措施能够缩小基本误差。例如可以通过轻轻敲击来减小或消除摩擦误差。从小到大或从大到小接近同一个额定值的反向行程时两个读数是不同的，可以取两次读数的平均值消除反向死区。

德国工业标准和德国电气工程师协会允许各种等级的电气测量仪表有以下的误差范围：

准确度等级	0.05	0.1	0.2	0.5	1	1.5	2.5	5
误差范围±%	0.05	0.1	0.2	0.5	1	1.5	2.5	5

前提是遵守由厂方所说明的参考条件，例如，仪器的使用环境、额定频率或者额定频率范围都应在测量仪表刻度盘上加以说明。

1.4.2 影响因素

如果在其它参考条件下测量，还会出现附加误差。当某一个影响因素发生变化时，这些误差在额定使用范围内不容许大于上述表中所给出的数字。影响效应以参考值百分数来表示。几个影响因素是：

位置影响 如果不按正常的使用位置来使用测量仪表，那么，由于摩擦的变化以及不平衡，测量仪表就会有一个附加的位置误差。

温度影响 温度影响是由测量机构所用材料的电、磁和机械性能与温度的关系决定的，即由电的阻抗、磁阻、介质常数、矫顽力以及机械强度随着温度的变化和热膨胀而引

起的。

电压影响 有一定额定电压的测量仪表，在与额定电压偏离的情况下，由于转矩的改变和因为测量仪表中铁芯的饱和现象导致发热，所以有一个附加的读数误差。功率因数表、指针式频率计、电流比率计和功率表都是这样。例如，功率表在达到额定电流、 $1/2$ 额定电压，或 $1/2$ 额定电流、额定电压的情况下进行工作，可能指示出不同的测量值。

预热影响 在长时间和短间接通时，同一个测量值读数的差别被视为预热影响。这个差别是由于测量仪表结构材料的弹性和磁性，热膨胀以及阻抗和介质常数与温度关系的变化而产生的。一般来说，测量仪表在工作时的过热温度越高，差别就越大。对于精密测量仪表，不允许有因预热而引起的附加误差。这个误差包含在读数误差中。

频率影响 频率影响是由于铁耗和铜耗以及介质常数依赖频率的特性和与频率有关的电抗的存在而产生的。

一切具有明显频率影响的测量仪表也与交流电流的曲线形状有关。当交流电流曲线偏离正弦形状时，就产生附加误差。

功率因数影响 即使在相同的功率情况下，功率表的读数根据相移的大小仍然会有些差别。例如，功率表对下述情况可能指示出彼此偏差的值。

在额定电压、 $1/2$ 额定电流和 $\cos \varphi = 1$ 时；

在额定电压、额定电流和 $\cos \varphi = 0.5$ 感性时；

在额定电压、额定电流和 $\cos \varphi = 0.5$ 容性时。

外场影响 许多测量仪表是借助于永久磁铁或通电线圈所产生的磁场进行工作的。当有一个外部磁场叠加于这种测量磁场时，就会使测量仪表产生误差。在强电流输电线附近

安装测量仪表时，尤其要注意这一点。按 VDE 规定，在有一个 0.5 mT 的外部磁场时，要在最不利的电流种类、相位以及频率的情况下，检验外部磁场影响。几个同时存在的外部磁场可以用矢量相加构成一个合成磁场。

外电场也会引起误差，例如，在静电测量仪表中，测量场的改变或者静态充电和静电吸引力均会产生误差。必要时，必须屏蔽掉这些外部场。

在任何情况下都必须弄清可能出现的误差的大小，因此始终要十分仔细地检查测量结果所依据的基础以及可能出现的外部情况。只有不断地检查测量方法、测量仪表和周围环境，才能防止出现错误的测量结果。

1.5 系统误差和随机误差

1.5.1 系统误差

误差可以分为系统误差和随机误差。关于误差的定义及其计算见 DIN 1319*。

由所使用的量具和测量仪器产生的误差以及由可测定的周围环境的影响引起的误差属于系统误差，观察者的主观影响也被认为属于系统误差。系统误差具有一定的大小和一定的正、负符号，这种误差多数能通过修正加以消除。一般来说，它们是可以控制的。但是也存在着某些系统误差，它们的产生原因不清楚，因此无法修正。如前所述，一部分系统误差可以控制，而另一部分不可控制。虽然都是未知的，但是它们经常有一定的大小或符号。

* 指德国工业标准 DIN 1319。——译者注

1.5.2 随机误差

随机误差起因于测量仪器或周围环境的不可测定的变化，它们的大小和符号是波动的和不可控制的，这就是随机误差具有分散性的原因。

当同一个观察者在周围环境条件保持不变或环境的影响已被修正的情况下，用相同的测量仪器多次连续地测量同一个不变的被测量时，在进一步通过修正消除了所有可控制的误差之后，各单独测量的结果仍然各不相同，但它们却是围绕着一个平均值作分散性波动的。这种分散性仅仅是由于不可控制的随机误差而引起的，也恰恰是因为其随机性而不可控制和不能修正的缘故，这类随机误差可以认为是观察者认识中不能确定的波动，也是测量仪器难以确定的误差。例如轴承间隙、弹性后效应或机械工艺缺陷所引起的随机误差。随机误差在数值和符号上是波动的。

