

第五篇 电测技术及仪表

主 编 费正生

副主编 孙愚蒙 牛 滨

执 笔 费正生 董怀武 张宝纯

牛 滨 李东滨 宋立新

孙愚蒙 李大明 周 严

主 审 马怀俭 王凤鸣

目 录

第 21 章 电测技术的一般知识

- 21.1 测量和计量……………5-4
- 21.2 电学基准……………5-4
- 21.3 测量的分类……………5-8
- 21.4 测量误差的类型……………5-9
- 21.5 消除系统误差的方法……………5-10
- 21.6 测量结果的处理……………5-10

第 22 章 模拟式仪表

- 22.1 磁电系仪表……………5-12
- 22.2 具有半导体变换器的
磁电系仪表……………5-13
- 22.3 电动系仪表……………5-14
- 22.4 电磁系仪表……………5-16
- 22.5 静电系仪表……………5-16
- 22.6 感应系电度表……………5-16
- 22.7 仪表选择及几种仪表
性能比较……………5-17
- 22.8 仪表的使用、维护、
保管和标志符号……………5-18

第 23 章 数字式仪表

- 23.1 概述……………5-20
- 23.2 数字频率计……………5-20
- 23.3 数字电压表 (DVM) ……5-21
- 23.4 数字多用表及微处理器
式数字表……………5-24
- 23.5 数字多用表的选择和使
用……………5-28
- 23.6 数字功率表……………5-30

第 24 章 直流测量及其仪器仪表

- 24.1 直流电位差计……………5-32
- 24.2 直流电桥……………5-33
- 24.3 直流电阻箱和直流分压
箱……………5-37
- 24.4 直流电压测量……………5-38
- 24.5 直流电流测量……………5-39

- 24.6 直流功率测量……………5-40

- 24.7 直流电阻测量……………5-41

第 25 章 交流测量及其仪器仪表

- 25.1 概述……………5-42
- 25.2 阻抗器件……………5-42
- 25.3 交流电位差计……………5-43
- 25.4 交流电桥……………5-44
- 25.5 交流电压和电流的测量……………5-45
- 25.6 交流功率和电能的测量……………5-47
- 25.7 频率、相位和功率因数
的测量……………5-50
- 25.8 谐波的测量……………5-50
- 25.9 交流参数的综合测量……………5-51
- 25.10 交流电参量的测量 ……5-52

第 26 章 自动测试系统

- 26.1 测试用接口系统……………5-55
- 26.2 IEC-625 自动测试系统
的组成……………5-63
- 26.3 自动测试系统的组建步
骤……………5-68
- 26.4 自动测试系统的故障诊
断……………5-69

第 27 章 磁测量

- 27.1 概述……………5-70
- 27.2 磁场的测量……………5-71
- 27.3 磁性测量……………5-74

第 28 章 非电量的电测量

- 28.1 非电量电测的一般问题……………5-78
- 28.2 加速度和振动的电测量
及其传感器……………5-80
- 28.3 位置和位移的电测量及
其传感器……………5-82
- 28.4 线速度、转速与流速的
电测量及其传感器……………5-84
- 28.5 转矩的电测量及其传感

第五篇 电测技术及仪表

主 编 费正生

副主编 孙愚蒙 牛 滨

执 笔 费正生 董怀武 张宝纯

牛 滨 李东滨 宋立新

孙愚蒙 李大明 周 严

主 审 马怀俭 王凤鸣

目 录

第 21 章 电测技术的一般知识

- 21.1 测量和计量……………5-4
- 21.2 电学基准……………5-4
- 21.3 测量的分类……………5-8
- 21.4 测量误差的类型……………5-9
- 21.5 消除系统误差的方法……………5-10
- 21.6 测量结果的处理……………5-10

第 22 章 模拟式仪表

- 22.1 磁电系仪表……………5-12
- 22.2 具有半导体变换器的
磁电系仪表……………5-13
- 22.3 电动系仪表……………5-14
- 22.4 电磁系仪表……………5-16
- 22.5 静电系仪表……………5-16
- 22.6 感应系电度表……………5-16
- 22.7 仪表选择及几种仪表
性能比较……………5-17
- 22.8 仪表的使用、维护、
保管和标志符号……………5-18

第 23 章 数字式仪表

- 23.1 概述……………5-20
- 23.2 数字频率计……………5-20
- 23.3 数字电压表 (DVM) ……5-21
- 23.4 数字多用表及微处理器
式数字表……………5-24
- 23.5 数字多用表的选择和使
用……………5-28
- 23.6 数字功率表……………5-30

第 24 章 直流测量及其仪器仪表

- 24.1 直流电位差计……………5-32
- 24.2 直流电桥……………5-33
- 24.3 直流电阻箱和直流分压
箱……………5-37
- 24.4 直流电压测量……………5-38
- 24.5 直流电流测量……………5-39

- 24.6 直流功率测量……………5-40

- 24.7 直流电阻测量……………5-41

第 25 章 交流测量及其仪器仪表

- 25.1 概述……………5-42
- 25.2 阻抗器件……………5-42
- 25.3 交流电位差计……………5-43
- 25.4 交流电桥……………5-44
- 25.5 交流电压和电流的测量……………5-45
- 25.6 交流功率和电能的测量……………5-47
- 25.7 频率、相位和功率因数
的测量……………5-50
- 25.8 谐波的测量……………5-50
- 25.9 交流参数的综合测量……………5-51
- 25.10 交流电参量的测量 ……5-52

第 26 章 自动测试系统

- 26.1 测试用接口系统……………5-55
- 26.2 IEC-625 自动测试系统
的组成……………5-63
- 26.3 自动测试系统的组建步
骤……………5-68
- 26.4 自动测试系统的故障诊
断……………5-69

第 27 章 磁测量

- 27.1 概述……………5-70
- 27.2 磁场的测量……………5-71
- 27.3 磁性测量……………5-74

第 28 章 非电量的电测量

- 28.1 非电量电测的一般问题……………5-78
- 28.2 加速度和振动的电测量
及其传感器……………5-80
- 28.3 位置和位移的电测量及
其传感器……………5-82
- 28.4 线速度、转速与流速的
电测量及其传感器……………5-84
- 28.5 转矩的电测量及其传感

器.....5-84
28.6 压力的电测量及其传感
器.....5-87
28.7 流量的电测量及其传感
器.....5-87

28.8 温度的电测量及其传感
器.....5-90
28.9 温度的电测量及其传感
器.....5-91

参考文献

第 21 章 电测技术的一般知识

21.1 测量和计量

我们要认识和改造客观世界, 测量是一个不可缺少的过程。测量几乎贯穿在人们活动的各个方面。我们不但要认识客观世界各种事物和现象的性质, 还要掌握它们在数量方面的相互关系, 这样才能使认识过程提高一步。况且质量和数量是相互依存的, 任何事物的质的变化, 总是通过一定的数量界限来体现的。

