

全国电磁计量技术交流会

文集

中国计量科学研究院情报室

1936

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

编 者 的 话

我院于1975年11月在福州市召开了“全国电磁计量技术交流会”。参加这次交流会的代表来自全国各地的厂矿、大专院校、科研机构 and 省市计量部门计 200 多个单位。会上共交流了116篇文章。

这些文章反映了我国电磁计量技术战线上的广大计量人员自无产阶级文化大革命以来，在毛主席无产阶级革命路线指引下，以阶级斗争为纲，坚持“独立自主，自力更生”的方针，在为社会主义革命和社会主义建设服务方面所取得的新成就。

编入这本文集里的25篇文章仅仅是其中的一部分，现在编辑出版供各有关生产、科研和教学部门从事电磁计量工作的同志参考。因编者水平所限，如有缺点和错误，望读者批评指正。

中国计量科学研究院情报室

1976年10月

目 录

1. 我国饱和标准电池温度系数的精确测定.....	(1)
2. 用交流约瑟夫森效应监督保持伏特基准的研究.....	(11)
3. 代换式电位差计的置换电桥法自检与核验.....	(15)
4. 直流比较仪中的磁调制器.....	(34)
5. 磁调制式直流放大器.....	(43)
6. 通讯电缆阻容全自动测试仪.....	(55)
7. 关于感应分压器的基本理论.....	(69)
8. 用磁位计测量整流系统中的直流大电流和电能.....	(106)
9. 0.1—15仟伏精密电压互感器和双级电压互感器的研制	(118)
10. 热电转换交流标准.....	(137)
11. 电子数字式精密功率、电能表.....	(142)
12. 电工测量仪表万能校验装置.....	(157)
13. 704—2型数字式工频相位计.....	(165)
14. SG—2型数字式高压架空输电线路故障点探测器原理	(187)
15. 变压器负荷记录表介绍.....	(206)
16. 误差极限值的综合方法.....	(208)
17. 在较弱磁场中测定质子回旋磁比 γ'_p	(213)
18. 磁通门磁强计研制报告.....	(233)
19. 积分式超导材料磁化曲线测量装置.....	(272)
20. 对影响R-C05永磁测量几种因素的讨论.....	(279)
21. 霍尔效应磁性记录仪.....	(292)
22. 永磁材料直流磁特性自动测量装置和方法.....	(304)
23. 交直流叠加磁化曲线的自动记录.....	(335)
24. 关于磁化水在早稻上的应用.....	(342)
25. 充磁方法对小型铁氧体直流永磁电机特性的影响.....	(345)
26. 电磁计量的国内外情况.....	(354)

我国饱和标准电池温度系数的精确测定

实 验 小 组 *

提要：本文系通过精密实验，提出了一个新的饱和标准电池电动势——温度公式（四次式）：

$$E_t = E_{20} - [39.94(t-20) + 0.929(t-20)^2 - 0.0090(t-20)^3 + 0.00006(t-20)^4] \times 10^{-6} \text{伏}$$

及较简便的三次温度公式：

$$E_t = E_{20} - [39.9(t-20) + 0.94(t-20)^2 - 0.0090(t-20)^3] \times 10^{-6} \text{伏}$$

四次式可在 $0 - +40^\circ\text{C}$ 范围内使用，三次式可在 $5 - +35^\circ\text{C}$ 范围内使用。

这里提出的公式，比习惯上采用的1908年美国沃尔夫提出的“国际公式”准确和适用。

一、前 言

饱和标准电池（以下简称电池）是用来保存和传递电压单位量值的一种标准量具，它和标准电阻共同构成电学计量的主要标准器。由于电池的电动势在不同的温度下有 不同的数值，因此在实际使用中就需要用电池电动势——温度公式（以下简称温度公式）进行换算。过去，习惯上采用的温度公式是国际上一直沿用的1908年美国沃尔夫提出的“国际公式”^[1]：

$$E_t = E_{20} - [40.6(t-20) + 0.95(t-20)^2 - 0.01(t-20)^3] \times 10^{-6} \text{伏}$$

但是，这个半世纪以前的公式，经我国长期使用和多次试验，证明已不满足高精度电池生产和计量技术的需要。国际上也是这种情况。所以我国及一些国家，曾陆续进行过多次确定温度公式新系数的试验，发表了一些结果^{[2][3][4][5]}。

从一九七四年七月到一九七五年一月，在上海电工仪器厂进行了一次精确的测定温度系数试验。提出了我国的温度公式：

$$E_t = E_{20} - [39.94(t-20) + 0.929(t-20)^2 - 0.0090(t-20)^3 + 0.00006(t-20)^4] \times 10^{-6} \text{伏}$$

下面扼要介绍这次实验情况。

* 参加实验小组的有：上海电工仪器厂、中国计量科学研究院、中国计量科学研究院分院、上海市计量测试管理局、上海电工仪器研究所、扬州师范学院、陕西省计量局、天水长城电工仪器厂等八个单位。本文由中国计量科学研究院电磁室执笔。

