

文章编号:1002-6061(2001)05-0032-05

用数字电压表检定 标准电池的测量不确定度评定

岳永红

(航天机电集团第三研究院 303 所,北京 7200 信箱,100074)

摘要 介绍了用数字电压表检定高等级标准电池的操作方法,并对其测量不确定度进行了分析与评定。

关键词 数字电压表 检定 标准电池 测量不确定度

Evaluation of Uncertainty of Measurement of Verifying Standard Cell by DVM

Yue Yonghong

Abstract The operating method of verifying high class standard cell with DVM is introduced. And the uncertainty of measurement is analyzed and evaluated.

Key words DVM, Verification, Standard cell, Uncertainty of measurement

检定标准电池的传统方法是用标准电池比较仪,采用差值替代进行,虽然比较成熟,但因其所用配套设备较多、操作繁琐、速度慢等问题一直困扰着从事此项检定工作的技术人员,当前计量检测都在朝着数字化的方向发展,根据 JJG153-96《标准电池》检定规程 17.4 条选用检定装置的规定,这几年已有人开始使用数字电压表来检定低级别的标准电池,但对较高级别的标准电池未涉及,笔者对此进行了尝试,在进行了测量不确定度分析与评定后认为,用数字电压表(简称 DVM)(或数字多用表的直流电压功能)检定较高级别的标准电池也是可行的。

1 测量原理及方法

被检标准电池可选 0.0005 级、0.001 级或二等标准电池组,根据 JJG153-96《标准电池》检定规程,作标准的标准电池是一等标准电池组,测量仪器选用 8 位半的 1281(或 1271)型数字多用表(简称 DMM)的直流电压功能,并采用替代法进行检定。

其工作原理如图 1 所示,用 DMM 的直流电压功能在 1 V 量程上,将标准电池电动势 E_N 值复现在 DMM 上来实现替代法检定。

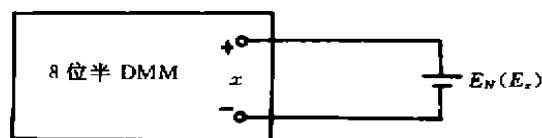


图 1

检定方法:将标准的和被检的标准电池 E_N 、 E_x 均放在同一个恒温油槽中,油槽温度被控制在 $(20 \pm 0.1)^\circ\text{C}$,检定时间 ≥ 2 天,检定次数 ≥ 3 次,将标准的和被检的标准电池的负极串联后接 DMM“-”端,正极通过检定标准电池专用的未知转换开关接 DMM“+”端,DMM 加热预热 4 小时后用 DMM 分别测出标准的和被检的标准电池的电动势 N_N 及 N_x ,每次检定采用对称观察法读数,即: N_{N1} 、 N_{x1} 、 N_{N2} 、 N_{x2} ... 则被检的标准电池在 20°C 时的电动势值按(1)式计算:

$$E_{20,x} = E_{20,N} + N_x - N_N + \Delta E_c \times 10^{-6} (\text{V}) \quad (1)$$

式中,温度换算更正值

$$\Delta E_c = (t_x - t_N)(t_x + t_N) (\mu\text{V}/^\circ\text{C}^2) \quad (2)$$

因标准电池的结构主要由松散的化学物质装入玻璃容器内,它的电极属于固液两相之间,因其不允许振动或倒置,同时又因化学物质是光敏物质,所以要避光保存和使用。特别要注意的是,在检定和使用标准电池中应避免充、放电的极化现象发生,以免造成标准电池电动势的不稳定或准确度下降,由于DMM的高输入阻抗是通过负反馈形成的,因此必须在DMM通电和选择正确量程的基础上,进行标准电池的连线和折线,否则会使标准电池放电。另外,在用DMM检定标准电池时应注意接线的次序,先将标准电池的负极串联后接DMM“-”端,然后再依次接入正极,这样可防止导线瞬间短路使标准电池放电,导致电动势下降影响测量结果。

2 测量不确定度的分析

2.1 不确定度评定的数学模型

根据测定,检定时恒温油槽的温场不均匀性 $<0.001^{\circ}\text{C}$,对于检定0.0005级及其以下等级的标准电池的影响量很小,故可忽略不计,则 E_N 与 E_x 处于同一温度,所以 $\Delta E_t=0(\mu\text{V})$,因此(1)式变为

$$E_{20.x} = E_{20.N} + N_x - N_N \quad (\text{V}) \quad (3)$$

式中: N_x ——被检电池的DMM的读数;

N_N ——标准电池的DMM读数;

$E_{20.N}$ ——标准电池 20°C 时的电动势值;

$E_{20.x}$ ——被检电池 20°C 时的电动势值。

2.2 方差

依照公式: $u^2(y) = \sum (\partial f/\partial x_i)^2 u^2(x_i)$
(各分量彼此不相关)