为了使认识过程深化到定量这一目的, 我们必须有一定的依据。这就是说, 必须制定出各种量的单位。测量就是将被测的量和某一取为单位的数值进行比较的实验过程。近代自然科学是从有了实验科学之后才真正形成的。重要的实验数据可以把假说上升为理论。同时, 很多实验数据还成为发现新问题, 提出新理论的线索和依据。著名科学家门捷列夫用一句话概括了测量对科学的作用。这句话就是“没有测量, 就没有科学”。

现代工业用到测量上的工时和费用约占整个生产费用的20%~30%。在国民经济的各个领域, 测量水平的提高, 测量费用的降低, 测量误差的减小, 测量效率的提高, 在很大程度上决定于测量手段的现代化, 而测量手段的现代化, 已被公认为是科学技术和国民生产现代化的一个重要标志。

随着生产的发展, 商品的交换和国内外的交往, 出现了大家公认的统一单位, 以及体现这些单位的基准、标准, 以及用这些基准和标准来校准的测量器具, 从而形成了与测量有联系而又有区别的关于测量的新概念, 这就是计量的概念。也可以说, 计量是为保持量值的统一和准确一致所进行的一种测量。它必须具有三个主要特征, 即统一性、准确性和法制性。计量工作主要是把未知量与经过准确确定, 并经国家计量部门认可的基准或标准相比较来加以测定, 也就是通过建立基准、标准来进行量值传递, 因而包含了为达到统一和准确一致所进行的全部活动。例如: 单位的统一; 基准和标准的建立; 计量监督管理; 测量方法及其手段的研究等。

凡能用来直接或间接测出被测对象量值的量

具、计量仪器和计量装置都统称为计量器具。计量器具按用途可分为计量基准、计量标准和工作用计量器具三类。

计量基准一般又分为国家基准、副基准和工作基准。国家基准又叫主基准, 它用来复现和保存计量单位, 具有现代科学技术所能达到的最高准确度。它经国家鉴定并批准, 并作为统一全国计量单位量值的最高依据的计量器具。通过直接或间接与国家基准比对来确定其量值, 并经国家鉴定批准的计量器具称为副基准。建立副基准的目的主要是代替国家基准的日常使用, 也可以用于验证国家基准的变化。经与国家基准或副基准校准或比对, 并经国家鉴定, 实际用以检定计量标准的计量器具称为工作基准。工作基准主要用于一般量值传递, 以防止国家基准或副基准由于使用频繁而丧失其应有的准确度或遭到损坏。

计量标准是按国家规定的准确度等级, 作为检定依据用的计量器具或物质, 它的量值是由工作基准传递来的。计量标准将基准所复现的单位量值, 通过检定系统逐级传递到工作用计量器具; 以保证量值的准确和一致。计量标准有两类: 一类是标准器具; 另一类是标准物质。

不用于检定工作, 而只用于日常测量的计量器具称为工作用计量器具。但是工作用计量器具要定期用计量标准来检定, 即由计量标准来评定它的计量性能(如准确度、稳定度、灵敏度等)是否合格。

从上面的讨论可以看出, 计量的出现是测量发展的客观需要, 测量还是计量联系生产实际的重要途径, 可以说没有测量就谈不上计量。但是测量数据是否准确可靠, 则要求计量予以保证。没有计量, 测量也将失去价值。

21.2 电学基准

1960年, 第十一届国际计量大会正式通过了国际单位制(SI)。SI是由MKSA有理单位制发展而来, 它是由m(米)、kg(千克)、s(秒)、A(安培)、K(开尔文)、cd(坎德拉)和mol(摩尔)七个基本

单位组成的单位制。其中电学单位是根据电流的定义由绝对测量导出的绝对单位。我们知道，这种按力学量的基本单位（米、千克、秒）来复现电单位的实验称为电单位的绝对测量。所谓绝对测量，是一种实验工作，由绝对测量得到的绝对电学单位，并不是在具体的实物或装置上确定的数值，也没有实用性。电流的复现，初期主要使用电流天平，但其准确度多年来一直停滞在 10^{-6} 量级。电压单位的复现更为困难，曾提出过电压天平，但所能达到的准确度还比不上电流天平。准确度较高的是欧姆单位的复现，利用计算电容的方法来复现欧姆单位可达到 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 的不确定度。

近年来，利用量子现象来建立电学单位的自然基准已取得了令人瞩目的成果，如利用交流约瑟夫逊（Josephson）效应来建立电压自然基准和利用克里青（Klitzing）效应来建立电阻自然基准等。

在电压实物计量标准方面，也可用齐纳二极管制成标准电压装置，其不确定度近年来已小于 2×10^{-8} 。通过选定工作电流的方法，可使齐纳二极管在 $25 \sim 70^\circ\text{C}$ 的范围内获得 $0.1 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ 的温度系数。因此有可能逐步取代经典的惠斯登（Weston）标准电池。

21.2.1 电流的绝对测量

电流单位安培（A），是国际单位制中七个基本单位之一。安培的定义是：在真空中，截面积可忽略的两根相距1m的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时，若导线间相互作用力在每米长度上为 $2 \times 10^{-7}\text{N}$ ，则每根导线中的电流为1A。按这个定义来进行实验，实际上是不可能的。一般采用图21-1所示的雷利（Rayleigh）式电流天平。图21-1中， F 为多层固定线圈， M 为多层可动线圈。若同轴线圈

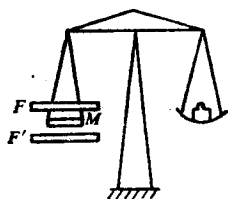


图 21-1 雷利式电流天平原理图

的互感为 $M(x)$ ，轴方向位移为 x ，电流为 I 时，则力

$$F = I^2 \frac{\partial M(x)}{\partial x} \quad (21-1)$$

这种天平没有必要测量线圈尺寸的绝对值。利用安培天平复现电流单位安培的精度约为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级。

由于安培天平复现电流单位的精度并不高，同时很难用真实的稳定电流来保存，所以实际上都是根据欧姆定律通过具有实物基准的电压单位和电阻单位来保存电流单位。

21.2.2 电阻的绝对测量

近年来世界各国逐渐开展了通过计算电容来对电阻进行绝对测量的工作。1956年，澳大利亚标准研究所的汤普逊（Thompson）和兰帕特（Lampard）发现了一个静电学定理，根据这个定理，可以制成一种柱状结构的电容器，不论其横截面的形状如何，其电容量只取决于轴向长度。轴向长度可用激光干涉仪精确计量，因而使计算电容的不确定度可达到 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 量级。