二、实 验 概 况

(一) 试验电池的组成

参加试验的有三十五个精密电池,由四个单位制造,均为酸性H型电池,其酸性都在 $0.026\sim 0.030\text{N}$ 范围,年稳定性约一微伏。镉汞齐含量,基本上按百分之十配制(详见表1)。这样的电池,在 $0\sim +40^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用,从电池特性来说是合理的。

(二) 试验方法

试验是在 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为50%的恒温室里进行。工作基准电池放置于 $20\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ 的恒温油槽中。试验电池放置于可调温油槽中,其温度稳定在 0.002°C 左右。

采用一等标准铂电阻温度计及精密特殊电桥测温。测定电动势值是用最小步进值为 $0.1\mu\text{v}$ 的UJ35型低阻电位差计,其装置常数为 $0.05\mu\text{v}/1\text{mm}$ 。

表1 试验电池一览表

测 量 序 号	型 号	制 造 编 号	制 造 厂 家	代号	制 造 日 期	玻 璃 料 号	Hg ₂ So ₄ 制 法	含 量
1—10	BC 17	10	天水长城电工仪器厂	A	1973	23号	电 解 法	10%
11—20	BD 10	71015	上海计量局实验工厂	B	1971	23号	电 解 法	11%
21—29	BC 11	73	上海电工仪器厂	C	1967	95号	化学沉淀法	10%
31—36	BC 11—6	7402	扬州师院实验工厂	D	1973	5 号	电 解 法	10%

注:以下文字、图表均用制造厂家代号表示。

试验温度范围为 $0\sim +40^{\circ}\text{C}$,按 $20^{\circ}\text{C}\rightarrow 40^{\circ}\text{C}\rightarrow 20^{\circ}\text{C}\rightarrow 0^{\circ}\text{C}\rightarrow 20^{\circ}\text{C}$ 的升降温闭合循环程序,每间隔 5°C 为一测量点。首先升温,开始及终点均在 $+20^{\circ}\text{C}$ 。在测量点上,分别测定温度值及对应的电动势值。升降温的速率约为 $1^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ (15°C 以下降温速率较慢)。试验电池在每个测量点上恒温72小时后开始测定,取用120小时的测定值及前两个测定值(任相邻两次测定的平均间隔时间不少于12小时),用此三次测定的平均值作为该点温度下的电动势值。三次测定值彼此间极差约在 $0.3\mu\text{V}$ 左右。

对于每个电池有升降温两组测定值,每组有9个数据,5个未知数(E_{20} 、 α 、 β 、 γ 、 δ),用最小二乘法经电子计算机分别求出每个电池升降温的温度系数(α 、 β 、 γ 、 δ)。然后,取升降温的温度系数的平均值作为该电池的温度系数。这样,就算得35个电池的温度系数。其中24号电池温度系数离群,按统计理论计算结果应予剔除。最后得34个电池的对应温度系数的平均值,作为此次实验结果。

三、温度系数的确定及所采用的温度公式

按照前面的试验方法,得到35个试验电池升、降温的温度系数(α 、 β 、 γ 、 δ)及其对应的标准差。这些数据均列于表2及表3中。表中M是各测量点的电动势测定值的标准差。因24号电池剔除,即取34个电池的对应温度系数求其升、降温的组平均值及总平均值,其计算结果也列于表2及表3中。

从表2及表3,可计算出电池温度系数的最后平均值,并列于表4中。

表 4 34个电池温度系数最后计算结果

系 数 平 均 值	$\alpha(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	$\beta(\mu\text{V}/^\circ\text{C}^2)$	$\gamma(\mu\text{V}/^\circ\text{C}^3)$	$\delta(\mu\text{V}/^\circ\text{C}^4)$
升 温	-39.9402	-0.92745	0.008994	-0.0000669
降 温	-39.9298	-0.93004	0.008983	-0.0000595
升、降温	-39.9350	-0.92874	0.008988	-0.0000632
最后取值	-39.94	-0.929	0.0090	-0.00006

确定了温度系数后,即得到 $0 \sim +40^\circ\text{C}$ 范围内的四次式:

$$E_t = E_{20} - [39.94(t - 20) + 0.929(t - 20)^2 - 0.0090(t - 20)^3 + 0.00006(t - 20)^4] \times 10^{-6} \text{ 伏} \dots\dots\dots (1)$$

如令 $\delta E_t = E_t - E_{20}$

$$\text{则 } \delta E_t = -39.94(t - 20) - 0.929(t - 20)^2 + 0.0090(t - 20)^3 - 0.00006(t - 20)^4 \text{ 微伏} \dots\dots\dots (2)$$

