

用计算电容法绝对测定电学阻抗*

张 钟 华

(中国计量科学研究院)

一、引 言

电阻的绝对测量是电测量技术的基础性工作之一。用绝对测量法定义的欧姆值 Ω_{ABS} 与绝对安培 A_{ABS} 一起可导出所有的其他电学单位，因此电阻的绝对测量是一个独立完整的电测量体系中必不可少的一部分。另一方面，此项工作与基本物理常数的测定与平差也有密切的关系。我们知道，有一些物理常数的测定是与绝对安培 A_{ABS} 相联系的(如 γ'_p)，还有一些则与绝对伏特 V_{ABS} 相联系(如 $\frac{2e}{h}$)。在 SI 单位制中只定义了 A_{ABS} ， V_{ABS} 需由方程

$$V_{\text{ABS}} = A_{\text{ABS}} \Omega_{\text{ABS}} \quad (1)$$

导出。因而在测定 $\frac{2e}{h}$ 这一类物理常数时，需引入比例量

$$K = \frac{\Omega_{\text{ABS}}}{\Omega_{\text{BI-69}}}, \quad (2)$$

$\Omega_{\text{BI-69}}$ 是保存在国际计量局的欧姆单位。另一方面，在推导物理常数之间相互联系的方程时也需要引入 K 值。因而在进行物理常数的平差时， K 值是一个重要的辅助常数^[1-2]。这个数值的测定就是通过电阻的绝对测量进行的。

电阻的绝对测量与物理常数间还有另一方面的联系。后面将谈到，用计算电容来实现电阻绝对测量时需用到真空介电常数 ϵ_0 的数值。由于

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}, \quad (3)$$

因而从电阻绝对测量的角度也会对最重要的物理常数之一——光速 c 的测定提出很高的要求。

二、电学阻抗绝对测量系统

目前，准确度最高的电阻绝对测量是用计算电容的方法实现的。测量系统可用图 1 来表示。由于在系统中同时实现了电容、电阻、电感三者的绝对测量，故此系统称为“电学阻抗绝对测量系统”。其中的核心部分——计算电容是一个几何尺寸可以精确测量的真空介质电容器，因而我们就可以从长度基准(Kr⁸⁶或激光副基准)和光速值导出其电容量来。计算电容的电容量通常不大于 1pF，故需用一个 C-C 过渡电桥传递到较大的电容量。再通过一个实现方程

$$\omega RC = 1 \quad (4)$$

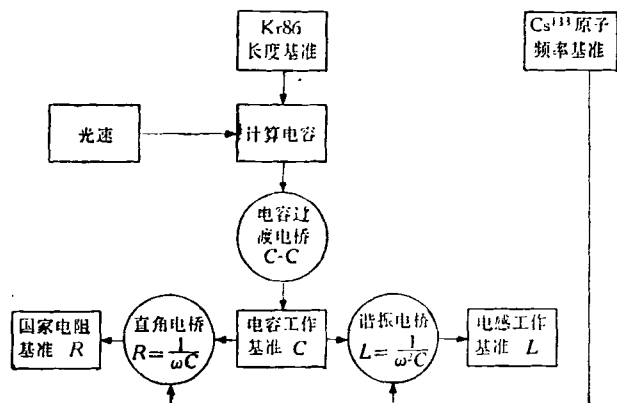


图1 用计算电容法实现的电学阻抗绝对测量系统

* 1979年3月13日收到。

的电桥传递出电阻的绝对数值，并经过适当的直流传递过程就可导出 Q_{ABS} 。

为了完整起见，在系统中也通过平衡方程为

$$\omega^2 LC = 1 \quad (5)$$

的谐振电桥导出了电感量的绝对单位——绝对亨利 H_{ABS} 。

中国计量科学研究院已按图 1 的方案实现了一个电学阻抗绝对测量系统，导出了电阻、电容、电感的绝对单位。下面简要介绍一下该系统的几个关键部分：

1. 计算电容主体

计算电容主体实际上是一个其几何尺寸可以精确测量，因而电容量可以计算出来的精密电容器。通常型式的电容器要完成此种任务有一定困难，因为要计算出电容量往往需要精确测出很多几何尺寸，很难实现。1956 年澳大利亚的 A. M. Thompson 和 D. G. Lampard 提出了一个静电学上的新定理，把问题大大简化了^[3]。该定理证明了一个截面为任意形状的无限长导电柱面，如用无限小的绝缘气隙将其分为四个电极，则单位长部分电容 C_1 和 C_2 满足方程

