

1980/10/10

第 6 篇 测 量

主 编	成 田 賢 仁	(九 州 大 学)
执 笔 者	浅 井 功	(北辰電機製作所)
	飯 島 信 明	(岩 崎 通 信 機)
	石 毛 龍 之 介	(電子技術総合研究所)
	石 和 田 次 郎	(日本電気計器検定所)
	小 畑 耕 郎	(青山学院大学)
	菅 野 允	(玉 川 大 学)
	楠 井 昭 二	(日本電気計器検定所)
	桜 井 健 二 郎	(電子技術総合研究所)
	杉 山 卓	(横河電機製作所)
	高 山 外 之	(日本電気計器検定所)
	寺 西 英 三	(電子技術総合研究所)
	成 田 賢 仁	(九 州 大 学)
	平 山 宏 之	(電子技術総合研究所)
	本 田 辰 篤	(電子技術総合研究所)

译 者	李 显 扬	金 鎮 浩
校 者	王 鑑	

目 录

第1章 电学、磁学单位及其标准器	6-1
1.1 国际单位制和电学、磁学单位	6-1
1.2 电学单位的绝对测量	6-1
1.3 电学单位的保持	6-6
1.4 电学标准器	6-7
1.5 电学量和高频标准传递	6-10
第2章 模拟仪表与数字仪表	6-11
2.1 模拟仪表	6-11
2.2 数字仪表	6-17
第3章 记录仪	6-21
3.1 概述	6-21
3.2 分类	6-21
3.3 记录部分	6-21
3.4 自动平衡式记录仪	6-23
3.5 直接驱动式记录仪	6-25
3.6 其他记录仪	6-25
第4章 积算仪表	6-25
4.1 概述	6-25
4.2 直流积算仪表	6-25
4.3 交流积算仪表	6-26
4.4 特殊用电度表	6-28
4.5 电度表试验法	6-29
第5章 仅用互感器和分流器、分压器	6-31
5.1 测量范围的扩展	6-31
5.2 仅用互感器	6-31
5.3 分流器	6-36
5.4 倍率器、分压器	6-36
第6章 示波器和计数器	6-37
6.1 示波器的种类	6-37
6.2 示波器	6-37
6.3 电子式示波器	6-39
6.4 计数器	6-41
第7章 直流、低频测量仪和测量法	6-42
7.1 直流电压、电流、功率的测量	6-42
7.2 直流电位差计	6-43
7.3 直流标准电压发生器	6-46
7.4 差动电压表	6-47
7.5 电阻测量	6-47
7.6 阻抗测量法	6-50
7.7 交流电桥	6-51
7.8 阻抗元件	6-55

7.9 阻抗测量装置	6-57
7.10 交流电压、电流、功率、相位、功率因数 和频率的测量法	6-59
7.11 波形、失真的测量法	6-62
第8章 高频、超高频测量法	6-63
8.1 概述	6-63
8.2 频率测量	6-63
8.3 同能量有关量的测量	6-64
8.4 电路参数的测量	6-67
第9章 激光测量法	6-69
9.1 概述	6-69
9.2 输出的测量	6-69
9.3 窄脉冲的宽度和波形测量	6-71
9.4 频率的测量	6-72
第10章 磁测量法	6-72
10.1 概述	6-72
10.2 磁场测量法	6-72
10.3 直流磁特性测量法	6-73
10.4 交流磁特性测量法	6-74
10.5 高频磁特性测量法	6-76
第11章 非电量的电测量	6-77
11.1 概述	6-77
11.2 长度、变位的电测量	6-77
11.3 力、压力的电测量	6-78
11.4 振动、冲击的电测量	6-79
11.5 噪声的电测量	6-81
11.6 速度、旋转的电测量	6-81
11.7 流量、流速的电测量	6-82
11.8 粉末量和形状的电测量	6-83
11.9 时限的电测量	6-84
11.10 生物体的电测量	6-84
11.11 温度的电测量	6-85
11.12 成分的电测量	6-85
11.13 非破坏性检查	6-86
11.14 数字转换器	6-86
第12章 辐射线测量	6-87
12.1 辐射线概述	6-87
12.2 辐射线检出器	6-89
12.3 辐射线测量电路	6-91
12.4 辐射线测量法	6-92
参考文献	6-93

第1章 电学、磁学单位及其标准器

1.1 国际单位制和电学、磁学单位

1960年国际权度大会采纳了国际单位制(SI)作为全世界共同使用的单位制。SI是由 MKSA 有理单位制发展来的,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。它有别于1908年定义的,直至1948年前还使用的水银电阻原器和银电量计为基础的国际电学单位。属于 CGS 电磁单位制的 Gb(吉伯)、Oe(奥斯特)、G(高斯)、Mx(麦克斯威尔)等单位仍有一部分在使用。为了做到国际上统一,应将它们相应地换算为 SI 的 A(安培)、A/m(安培/米)、T(特斯拉)、Wb(韦伯)(见第1篇)。

1.2 电学单位的绝对测量⁽¹⁾

基本单位 A(安培)的定义是:如果一恒定的电流,流过在真空中相距 1m 互相平行的、两根圆截面无穷小并长度无限长的直导线,若每 m 长度的两导线间产生的力等于 2×10^{-7} N(牛顿)时,则此电流定义为 1 A。按该定义复现的 SI 电学单位与真空磁导率 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m 时的导出单位相一致。实现电流定义的手段称之为电流的绝对测量。理论上可从电流单位和力学单位导出电学量的各个单位,但是精度差。为此,电阻的绝对测量特别必要,其他单位从电流和电阻量便可导出。最近建议采用电压的绝对测量取代电流的绝对测量,进而完善了电流、电压的绝对测量。这主要是应用能产生恒稳电压的约瑟夫逊(Josephson)效应。

1.2.1 电阻的绝对测量 将磁导率 μ 和介电常数 ϵ 当作独立量考虑,其余如设长度量纲为 L ,时间量纲为 T ,则电感量纲为 μL ,静电容量纲为 ϵL ,电阻量纲为 $\mu L T^{-1}$ 或 $\epsilon^{-1} L^{-1} T$ 。据此,如 μ 、 ϵ 为已知量,只要测量长度值便可计算出电感和静电容值,进而与时间或频率结合起来则能求得电阻

的绝对值。绝对测量电阻大致有两种方法:(i)由几何尺寸计算出自感(L)和互感(M)值,再用交流电桥比较其电阻值;(ii)从测量长度值计算出静电容值,再用交流电桥比较其电阻。这就是使用交联电容器(cross capacitor)⊙的方法,亦称计算电容器的方法。长期以来都使用第一种方法,但精度限制在百万分之几(ppm)。最近主要是采用第二种交联电容器的计算电容法,精度已达到千万分之一(0.1ppm)。

(a) 用自感量(L)和互感量(M)测量电阻的绝对值 用精确加工的直径为 $\phi 30 \sim 40$ cm、长度为 $30 \sim 100$ cm 的玻璃、熔融石英等做成骨架,在上面加工出螺距为 1 cm 的螺旋槽,用纯铜线单层沿骨架螺旋槽绕一层绕组,构成电感 L 。再绕上 $200 \sim 500$ 匝的多层二次绕组构成互感 M 。使自感 L 值约为 $15 \sim 100$ mH,互感 M 值约为 10 mH。测量骨架的直径、绕线线径和螺距值计算 L 、 M 的值,并进行校正直径和螺距的不均匀度及线圈的磁导率等。以这 L 、 M 作为绝对标准器,用图 1 和图 2 电桥进行电阻的比较。在比较中使用共同的电容 C 。图 2 中 K 是一断续器,使其断续频率为 f 。由图 1(a)和图 2 组合起来计算 $fL = R_1 R_2 R_4 / R_3 R_5$,由图 1(b)和图 2 组合起来计算得到 $fM = R_1 R_1 R_4 / R_2 R_5$,求出电阻的绝对值。除使用 M 的测量方法外,还有用坎贝尔(Campbell)电桥和温纳(Wenner)法。1965 年公布的绝对测量值⁽²⁾见表 1。