汤普逊和兰帕特证明，将如图21-2a所示的任

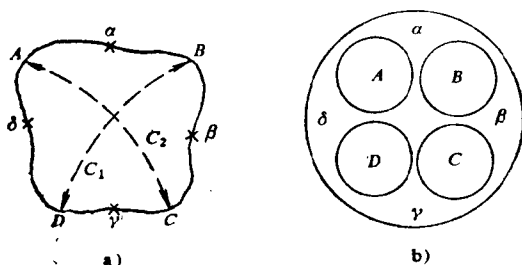


图 21-2 交叉电容的原理结构示意图

意形状柱面电极放在真空中，由 α 、 β 、 γ 、 δ 四处的微小间隙互相绝缘分离为四部分。实际上，柱面可由四根非常靠近而又相互绝缘的金属棒组成，如图21-2b所示。若将A、C部分接地，则B-D部分间的内部电容为 C_1 。若B、D部分接地，则A-C部分间的内部电容为 C_2 。设垂直纸面方向的长度为 L ，当 $C_1 = C_2$ 时，则电容

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} L = \frac{10^7 \ln 2}{4\pi^2 C^2} L \quad (21-2)$$

式中 $\epsilon_0 = 10^7 / 4\pi c^2 (\text{F/m})$;

上式中 c 为光速， $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}$;

将 c 值代入式（21-2），得单位长度的电容为 $C_0/L = 1.953549043 \text{pF/m}$ ，即约为 2pF/m 。光速的测量误差推断为 4×10^{-9} ，则计算电容的理论误差为 8×10^{-9} ，误差值主要取决于长度测量。若 C_1 、 C_2 稍有不，则要取其平均值，即

$$C_m = \frac{C_1 + C_2}{2} = C_0 \left\{ 1 + \frac{\ln 2}{8} \left(\frac{\Delta C}{C_0} \right)^2 - \frac{(\ln 2)^3}{192} \left(\frac{\Delta C}{C_0} \right)^4 + \dots \right\} \quad (21-3)$$

式中, $\Delta C = C_1 - C_2$, 若 $(\Delta C/C) < 3.4 \times 10^{-4}$, 则其校正项小于 1×10^{-8} , 在允许的精度内可认为 $C_m = C_0$ 。

实际的计算电容器如图 21-2b 所示。其中柱面系由直径相同的四根非常靠近而又相互绝缘的平行金属棒组成。当然, 金属棒不可能是无限长, 因而不可避免地存在“端部效应”。但这可通过改变棒的长度利用差值计量法将其消除。

交叉电容值一般为 1pF, 通常都是将该电容值通过 10:1 的变压器电桥传递给较容易保存量值的 10pF 电容基准。

我国的计算电容的不确定度为 3.5×10^{-7} 。

为利用计算电容所传递的电容量值来绝对计量电阻 原则上可采用图 21-3a 所示的桥式电路。其中, U_1 、 U_2 是由感应分压器提供的幅值相等, 相

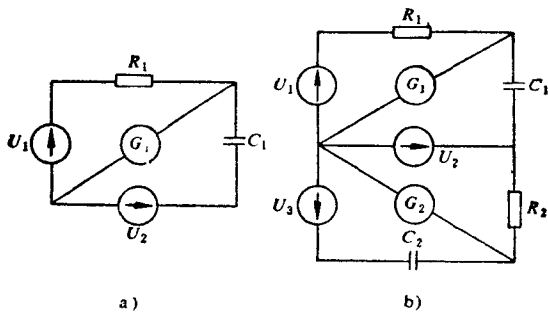


图 21-3 测量电阻的电桥原理电路

位相差 90° , 连续可调的交流电压。当检流计 G_1 指零时, 有

$$R_1 = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{1}{\omega C_1} \quad (21-4)$$

式中 ω 是角频率。

这样, 通过电容和频率便可得出电阻。实际上, 常采用图 21-3b 所示的双桥电路。其中, U_3 也是由感应分压器提供的与 U_1 的幅值相等, 但相位相反的交流电压, R_2 和 C_2 分别是与 R_1 和 C_1 名义值相等的电阻和电容。当 G_1 、 G_2 皆指零时, 有

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{\frac{1}{\omega C_1}} \quad (21-5)$$

$$\frac{U_2}{U_3} = \frac{R_2}{\frac{1}{\omega C_2}} \quad (21-6)$$

由上面二式可得

$$R_1 R_2 = \frac{U_1}{U_3} \cdot \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2} \quad (21-7)$$

由此可见, 该法可在对 U_2 的 90° 相移要求不甚严格的情况下求出电阻值。

21.2.3 电压实物基准

目前使用的电压实物基准, 主要是惠斯登饱和标准电池, 如图 21-4 所示。这是一种化学原电池, 密封在 H 形玻璃管内。在硫酸镉饱和溶液内, 往往

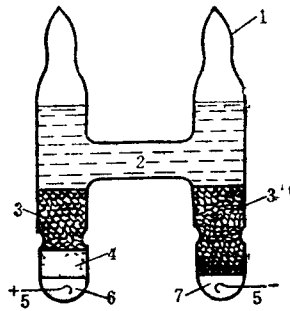


图 21-4 惠斯登饱和标准电池

1—玻璃电容 2—硫酸镉饱和液 3—硫酸镉结晶
4—去剂剂 5—铂引线 6—水银 7—铜汞合金

添加少许硫酸, 使溶液呈弱酸性, 可以提高电动势的稳定性。电极用铂丝经玻璃管壁引出。电池内阻约为数百欧。制作良好的饱和型标准电池的电动势具有优于 $1\mu\text{V}$ 的年稳定性, 但温度系数较大, 约为 $-40\mu\text{V}/\text{K}$ 。为了保持电动势的高度稳定性, 必须使用恒温稳定性为 $1 \sim 5\text{mK}$ 的恒温油槽。近年来, 也发展了空气恒温槽, 其稳定性优于 1mK 。国产饱和型标准电池的温度修正公式如下:

$$E_t = E_{20} - 39.94 \times 10^{-6}(t-20) - 0.929 \times 10^{-8}(t-20)^2 + 0.0090 \times 10^{-6}(t-20)^3 - 0.00006 \times 10^{-6}(t-20)^4 \quad (21-8)$$

式中 E_{20} 为 20°C 时的电动势, t 为温度, $^\circ\text{C}$ 。

式 (21-8) 的适用温度范围为 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

为了得到更稳定、更精确的标准电压, 往往将若干个标准电池组合在一起构成电池组, 取其电动势的算术平均值。目前一些国家所保存的电压基准组的标准电池数是: 美国为 40 个, 苏联为 20 个, 法国为 10 个, 日本为 10 个, 中国为 20 个。这些基准电