$$2^{-\frac{C_1}{C_0}} + 2^{-\frac{C_2}{C_0}} = 1 \quad (\text{场在柱面内或柱面外均可}), \quad (6)$$

其中

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \ln 2}{\pi} = 0.01953549043 \cdot \epsilon_r \text{pF/cm}, \quad (7)$$

这是一个常数。 C_1 与 C_2 通常称为“交叉电容”(Cross-Capacitance)，如图 2 所示。

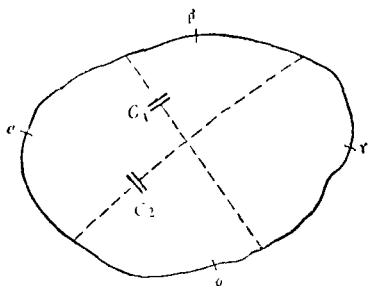


图 2 交叉电容示意图

当 $C_1 \approx C_2$ 时，可把(6)式展开成

$$\bar{C} = \frac{C_1 + C_2}{2} = C_0 \left[1 + \frac{\ln 2}{8} \left(\frac{C_1 - C_2}{C_0} \right)^2 - \frac{(\ln 2)^3}{192} \left(\frac{C_1 - C_2}{C_0} \right)^4 + \dots \right]. \quad (8)$$

总电容量为

$$C = \bar{C}l, \quad (9)$$

l 为轴向长度。

因此如按这个定理来建立计算电容，可有如下的特点：

1. 可以任意选择适当的截面形状。
2. 如令 $C_1 \approx C_2$ ，则其平均电容量与常数 C_0 只差二阶以上的小量，稳定性很高。
3. 总电容只取决于一个轴向长度，用适当的干涉仪可把此长度测量到接近长度基准的水平。

因此，这种类型的电容器的准确度可做得很高，达到千万分之几甚至更高的精度。

图 3 所示为我国计算电容基准的电极布置图，它由 8 根 $\phi 30$ 的相互绝缘的圆棒组成。2, 3, 6, 7 四根棒构成一个如图 2 所示的工作空

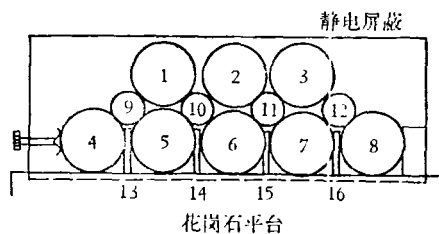


图 3 电极布置图

间；其他圆棒只起支撑作用。为了确定电容器的轴向长度，2, 3 两根电极做成 Kelvin 式等电位保护电极的结构，如图 4 所示，其基体是熔融石英玻璃管，表面用真空蒸着法金属化，再用光刻技术刻出两圈很细的绝缘气隙，气隙中心间的距离就是电容器的轴向长度，可在中国计量科学研究院长度室的光电光波比较仪上测定。

我国的计算电容基准名义值定为 0.5pF ，相对误差为 3.5×10^{-7} 。

2. 电容过渡电桥和电容工作基准

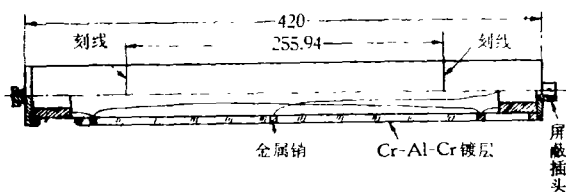


图4 指零棒结构图

计算电容的标称容量只有 0.5 pF, 实际使用时需要把其数值传递到一组包括各种不同名义值的电容工作基准, 所使用的比例量具是电容过渡电桥。这是一个感应耦合比例臂电桥, 原理图如图 5 所示, 主要技术指标如下:

电容测量范围: 0.5 pF—10⁴pF;

工作频率: 400—2500Hz;

比例误差: $\pm 5 \times 10^{-8}$ 。

电容工作基准组有自制的熔融石英介质电容器和空气电容器两种。前者的稳定性很高,

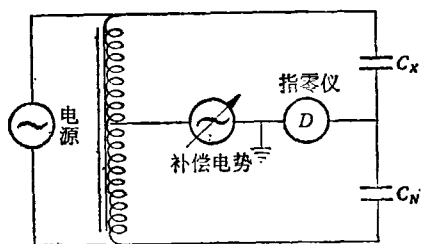


图5 电容过渡电桥

年变化可小于 1×10^{-6} , 用以保存计算电容的数值, 但它的温度系数较大 ($1-2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$), 频率响应也稍差。后者(电极为殷钢)的优点则是温度系数小 ($1-2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), 频率响应良好。采用这两种电容器构成电容工作基准组可互相补充, 得到较好的结果。

3. 用直角电桥进行电容电阻传递

为了从电容工作基准组传递出电阻的绝对单位, 可以利用一个平衡方程为

$$\omega RC = 1 \quad (10)$$

的电桥, 其原理图见图 6。此电桥需要用到一个高质量的直角电源, 故称为直角电桥。为了减轻对直角电源的要求, 实际上用了两个如图 6 所示的线路组合成一个双电桥, 把两个电桥的读数平均后, 直角电源的误差只引起二阶误

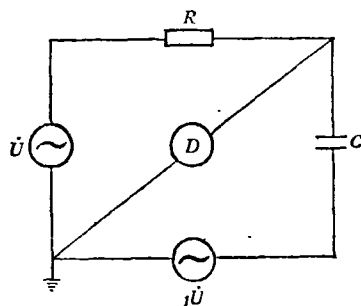


图6 直角单电桥

差。此外, 由(10)式可看到, 电桥的平衡方程直接与频率有关, 因而电桥的供电电源采用了高质量的石英振荡器。振荡器的频率由中国计量科学研究所的 Cs¹³³ 原子钟频率标准予以精密测定。

直角电桥的主要参数为 $R = 10^4 \Omega$; $C = 10^4 \text{pF}$; $\omega = 10^4 \text{rad/s}$ ($f \approx 1592 \text{Hz}$); 传递准确度: $\pm 3 \times 10^{-8}$ 。

4. 用谐振电桥进行电容电感传递

图 1 中的电学阻抗绝对测量系统中还有一部分重要内容是用谐振电桥进行电容电感传递。此电桥的线路基本上与图 5 相同, 但被测阻抗不一样, 具体接法见图 7。电桥的平衡方程为

$$\omega^2 LC = 1, \quad (11)$$

由此可以从电容和频率传递出电感量的绝对数值, 主要参数为 $L = 0.1 \text{H}$; $C = 0.253 \mu\text{F}$; $f = 1000 \text{Hz}$; 传递准确度: $\pm 5 \times 10^{-6}$ 。