式中 E_{20} —在 $+20^\circ\text{C}$ 时,某一电池电动势精确值。

δE_t —任一电池,当偏离 $+20^\circ\text{C}$ 时要采用的温度改正量。

温度改正量 δE_t 与温度 t 的关系曲线见图 1

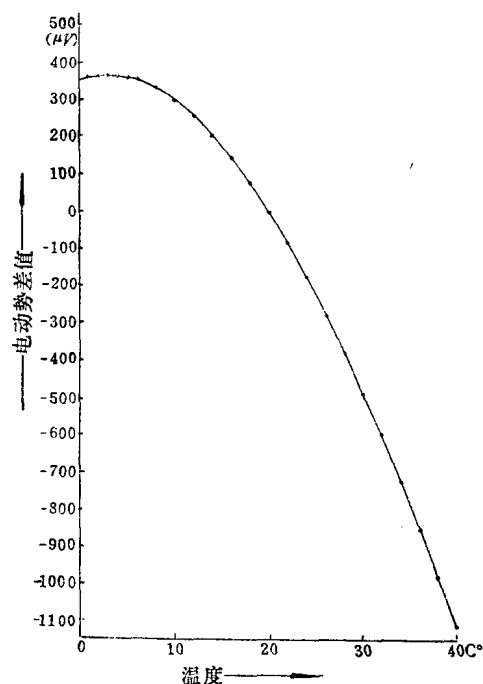


图 1 $\delta E_t \sim t$ 曲线图

在这次实验中,也计算出 $5 \sim +35^\circ\text{C}$ 范围内的三次温度公式:

$$E_t = E_{20} - [39.9(t - 20) + 0.94(t - 20)^2 - 0.0090(t - 20)^3] \times 10^{-6}$$

此公式在使用中会比四次式简便些。

四、温度公式的讨论

(一) 四次式的准确度

在同种工艺条件生产的精密电池,采用 (2) 式作温度改正量, δE_t 值不确定度约为:

$$15 \sim 25^\circ\text{C} \pm 1\mu\text{V}$$

$$10 \sim 30^\circ\text{C} \pm 2\mu\text{V}$$

$$5 \sim 35^\circ\text{C} \pm 3\mu\text{V}$$

$$0 \sim 40^\circ\text{C} \pm 4\mu\text{V}$$

这里的不确定度即指 δE_t 的计算值与某一电池的 $(E_t - E_{20})$ 实际值之差。

(二) 四个制造厂 (单位) 各组电池温度系数平均值

表 5 四厂家的温度系数系数

厂 家	系 数	α $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	β $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}^2$	γ $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}^3$	δ $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}^4$
A	(10)	-39.915	-0.9285	0.00909	-0.000066
B	(10)	-39.936	-0.9299	0.00888	-0.000060
C	(9)	-39.990	-0.9301	0.00891	-0.000059
D	(6)	-39.918	-0.9266	0.00908	-0.000068
四 次 式		-39.94	-0.929	0.0090	-0.000060

从表 5 看出, 各制造厂电池温度系数平均值彼此间差别不大, 并接近于四次式中的温度系数值。如果制造厂工艺控制良好, 则各自出厂的电池, 其温度系数应分别与此次所得出的该厂的平均系数相近, 因而也与四次式中温度系数相近。这样, 这次所提出的公式, 对国内电池而言, 其适应性就大了。

(三) 四个厂家各组实测电动势组平均值 (E 实测) 与按国际计算值 (E 计算) 之偏差 (ΔE) 情况

此偏差 ΔE , 用图 2 表示。从图 2 看出, 在低于 20°C 时, 电动势实测值 (组平均值) 比按国际公式计算低; 而高于 20°C 时, 则测量值都高。四个厂家曲线特性几乎是相同的, 在 $15-25^{\circ}\text{C}$ 范围内, 四条曲线几乎重合, 没出现如西德试验电池那样, 有较大分散性。

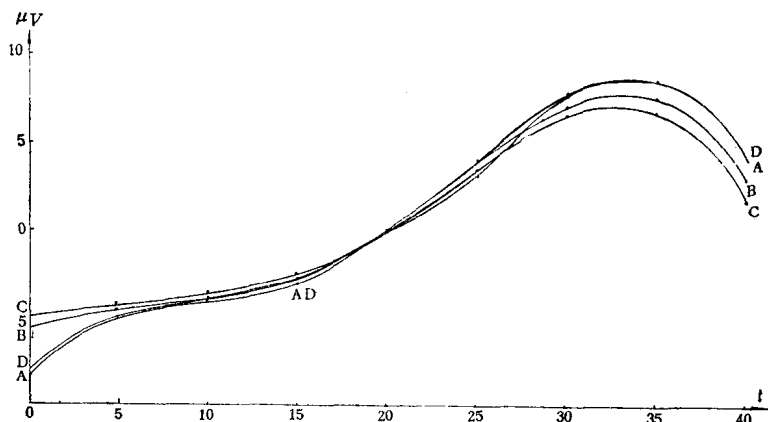


图 2

(四) 中国和国际、西德温度公式间比较 (见表 6)