(b) 计算电容器和使用计算电容器作电阻的绝对测量⁽³⁾⁽⁴⁾ 计算电容器是根据 1956 年澳大利亚的汤普逊(Thompson)和兰帕特(Lampard)发表的理论为基础的⁽⁵⁾。研究截面如图 3 所示的任意形状圆筒状电极,放在真空中,由 α 、 β 、 γ 、 δ 四处的微小间隙互相绝缘分离为 4 部分。若在 2、4 部分接地则 1-3 部分间的内部电容为 C_1 ,若 1、3 部

⊙ cross capacitor 是一种交联电容器,基于“汤普逊-兰帕特型计算电容”复现国际单位制电容单位法,故亦称“汤普逊-兰帕特型计算电容型”。——译者注

分接地则 2-4 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 。

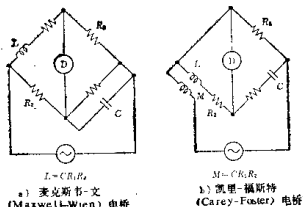


图 1

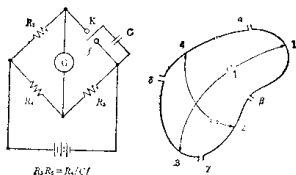


图 2 麦克斯韦直流电桥

图 3 计算电容器原理

表 1 电阻的绝对测量

国 别	研究所简称	发表年份	$\Omega_{90} - \Omega$ ($\mu\Omega$)	误差 (ppm)	标准器
加 拿 大	NRC	1957	-3.4	± 20	互感
美 国	NBS	1960	+0.85	± 2.1	计算电容
日 本	ETL	1964	+1.3	± 10	自感
澳大利亚	NML	1964	-0.05	± 0.5	计算电容
英 国	NPL	1964	-0.9	± 3	互感

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

式中 $\epsilon_0 = 10^{-7}/4\pi C^2 (F/m)$

光速 $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s} \pm 4 \times 10^{-9}$

如果由计算求得电容 C_0 ，则 $C_0/L \approx 1.953549043 \text{ pF}$ ，即每米约为 2 pF 。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 稍有不等，则要取其平均值

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

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

实际的计算电容器如图 4 所示，四根直径相同的圆柱互相平行，且截面又互相对称配置。本来是以四根圆柱为基础，但可以根据圆柱多少和改变有效长度 L 构成各种不同型式，现已有 10 个国家用作绝对测量电容和电阻单位。4~6 根圆柱计算电容的计算公式见表 2。改变有效长度 L 的方法，有改变块规连接那样的方法和采取移动插进圆柱间隙的保护电极（见图 4）的方法，其位移采用光干涉法测量。现在，采用光干涉测量的保护电极移动式计算电容的精度可达 10^{-7} 。

电子技术总合研究所（简称电总研）的交联电容器是四根圆柱的光干涉式，使用 He-Ne（氦-氖）激光干涉仪，保护电极的移动距离为 5 cm ，采用 10:1 变压器电桥测量电容差，把基准单位传递给 1 pF 的熔融石英管电容器加以保持。进一步使用图 5 线路，使用直角相移电桥⁽⁸⁾（见图 6），以 1592 Hz 定频来比较电阻和电容，求得电阻的绝对值。平衡条件是当 $z \ll 1$ 时，则 $\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 = 1$ 。最近的绝对测量值换算为国际权度局（简称国际局）维持的单位 Ω_{90} ，其差 $\Omega_{90} - \Omega_{90}$ 值是：NBS 为 $1.02 \mu\Omega$ (1973)，NML 为 $0.80 \mu\Omega$ (1973)，LCIE 为 $1.46 \mu\Omega$ (1975)，ETL 为 $1.19 \mu\Omega$ (1977)，相差 10^{-7} 数量级，精度与用电感测量相比提高一个数量级。

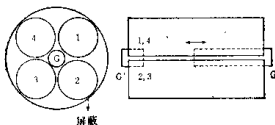


图 4 圆筒式计算电容器

1.2.2 电流的绝对测量 电流的绝对测量，按电流定义规定是用无限长导线进行实验，实际是不可能的，一般使用圆筒形线圈。现在都采用雷利 (Rayleigh) 式电流天秤，亚尔登琼斯 (Ayrton)

Jones) 式电流天秤和电动测力仪 (Electro dynamo meter) 两种方法。电流天秤方法是利用恒定电流在线圈间产生的力, 电动测力仪是利用其力矩原理, 并用达到平衡时的质量标准砝码测量出力或力矩。图7为使用多层线圈的雷利式电流天秤原理图。图中F为固定线圈, M为可动线圈。若同轴线圈的互感为 $M(x)$, 轴方向位移为 x , 电流为 I

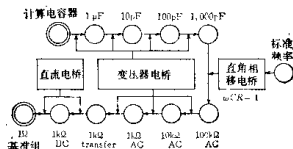


图5 用计算电容器的电阻绝对测量系统

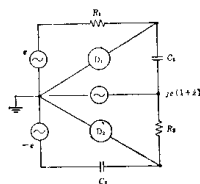


图6 直角相移双臂电桥



图7 雷利式电流天秤原理图

表2 计算电容器的型式

电极数	对应电极装配	计算公式	电容值 (pF/m)	备注
4		$\frac{\epsilon_0}{\pi} \ln 2$	1.953549043	NML, ETL, NBS, NFL, NRC, IMM, ASMW使用
5		$\frac{\epsilon_0}{\pi} \ln \frac{2}{\sqrt{5}-1}$	1.356235626	LCIE使用
		$\frac{\epsilon_0}{\pi} 2 \cdot \ln \frac{2}{\sqrt{5}-1}$	2.712471252	
6		$\frac{\epsilon_0}{\pi} \ln \frac{4}{3}$	0.816796110	PTB使用
		$\frac{\epsilon_0}{\pi} \ln \frac{3}{2}$	1.142752933	
		$\frac{\epsilon_0}{\pi} \ln 2$	1.953549043	
		$\frac{\epsilon_0}{\pi} 2 \cdot \ln \frac{3}{2}$	2.285505867	
		$\frac{\epsilon_0}{\pi} \ln 3$	3.096301976	
		$\frac{\epsilon_0}{\pi} \ln 4$	3.907098086	

注：对应电极间电容指黑圈电极间电容。 ϵ_0 为真空介电常数。

时, 则力

$$F = I^2 \frac{\partial M(x)}{\partial x}$$

对雷利式电流天平, 若已知 F 、 M 的有效半径比, 便可知 $\partial M(x)/\partial x$ 值, 没有必要测量线圈尺寸的绝对值。而亚尔登琼斯式电流天平因为使用两个单层线圈, 需要测量线圈的尺寸才能计算出 $\partial M(x)/\partial x$ 值。如果线圈通以 1 A 左右的电流, 产生的力约为数克重, 而这个对动圈的静重达到约相当于 1 kg 重, 因此, 需要灵敏的天秤。

电动测力仪是由达到平衡时的砝码求得力矩 T , 在固定线圈内同一中心上放有互相垂直的可动线圈, 若其互感为 $M(\theta)$, 则力矩 T 如下式:

$$T = I^2 \left(\frac{\partial M(\theta)}{\partial \theta} \right)_{\theta = \pi/2}$$

T : 可从秤砣 (或砝码) 平衡求得。

在测量力的同时, 用标准电阻和标准电池测量电流。从而, 将力的测量值与由尺寸测量值和电流测量值计算的力值相比较, 求出电流的绝对值。这种测量方法的准备和测量时间均较长, 而且存在着象微弱的测量, 要防止温度上升, 向可动线圈导入电流等困难, 精度限制在百万分 (ppm) 之几内, 表 3 为 1968 年公布的绝对测量的电流单位^[7]。它表明国际局的电流单位 A_0 与理论值相差 11 ppm, 1969 年开始进行修正, 各个国家也相继随之修正。