由(3)得方差为

$$u^2(E_x) = c^2(E_N) \cdot u^2(E_N) + c^2(N_x) \cdot u^2(N_x) + c^2(N_N) \cdot u^2(N_N) \quad (4)$$

其中灵敏系数:

$$c(E_N) = \frac{\partial f}{\partial E_N} = 1; \quad c(N_x) = \frac{\partial f}{\partial N_x} = 1;$$

$$c(N_N) = \frac{\partial f}{\partial N_N} = -1$$

2.3 不确定度来源

在校准/检定中,各种因素引起的测量不确定度有以下几项:

a. 由作为标准的一等标准电池组年变化、电动势的传递引出的B类标准不确定度及环境温度、湿度等因素带来B类标准不确定度,设为 $u(E_N)$;

b. 测量的重复性引入的A类标准不确定度,设为 $u(N_x)$

c. DMM的24h稳定性、分辨力、零电流、输入阻抗、转换开关热电势等因素带来的B类标准不确定度,设为 $u(N_N)$;由(4)式得

$$u_c = \sqrt{u^2(E_N) + u^2(N_x) + u^2(N_N)} \quad (5)$$

其中: $u^2(E_N) = \sum_{i=1}^n u^2(E_{N_i})$

$$u^2(N_x) = \sum_{i=1}^n u^2(E_{N_i})$$

$$u^2(N_N) = \sum_{i=1}^n u^2(N_{N_i})$$

(各分量均互不相关)

3 测量不确定度的评定

3.1 由作为标准的一等标准电池组给出的不确定度 $u(E_N)$

1) 一等标准电池组年变化引入的标准不确定度 $u(E_{N1})$

根据JJG153-96《标准电池》检定规程,一等标准电池组允许的最大年变化为 $\pm 2 \mu\text{V}$,由标准器的历年检定证书的数据可得,在此区间近似正态分布,设置信概率 $p=100\%$,它的包含因子 $k=3$,故: $u(E_{N1})=2/3=0.67 \mu\text{V}$,其自由度 $\nu(E_{N1})=\infty$ 。

2) 一等标准电池组电动势的传递校准不确定度 $u(E_{N2})$

根据标准电池检定传递系统表,一等标准电池组电动势值的传递扩展不确定度 $\leq 1 \mu\text{V}$,它按包含因子 $k=2$ 而得,故: $u(E_{N2})=1/2=0.50 \mu\text{V}$,其自由度 $\nu(E_{N2})=\infty$ 。

3) 环境温、湿度等因素的影响

由于实验室的检定条件满足检定规程中表

9的规定,所以由此带来的影响可忽略不计。

4)以上两项合成得

$$u(E_N) = \sqrt{u^2(E_{N1}) + u^2(E_{N2})} \\ = \sqrt{0.67^2 + 0.50^2} = 0.84 \mu\text{V}$$

自由度: $\nu(E_N) = \infty$

3.2 测量的重复性引入的标准不确定度 $u(N_x)$

用一等标准电池组及 1281 型 DMM 在相同条件下对被检 0.001 级标准电池进行 10 次独立测量,其电动势值列于表 1。

表 1

次数 i	e_i/V	$(e_i - E_x)/\mu\text{V}$	次数 i	e_i/V	$(e_i - E_x)/\mu\text{V}$
1	1.018626	1	6	1.018626	1
2	1.018625	0	7	1.018625	0
3	1.018625	0	8	1.018624	-1
4	1.018624	-1	9	1.018625	0
5	1.018625	0	10	1.018626	1

最佳估值: $\bar{E}_x = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} e_i = 1.018625 \text{ V}$

实验标准偏差

$$s(e) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (e_i - \bar{E}_x)^2}{n-1}} \\ = 0.74 \mu\text{V} \quad (n=10)$$

最佳估值(算术平均值)的标准偏差

$$s(\bar{E}_x) = \frac{s(e)}{\sqrt{n}} = 0.23 \mu\text{V}$$

测量重复性引起的测量不确定度 $u(N_x) =$ 测量结果(算术平均值)的实验标准偏差

即 $u(N_x) = 0.23 \mu\text{V}$

自由度 $\nu(N_x) = n - 1 = 10 - 1 = 9$

3.3 由检定装置 1281 型 DMM 引入的标准不确定度 $u(N_N)$

1) 因为采用替代法检定,从公式(3)可以看出,由 DMM 的示值极限误差及校准不确定度引入的测量不确定度可以从 N_x 、 N_N 中互相抵消,因此可以不考虑。