* 1974年, 西德联邦物理技术研究院发表了四次温度公式:

$$E_t = E_{20} + \delta E_t$$

$$\delta E_t = - [39.83(t-20) + 0.930(t-20)^2 - 0.0090(t-20)^3 + 0.00006(t-20)^4] \times 10^{-6} \text{ 伏}$$

表6 温度改正量之间的差别

$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	δEt (中国四次式) - δEt (中国三次式) μV	δEt (中国四次式) - δEt (西德四次式)* μV	δEt (中国四次式) - δEt (国际三次式) μV
0		2.60	-6.40
5	0.04	1.88	-4.84
10	0.90	1.20	-4.10
15	0.44	0.58	-2.68
20	0	0	0
25	0.04	-0.52	3.66
30	0.10	-1.00	7.10
35	-1.16	-1.42	8.22
40		-1.80	4.00

从表6看出,在15—25 $^{\circ}\text{C}$ 范围内使用三次式与四次式差别不大于0.5微伏,而在3—+35 $^{\circ}\text{C}$ 范围则为1微伏。因此,一般讲用三次式就可以了。用国际公式时,在各点的误差较大,而西德公式与我国四次式较接近。

(五) 我国和西德、美国所得温度系数结果之比较 (见表7)

表7 近年来发表的电池温度系数极差、平均值和平均标准差

公 式		α ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)	β ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}^2$)	γ ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}^3$)	δ ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}^4$)
中国 (1974)	极 差	0.281	0.0121	0.00041	0.000032
西德 (1973)		0.613	0.0361	0.00234	0.000065
美国 (1972)		2.18	0.292	0.0116	—
中国 (1974)	系平* 数均 平标准 值差	-39.941 (± 0.021)	-0.9290 (± 0.0027)	0.00898 (± 0.00007)	-0.000063 (± 0.000007)
西德 (1973)		-39.875 (± 0.028)	-0.9256 (± 0.0035)	0.00884 (± 0.00009)	-0.00006 (± 0.000009)

从表7看出,我们的标准差比西德的较好些。

五、结 束 语

在这次实验过程中,试验小组同志以毛主席哲学思想为武器、坚持实践第一观点、破除迷信、解放思想、依靠群众、在兄弟单位大力支持下较快完成了实验工作。

通过这次实验,精确测定了我国电池温度系数,确定了我国采用的温度公式。

由于此次实验的电池,其镉录齐的含量基本上为10%。因此,四次公式可以在0—+40 $^{\circ}\text{C}$

* 指各电池对应温度系数的标准差的均方平均值。

范围内使用。

采用四次温度公式，在 $0 - +40^{\circ}\text{C}$ 范围内使用，其温度改正量 (δE_t) 与某一精密电池实际的 ($E_t - E_{20}$) 值相差约为 $1\mu\text{V}$ ($15 - 25^{\circ}\text{C}$)； $2\mu\text{V}$ ($10 - 30^{\circ}\text{C}$)； $3\mu\text{V}$ ($5 - 35^{\circ}\text{C}$)； $4\mu\text{V}$ ($0 - 40^{\circ}\text{C}$)。比用国际公式计算准确得多。

如果电池制造工艺控制良好，则电池的温度系数应与此次得到的平均系数相近，因而使用此四次公式引起的误差可能仍在上述范围。当然，公式本身仍然有待于在广泛使用中进一步验证它。使用者可以根据需要，采用四次式或者三次式。

参 考 资 料

- [1] F. A. Wolff: The Temperature Formula of the Weston Standard cell Bull. B. S. 5, 309 (1908)
- [2] M. Froehlich und F. Melchert: Neubestimmung der Temperaturabhängigkeit der Elektromotorischen Draft der Internationalen Weston-Elemente im Bereich von 10 bis 30°C , Metrologia. vol. 7, № 2, 58—65 (1971)
- [3] Hamer. W. J., Skapers. A., Field. B. F.: The EMF-Temperature coefficient of "Acid" standard cells of the saturated cadmium sulfate Type from 15 to 40°C , J. Research Nat. Bur. standards 76A, 321 (1972)
- [4] M. Froehlich und F. Melchert: Neubestimmung der Temperaturabhängigkeit der Elektromotorischen Kraft der Internationalen weston-Elemente im Bereich von 0°C bis 40°C , Metrologia, vol. 10, № 3, 79—86 (1974)
- [5] 国产高精度标准电池性能试验结果，计量工作，1, 38 (1974)