可由测得的几个单值按其所有的单值 A_i 的算术平均值求得平均值 \bar{A} ：

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$$

平均值比真值偏离一个微小的值，而且测量的次数越多偏离越小。

单值围绕平均值分布的最重要的指标是所谓离散度或均方根差（也叫作标准偏差） s ：

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}$$

在纯随机误差分布以及有足够多的测量数据时，单值 A_i 按著名的高斯误差分布定律围绕平均值 \bar{A} 分布。

1.5.3 系统误差的综合

一个函数 $M = f(x, y)$ 的最大可能误差可以通过系统误差 ax 和 by 以及两个相互独立的测量值 x 和 y 的容许误差来计算:

$$\Delta M = \frac{\partial f}{\partial x} ax + \frac{\partial f}{\partial y} by$$

a 和 b 必须比 1 小。

乘法 测量结果由两个具有容许误差的测量值的乘积得到

$$M = x \times y$$

那么测量结果的最大可能容许误差为

$$\Delta M = \pm x \times y(a + b)$$

测量结果的相对容许误差为

$$\frac{\Delta M}{M} = \pm (a + b)$$

因此, 测量结果的最大容许误差等于因子容许误差的和。在各单个因子容许误差相同的情况下, 因子数目越少, 乘积的偏差也越少, 也就是说, 人们要从许多可能的测量方法中优先采用最容易得到测量结果的方法。例如, 在测量仪器的容许误差相同的情况下, 功率的测量使用一个瓦特计比使用电流计和电压计准确些。

除法 采用除法时, 被除数和除数的容许误差在测量结果中相加。

$$M = \frac{x}{y}$$

$$\Delta M = \frac{x}{y} (\pm a \pm b), \quad \frac{\Delta M}{M} = \pm a \pm b$$

加法 $M = x + y,$

$$\Delta M = \pm (ax + by), \quad \frac{\Delta M}{M} = \pm \frac{ax + by}{x + y}$$

因此，采用加法时，容许误差的大小与相加数的大小有关。当相加数相差非常大时，测量结果的误差是由比较大的相加数的容许误差决定的。因此，必须特别准确地测量这个大数。

减法 $M = x - y$

$$\Delta M = \mp (ax + by), \quad \frac{\Delta M}{M} = \mp \frac{ax + by}{x - y}$$

正如上面等式所示，当 x 和 y 很大，而它们的差很小时，在相减时测量结果的误差可能很大，这就是为什么要避免采用大数的差值出现在测量结果中的测量方法。

1.5.4 随机误差的综合

通过计算容许误差得到测量结果的最大可能误差，在纯随机误差的情况下，平均误差是根据高斯误差分布定律得到的。如果测量结果 M 是自变量 x 和 y 的函数，亦即

$$M = f(x, y) \quad (1.5.1)$$

并由相同数量的单个值的测量系列按 (1.5.1) 式计算标准偏差 s_x 和 s_y ，这样，测量结果的标准偏差根据下式计算：

$$s_M = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} s_x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} s_y\right)^2}$$

如果 M 表示自变量 x 和 y 的积，自变量 x 和 y 的标准偏差分别是 s_x 和 s_y ，则标准偏差 s_M 计算如下：

$$M = f(x, y) = x \times y; \quad \frac{\partial f}{\partial x} = y; \quad \frac{\partial f}{\partial y} = x$$

$$s_M = \sqrt{(y \times s_x)^2 + (x \times s_y)^2}$$

如果 M 为一线性函数

$$M = ax + by$$

则测量结果的标准偏差为：

$$s_M = \sqrt{(a s_x)^2 + (b s_y)^2}$$

1.6 灵敏度

在刻度尺上读取测量值的测量方法或测量仪表，其灵敏度 E 系指可察觉的指针偏移 ΔL 与引起偏移的测量值变化 ΔM 之比：

$$E = \frac{\Delta L}{\Delta M}$$

因而，有刻度盘的测量仪表的灵敏度总是具有长度/测量值的量纲。由此可知，在指针式测量仪表上的所有测量值最终都归结为一个长度，因为人们只能读出长度。对一定的测量值的变化，指针的行程越长，测量仪表或测量方法的灵敏度越高。为了更准确地表达灵敏度，可以提出电流灵敏度、电压灵敏度、起始灵敏度等。灵敏度的倒数是测量仪表的常数，它是使指示标记移动一个刻度线时测量值的变化，例如人们常说的电流常数、冲击常数等。

对于数字式测量仪表，其灵敏度为数码步进值的读数变化 ΔZ 与引起的测量值变化 ΔM 之比：

$$E = \frac{\Delta Z}{\Delta M}$$

灵敏度并不是准确度，测量仪表或测量方法可以很灵敏但不准确，为此始终应当注意使灵敏度和准确度保持一个适