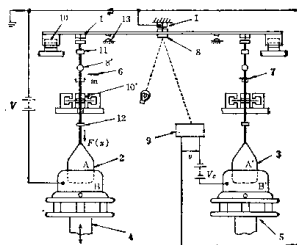
表 3 电流的绝对测量

方 法	$A - A_{01}$ 值 (μA)
1958 年根据 NBS 的电流天平和电动测力仪测量	-11.6
1968 年根据 NBS 的电动测力仪测量	-12.6
1965 年根据 NPL 的电流天平测量	-10.4
根据 1MIMK (苏联) 的强磁场 V_f 测量 (1966) 和根据 NBS (1967)、NPL (1965) 的弱磁场 V_f 测量综合	-9.3
平均值	-11.0

1.2.3 电压的绝对测量 由于计算电容器的出现, 提高了电容的测量精度, 使电压的绝对测量成为可能。比电流的绝对测量, 实验简便些, 精度可超越电流绝对测量的限度。它利用加在电容器

两极间的高电压的静电引力作用。设电容为 C , 电极间距为 x , 外加的电压为 V , 则静电引力

$$F = -\frac{1}{2} V^2 \frac{\partial C}{\partial x}$$



- 1: 弹簧支点 2: 测量用电容器 3: 平衡用电容器
4: 可动支持台 5: 固定支持台 6: 标准砝码
7: 平衡用砝码 8, 8': 平面镜 9: 角位移-电压
转换器 10, 10': 涡流控制器 11: 正交刀口
机构 12: 联结器 13: 制动档

图 8 电压天平结构

现在各种方法都在探索中。如 NSL 是将附有保护环的蒸发上金属的玻璃电极对着水银面, 并用光波干涉法的液体电位差计来测量由于加高电压引起的水银面的凸起。电总研对图 8 所示的称为静电能量变化法进行研究^[8]。它利用静电能与机械能变化相等的原理, 即当电压施加在垂直式平行平板电容器的两极, 其一电极沿垂直方向自 x_1 移至 x_2 时, 电容器储存的静电能变化等于克服逆着电极的静电引力移动所需要的机械能变化。 C_1 、 C_2 为 x_1 、 x_2 处的静电电容, 外加电压为 V 可表示为

$$V = \sqrt{\frac{2 \int_{x_1}^{x_2} F_x dx}{C_2 - C_1}}$$

式中, F_x 、 dx 和 $C_2 - C_1$ 分别由天平、光干涉仪和计算电容器测量。使用装有板弹簧的天秤, 其偏离由光电转换器检测。施加 4~5 kV 高电压的静电引力约为 1~1.5 g 重, 高电压通过特殊分压器与标准电池比较。最终, 电压绝对测定的精度预计达到 1~2 ppm。

1.2.4 约瑟夫逊 (Josephson) 电压标准 超导体器件的电压阶跃现象, 即约瑟夫逊效应, 是

1962年B. D. 约瑟夫逊^[10]理论的预见, 经过实验验证, 它可用作电压标准。如Sn-SnOx-Sn, Pb-PbOx-Pb中有几个毫微米的绝缘薄膜, 当频率为 ν (如10GHz)的微波照射在弱结合的约瑟夫逊器件时, 在超低温状态下的电压-电流特性呈现出如图9所示的阶梯状电流、电压跃变现象。根据理论, 设第 n 个阶跃电压为 V_n , 普朗克常数为 h , 电子电荷为 e 时有着 $nV_n = 2e/h \cdot \nu$ 的关系。 V_n 取在1~10 mV范围内, 经电阻分压器与标准电池电压比较。上式中的 $2e/h$ 假定为一恒定值, 只要测量频率便可导出电压值, 并能利用它监视标准电池的稳定性。据包括国际局在内的十个国家研究所的实验, 确认电压精度为 10^{-8} 数量级。1975年电学咨询委员会(CCE)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, $2e/h = 483594.0 \text{ GHz/V}_{\text{exact}}$ 。但是, 要看到由该值复现的电压不一定与SI值相一致。电总研采用两个Pb-PbOx-Pb器件相串联, 产生10mV电压, 图10中使用100:1的哈蒙(Hamon)式分压器⁽¹¹⁾, 与标准电池相比较。

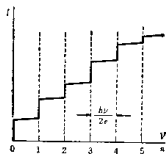


图9 约瑟夫逊器件的电流-电压特性图

图10中使用100:1的哈蒙(Hamon)式分压器⁽¹¹⁾, 与标准电池相比较。

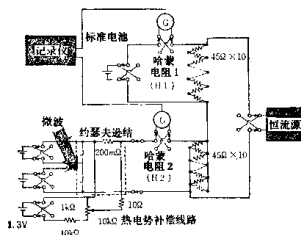


图10 约瑟夫逊电压基准的测量线路

1.2.5 利用基本常数的绝对测量 除上述直接的绝对测量外, 也可根据各种物理基本常数⁽¹¹⁾⁽¹²⁾的组合求得现行单位的绝对值。

(a) γ_p 的测量 质子磁旋比 γ_p 是电流标准和磁场测量的基准。质子的磁能 μ 与其角动量 a 成正比, 而 γ_p 为其比例常数, 所以定义为 $\gamma_p = \mu/a$ 。若把它放进均匀磁通密度 B 中, 就要以 B 方向为轴进行旋进, 角频率为 $\omega = \gamma_p B$ 。因而从测量频率和磁场, 亦即从测量电流中就能决定 γ_p 值。反之, 假如 γ_p 为一常数, 只要测量频率便可求得 B 值, 另外还能监视电流单位的稳定性。求 γ_p 的方法是采用弱磁场和强磁场两种方法。前者是把水放在根据尺寸测量值计算出磁场的螺管中心, 水被强磁场极化, 测量与磁场垂直放置的线圈中所产生的衰减信号频率求得 γ_p 。电总研在绝对测量电阻时所用的线圈, 为了得到更均匀磁场, 使用有补偿的赫姆霍兹(Helmholtz)线圈, 图11为其测量系统图。 γ_p 最近数值(1968年)换算成1969年国际局的单位, 即 $\gamma_p = 2.6751156 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1} \pm 5.7 \text{ ppm}$ 。式中, 加“ $''$ ”号表示没有反磁性补偿的水质子的 γ_p 。

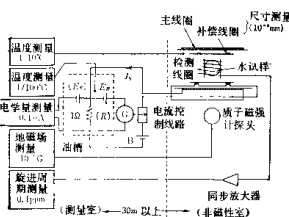


图11 γ_p 的测量系统

另外, 强磁场法是在电磁铁的强磁场中求得共振频率 ω 的同时, 又要把电流导线插进磁场中, 其作用力由天平测得, 而且还需要校正磁场。如果电流单位与绝对值不同, 在强、弱两磁场测得的 γ_p 值就不一致, 偏向相反方向。因此要取其几何平均值作为SI单位的 γ_p 值。所以要注重强、弱两磁场的测量组合作为电流的绝对测量法之一。也可用作检验由标准电池和标准电阻保持的电流单位长年变化的一种方法。由各种方法测量的 γ_p 和由其他基本常数组合求得的 γ_p , 其最确切推定值(1973)为 $\gamma_p = 2.6751301 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1} \pm 2.8 \text{ ppm}$ 。精密磁场测量采用该常数。

(b) 根据间接方法的绝对测量 除电流、电

阻的直接绝对测量外,还能从 ν_p ,阿伏加特罗常数,法拉第常数,水中质子磁矩的核磁子比等各种基本常数组合,求得电流或 $2e/h$ 的SI值。综合直接法和间接法求得的现行单位和 $2e/h$ 的推定值(1975)⁽¹⁴⁾见表4。