表 2 0 °C—40°C升温过程四次式温度系数

电池编号	α 10 ⁻⁶ V/°C		β 10 ⁻⁶ V/(°C) ²		γ 10 ⁻⁶ V/(°C) ³		δ 10 ⁻⁶ V/(°C) ⁴		M 10 ⁻⁶ V
1	-39.918	±0.020	-0.9272	±0.0025	0.00914	±0.00006	-0.000071	±0.000006	±0.29
2	-39.944	±0.029	-0.9246	±0.0037	0.00915	±0.00009	-0.000079	±0.000009	±0.42
3	-39.883	±0.028	-0.9244	±0.0036	0.00900	±0.00009	-0.000072	±0.000008	±0.41
4	-39.958	±0.032	-0.9207	±0.0042	0.00925	±0.00010	-0.000089	±0.000008	±0.47
5	-39.841	±0.042	-0.9236	±0.0055	0.00883	±0.00013	-0.000071	±0.000013	±0.62
6	-39.886	±0.050	-0.9213	±0.0065	0.00907	±0.00016	-0.000084	±0.000015	±0.73
7	-39.872	±0.024	-0.9311	±0.0031	0.00905	±0.00008	-0.000064	±0.000007	±0.36
8	-39.856	±0.028	-0.9222	±0.0037	0.00905	±0.00009	-0.000085	±0.000009	±0.41
9	-39.978	±0.029	-0.9217	±0.0038	0.00915	±0.00009	-0.000079	±0.000009	±0.43
10	-40.097	±0.018	-0.9208	±0.0023	0.00927	±0.00006	-0.000081	±0.000006	±0.26
组平均值	-39.9233		-0.92376		0.009096		-0.0000775		
11	-39.944	±0.009	-0.9313	±0.0012	0.00891	±0.00003	-0.000054	±0.000003	±0.14
12	-39.880	±0.024	-0.9300	±0.0031	0.00887	±0.00008	-0.000056	±0.000007	±0.35
13	-39.921	±0.013	-0.9291	±0.0017	0.00891	±0.00004	-0.000059	±0.000004	±0.19
14	-40.088	±0.015	-0.9319	±0.0019	0.00891	±0.00005	-0.000050	±0.000004	±0.22
15	-39.914	±0.017	-0.9330	±0.0022	0.00884	±0.00005	-0.000050	±0.000005	±0.25
16	-39.900	±0.014	-0.9261	±0.0018	0.00894	±0.00004	-0.000069	±0.000004	±0.21
17	-39.915	±0.018	-0.9306	±0.0024	0.00887	±0.00006	-0.000059	±0.000006	±0.27
18	-39.910	±0.014	-0.9289	±0.0018	0.00888	±0.00004	-0.000062	±0.000004	±0.21
19	-39.995	±0.017	-0.9312	±0.0022	0.00898	±0.00005	-0.000059	±0.000005	±0.25
20	-39.952	±0.008	-0.9340	±0.0011	0.00882	±0.00002	-0.000048	±0.000002	±0.12
组平均值	-39.9419		-0.93061		0.008893		-0.0000566		

续表 2

电池编号	α $10^{-6}V/^{\circ}C$		β $10^{-6}V/(^{\circ}C)^2$		γ $10^{-6}V/(^{\circ}C)^3$		δ $10^{-6}V/(^{\circ}C)^4$		M $10^{-6}V$
21	-39.848	± 0.022	-0.9281	± 0.0029	0.00880	± 0.00007	-0.000066	± 0.000007	± 0.33
22	-39.899	± 0.024	-0.9280	± 0.0031	0.00892	± 0.00007	-0.000068	± 0.000007	± 0.35
23	-39.984	± 0.015	-0.9301	± 0.0020	0.00888	± 0.00005	-0.000058	± 0.000005	± 0.22
24	-40.139	± 0.036	-0.9390	± 0.0047	0.00878	± 0.00011	-0.000035	± 0.000011	± 0.53
25	-39.906	± 0.015	-0.9309	± 0.0020	0.00896	± 0.00005	-0.000061	± 0.000004	± 0.22
26	-39.996	± 0.007	-0.9281	± 0.0009	0.00894	± 0.00002	-0.000064	± 0.000002	± 0.10
27	-40.097	± 0.015	-0.9314	± 0.0019	0.00894	± 0.00004	-0.000058	± 0.000005	± 0.22
28	-39.976	± 0.012	-0.9302	± 0.0016	0.00900	± 0.00004	-0.000060	± 0.000004	± 0.18
29	-40.039	± 0.012	-0.9299	± 0.0016	0.00889	± 0.00004	-0.000056	± 0.000004	± 0.18
组平均值*	-39.9681		-0.929584		0.008916		-0.0000613		
31	-39.972	± 0.016	-0.9246	± 0.0017	0.00910	± 0.000002	-0.000075	± 0.000005	± 0.25
32	-39.942	± 0.023	-0.9249	± 0.0030	0.00887	± 0.00007	-0.000069	± 0.000007	± 0.34
33	-39.930	± 0.022	-0.9255	± 0.0029	0.00921	± 0.00007	-0.000079	± 0.000007	± 0.32
34	-39.905	± 0.019	-0.9258	± 0.0025	0.00909	± 0.00006	-0.000070	± 0.000006	± 0.38
35	-39.892	± 0.021	-0.9263	± 0.0028	0.00909	± 0.00007	-0.000074	± 0.000006	± 0.31
36	-39.928	± 0.021	-0.9258	± 0.0028	0.00921	± 0.00007	-0.000075	± 0.000006	± 0.31
组平均值	-39.9282		-0.92548		0.009095		-0.0000737		
总平均值	-39.94017		-0.92745		0.008994		-0.0000669		