池组的年变化率约为 $(1\sim 2)\times 10^{-7}$ 。

使用标准电池时，应特别小心，任何情况下绝对禁止将标准电池短路，亦不得过载，通过或取自0.01级以上精度的标准电池的电流不得大于1 μ A。不能让人体的任何部分将标准电池短路，更不得用一般的指针式万用表直接测量标准电池的电动势。标准电池应远离热源，免受强光或射线照射，严禁倒置、摇晃或振动，搬动或运输后必须静止一段时间（半小时至几天，视具体情况而定）方能使用。

21.2.4 电阻实物基准

目前，电阻单位量值复现的不确定度已小于 1×10^{-7} 。同时，电阻量值也可以用良好的实物基准，即标准电阻来复现和保存，使用非常方便。

为获得尽可能高的稳定欧姆值，各国普遍采用若干个名义值为1 Ω 的标准电阻组成电阻基准组来保存电阻单位，如国际计量局和美国的电阻基准，都是由10个1 Ω 的标准电阻所组成，单个电阻值的年变化率不超过 1×10^{-7} 。我国的电阻基准亦由10个1 Ω 的标准电阻组成，单个电阻值的年变化率为 2×10^{-7} 。

标准电阻是用具有低温度系数的合金丝（如锰镍铜合金丝）绕制而成的。电阻经退火处理后置于装满纯矿物油或惰性气体的密闭容器中，以保证阻值的稳定。 $10^4\sim 10^6\Omega$ 的高电阻使用含Al等的Ni-Cr系精密电阻细线。电阻和温度的关系通常用下式表示：

$$R_t = R_{20} \{ 1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \} \quad (21-9)$$

式中 R_t 和 R_{20} 为 t 和 20°C 时的电阻值； α 和 β 为电阻的一次和二次项温度系数。

高质量的标准电阻在 20°C 附近的温度系数约为 $1\times 10^{-8}\text{K}^{-1}\sim 5\times 10^{-9}\text{K}^{-1}$ 。

为消除连接导线的电阻对标准电阻的影响，实用的标准电阻都制成四端钮结构，如图21-5所示。四个端钮都安装在标准电阻的面板上，其中， C_1 、 C_2 是电流端钮， P_1 、 P_2 是电位端钮。

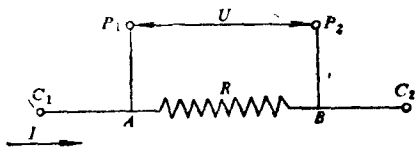


图 21-5 标准电阻原理图

标准电阻虽不像标准电池那样娇气，但使用时亦应注意环境温度和额定功率。环境温度及其稳定性，可根据标准电池的规定使用温度及温度系数确定。额定功率一般限制在0.1W以下，对特别精密的计量则应限制在0.01W以下，以免电阻丝发热而引起阻值的变化。

21.2.5 自然基准

实物基准是由极大量的原子和分子组成的宏观物体，它们的尺寸、成分、固有振动频率等物理、化学特性，可能由于温度、湿度、气压以及在使用中的老化、磨损等外界因素的影响而发生各种无法控制的变化。更为精确而稳定的计量单位正在逐步建立在微观系统的基础上。因为微观世界遵循量子定律，具有内在的稳定性和齐一性，这正适于用来建立稳定的可以准确复制的计量单位基准，这就是自然基准。

(1) 约瑟夫逊效应电压基准 若用一个频率为 f （如10GHz）的高频能量去辐射弱耦合的约瑟夫逊结，则当超导电流超过临界值 I_c 时，超导结的 I - V 特性曲线便会出现阶梯（跳跃）式的变化，如图21-6所示。根据理论，设第 n 个阶跃电压为 U_n ，普朗克常数为 h ，电子电荷为 e 时，有

$$U_n = \frac{n\hbar}{2e} f \quad (21-10)$$

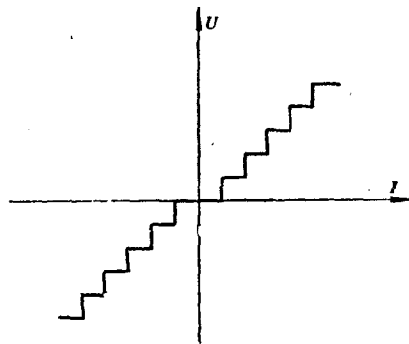


图 21-6 约瑟夫逊器件的电流-电压特性图

由上式可见，由于 $\hbar/2e$ 为一恒定值，也称磁通量子，故可通过频率导出电压值，而频率 f 的计量精度目前已可达 10^{-14} 量级。用这种效应可使电压的复现精度达到 10^{-8} 量级或更高。

1975年，电学咨询委员会（CCF）建议以确定的 $2e/h$ 值导出电压基准，多数研究所采用了1972年

宣布的数值, 为 $2e/h = 483594.0 \text{ GHz/V}$ 。

单个约瑟夫逊结上的电压较小, 一般约 $1 \sim 10 \text{ mV}$ 。日本曾研制出由20个约瑟夫逊结串联组成的复合约瑟夫逊结, 获得了约 100 mV 的电压。最近, 原联邦德国采用大规模集成电路和微波技术相结合的方法, 研制出了由1400多个结串联而成的约瑟夫逊器件, 其输出电压达到了 1.2 V , 甚至更高, 使约瑟夫逊电压基准的复现精度达到 10^{-9} 量级。但由于基本物理常数 e 和 h 的计量精度目前仅为 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ 量级, 所以, 尽管约瑟夫逊电压基准有很高的复现性, 但严格地讲, 仍不能认为是绝对电压值。

(2) 克里青 (Klitzing) 效应电阻基准 1980 年德国学者克里青发现了一种新的量子效应, 被称为克里青效应, 利用该效应可望建立起电阻自然基准。克里青效应的简单原理如下: 若将 MOS 场效应晶体管置于磁感应强度 B 为 $10 \sim 15 \text{ T}$ 的超导磁体中, 则在强磁场的作下, 该晶体管基体表面沟道中流动的电子便受到洛仑兹力的作用, 从而产生回转运动, 致使基体表面的两侧产生霍尔电动势。由于处于低温下的电子热运动的弛豫时间远大于回转周期, 故而此时的电子状态将形成一系列的兰道能级, 且每个能级可容纳的电子数 N_i 为 eB/h (其中, e 为电子电荷, h 为普朗克常数)。充满 i 个能级的电子数 N 为 $iN_i = ieB/h$, 霍尔电势 U_H 为 IB/N_e , I 为电流, 于是等效电阻

$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{h}{ie^2} \quad (21-11)$$

式中 h/e^2 具有电阻的量纲, 约为 $25.8 \text{ k}\Omega$ 。

这样, 就可以利用克里青效应, 通过物理常数 h 、 e 和正整数 i 来建立电阻的自然基准。

21.2.6 其它

(1) 电容 标准电容器的介质通常有气体 (如空气、氮气) 和固体 (如云母、石英) 两种。标准电容大都用导体将两个极板屏蔽起来, 制成三端钮电容。屏蔽的导体与极板间形成的杂散电容可通过适当的计量方法予以消除。