表4 现行电学单位和 $2e/h$ 值与绝对值(SI)的关系

$$\begin{aligned} A_{90}/A &= 1 - (3.21 \pm 0.76) \text{ ppm} \\ V_{90}/V &= 1 - (3.76 \pm 0.69) \text{ ppm} \\ \Omega_{90}/\Omega &= 1 - (0.55 \pm 0.19) \text{ ppm} \\ 2e/h &= 4.835982(\pm 33) \times 10^{14} \text{ Hz} \\ &\quad \cdot V^{-1} (\pm 0.69 \text{ ppm}) \end{aligned}$$

注:单位加69注释表示1969年国际局单位。 $\pm$ 表示误差。

1.3 电学单位的保持⁽²⁾

1.3.1 单位保持和国际比对 因为绝对测量装置不宜于经常开动来进行对标准器定值,所以一般由稳定的标准器组群来保持单位。这样各国保持的单位显然要存在差别,为确定精度和作国际统一,以国际局为中心进行国际比对。

1933年以来,国际局定期地集中各国的1 Ω 标准电阻和标准电池进行电阻和电压单位的国际比对。在这期间,1948年从国际单位向绝对单位过渡,1969年综合各国的绝对测量结果,修正国际局的电压单位,各国又依此为基准修正了电压、电阻

单位,达到了与国际局的单位一致。近期比对结果和修正值见表5。

电容标准从1959年开始在各国巡回进行0.1nF的国际比对,随着计算电容器的进步,1966年开始以NBS为中心开展10pF的巡回国际比对。近期结果见表6,得到 10^{-7} 级的一致结果。对热电式的电压、电流转换器和高频的功率、电压、衰减量、相移、噪声、反射系数等也指定所洛脱(Pilot)实验所采取巡回方式进行国际比较⁽¹⁵⁾,作到有助于国际统一。

1.3.2 电学标准确立系统 随着计算电容器和约瑟夫逊效应的应用法的进展,1975年CCE建议确立新的电学标准系统,各国都采纳了这一建议,如图12所示。过去是依据标准电阻、标准电池组群保持单位,与国际比对明确各国间之差值,综合各国的绝对测量结果实现了单位修正。今后要以计算电容器和约瑟夫逊电压标准为基础独自地复现电阻、电压单位,并可做到连续地修正电阻和电压基准组群的单位值。电容单位直接从计算电容器导出。在此条件下,通过直接绝对测量和各种基本常数的综合研究,求出 $2e/h$ 的SI值是很重要的。其结果可导致停止电压的国际比对,而电阻比对也要改变与国际局的绝对值进行比对的状态。电总研1977年对电阻单位修正了 $+1.79\mu\Omega$,接近于SI值,另外电压单位修正了 $-0.56\mu V$,向由 $2e/h = 483591.0 \text{ GHz/V}$ 导出电压单位的新系统过渡。

表5 电阻和电压单位的国际比对(示出与国际局的单位差)

国 别	国家研究所 简 称	$\Omega_{N1} - \Omega_{01} = \Delta(\mu\Omega)$				$V_{N1} - V_{01} = \Delta(\mu V)$			
		1967	1969修正值	1970	1973	1967	1969修正值	1970	1973
日 本	ETL	+0.06	0	-0.19	-0.40	-2.66	-8.3	+0.51	+1.80
东 德	ASMW	-0.39	0	+0.10	+0.93	-6.80	0	+2.49	+0.51
西 德	PTB	+5.06	-5.1	+0.33	+0.57	-0.64	-10.4	-0.26	+1.37
美 国	NBS	-0.19	0	+0.03	+0.20	-2.58	-8.4	+0.17	+0.12
澳 大 利 亚	NML	-3.63	+3.8	+0.29	+0.33	+5.16	-16.2	0.00	+0.98
加 拿 大	NRC	-2.94	+2.7	-0.47	-0.90	-2.98	-8.0	+0.10	-0.18
法 国	LCIE	-12.22	+12.2	+0.30	+0.63	-4.92	-6.1	+0.23	+1.01
意 大 利	IEN	+0.89	0	+0.78	+0.88	-0.87	-10.1	+0.04	+1.08
英 国	NPL	-3.50	+3.7	+0.31	+0.01	+3.62	-13.0	+0.69	+1.23
苏 联	IMM	-0.51	0	+0.01	+0.62	+8.38	-16.0	+2.16	+4.16
南 非	NPRL				+1.11				+1.57
(国际局)		BIPM	0			-11.0			

表 6 10pF 石英电容器的巡回比对结果

国 别	国家研究所 简 称	日 期 (年、月)	测 量 条 件		测 量 值 (Δ)				单位差 $F_{\text{NBS}} - F_{\text{NBS}} (\mu\text{F})$
			电压 (V)	频率 (Hz)	N _{9.108}	N _{9.119}	N _{9.120}	平 均	
美 国	NBS	1973-8	100	1592	-14.31	-1.31	-0.72	-5.45	—
澳大利	NML	1973-11	100	1592	-14.28	-1.29	-0.615	-5.105	-0.03
日 本	ETL	1974-3	15	1592	-11.29	-1.35	-0.72	-5.45	+0.01
美 国	NBS	1974-6	100	1592	-14.26	-1.28	-0.63	-5.39	—
英 国	NPL	1974-8	60	1000	-14.28	-1.45	-0.73	-5.49	+0.11
美 国	NBS	1975-5	100	1592	-14.22	-1.26	-0.52	-5.33	—

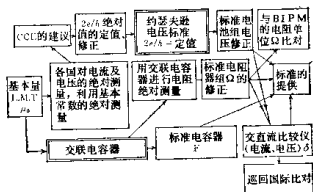
注: 25°C, 电容 $C = 10(1 \pm 4 \times 10^{-6}) \mu\text{F}$ 。

图12 新确立的电学标准系统

1.4 电学标准器⁽¹⁸⁾

1.4.1 标准电阻器 标准电阻器用于电阻单位的保持及精密测量的基准, 所以要求测量精度高, 长期稳定性好。1Ω 的电阻基准适用于 $10^{-8} \sim 10^6 \Omega$ 的电阻。如图 13 (a), 两个电流端 AB 间若通以电流 I, 电压端 CD 间的电压为 V, 则电阻 R 定义为: $R = V/I$ 。这样的电阻称为四端电阻, 通常用于 10Ω 以下的电阻器。电流端的电阻如比电压端间的电阻小到可以忽略时, 可用图 (b) 两端电阻代用。高电阻因为要考虑端子和外壳间的绝缘电阻, 而采用图 (c) 的三端结构, 防护端 G 要接在线路适当地点。另外, 四端电阻也有加防护端 G, 如图 (d) 所示的五端电阻结构。四端电阻的精密测量使用有引线来调整线路的凯尔文 (Kelvin) 双臂电桥, 而二端、三端电阻则可用精密惠斯顿 (Wheatstone) 电桥。

标准电阻器一般采用最稳定的线绕式。精密标准电阻器, 绕组双绕后进行成形热处理, 然后保持原形封闭在干燥空气的双壁式容器内 (见图 14), 或者封闭在充油封闭式容器内。

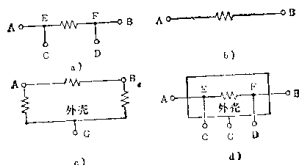


图13 电阻定义

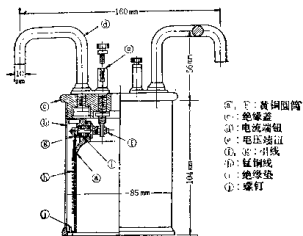


图14 双壁式标准电阻器

1~10Ω 电阻器, 其年稳定性达 0.1~1ppm。一般多把绕组线轴放在容器内做成开放式, $10^{-4} \sim 10^5 \Omega$ 电阻器年稳定性为 1~30ppm。电阻线多使用锰铜线和类似锰制的合金线 (含 Ge 的 Cu-Mn 系合金)⁽¹⁷⁾。 $10^4 \sim 10^9 \Omega$ 高电阻使用含 Al 等的 Ni-Cr 系精密电阻细线。这些电阻线的温度系数和对铜热电势都比较小。电阻器存在的主要问题是周围温度及电流引起的本身升温。电阻和温度的关系通常用二次式表示。

$$R_t = R_{20} \{ 1 + \alpha_{20}(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \}$$