2) 1281 的分辨力引入的标准不确定度 $u(N_{N1})$

1281 的 DV 档显示位数为 7 位半,其 1 V 量程分辨力为 $0.1 \mu\text{V}$,属均匀分布, $k = \sqrt{3}$,取半宽, $a = 0.05 \mu\text{V}$,则

$$u(N_{N1}) = 0.05 / \sqrt{3} = 0.029 \mu\text{V}$$

因其很可靠,自由度 $\nu(N_{N1}) = \infty$

3) 1281 的 24 h 稳定性引入的标准不确定度 $u(N_{N2})$

从 1281 的技术说明书得知,1 V 量程的 24 h 稳定性为 $\pm(0.00005\% \text{ 读数} + 0.00002\% \text{ FS})$,在 1 V 点为 $\pm 0.7 \mu\text{V}$,属均匀分布, $k = \sqrt{3}$,取半宽 $a = 0.7 \mu\text{V}$,则

$$u(N_{N2}) = 0.7 / \sqrt{3} = 0.40 \mu\text{V}$$

因其很可靠,自由度 $\nu(N_{N2}) = \infty$ 。

4) 1281 的零电流引入的标准不确定度 $u(N_{N3})$

只考虑 1281 的零电流时,其等效电路如图 2 所示。

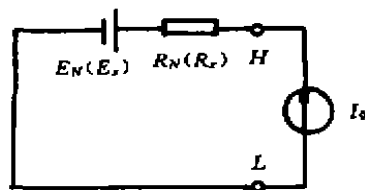


图 2

图中, I_0 为 DMM 的零电流;

R_N 、 R_x 分别为标准的和被检的标准电池内

阻:

E_N 、 E_x 分别为标准的和被检的标准电池电动势。

当标准的和被检的标准电池接入时, 分别有

$$D_N = E_N - I_0 R_N \quad (6)$$

$$D_x = E_x - I_0 R_x \quad (7)$$

$$D_x - D_N = E_x - E_N - I_0 (R_x - R_N) \quad (8)$$

其中: D_N 为接入标准的标准电池时的 DMM 读数;

D_x 为接入被检的标准电池时的 DMM 读数。

从(8)式可知, 由 I_0 引入的测量误差为

$$\Delta u_1 = I_0 (R_x - R_N) \quad (9)$$

由 1281 的技术说明书中查得, $I_0 < 5 \times 10^{-11} \text{ A}$, 0.001 级标准电池的内阻 $\leq 10000 \Omega$, 一般情况下, $R_x - R_N < 1000 \Omega$, 考虑最不利的情况, 取 $I_0 = 5 \times 10^{-11} \text{ A}$, $R_x - R_N = 1000 \Omega$, 代入式(9), 得此项最大误差为: $\Delta u_{1m} = 5 \times 10^{-8} \text{ V}$, 属均匀分布, $k = \sqrt{3}$,

$$\begin{aligned} u(N_{N3}) &= 5 \times 10^{-8} / \sqrt{3} \\ &= 2.9 \times 10^{-8} \text{ V} = 0.029 \mu\text{V}, \end{aligned}$$

因其很可靠, 自由度 $\nu(N_{N3}) = \infty$ 。

5) 1281 的输入阻抗引入的标准不确定度 $u(N_{N4})$

只考虑 1281 的输入阻抗时, 其等效电路如图 3 所示。

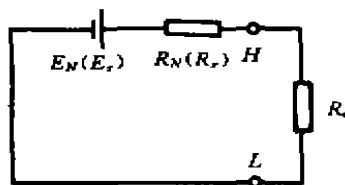


图 3

图中, R_i 为 DMM 的输入阻抗;

R_N 、 R_x 分别为标准的和被检的标准电池内阻;

E_N 、 E_x 分别为标准的和被检的标准电池

电动势。

当标准的和被检的标准电池接入时, 分别有

$$D_N = E_N - \frac{E_N}{R_N + R_i} R_N \quad (10)$$

$$D_x = E_x - \frac{E_x}{R_x + R_i} R_x \quad (11)$$

其中: D_N 为接入标准的标准电池时, DMM 的读数;

D_x 为接入被检的标准电池时, DMM 的读数。则

$$\begin{aligned} D_x - D_N &= E_x - E_N - \left(\frac{E_x}{R_x + R_i} R_x - \frac{E_N}{R_N + R_i} R_N \right) \\ &= E_x - E_N - \left(\frac{E_x}{R_x + R_i} R_x - \frac{E_N}{R_N + R_i} R_N \right) \end{aligned} \quad (12)$$

从(12)式可知, 由 R_i 引入的误差为

$$\Delta u_2 = \frac{E_x}{R_x + R_i} R_x - \frac{E_N}{R_N + R_i} R_N \quad (13)$$