近年来, 电容基准一般都是由几只 10^6 pF 的熔融石英电容器组成, 其年变化约为 10^{-7} 量级, 精度一般约为 10^{-8} 量级。

(2) 电感 电感基准有自感和互感两种。电感基准一般由几只 10 mH 的标准电感组成, 其精度约为 10^{-8} 量级。我国电感基准的精度约为 3×10^{-8} 。有些国家的电感基准是由可计算的电感线圈得到的,

精度可达 1×10^{-8} 。

(3) 交流电的计量 交流电的计量迄今为止都是以直流电的计量为基础。因此, 交流电的计量的核心是交直流转换技术。

交直流转换的方法主要有静电法、电动法和热偶法。

静电式 (亦称象限静电计式) 交直流转换标准系由一个固定极板和一个可动极板构成。当两极板间分别加上交流电压和直流电压后, 若可动极板两次偏转的角度相同, 则认为两个电压的有效值相等。

电动式 (亦称电力计式) 交直流转换标准是由一个固定线圈和一个可动线圈串联而成。当两个线圈分别通上交流电流和直流电流后, 若可动线圈的两次偏转的角度相同, 则认为两个电流的有效值相等。

热偶式交直流转换标准利用交流和直流的热电等效的原理。热偶由热偶丝和加热丝组成。热偶丝由两种不同的金属材料 (如铁-康铜、铜-康铜、镍-镍铬合金等) 组成, 其公共结点与加热丝之间用导热性好的电绝缘珠相连。

由于热偶的加热丝很细, 对交直流的响应基本相同, 故当交直流电流分别通过加热丝时, 若两者所产生的热电动势相同, 则可认为交直流电流的有效值相等。

热偶的交直流转换精度已可达 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级。世界各国实用的交直流转换标准, 几乎都用热电偶制成。我国也采用多元热偶来制成交直流转换标准, 转换精度已达 10^{-6} 量级。

21.3 测量的分类

仅仅确定了电学单位并制备了实物基准, 在实际测量过程中, 还是不能满足要求, 还必须根据被测对象来选定测量方式和测量方法, 并从而确定测量仪器和仪表。

21.3.1 测量方式的选择

(1) 直接测量 将被测量与标准量直接比较, 或用事先刻度好的测量仪表进行测量, 从而求得被测量的数值, 这种测量方式称为直接测量。例如, 用数字电压表测量电压即属于直接测量。

(2) 间接测量 未知被测量按某种函数关系与几个便于测量的量相联系, 先分别直接测量这几个量的数值, 再通过函数关系求得未知的被测量,

这种测量方式称为间接测量。例如,利用导体的电阻 r 与它的长度 l 及截面 q 之间的关系式 $r=\rho l/q$,直接测量出 r , l 和 q 后,即可间接求得电阻系数 ρ 。

(3) 组合测量 如被测量有多个,而且能以某些可测量的不同组合形式表示(或者改变测量条件来获得某一可测量的不同组合)时,可先通过直接或间接地测量这些组合的数值,再通过解出联立方程组而求得未知的被测量数值,这种测量方式称为组合测量。例如,要求测量电阻温度系数 α , β 及 20°C 的电阻值 r_{20} 时,可先测出三个已知温度 t_1 , t_2 和 t_3 下的电阻 r_{t_1} , r_{t_2} 和 r_{t_3} ,再通过求解下述联立方程组而求得 α , β 及 r_{20} 。

$$\left. \begin{aligned} r_{t_1} &= r_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2] \\ r_{t_2} &= r_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2] \\ r_{t_3} &= r_{20}[1 + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2] \end{aligned} \right\} \quad (21-12)$$

21.3.2 测量方法的选择

在测量方式选定之后,即可根据对准确度的要求和具体试验条件,选择相应的测量方法。

(1) 直读法 用直接指示或显示的模拟仪表或数字仪表读取被测量数值的方法称直读法。这种方法最为常用,比较简便。

(2) 比较法 将被测量与标准量通过比较仪器进行比较,从而求得被测量数值的方法称为比较法。根据被测量与标准量进行比较时的具体特点,比较法又分三种。

1) 差值法 测出被测量与标准量的差值,从而求得被测量的方法称差值法。差值法的测量误差取决于标准量的误差及测量差值的误差,差值越小,则测差值的误差对测量误差的影响越小。例如,差值为千分之一,测差值的误差为百分之一时,则测差值的误差反映在测量误差中仅为十万分之一。

2) 零值法(平衡法) 在测量过程中,连续改变标准量,使之与被测量相等,亦即使差值为零,从而确定被测量的方法称零值法。由于比较时测量电路处于平衡状态,故又称平衡法。电位差计就是一种零值法测量仪器。

3) 替代法 将被测量与标准量先后替代接入同一测量装置,在保持测量装置工作状态不变的情况下,用标准量值来确定被测量的方法称为替代法。替代法常用于同名义值标准量具,如标准电阻的测量。

21.4 测量误差的类型

在任何测量过程中,无论采用多么完善的测量方法和多么准确的测量仪器仪表,都不可避免地会产生测量误差。通常将误差按各种形式分类。

21.4.1 按误差的数学表达式划分

(1) 绝对误差 已测得的被测量之值 X 与其实际值 X_0 之间的差值称为测量的绝对误差,绝对误差

$$\Delta X = X - X_0 \quad (21-13)$$

(2) 相对误差 绝对误差与被测量的实际值之比称为测量的相对误差,相对误差

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \quad (21-14)$$

(3) 引用误差 为了便于区分仪表和仪器的准确度等级,在用(21-14)式求相对误差时,改为取仪表仪器的量程,即满刻度值 X_m 作为分母,这就引出了引用误差,引用误差

$$\gamma_n = \frac{\Delta X}{X_m} \quad (21-15)$$

21.4.2 按误差的来源划分——工具误差与方法误差

(1) 工具误差 工具误差是由测量仪器中各个环节的不完善而产生的误差。

(2) 方法误差 方法误差是由于测量方法不完善或理论上的缺陷所引起的误差。

21.4.3 按误差出现的规律划分——系统误差、随机误差与粗大误差

(1) 系统误差 系统误差是遵循一定规律或在测量过程中保持不变的误差。例如,测量仪表的刻度不准确,周围温度对仪表的影响等所引起的误差。

(2) 随机误差 随机误差是指按照统计规律变化的误差,又称偶然误差。例如,在相同条件下,对同一未知量重复多次进行测试,在测量系统灵敏度足够高的情况下,每次测量的数据总不会重复同一数值,这主要是由于那些对测量值影响较微小,又互不相关的多种因素共同造成的。例如,热骚动,噪声干扰,电磁场的微变,空气扰动,大地微振等。