式中, R_t 和 R_{20} 为 t 和 20°C 时的电阻, α_{20} 和 β 为温度的一次和二次的温度系数。

在锰钢 $\alpha_{20} = (5 \sim 10) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\beta = -0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}^2$ 。类似锰钢的合金 $\alpha_{20} = \pm 1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\beta = -0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}^2$ 。Ni-Cr 系 $\alpha_{20} = \pm 20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\beta = \pm 1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}^2$ 。经过选用 α_{20} 也可达 ± 5 、 $\pm 1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。因为电流要引起本身温升, 所以电阻器设计为每 1 W (瓦特) 约升 1°C 左右, 可从温度系数推测出因本身温升引起的电阻变化, 故需要在适当的电流条件下使用。

超出线绕电阻界限 ($10^8 \sim 10^9 \Omega$) 的高阻标准电阻器, 是把炭合成薄膜电阻封闭在玻璃器内, 再放到金属容器中构成三端电阻。年稳定性 $0.5 \sim 1\%$, 温度系数 $\pm 0.2\%/^\circ\text{C}$, 电压系数 $-0.001 \sim -0.02\%/V$, 最高能作得 $10^{14} \Omega$ 。此外, 利用封在电离箱内半衰期长的同位素 (^{89}Sr , ^{14}C , ^{137}Cs 等) 的电压-电流特性, 在一定的微小电流下, 求得等效的超高电阻值。如电流为 $10^{-8} \sim 10^{-14} \text{ A}$, 加 100 V 电压时的等效电阻值为 $10^{11} \sim 10^{16} \Omega$, 若事先进行过校正, 长年变化可从半衰期计算。高阻测量使用惠斯顿电桥或根据电容和时间求得。

以 1Ω 电阻为基准, 可以迅速正确地组合成所要的电阻标度值。方式较多, 最简便的是如图 15 所示的 Hamon 式合成电阻^[41]。在图 (a) 中如果 $\frac{r_1}{R_1} = \frac{r_2}{R_2} = \dots = \frac{r_n}{R_n}$, $\frac{r'_1}{R'_1} = \frac{r'_2}{R'_2} = \dots = \frac{r'_n}{R'_n}$, 则由串联和并联连接可得到 $n^2:1$ 的正确比值。图 (b) 是使用 11 个 10Ω 电阻组件, 如果每个组件电阻都调校到 100 ppm 以内, 则串联和并联连接的偏差值在 0.01 ppm 精度内。电压端电阻为 0.2Ω 数量级, 完全可调整到 1%。另外, 9 个组件电阻每 3 个进行串并联连接, 便能得到 10Ω 。因此, 除了作为 1, 10, 100Ω 外, 还能作为 10:1 的比电阻器。改变电阻组件的标称值便可组成各种额定值的合成电阻。使用 100 个 100Ω 电阻组件可合成 $1 \sim 10^4 \Omega$ 的电阻。该方法除了组合成电阻值的标度外, 也可用于分压器线路。

交流标准电阻除应满足直流标准电阻的必要条件外, 还应不随频率变化。由于采用分段双绕、亚尔登-贝利 (Ayrton-Perry)、加其士、夏普隆 (Shapton) 等无感绕法, 以减少并联电容和串联电感的影

响。交流误差的测量用计算可求得频率特性的单线绕电阻器为基准。

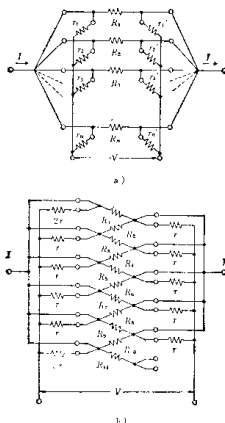


图15 组合电阻器原理线路

1.4.2 标准电池 采用 1892 年韦斯顿 (Weston) 发明的 Cd (镉) 电池作为标准电池。根据电解液硫酸镉溶液的饱和度, 电池分饱和式和不饱和式两类, 另外, 按电解液的酸性度分中性电池和酸性电池。标准电池结构见图 16, H 型玻璃容器内封有精制的化学物质, 饱和式电池为了保持电解液饱和, 加些多余的硫酸镉结晶。酸性电池在电解液中加入硫酸使其酸性度达到 $0.03 \sim 0.05 \text{ N}$ 。不饱和式电池温度系数小, 但长期稳定性不够好。饱和式电池温度系数大, 但稳定性好, 适用于精密测量。使用最多的酸性饱和式电池的电动势和温度关系如下:

$$E_t = E_{20} - 39.9 \times 10^{-6} (t - 20) - 0.84 \times 10^{-8} (t - 20)^2$$

式中, E_t 和 E_{20} 分别为 t 和 20°C 时的电动势 (V)。使用温度范围为 $4 \sim 40^\circ\text{C}$, E_{20} 为 $1.018620 \pm 30 \mu\text{V}$ 。因为温度通常引起电动势滞后, 为防备温度急剧变化都放在能控制恒温的油槽或空气槽内。因电池的内阻大型的约为 600Ω , 小型的约为 1500Ω , 仅供基本没有电流输出的零位法测量使用。电池两

脚的各自温度系数比总体值大一位数,若两脚间温度相差 0.1°C ,虽控制到恒温也要产生 $30\mu\text{V}$ 左右的电动势变化,所以要特别注意温度的分布。选择良好电池的方法是:(i)使温度变化再回到原先状态,电动势不应变化;(ii)进行 $0.1\mu\text{A}$ 放电三分钟左右也能很快恢复;(iii)直流和交流内阻之比近似于1;(iv)长期稳定性要好,等等条件下,按事先选定的程序进行试验。标准电池的精密测量是将两个电池反接用电位差计测量两电动势之差。使用时要定期地校正,恒温保存,避开光线,不许充放电、振动和倒放。

利用齐纳二极管反雪崩特性的恒定电压可代替标准电池。以温度补偿式齐纳二极管为基准电压,采用电子放大器能制造 $0\sim 1000\text{V}$ 、高电压的 $5\sim 7$ 位标准电压发生器。有负载电流时也能保持输出电压

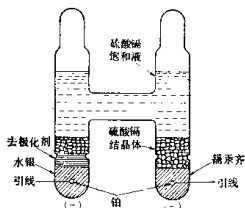


图16 饱和式标准电池结构

不变,所以使用方便,但稳定性要比精密标准电池差1~2位数,另外,还有标准电流发生器,它根据通过负载的电流流经标准电阻,并将其端电压反馈回输入端的方式制造的,最大电流为 1A ,精度约为 10^{-4} 。

1.4.3 标准电容器^[9] 保持电容单位的标准电容器应有明确体现定义的结构,温度系数、电压系数和损耗角都小,长期稳定,不随频率和压力等变化。各种标准电容器的特性比较见表7。它和电阻器一样具有多端结构,低值电容为三端,中值电容为两端,高值电容因受导线的电感影响而采用四端结构。三端结构的特征有:(i)联接线间的电容固定;(ii)防止了屏蔽电容的耦合;(iii)可以是无损耗型的;(iv)可以并联连接等。金属屏蔽外壳与端子间的电容和绝缘电阻,可适当地连接外壳防护端予以消除。如果平行平板电容器极板是旋转移动的,可以制造分辨率约为 10^{-5} 的可变电容器。图17(a)的熔融石英圆板电容器是用作 10pF 的国际比对的,它具有稳定性好的特点。为了改善其温度系数,电总研研制了图(b)的熔融石英管电容器^[4]。两极间去掉小部分石英没有电介质,温度系数好,通常封在真空中使用。用熔融石英圆板、空气和气体作介质的平行平板式电容器,也有的封在有控制温度的空气槽内。对于高值电容,采用由变压器和中值电容器,而取得高值电容的线路。电容器的精密测量多使用变压器电桥,三端电容器比时,把防护端接到变压器的中点,如果把它接地,则不需要复杂的瓦格纳(Wagner)接地线路,就能够消除端钮和