由 1281 的技术说明书中查得, $R_i > 10^{10} \Omega$, 取 $R_i = 10^{10} \Omega$, $R_N \approx R_x = 1000 \Omega$, 它们与 R_i 相比非常小, 可忽略, 则(13)式变为 $\Delta u_2 = \frac{R_x(E_x - E_N)}{R_i}$, 考虑最不利的情况, 即: $E_x - E_N = 80 \mu\text{V}$, 代入(13)式得最大误差为 $\Delta u_{2m} = 8 \times 10^{-12} \text{ V} = 0.001 \text{ nV}$, 属均匀分布, $k = \sqrt{3}$,

$$u(N_{N4}) = 0.001 / \sqrt{3} = 0.00058 \text{ nV}$$

因其很可靠, 其自由度 $\nu(N_{N4}) = \infty$ 。

由 $u(N_{N5})$ 的数值可以看出, 由 DMM 的输入阻抗引入的测量不确定度很小, 与其它分量相比小了一个数量级, 故可略去不计, 另外, 由于采用了对称观察法读数, 消除了测量装置的线性漂移带来的不确定度。

6) 转换开关热电势引入的标准不确定度

检定中, $E_N(E_x)$ 换接时可人为操作, 但非常麻烦, 若选用转换开关进行换接则须考虑热电势的影响, 我们配备有检定标准电池专用的未知转换开关, 它的热电势近似为零, 故由此而引入的测量不确定度可忽略不计。

以上几项合成:

$$u(N_N) = \sqrt{u^2(N_{N1}) + u^2(N_{N2}) + u^2(N_{N3})}$$

$$= \sqrt{+0.029^2 + 0.40^2 + 0.029^2}$$

$$= 0.40 \mu\text{V}$$

其自由度为: $\nu(N_N) = \infty$

3.4 测量不确定度合成

$$u_c = \sqrt{u^2(E_N) + u^2(N_x) + u^2(N_N)}$$

$$= \sqrt{0.84^2 + 0.23^2 + 0.40^2} = 0.96 \mu\text{V}$$

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\frac{u^4(E_N)}{\nu(E_N)} + \frac{u^4(N_x)}{\nu(N_x)} + \frac{u^4(N_N)}{\nu(N_N)}}$$

$$= \frac{0.96^4}{\frac{0.84^4}{\infty} + \frac{0.23^4}{9} + \frac{0.40^4}{\infty}} = 2732$$

标准不确定度一览表见表 2。

3.5 扩展不确定度 U

根据 ν_{eff} 值查 t 分布的 $t_p(\nu)$ 值表, 设 $p = 95\%$, 则 $t_p(\nu_{\text{eff}}) = 1.96$

取 $k = t_p(\nu_{\text{eff}}) = 1.96$

则 $U = k u_c = 1.96 \times 0.96 = 1.9 \mu\text{V}$

3.6 测量不确定度的报告

0.001 级标准电池的电动势 $E_{20.0} = 1.018625 \text{ V}$, 扩展不确定度 $U = 1.9 \mu\text{V}$ ($k = 1.96$), 该扩展不确定度的估计区间具有 0.95 的置信水平。

表 2

序号	标准不确定度				自由度	
	不确定度来源	类别	符号	数值	符号	数字
1	一等标准电池组年变化	B	$u(E_{N1})$	$0.67 \mu\text{V}$	$\nu(E_{N1})$	∞
2	一等标准电池组电动势的传递	B	$u(E_{N2})$	$0.50 \mu\text{V}$	$\nu(E_{N2})$	∞
3	测量的重复性	A	$u(N_x)$	$0.23 \mu\text{V}$	$\nu(N_x)$	9
4	1281 示值的分辨力	B	$u(N_{N1})$	$0.029 \mu\text{V}$	$\nu(N_{N1})$	∞
5	1281 的 24 h 稳定性	B	$u(N_{N2})$	$0.40 \mu\text{V}$	$\nu(N_{N2})$	∞
6	1281 的零电流	B	$u(N_{N3})$	$0.029 \mu\text{V}$	$\nu(N_{N3})$	∞
7	1281 的输入阻抗	B	$u(N_{N4})$	0.00058 nV	$\nu(N_{N4})$	∞
$u_c = 0.96 \mu\text{V}$					ν_{eff}	2732

JJG153-96 标准电池计量检定规程规定: 检定标准电池时, 各种因素引起的总不确定度应小于相应等级指数值的 $1/3$, 即 0.001 级为 $0.001 \times (1/3) = 0.00033 = 3.3 \mu\text{V}$, 本文的测量结果 $U = 1.9 \mu\text{V} < 3.3 \mu\text{V}$, 符合规程要求。

4 结论

通过以上分析可以看出, 选用高准确度的 DMM 做检定装置, 采用替代法检定 0.0005 级

及其以下等级的标准电池是可行可靠的。此方法具有简单易行, 检定速度快、读数直观、不存在视差等优点, 不仅充分利用实验室设备提高了工作效率, 而且为今后进行自动化检定奠定了基础。

2001-05-21 收稿, 2001-06-27 收修改稿

作者简介: 岳永红 女 工程师