(3) 粗大误差 粗大误差又称过失误差,它是由某种过失引起的明显与事实不符的误差。它主要是由于操作不当,读数、记录和计算错误,测

试系统的突然故障、环境条件的突然变化等疏忽因素而造成的误差。

(4) 正确度、精密度和准确度 在一次测量中, 如果系统误差很小, 那么测量结果就是相当正确的。如果进行多次重复测量时, 各次测量所得结果相当一致, 离散甚小, 那就说明随机误差相当小, 可说测量结果是相当精密的。测量的精密度高, 则表明测量结果的重复性愈好。现以射击为例, 以靶心比作真值, 靶上的着弹点如图 21-7 所示, 图 a 为既分散而又偏斜, 就是既不精密, 也不正确, 即不准确; 图 b 为落点较分散, 但就总体而言却大致都围绕靶心, 即正确而欠精密; 图 c 为着弹点互相很靠近, 但都偏在一边, 这就是精密而欠正确; 图 d 为着弹点互相很接近, 而且又都很接近靶心(真值), 这就是既精密而又正确。

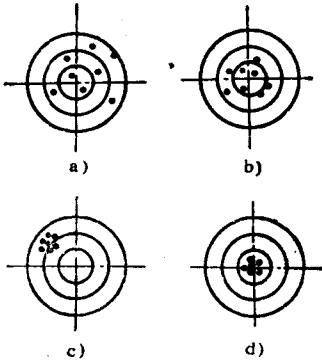


图 21-7 以射击比喻测量

1—不准确 2—正确而欠精密 3—精密而欠正确 4—准确

21.4.4 按使用条件划分——基本误差和附加误差

(1) 基本误差 仪器或传感器在标准条件下使用时所具有的误差称为基本误差, 它属于系统误差。所谓标准条件如温度为 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 电源电压为 $220\text{V} \pm 10\%$ 等。

(2) 附加误差 当使用条件偏离标准条件后, 仪器在基本误差的基础上增加的系统误差, 称为附加误差。

21.4.5 按被测量稳定性划分——静态误差与动态误差

(1) 静态误差 被测量稳定、不随时间变化的测量误差称为静态误差。

(2) 动态误差 在被测量随时间而变化的过程中所产生的附加误差称为动态误差。由于传感器或测试系统对动态信号需要一段响应时间, 加上各类传感器对不同频率的被测信号的灵敏度和时间延迟也不相同, 使输出信号与输入信号的波形不能完全一样, 因而造成了动态误差。

21.5 消除系统误差的方法

为使被测量的值尽量接近于实际值, 就必须: 第一, 要尽可能地消除系统误差的出现; 第二, 根据实验数据的结果对它与被测量实际值的近似程度加以评价, 或者说对测量精度加以评价。下面先指出消除系统误差的一般方法。

21.5.1 按正反向补偿误差

需要补偿时可进行两次测量, 使系统误差在测量结果中一次为正, 而另一次为负。这样, 在这样两种情况下获得的数值的总和之半将与恒定的系统误差无关。

例如, 假定测量对象是通过直流电流的线圈的磁场强度。外界的恒定磁场(例如地磁场)将叠加在被试磁场上并歪曲测量结果, 因而将产生某种系统误差。如在测量时改变线圈中电流的方向或将线圈在空间中转动 180° , 则被测量的符号变为相反, 而误差也将改变其符号。取所得二值的总和之半, 所得结果将消除系统误差的影响。

21.5.2 用替代法消除误差

此法归结为将被测量值用已知的等值量来置换(参看替代法, 第 21.3.2 节), 置换时要使测量装置的状况及其作用均保持不变。这时, 由装置的特性引起的系统误差将被消除。

21.5.3 用引入校正值得消除误差

如果系统误差为已知, 则可在测量结果中引入相应的校正值。如在测量线圈磁场时, 可以先切断线圈中的电流, 预先测定外界磁场的强度, 从而引入校正值。

21.6 测量结果的处理

系统误差被消除后, 需对测量结果中包含的随机误差加以处理。与系统误差不同, 随机误差处理的理论基础是概率统计, 是根据在同一条件下进行多次重复测量所得的一系列结果, 估计出一个尽可能接近理想的结果, 并求出这个估值在一定的置信限内的置信度。对于随机误差所作的概率统计处,

理,是在完全排除了系统误差的前提下进行的。

如在相同条件下对同一个被测量进行 N 次测量,其值为 x_1 至 x_2 时有 N_1 个, x_2 至 x_3 时有 N_2 个, ..., 而 $N_1 + N_2 + \dots = N$, 可据此绘出统计直方图,如图21-8所示。我们可估计出最接近真值 A_0 的一个估值 \bar{x} , 则可用真误差 ξ 来作直方图的横坐标,如图21-8下方所示。

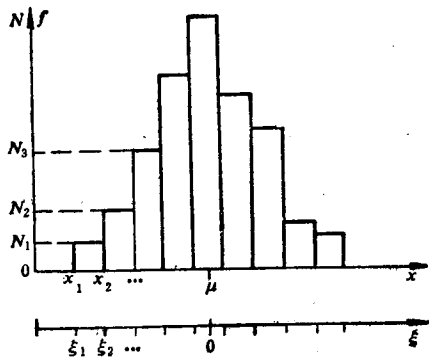


图 21-8 统计直方图

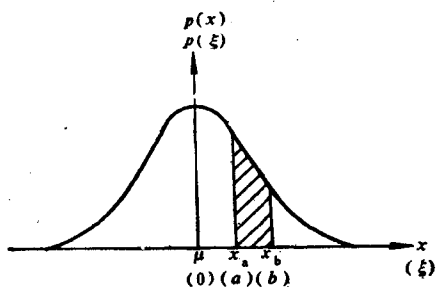


图 21-9 误差的正态分布

如测量的分辨力足够高,可把统计区间划分得足够细,取 $(x_i, x_i + dx)$ 为区间,则直方图的包络就将由梯形趋于一条平滑的曲线,如图21-9所示。当取样的数目 $N \rightarrow \infty$, 而区间宽度 $dx \rightarrow 0$ 时,样本出现的频率 $P_i = N_i/N$, 就是出现的概率密度 $p(x)$ 。图21-9所示的曲线就是概率密度分布曲线,也叫偶然误差的正态分布曲线,它可用下式表示:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

或

$$p(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right] \quad (21-16)$$

式中

$$\sigma = \lim_{N \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i^2} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (21-17)$$

σ 是一系列测量的均方根误差,又叫标准偏差。

误差在某一区间出现的概率,可以通过对正态分布的积分来求得。可计算得

$$P\{|\xi| \leq 3\sigma\} = 0.9973$$

$$P\{|\xi| > 3\sigma\} = 1 - 0.9973 \approx 3/1000$$

由此可见 $|\xi| > 3\sigma$ 的情况出现的可能性极小,因此习惯上有时也称 3σ 为最大误差或极限误差。

一系列等精度测量 x_i 的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{1}{N} (x_1 + x_2 + \dots + x_N) \quad (21-18)$$