表7 标准电容器的特性

类别	电容范围 (F)	损耗角 (10^{-2}rad)	温度系数 (ppm/ $^{\circ}\text{C}$)	电压系数 (ppm/V)	频率特性 (ppm)	稳定性 (ppm/年)
铍银云母	$100\text{p}\sim 10\mu$	5~20	10~20	0.1~1	-250 (100Hz~3kHz)	$\pm 10\sim 50$
聚乙炔	$1\text{p}\sim 0.01\mu$	5~60	- (60~220)	0.4~2	-165 (60Hz~1.2kHz)	$\pm 100\sim 500$
聚苯乙烯	$1\text{p}\sim 0.01\mu$	5~60	- (110~200)	0.2~0.5	-190 (60Hz~1.2kHz)	$\pm 100\sim 500$
空气	$0.001\text{p}\sim 0.1\mu$	<1	20~30	0	0 (10kHz以下)	$\pm 20\sim 50$
封入气体	$10\text{p}\sim 1000\text{p}$	<1	0~4	0	0 (10kHz以下)	$\pm 10\sim 50$
熔融石英平板	$1\text{p}\sim 1000\text{p}$	20	10~20	0.5~1	-500 (30Hz~100kHz)	$\pm 10\sim 150$
熔融石英圆筒	$0.001\text{p}\sim 10\text{p}$	20	10~15	<0.01	-500 (30Hz~100kHz)	± 5
熔融石英管	$0.1\text{p}\sim 2\text{p}$	<10	± 2	<0.01	-100 (30Hz~100kHz)	± 5

防护端间的电容和绝对电阻的影响。

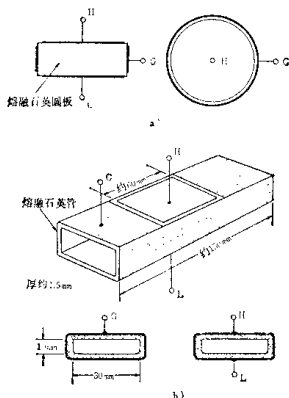


图17 熔融石墨电容器

电感标准有自感和互感两种。把铜导线单层或多层地绕在大理石、木等做的圆筒骨架或圆环骨架上制成电感标准器，它的直流电阻很小，电感值不随频率和电流改变。一般温度系数为 $\pm 20 \sim 30 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ，测量精度为 1×10^{-4} 。因为它受周围的磁性体、其他器件的电磁耦合、引线长度等影响，所以要尽可能将其补偿到最小程度。自感定值使用图1(a)的麦克斯韦-文(Maxwell-Wien)式电桥与电容比对，互感测量使用图1(b)的凯里-福斯特(Carey-Foster)电桥。由于交联电容器的出现，目前电感标准不显得那样重要了。

1.4.4 交直流比较仪 交流电压、电流和功率标准是按有效值的定义从直流标准导出。使用交直流比较仪，对交流、直流的同一值，其指示值或者是输出必需相等。已知的方法比较多，对于电压和电流比较，大多使用频带宽、精度高的热式交直流比较仪。图18所示为真空热电偶，单独使用时用于电流比较，和串联电阻一起用时，作为电压比较的转换器。仔细分析直流和交流响应是有差异的。产生同一电动势值的直流电流为 I_d 、交流的有效值为

I_a 时，则 $\delta = (I_a - I_d) / I_d$ 称为交直流差，它必须在理论和实验上予以决定。电压比较也要考虑电阻器的频率特性，电总研以10mA为基准，建立了高精度、扩频到100kHz的电压、电流标准⁽²⁰⁾。另外，功率和电能使用电动式功率脉冲转换式的交直流比较仪从直流标准导出，供给特殊制造的精密感应式电能表定值，并作为标准器。

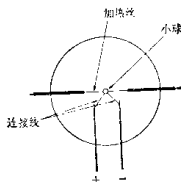


图18 真空热电偶

1.5 电学量和高频标准传递⁽²¹⁾

标准器或仪器仪表可以逐级地由高一级标准校验，确立与国家标准联系的过程，称之为传递。即是联系到国家标准的校验系统和各级精度的。电学量、高频的标准传递系统见图19。在民间事业所设有标准实验室或标准室，通过公共校验机关，定期校验标准器并保持它，另外，以基础标准器为基础确定等级和校验其它精密测量仪器。依照现场仪器仪表的应有精度，确定校验周期和顺序，反复校验，来保持与国家标准联系的应有精度。这样自主的标准器和仪器仪表的管理是相当重要的。

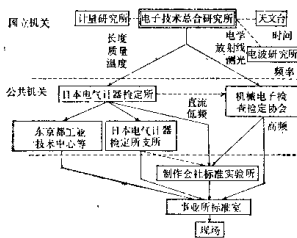


图19 电学量、高频范围传递指示图

第2章 模拟仪表与数字仪表

2.1 模拟仪表 (22)~(31)

2.1.1 模拟仪表的一般介绍 用标度盘和指针指示电量的仪表, 相对于数字仪表而言称作模拟仪表。

(*) 分类 模拟仪表按工作原理分: 磁电系(动圈式)、电磁系(动铁式)、电动系、静电系、感应系、整流系、热电系、比率表等类。磁电系直流电流表和电压表, 为各类型仪表中使用最广的一种。现在, 随着半导体元件及其电路技术的发展, 变换各种被测量为直流流量, 并用磁电系仪表指示的情况增多了。电磁系结构牢固, 主要用于交流电流表和电压表。电动系主要用于直流和交流电流表、电压表、功率表, 而且, 由于原理上交直流指示误差小, 因而也可作为比较器使用。静电系因其功率损耗小而适于高压测量。感应系虽然作为电能表广泛采用, 但不用作指示仪表。整流系虽然是以磁电系仪表指示交流整流流量的, 是具有高灵敏度的交流仪表, 但在一般的整流方式中, 是按平均值工作的, 因而波形误差大, 还有, 以整流器或二极管之类构成的变换式功率表、功率因数表、频率表等, 在日本工业标准(JIS)中也称作整流系。热电系具有良好的高频特

性, 因而可构成不受失真影响的真实有效值指示型电流表、电压表以及高频功率表。比率表有磁电系比率表、电磁系比率表、电动系比率表, 用于电阻表、温度表、功率因数表、频率表中, 近来它们又用于各种变换器中。除上述, 还有采用动磁式原理的简单且小型的电流表, 但它不适于精密测量。而且, 还有不称作模拟仪表的振荡式频率表。各系的使用频率范围如表8所示, 各种电流表、电压表的测量范围如表9所示。

表8 各系仪表的使用频率范围

种类	DC	1Hz	10	50	100	1kHz	10	100	1MHz	10
磁电系	1									
电磁系										
电动系										
热电系										
感应系										
静电系										
整流系										

根据日本工业标准 JIS C 1102(1975)“指示电气计器”, 按仪表的准确度分类时, 电流表、电压表、功率表(无功功率表)可分为0.2级、0.5级、1.0

表9 各系电流表及电压表的测量范围

种类	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵
磁电系												
电磁系												
电动系												
热电系												
感应系												
静电系												
整流系												

注: □ ■ 分别表示电流表和电压表本身的测量范围。如果外附扩展器, 则可扩大测量范围。

级、1.5 级和 2.5 级等五级，而指针式频率表则分为 0.2 级、0.5 级和 1.0 级等三级。

按用途分类时，则分为标准型、便携型、配电盘型、面板型等四种型式。

(b) 结构 结构大致分为使指针相应于输入电量大小而偏转的内部测量机构，以及装有标志指针偏转量的标度盘的外部机壳等两个部分。测量机构还可按指示动作划分为：使附有指针的可动部分相应于不同的输入量而产生不同的转动力矩的驱动机构；产生同转动力矩相平衡的、力图使指针回到零位的反作用力矩的控制机构；以及使可动部分的运动尽快稳定的阻尼机构。按可动部分的支持方式分类，有轴针和宝石支承的轴针式仪表和由两个张丝支承的张丝式仪表。