* 24号剔除

表 3 +40°—0 °C升温过程四次式温度系数

1

电池编号	α 10 ⁻⁶ V/°C		β 10 ⁻⁶ V/(°C) ²		γ 10 ⁻⁶ V/(°C) ³		δ 10 ⁻⁶ V/(°C) ⁴		M 10 ⁻⁶ V
1	-39.872	±0.017	-0.9376	±0.0023	+0.00905	±0.00005	-0.000044	±0.000005	±0.26
2	-39.851	±0.033	-0.9402	±0.0043	+0.00895	±0.00010	-0.000037	±0.000010	±0.49
3	-39.891	±0.019	-0.9331	±0.0025	+0.00904	±0.00006	-0.000048	±0.000009	±0.28
4	-39.887	±0.027	-0.9334	±0.0036	+0.00909	±0.00008	-0.000056	±0.000010	±0.40
5	-39.870	±0.022	-0.9300	±0.0028	+0.00893	±0.00007	-0.000059	±0.000007	±0.32
6	-39.932	±0.021	-0.9331	±0.0027	+0.00920	±0.00006	-0.000047	±0.000006	±0.30
7	-39.936	±0.014	-0.9307	±0.0018	+0.00929	±0.00004	-0.000066	±0.000007	±0.21
8	-39.920	±0.014	-0.9313	±0.0018	+0.00924	±0.00004	-0.000062	±0.000011	±0.21
9	-39.920	±0.017	-0.9319	±0.0022	+0.00901	±0.00005	-0.000056	±0.000005	±0.25
10	-39.995	±0.018	-0.9315	±0.0023	+0.00901	±0.00006	-0.000060	±0.000006	±0.26
组平均值	-39.9074		-0.93328		+0.009081		-0.0000535		
11	-39.944	±0.018	-0.9284	±0.0024	+0.00892	±0.00006	-0.000064	±0.000006	±0.27
12	-39.890	±0.014	-0.9300	±0.0018	+0.00891	±0.00004	-0.000058	±0.000004	±0.20
13	-39.945	±0.013	-0.9300	±0.0017	+0.00897	±0.00004	-0.000058	±0.000004	±0.19
14	-40.061	±0.012	-0.9289	±0.0015	+0.00883	±0.00004	-0.000062	±0.000004	±0.17
15	-39.886	±0.020	-0.9276	±0.0027	+0.00879	±0.00006	-0.000067	±0.000006	±0.30
16	-39.910	±0.023	-0.9286	±0.0030	+0.00898	±0.00007	-0.000061	±0.000008	±0.34
17	-39.871	±0.022	-0.9280	±0.0029	+0.00878	±0.00007	-0.000068	±0.000007	±0.32
18	-39.944	±0.010	-0.9294	±0.0013	+0.00898	±0.00003	-0.000059	±0.000003	±0.15
19	-39.939	±0.016	-0.9297	±0.0020	+0.00885	±0.00005	-0.000065	±0.000008	±0.23
20	-39.911	±0.034	-0.9308	±0.0045	+0.00874	±0.00011	-0.000063	±0.000011	±0.51
组平均值	-39.9301		-0.92914		+0.008875		-0.0000625		

表 3 +40°—0°C降温过程四次式温度系数

2

电池编号	α 10 ⁻⁶ V/°C		β 10 ⁻⁶ V/(°C) ²		γ 10 ⁻⁶ V/(°C) ³		δ 10 ⁻⁶ V/(°C) ⁴		M 10 ⁻⁶ V
21	-39.910	±0.018	-0.9278	±0.0024	+0.00897	±0.00006	-0.000062	±0.000006	±0.27
22	-39.908	±0.018	-0.9290	±0.0024	+0.00896	±0.00006	-0.000060	±0.000006	±0.27
23	-39.996	±0.019	-0.9308	±0.0025	+0.00892	±0.00006	-0.000056	±0.000006	±0.28
24	-40.135	±0.032	-0.9360	±0.0042	+0.00875	±0.00010	-0.000048	±0.000010	±0.48
25	-39.893	±0.016	-0.9298	±0.0021	+0.00894	±0.00005	-0.000061	±0.000005	±0.24
26	-40.026	±0.014	-0.9293	±0.0018	+0.00903	±0.00004	-0.000058	±0.000004	±0.20
27	-40.032	±0.016	-0.9256	±0.0021	+0.00878	±0.00005	-0.000070	±0.000005	±0.23
28	-39.964	±0.015	-0.9285	±0.0019	+0.00897	±0.00005	-0.000061	±0.000005	±0.22
29	-40.066	±0.018	-0.9297	±0.0024	+0.00896	±0.00006	-0.000059	±0.000004	±0.27
组平均值	-39.9744		-0.92851		+0.008941		-0.0000608		
31	-39.950	±0.011	-0.9282	±0.0014	+0.00906	±0.00003	-0.000064	±0.000003	±0.16
32	-39.991	±0.015	-0.9294	±0.0019	+0.00900	±0.00005	-0.000061	±0.000005	±0.22
33	-39.884	±0.014	-0.9295	±0.0018	+0.00911	±0.00004	-0.000065	±0.000005	±0.20
34	-39.905	±0.010	-0.9276	±0.0013	+0.00910	±0.00003	-0.000062	±0.000003	±0.14
35	-29.851	±0.016	-0.9270	±0.0020	+0.00900	±0.00005	-0.000065	±0.000005	±0.23
36	-39.864	±0.015	-0.9249	±0.0019	+0.00907	±0.00005	-0.000058	±0.000005	±0.22
组平均值	-39.9075		-0.92777		+0.009057		-0.0000625		
总平均值	-39.92985		-0.93004		+0.008983		-0.0000595		