当 N 为无限时, \bar{x} 就是真值 A_0 的最佳估值 μ 。实际测量中, N 一般取 4 至 20。

标准偏差 σ 是以真误差 $\xi = x - \mu$ 来定义的。实际上我们既不知道 ξ , 也不知道 μ 之值,我们只知道各次测量结果 x_i 以及 μ 的估值 \bar{x} 。因此,通常采用各次测量结果 x_i 的残余误差

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (21-19)$$

σ^2 的无偏估值 $\hat{\sigma}^2$ 与 v_i 的关系为

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N v_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (21-20)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (21-21)$$

这个公式常称为贝塞尔公式。

如果遇到残余误差的绝对值 $|v_i|$ 超过 3σ , 那么这个数据就很值得怀疑。当出现大误差时,应检查该次测量是否有差错。如无差错,则应从某种瞬变系统误差(例如电力网电压突然跳动)方面去寻找原因。在有根据时把该次异常的测量结果剔除,也可增补测量次数,取得更多数据,以减弱大误差的影响。

第22章 模拟式仪表

22.1 磁电系仪表

22.1.1 测量机构(表头)

其结构如图22-1所示,在永磁系统的辐射磁场内放入一个通有直流电流 I_0 的活动线圈,它与磁场相互作用产生一个与电流成比例的转矩。当转矩与游丝产生的反作用力矩平衡时,仪表达达到稳定偏转,其偏转角

$$\alpha = S_I I_0 \quad (22-1)$$

式中 $S_I (= \alpha/I_0)$ ——机构对电流灵敏度,其倒数为机构电流常数。

磁电系测量机构标尺均匀,只适用于直流测量,可制成直流电流表、电压表、电阻表和检流计。如果将测量机构和半导体变换器相组合,还可用来测量交流电流、电压、功率、频率和相位。

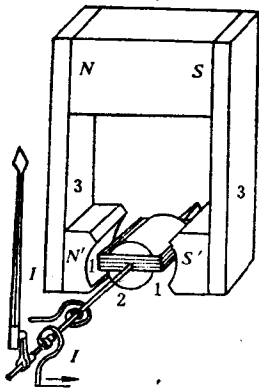


图 22-1 磁电系测量机构

1—线圈 2—铁心 3—磁轭

22.1.2 电流表和电压表

磁电系测量机构在串联接入被测线路时能直接测量微安级或毫安级电流,为了测量更大电流,需并联分流器。这种仪表的内部线路如图22-2所示,图中 R_0 为测量机构电阻, R_c 是温度补偿电阻, R 为扩展电流测量范围的锰铜分流电阻。电流表的稳定偏转角

$$\alpha = \frac{S_I}{n_I} I \quad (22-2)$$

$$n_I = \frac{I}{I_0} = \frac{R_0 + R_c + R}{R}$$

式中 I ——被测电流;

n_I ——分流系数。

改变分流电阻 R 的大小,可制成多量限电流表。

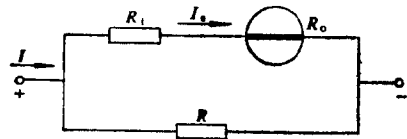


图 22-2 磁电系电流表线路

带有内部分流器的电流表其最高量限通常为30A,如要测量更大的电流,需采用外部分流器。外部分流器分为专用与定值两种。专用分流器只用于和它一起校准过的仪表,而定值分流器只要机构的电压量限与分流器的标称电压相等即可配合使用。

外部分流器具有两对端钮,电流端钮用来将分流器接入被测电路,电位端钮用来连接测量机构。

将磁电系测量机构与锰铜串联电阻器 R 组合可制成电压表,测量电压时它与负载并联,其内部线路如图22-3所示。

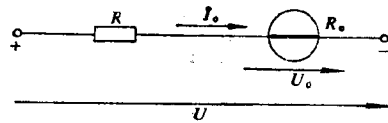


图 22-3 磁电系电压表线路

电压表的偏转角

$$\alpha = \frac{S_U}{n_U} U \quad (22-3)$$

$$S_U = \frac{S_I}{R_0}$$

$$n_U = \frac{U}{U_0} = \frac{R_0 + R}{R_0}$$

式中 S_U ——测量机构对电压灵敏度;

U ——被测电压;

n_U ——分压系数。

改变电阻 R 的大小,可制成多量限电压表。

具有内部串联电阻器的电压表其最高量限通常为600V,如要测量更高电压可采用外部串联电阻器。外部串联电阻器又分专用和定值两种,专用的只能用于和它一起校准过的仪表,而定值的可用于仪表标称电流不超过电阻器标称电流的任何仪表。

22.1.3 电阻表

1. 读数与电源电压有关的电阻表

图22-4所示为电阻表的原理电路,图中 U 为仪表电源电压, R' 为仪表内阻, R_x 为被测电阻,由式(22-2)可得电阻表的稳定偏转角

$$\alpha = S_I \frac{U}{n_I} \frac{1}{R' + R_x} \quad (22-4)$$

由式(22-4)可见,当 U 不变时,仪表可按被测电阻刻度。为了消除 U 变化所引起的误差,测量时先将 R_x 短接,调节“0”调零器(改变 n_I)使仪表指针指在 $R_x=0$ 的刻度点上。

电阻表也可制成多量限的,当 n_I 减小到 $1/h$,可使 $R'+R_x$ 扩大 h 倍。

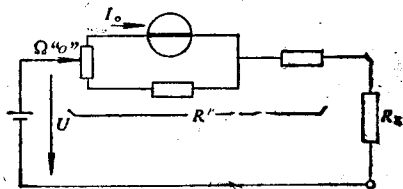


图 22-4 磁电系电阻表线路

2. 与电压无关的比率式电阻表

测量电气设备和供电线路的绝缘电阻时,广泛使用高阻表(又称兆欧表或摇表)。这种仪表为了自动消除电源电压变化所引起的误差,而采用了比率式测量机构。这种机构有两个活动线圈:一个产生转矩;另一个产生反作用力矩。当电源电压变化时,两个线圈中的电流及其力矩成比例变化,因而不影响仪表读数。

高阻表有三个接线柱,一个为“线路”(L);另一个为“接地”(E);还有一个为“屏蔽”(G)。当用仪表测量供电线路的绝缘电阻时,“L”接火线,“E”接地线上;如测电气设备绝缘电阻时,可将E接到外壳上;而在测量电缆的绝缘电阻时,为消除芯线绝缘层表面漏电所引起的误差,还应当将“G”接到电缆的绝缘层上。