轴针式仪表的结构，以磁电系为例，如图 20 所示。有固定于动圈转轴上、下两端的轴针，以及与轴针相应的装于固定部分的宝石轴承支撑着可动部分旋转。游丝的内端接在可动部分上，外端接在固定部分上，因而它在产生比例于可动部分转角的作用力矩（控制力矩）的同时，还起着向可动部分传导电流的引线作用。游丝通常采用磷青铜材料。其宽厚比约为 10，经压延成带状，并加工成阿基米德螺旋线。轴针用镍钢、钨钢等，先粗制后进行热处理，然后研磨镀铬。一般使用的轴针

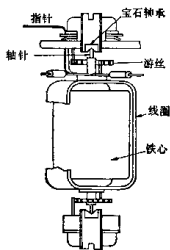


图20 轴针式仪表结构

直径为 0.2~2mm，圆锥角为 50°~60°，尖端曲率半径为 0.005~0.04mm。此外，还有多元合金的非磁性轴针，用于不能忽略轴针磁性影响的直流高灵敏度仪表中。宝石有蓝宝石、红宝石等人工宝石，研磨成 V 字形凹槽。也有将玻璃熔融后凝固成 V 字形孔的廉价宝石。V 字形孔的圆锥角约为 90°，底部曲率半径约为 0.07~0.5mm。为避免轴针受冲击时的损伤，采用弹簧宝石轴承结构。

张丝仪表结构，以磁电系为例，如图 21 所示。张丝的一端固定于可动部分的张丝座上，而另一端

则固定于张丝弹片上，于是兼顾了支持可动部分、产生反作用力矩（控制力矩）和向可动部分传导电流的三种作用。限制器是个小圆筒，它置于离张丝固定座凸部约 0.2~0.4mm 处，用来限制可动部分受冲击而发生轴向或横向移位的现象，从而防止张丝和可动部分受伤。张丝采用铂铑合金或铍铜、磷青铜等材料，经过压延后其宽厚比约达 10，在实用范围内其反作用力矩比例于张丝的扭转角度。当张丝弹片前后变形约 1mm 时，给张丝的张力为 50~200g。弹片要用弹性极限高的铍铜材料。

提高指示响应的阻尼机构，可采用电磁阻尼、涡流阻尼、空气阻尼及液体阻尼。电磁阻尼主要用于磁电系，是用线圈或线圈架上产生的感应电势来阻尼的。涡流阻尼主要用于电磁系，是用铝阻尼片在永久磁铁两极之间旋转时产生的涡流与磁铁磁通间的作用力来阻尼的，如感应式和电磁式等用这种阻尼形式。空气阻尼是利用附在可动部分上的阻尼片在严密的空气阻尼箱内移动时产生的阻力。液体阻尼是在可动部分和固定部分的间隙内注入硅油产生粘性阻尼。

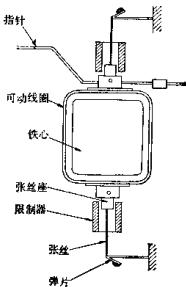


图21 张丝式仪表基本结构

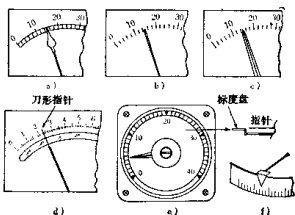


图22 标度和指针

做为仪表读数装置的标度盘和指针，如图 22 所示，根据仪表的等级和用途选用不同形式。也有用

装在可动部分上的反射镜代替指针,而在标度盘上映出光点读数的光标式仪表。

仪表的外部机壳,主要采用 ABS 树脂、酚醛树脂等成型品,读数窗使用玻璃或透明内烯树脂成型品,通常采取消除静电措施。配电盘式仪表的外部机壳尺寸,见 JIS C 1103(1984)。

(c) 特性 当被测量随时间变化时,要求指示响应尽可能快,但仪表的响应一般在 $0.1 \sim 3$ 秒内。当响应时间快于 0.1 秒时,由于交流仪表的转动转矩是二倍于被测量频率的交变转矩,所以对工频也开始响应,故不能读出。

仪表有如下误差因素。首先存在刻度误差和读数误差,因此测量值与真值不一致,指示值允许有相应于仪表等级的误差。这一误差的允许范围称为允许误差,由 JIS C 1102(1975)规定。其次是轴针和轴承宝石间的摩擦、游丝或张丝的弹性疲劳、自热、可动部分机械平衡不完善等内在因素,以及周围环境温度、磁场、待测频率、波形、功率因数等外在因素引起的指示误差。因此,仪表若不在规定状态中使用,误差将要增大。

(d) 校正试验法 为了进行准确的测量,有必要校正仪表的标度。在直流状态下校正 0.2 级直流及交直流仪表,需用标准电池、直流电位差计、标准分压器、标准分流器等作为标准器。近年来,多半采用高精度数字电压表代替电位差计。校正其它等级的仪表时,也必须用精度高于被校验仪表的仪器做为基准仪器。 0.2 级交流电动式仪表通常用直流校验。直流和交流的差先用比较器来校验。现在,无论是直流还是交流表大多用标准电流、电压发生器来校验,因为它输出的电流及电压值是由标度盘设定的,所以使用方便。精度为 $0.1 \sim 0.3\%$ 的发电机,广泛地用于 0.2 级以下仪表的校正试验中。近来,随着功率标准器的电子化,也使用精度为 $0.1 \sim 0.3\%$ 的数字功率表。

2.1.2 磁电式仪表(动圈式) 磁电式仪表是在永久磁铁的两磁轭与铁心间的 $1 \sim 2\text{mm}$ 空间磁场内置有可动线圈的直流专用仪表。结构如图 23 所示, N 、 S 为磁极, P 为极靴, D 为可动线圈, F 为游丝, C 为铁心。可动线圈由铜或铝漆包线绕在矩形铝架上构成,在其上下两端附装轴针,用宝石文承着可以偏转。

如果设气隙的磁通密度为 $B(\text{Wb}/\text{m}^2)$, 矩形线

圈的宽度、高度、线圈匝数分别为 $b(\text{m})$ 、 $h(\text{m})$ 、 n , 流经线圈的电流为 $i(\text{A})$, 反作用力矩(控制力矩)系数为 $\tau(\text{Nm}/\text{rad})$, 可动线圈从机械零位开始的转角为 $\theta(\text{rad})$, 那么 θ 与 i 之间有如下关系式:

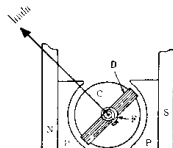


图23 磁电式仪表

$$\tau\theta = Bbhni \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

磁电式仪表有从标准用到小型的各种型式,最大标度值约为 20mA 的电流表,其被测电流全部流经可动线圈,当电流值大于 20mA 时要用分流器和毫伏表。分流器额定电压在 $45 \sim 1000\text{mV}$ 间有几种规格,一般为 50mV 。电压表的工作电流一般为 1mA ,即要求内部电阻为 $1000\Omega/\text{V}$,因此要在 1mA 电流表上串接附加电阻构成电压表。便携式仪表,为使用方便,一般都具有较多的量程。

磁电系的温度误差,是由于 (i) 气隙磁通密度, (ii) 反作用力矩, (iii) 可动线圈电阻随温度变化等所引起的。直接作为电流表使用时, (i)、(ii) 的两种变化影响互相抵消而使合成温度系数为 $(+0.05 \sim 0.2\%)/10^\circ\text{C}$ 。在精密电流表中,将温度系数近似为零的锰铜电阻与动圈并联,使流过线圈的分流电流呈现负温度系数,从而得到补偿。对于电压表,又有 (iii) 引起的误差,如果采用的附加电阻比线圈电阻大得多,而且温度系数非常小,则此项误差可以忽略。用分流器的电流表和多量程测量仪表中,采用了斯温伯恩温度补偿电路,如图 24 所示。设可动线圈及其串联电阻之和为 R_1 , 温度系数为 α_1 , 并联在 R_1 上的电阻为 R_2 (采用一般铜线电阻), 温度系数为 α_2 , 串联在 R_1 、 R_2 上的锰铜电阻为 R_3 (温度系数为零)。这时,线圈电流 i 的温度系数