图 7 的线路是串联谐振的形式, 实际上也可以将其接成并联谐振的形式, 两种接法的测量结果彼此符合得很好。

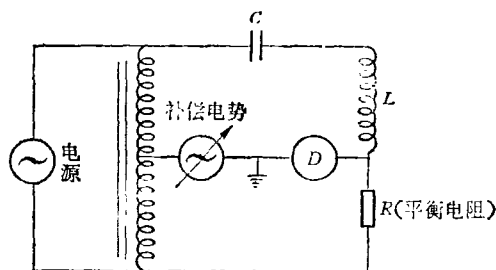


图7 谐振电桥

三、测量结果

1978年10月,用图1所示的电学阻抗绝对测量系统求得了我国的法定欧姆基准与绝对欧姆之间的关系为

$$Q_{NIM} = Q_{ABS} - 0.36 \mu\Omega \pm 0.48 \mu\Omega. \quad (12)$$

同年9月,我国的电阻基准与国际计量局保存的电阻单位 Q_{BI} 进行了比对,结果为

$$Q_{NIM} = Q_{BI} + 0.55 \mu\Omega. \quad (13)$$

由此可知,按照我国的测定,有

$$Q_{BI} = Q_{ABS} - 0.91 \mu\Omega \pm 0.48 \mu\Omega. \quad (14)$$

表1中列出了目前已发表的一些国家实验室进行电阻绝对测定的结果。可以看到,各国

表1 各国实验室电阻绝对测定结果

国别	实验室	测试日期	测定结果 $Q_{BI} - Q_{ABS}$	标准误差
澳大利亚	NML	1974	$-0.80 \mu\Omega$	$\pm 0.2 \mu\Omega$
美国	NBS	1974	$-1.02 \mu\Omega$	$\pm 0.05 \mu\Omega$
日本	FTL	1976	$-1.19 \mu\Omega$	$\pm 0.40 \mu\Omega$
法国	LCIF	1977	$-1.4 \mu\Omega$	$\pm 1.5 \mu\Omega$
中国	计量院 (NIM)	1978	$-0.91 \mu\Omega$	$\pm 0.48 \mu\Omega$

的结果在误差范围内能够互相符合^[4-6]。

但是要指出,并不能认为表1中的数据就严格表示了(2)式中的K值的测试结果。尽管各国的测试结果都折合到了 Q_{BI} ,但保存在国际计量局的电阻单位是一种实物基准,不是严格不变的。按照文献[2]中用NML历年的测试数据进行的推算, Q_{BI} 每年要减小 $0.043 \mu\Omega$,因此只有1969年1月1日这组实物基准所复现的单位 Q_{BI-69} 才是真正有确切定义的欧姆单位。不过,由于目前测试数据还不够充分,文献[2]中的推论还不是最后的结论。随着各国绝对测量电阻的工作进一步的开展,(2)式中的K值将能得到一个明确的数据。

参 考 文 献

- [1] B. N. Taylor, W. H. Parker, D. N. Langenberg, *Rev. Mod. Phys.*, 41-3 (1969), 375-498.
- [2] E. R. Cohen, B. N. Taylor, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2-4(1973), 663-729.
- [3] D. G. Lampard, *PIEE*, 104C (1957), 271.
- [4] R. D. Cutkosky, *Trans. IEEE*, IM-23-4 (1974), 295.
- [5] 電総研 = 電研, No. 328, 5(1977), 2-6.
- [6] N. Elnékvé, A European Conference on Precise Electrical Measurement, (1977), 53.

中国引力与相对论天体物理学会正式成立

——第一届代表大会于1979年11月12日至17日在苏州市举行

中国引力与相对论天体物理学会第一届代表大会于11月12日至17日在苏州市举行。中国物理学会副理事长、党组书记甘柏同志致开幕词。出席会议的代表130余人,他们来自科研、教育、科普各条战线的80个单位。我国老一辈著名科学家周培源、彭桓武、卢鹤绂、胡宁、王淦昌、施士元、周孝谦等同志出席了大会。从去年广州引力与相对论天体物理讨论会后,一年来我国在理论研究、观测资料分析和引力实验等方面都取得了新的进展,会议收到论文50篇,其中35篇在会上作了报告。周培源教授在会上就他的近期工作,作了题为“坐标在广义相对论引力论中的意义”的学术报

告。报告引起代表们很大兴趣,各种意见展开了热烈的讨论。会议讨论并通过了“中国引力与相对论天体物理学会章程(试行稿)”;以无记名投票和差额选举方式选举出周培源、胡宁等24名理事会理事。旅美华侨物理学家胡比乐也当选为理事,会议还为我国台湾省和港澳同胞保留了理事名额。在第一次理事会上,胡宁教授当选为理事长(按姓氏笔划),方励之、陈嘉言、郭汉英、秦荣先当选为副理事长。学会秘书长由秦荣先兼任。会议在新任理事长致闭幕词后圆满结束。

(刘易成)