用高阻表测量绝缘电阻时,必须在设备不带电

的情况下进行。因此在测量之前,应切断电源并进行短路放电。

高阻表的选择,视被测对象的工作电压而定,一般规定48V及以下的电气设备和线路用250V的高阻表,超过48V不到500V的用500V高阻表,500V以上的用1000V或2500V的高阻表进行测量。

22.1.4 检流计

检流计是高灵敏度磁电系仪表,它可用来测量小于 10^{-8} A的微小电流、小于 10^{-4} V的微小电压以及用作直流电桥和电位差计的指零仪。

检流计具有不被按测量分度的零点居中的双向标度尺。当需要时,可由实验者通过实验来确定其常数(或分度)值。

检流计为了提高灵敏度,多采用张丝或吊丝式结构及光标指示器。为了进一步提高灵敏度,还可采用光电放大。

在应用检流计进行测量时,为了使活动部分停在平衡位置所需的时间最短,检流计应在临界阻尼或微小临界阻尼情况下工作,即与检流计闭合的外电路电阻应等于或略大于检流计的外临界电阻。

检流计的灵敏度与临界电阻有关,临界电阻大的检流计对电流灵敏度高,适于和高电阻线路配合使用,而临界电阻小的检流计对电压灵敏度高,适于和低电阻线路配合使用。

在应用检流计进行测量时,应根据实际情况来选择具有足够灵敏度及良好阻尼的检流计。为防止检流计过载,使用时可并联一个万用分流器或串联一个几兆欧的保护电阻,并用它来调节灵敏度。在搬动检流计时,应注意将其活动部分用制动器锁住或将接线柱两端用导线短路。要切记不能用电阻表测量检流计内阻。

22.1.5 主要特性和应用范围

磁电系仪表的主要优点是:准确度高;灵敏度高;消耗功率小;外磁场影响小。其缺点是过载能力低,只适用于直流。

磁电系仪表广泛用于直流电流和电压的测量。

22.2 具有半导体变换器的

磁电系仪表

将磁电系测量机构与半导体变换器组合在一起,可用来测量交流电流、电压、功率和相位。这种仪表具有结构简单,灵敏度高,频率范围宽,消耗

功率小和便于制造等优点,其准确度和稳定性主要取决于变换器的特性。

22.2.1 整流系仪表和万用表

将半波整流电路或全波整流电路与磁电系测量机构组合在一起,可构成整流系仪表。用全波整流电路可提高仪表灵敏度。

整流系仪表的偏转与交流电流的平均值成比例,对特定波形(通常为正弦波)仪表也可按均方根值即有效值刻度,但当波形变化时将产生测量误差。

万用表是检查线路和维修电气设备时常用的一种仪表,它是由磁电系测量机构、干电池、整流电路、转变开关与22.1节所述的电流表、电压表和电阻表线路组合而成的,可用来测量直流电流、电阻、交直流电压和音频电平。

由于万用表具有多种测量功能,而且每一功能又有多种量限。因此在使用时,首先应根据被测量的种类将开关拨到正确的测量功能档,并选择适宜的量限。为减少误差,测量电流、电压时,被测量应大于所选量限的 $2/3$;测量电阻时,应使所选电阻档的中值电阻尽量接近被测电阻。应注意被测电阻本身不能带电,测量之前先将表笔短接,调节“ Ω ”调零器使指针指到零欧。测量完毕,应将开关转到交流电压的最高档。

22.2.2 变换器式频率表

这种仪表是由限幅、微分和整流电路所构成的频率变换器与磁电系测量机构组合而成。

当频率表并联到被测电路之后,则被测频率为 f 的正弦电压经限幅器限幅,输出一个近似为方波的电压。该电压经微分、整流之后,使测量机构流过一个与被测频率 f 成比例、单方向的尖顶脉冲电流而发生偏转,因此仪表可按频率刻度。

22.2.3 变换器式相位表

这种仪表由半导体相敏整流电路与零标居中的磁电系测量机构组合而成。当相位表的电压线路与负载并联,电流线路与负载串联之后,则相敏整流电路把电压与电流之间的相位差角 φ 转换成大小和方向与 φ 的大小与符号相对应的直流电流,该电流将使磁电系测量机构发生偏转。因此仪表可按相位或功率因数 $\cos\varphi$ 分度。

22.2.4 变换器式功率表

该表是由和差、整流、平方和差动电路所构成的功率变换器与磁电系测量机构组合而成。当仪表

的电压线路与负载并联,串联线路与负载串联之后,则被测功率的瞬时电压 u 和瞬时电流 i 在采样电阻 R 上的压降 iR ,经和差电路相加和相减变成 $u+iR$ 及 $u-iR$,两者经过双向整流、平方和差动电路,取其差值之后变成 $(u+iR)^2-(u-iR)^2=4Rui$,于是测量机构的偏转将对应平均转矩而与功率 $P=UI\cos\varphi$ 成比例。因此,仪表可按被测功率刻度。

变换器式频率表、相位表和功率表目前多制成固定式仪表。

22.3 电动系仪表

22.3.1 测量机构

图22-5所示为电动系测量机构,它由固定线圈1、1'和活动线圈2组成。当相同频率的且具有相位差的两个正弦电流通过线圈时,由于固定线圈的磁场与活动线圈的电流相互作用而产生转矩。

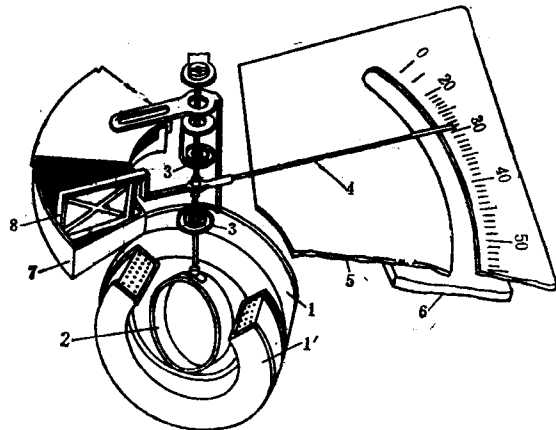


图 22-5 电动系测量机构

1、1'—固定线圈 2—活动线圈 3—游丝
4—指针 5—标度盘 6—镜子
7—阻尼箱 8—阻尼片

使活动部分发生偏转的平均转矩与两个线圈中电流的均方根值(即有效值)及它们之间的相位差角余弦的乘积 $I_1 I_2 \cos(\varphi_1, \varphi_2)$ 成比例。当转矩与游丝产生的反作用力矩相等时,测量机构的稳定偏转

$$\alpha = K I_1 I_2 \cos(\varphi_1, \varphi_2) \quad (22-5)$$

式中 K ——比例系数。

电动系测量机构能交直流两用,具有相敏性和选频性,可制成电流表、电压表和功率表。如制成比率式机构,还能测量相位和频率。

22.3.2 电流表 电压表和功率表

将电动系测量机构的活动线圈与分流器并联之