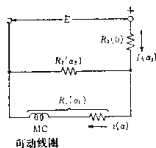


图24 斯温伯恩电路

为

$$\alpha = \frac{(a_2 - a_1)R_1}{R_1 + R_2} - \frac{a_{12}R_{12}}{R_{12} + R_3}$$

式中, $R_{12} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$, $a_{12} : R_{12}$ 的温度系数

为了完全补偿温度误差, 必须抵消直接作为电流表使用的指示表的误差。此外, 也有利用热敏电阻补偿温度误差的方法。这是用串联在动圈上的热敏电阻的负温度系数补偿动圈电阻的正温度系数的方法。

2.1.3 电磁系仪表 (动铁式) 电磁系仪表,

主要用于工频电流、电压的测量, 有精密型、便携型、配电盘型及面板型。电磁系的精度略低于电动系, 但因结构简单、耐用、抗过载能力强、价廉而被广泛采用。其原理是用固定线圈电流产生的磁场, 同其中放置的铁片间的电磁作用力产生动作。铁片形状有种种型式, 现在实用的有排斥式和排斥吸引式两种。排斥式, 是在固定线圈电流产生的磁场中, 配置着围绕转轴中心转动的动铁片和与之并排的固定铁片。因而两铁片被磁化, 在末端呈现出相同极性, 使其相互排斥而产生力矩。排斥吸引式如图 25 所示, 由两组可动和固定铁片分别构成排斥形式, 当固定线圈电流增加使可动铁片的偏转角增大时, 便处在另一组固定铁片的吸引状态中。因此, 这种型式的转动力矩大, 标度除零点附近外也都很均匀。铁片使用磁滞小的合金, 如坡莫合金等。转动转矩 T 一般如下式所示, 它同游丝或张丝的反作用力矩相平衡而指示出电流有效值。

$$T = \frac{1}{2} i^2 dL/d\theta \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

式中 i : 流经固定线圈的电流 (A); L : 线圈的自感 (H); θ : 可动部分偏转角 (rad)。

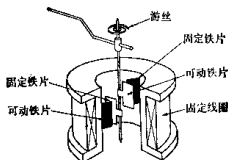


图25 排斥吸引式电磁系仪表

测量范围, 普通的电流表为 20mA, 电压表为 15V 以上。但是, 如果小于上述值, 则电流表的电

压降要增大, 电压表消耗的电流增大, 因而都不合适。图 26 是一种携带式仪表的内部接线图。其中, 图 (a) 为具有两个量程的电流表, 采用 9 股绝缘铜线做线圈, 最大标度比为 1:5, 图 (b) 为两个量程的电压表。

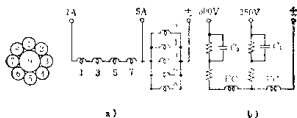


图26 携带式电磁系仪表接线图

电磁系从原理上看, 也可用于直流工作, 但由铁片的磁滞产生误差, 而且其功耗 VA 较之磁系直流表大, 所以只能作为交流专用表。使用频率一般为工频, 其频限对电流表约为 400Hz, 对电压表约为 100Hz。影响电流表频率特性的主要因素是固定线圈周围的金属部分上产生的涡流, 以及固定线圈匝间的分布电容。为了防止涡流影响, 在固定线圈周围尽量不用金属材料, 即使万不得已使用金属材料时也必须用高电阻的, 同时设一缺口, 以切断涡流回路。对于电压表, 除存在电流表的误差外, 还有固定线圈电感的影响, 致使工作电流随频率变化产生误差。补偿措施如图 26(b) 所示, 采用在部分串联电阻上并联适当的电容, 以限制电路阻抗随频率变化的方法。

2.1.4 电动系仪表 电动系仪表 (dynamometer) 如图 27 所示, 动侧在固定线圈的电流产生的磁场中可以旋转, 可用于从直流到 1kHz 的交流电流、电压和功率的精密测量。仪表的指示为有效值而且从原理上看, 交流和直流之差甚小, 因此可

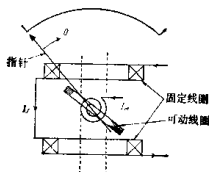


图27 电动系仪表原理图

在直流下定标度而直接用于交流测量中。现在,主要作为便携式精密功率表广为利用。转动动力矩 T 可通过系统的磁能量对偏转角的微分求得,即

$$T = I_m \cdot I_f \cdot \frac{dM}{d\theta} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

式中 I_f : 固定线圈电流(A); I_m : 可动线圈电流(A); M : 两线圈的互感(H); θ : 可动线圈的偏转角(rad)。

这一转动动力矩同装在可动部分上的游丝的反作用力矩相平衡而确定出一定的偏转角。

在功率表的固定线圈中通入负载电流,动圈与其串联的高电阻上加上负载电压,便可作为交直流两用功率表使用。

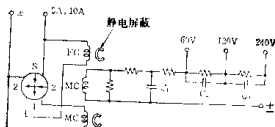


图28 单相功率表

图28是便携式单相功率表的内部接线图一例,电流取1:2的两种额定值,可通过插头变换固定线圈为串联或并联来实现。功率表在理想条件下产生转动动力矩的过程中,固定线圈电流与其磁场应同相且保持一定的比例关系,但当由于磁场中的金属引起的涡流破坏这种关系,而且在电压和动圈电流间所存在的同样的关系也由于动圈和定圈的电感影响而受到破坏时,便产生功率因数误差和频率误差。

三相功率表,是按两功率表法连接两个单相功率单元,将两者的动线圈装在同一转轴上,在一个表内取两功率相加值的一种仪表。

在电流表中,流经固定线圈的被测电流也流经可动线圈,但要设置分流器,使其与待测电流成比例。其标度呈平方特性,在交流下指示出有效值。电压表则由毫安表串联电阻构成。

2.1.5 其它仪表

(a) 热电系仪表 热电系仪表的原理,是将被测电流通入热丝,并由连接在热丝中心的热电偶检出热丝的温升,而后用高灵敏度毫伏表测量。因为是热交换,所以能获得真正的有效值,而且有优异的频率特性,因而使用在直流到数千 MHz 的高频

测量中。

热丝为用镍铬铁合金、康铜、锰铜等材料制成的细电阻丝,热电偶由镍铬合金线(+)和锰铜线(-)组合而成。为了防止空气对流等所引起的放热误差,真空式热电偶封装在真空度达 $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ mmHg}$ 的玻璃容器内。

图29为热电系仪表原理图以及真空式热电偶的一例。

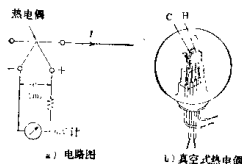


图29 热电系仪表

(b) 静电系仪表 静电系仪表,是利用在两个金属电极上加电压时所产生的吸引力或排斥力而构成的一种仪表。其原理为电压驱动,因而功耗甚小,适于高压、高阻抗电路的电压测量,而且有优异的频率特性,可用于直流到高频的测量。其指示为有效值。

图30为利用吸引力测量 $10 \sim 50 \text{ kV}$ 高压的静电系电压表。保护环使两电极的电力线变得均匀,同时增大绝缘能力,与可动电极有电连接。在两电极间加电压 E (V) 所产生的吸引力为 F (N·m),可由下式求得,此力同不平衡重量相平衡而取静止状态。

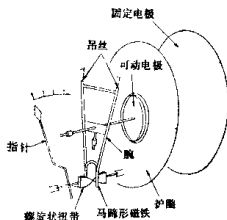


图30 改变电极间隔的静电系电压表