24 号电池剔除, 不计入组平均与总平均之中。

用交流约瑟夫森效应 监督保持伏特基准的研究

中国计量科学研究院分院电磁室

1. 引言

利用超导体的交流约瑟夫森效应测定电子电荷与普朗克常数比 e/h ，并进而监督、保持伏特基准的研究工作，在几个国家的计量部门已经完成。监督伏特的精密度已达到 10^{-8} 的量级。近来 Горбачевич 等[1]已考虑通过基本物理常数与约瑟夫森效应复现绝对伏特的可能性，Schrader[2]提出了以 e/h 为基础，建立新的单位制的问题。

由于测定 $2e/h$ 的工作在国际上已日趋成熟，国际计量局电学咨询委员会第13届会议确定了 $2e/h$ 的数值为 $483.5940\text{MHz}/\mu\text{V}^{[3]}$ ，并决定以此来保持伏特。从此，人们开始放弃过去关于基准电池组电动势平均值不变的假定，而根据约瑟夫森频率的变化随时来更正它的数值，并以此更正了的数值为基准，进行伏特的量值传递。

2. 约瑟夫森效应简述

两超导体间的约瑟夫森效应是量子效应在宏观尺度上的表现，为约瑟夫森在1962年所预言，并相继为实验所证实。他指出，当两块超导体的间隙足够近时（约 $10\text{\AA}$ ），会有电流流过，而两超导体（超导结）间的电压为零。当电流超过某一临界电流值 I_c 时，结上突然出现直流电压 V_0 而与此同时出现了交流电流，其频率 f_0 与 V_0 满足简单的关系：

$$f_0 = \frac{2e}{h} V_0$$

其中 e 、 h 分别为电子电荷与普朗克常数。

如果在结上除了 V_0 外再叠加上另一频率为 f 的交流电压，则由于它对原来频率为 f_0 的电流进行调制的结果，其 I - V 特性曲线上出现阶梯。第 n 个阶梯处的电压 V_n 为：

$$V_n = n \frac{hf}{2e}$$

这个关系把外加的频率和结上的直流电压联系起来了。它是用约瑟夫森效应保持伏特基准的理论基础。 n 和 $\frac{h}{2e}$ 是常数，所以频率 f 的变化直接反应了电压 V_n 的变化。

3. 原理性测量线路

频率 f 反应了结上的直流电压 V_n ，如果能把 V_n 和基准电池的电动势联系起来，也就是建立两者之间的电压传递关系，即电压比较仪，就可以把频率和基准电池电动势联系起来

了。但测量频率比较容易达到 10^{-8} 的准确度，因而达到了高精密度保持伏特基准的目的。

图1为原理性线路图，平衡时

$$E = \frac{R_1}{R_2} n \frac{hf}{2e}$$

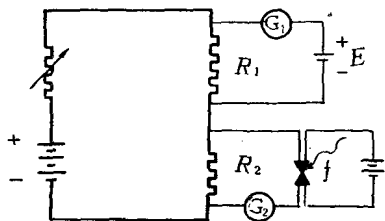


图1 原理线路图

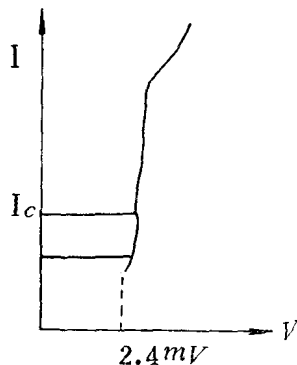


图2 铅超导结的直流特性曲线

4. 超导结的制性

实验发现具有约瑟夫森效应的超导结有很多种，例如点接触结、焊滴点、发夹式结、桥式结等。我们采用的是蒸发镀膜结。它的优点是工艺比较确定，体积小，可以在一块很小的玻璃片上同时蒸镀多个结进行串联，达到较高的电压。和点接触结相比，不太受机械振动的影响，结的尺寸比较容易控制，以便使结的共振频率与输入微波频率一致时，输入较多的功率。另外，薄膜结的理论分析也比较清楚。

镀膜机的极限真空度为 $5 \cdot 10^{-6}$ 。镀膜时真空度为 $2 \cdot 10^{-5}$ 。铅纯度为99.9999%。为了避免蒸发上低熔点杂质，镀膜时有1分钟的预熔。膜厚经干涉仪测量为 $1800 \text{ \AA} - 2000 \text{ \AA}$ 。

第一、二层铅间的氧化层用辉光放电技术获得。放电电流为60mA，30秒。所用氧气经液氮净化后输入。氧气压强为 $1.2 \cdot 10^{-1}$ 托。

第二层铅膜的蒸发工艺与第一层相同。

观察到的直流约瑟夫森效应的典型曲线如图2，临界电流 I_c 一般为几百微安。

我们在室温测定了结的四端子电阻，发现某些结的四端子电阻经常出现负值。我们的初步判断是这些结的氧化层不够致密或上、下铅膜间有漏洞所致。

我们对直线型超导结进行了理论计算，发现结的四端子电阻并不严格等于结的常态电阻 R_N ，而是膜电阻 R_F 与常态电阻 R_N 之比的函数，当 $R_N \ll R_F$ 时确实变为负值。Giaever也指出了这一点，但与我们的计算结果有别。

关于辉光放电形成氧化层的机构，Schroen作了分析^[5]。和热氧化方法相比，辉光放电产生的氧化层比较致密。这是获得高稳定性超导结的必要条件。氧分子离解为氧原子，获得负电荷变为负离子后，在电场的作用下向铅内部扩散，形成 PbO_2 、 PbO 等等铅的氧化物，为此应使铅膜处于等离子区内。

在阴极表面附近为阿斯顿暗区，阴极受电子或光子撞击而释放的电子在这里尚未获得足够的能量。离阴极更远，电离加大，形成了等离子区。在等离子区内，离子密度与电子密度

都很高, 约 $10^{10} \sim 10^{12} \cdot / \text{cm}^3$ 。这是产生氧化层的良好条件。

另外, 对辉光放电的分析表明, 在负区内靠近阴极暗区的一侧仍有足够强的电场。需要氧化的铅膜即置于此负区内。依据 Paschen 法则, 暗区宽度与压强成反比。对于我们的氧气放电电压, 铅膜恰好处于接近暗区的负区内。

为了防止超导结在制作完毕后铅膜随时间而继续氧化, 在超导结上涂以 BF 保护胶。有的结在这样保存(室温)三天后仍具有直流效应。

5. 电压比较仪

为了达到 10^{-8} 量级的精密密度, 显然不宜采用具有变动触点的直流分压箱, 而采用固定的电阻比。如果结上的电压是任意的, 一般而言, 固定电阻不能实现平衡(参看图 1)。幸而我们可以变动微波频率来改变阶梯密度, 亦即改变结上的电压, 从而实现测量线路的平衡, 达到结电压与标准电池相比较的目的。

固定电阻比 $\frac{R_1}{R_2}$ 为 100:1, 采用哈蒙结构。它的特点是 N 个电阻并联与串联之比, 对于 $\frac{1}{N^2}$ 的偏离, 是各个电阻对平均值偏差的二阶项。在电阻结点的地方应用了对称的四面体结构, 在电流、电压引线内串进了补偿电阻。

关于这种串、并联哈蒙结构四端子电阻的误差, 最早由 Page 进行了比较严格的数学分析^[6]他采用结点电位法列出一组线性克希霍夫方程组, 对电导无素构成的矩阵展成级数, 忽略掉高阶项后得到了这种四端子电阻误差的表示式, 其中出现与结点四面体相联接的电流、电压引线补偿电阻的误差 ε_i 及 ε_v , 为:

$$\delta = 4 \frac{G}{A} \varepsilon_i \varepsilon_v$$

G 是需并联的每个电阻元件的名义电导值, A 是结点四面体电流引线的名义电导值, 假如 $\frac{1}{G} = 100 \text{ 欧}$, $\frac{1}{A} = 10^{-3} \text{ 欧}$, $\varepsilon_i = 10^{-1}$, $\varepsilon_v = 10^{-3}$, 则 $\delta = 0.4 \cdot 10^{-8}$ 。

我们实际用的 R_1 、 R_2 分别为 10 个 100 欧电阻串、并联而成。 R_2 为 10 欧, 也易于和检流计内阻匹配。检流计采用光电放大, 稳流源稳定度约为 $10^{-7}/10$ 分钟。

6. 微波测量

微波选用 10GHz 波段, 其频率可在 $\frac{1}{100}$ 范围内连续可调 [步进 10Hz], 速调管功率 $> 100 \text{ mw}$ 。采用晶体锁相技术稳频。原理方框图为:

测频用的数字频率计用一级频标及甚低频接收机接收时号校验晶体。