

高等级直流电压参考标准的设计

杨振吉, 才滢

(海军计量测试中心, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要:介绍了低成本、高稳定度的直流电压参考标准的研制, 该标准器可取代 0.0002 级以下的标准电池, 具有较高的应用和推广价值。

关键词:电压参考标准; 稳定度; 不确定度

中图分类号: TM933.21

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2001)08-0018-04

The design of volts DC reference standard

Yang Zhenji, Cai Ying

(The Centre of Measuring & Testing of NAVY, Liaoning Guludao 125000, Chian)

Abstract: This article discusses that the development of low cost and high stability's volts DC standard. It may replace the standard cell (0.0002). The application and the spread price will rather better.

Key words: volts DC standard; stability; uncertainty

0 引言

在目前的电学计量中, 作为电气测量标准器使用的直流器具长期以来均采用标准电池。标准电池有稳定度高的优点, 但它的缺点也是显而易见的: 首先是其温度系数大; 其次是抗振动和冲击能力较差, 不易运输; 标准电池最致命的缺点是不能短路, 一旦短路就可能彻底损坏。另外, 标准电池的放电电流不能大于 $0.1\mu\text{A}$, 且只有单一的 1.018V 电动势输出。电子式电压标准与标准电池相比, 其突出的优点是能够提供高稳定度的 10V 输出, 另外还具有较强的带载能力, 输出阻抗小, 在向 100V 以上的直流电压量值传递过程中, 噪声及热电势的影响小。

1 直流电压参考标准的发展趋势

国外从七十年代开始研制电子式电压标准。七十年代中期美国 FLUKE 公司研制出不确定度为 30×10^{-6} /年的产品。到了八十年代末九十年代初美、英等国使该类产品性能大大提高, 最有代表性的产品是英国 DATRON 公司的 4912 型直流电压参考标准, 10V 年稳定度达 1.5×10^{-6} 。国内从八十年代初开始研制电子式直流电压参考标准, 到了九十年代初最有代表性、性能最佳的产品是北京无线电技术研

究所的 BY2501 型直流电压参考标准, 年稳定度为 30×10^{-6} , 性能指标与国外产品相比差距甚大。基于这种发展状况, 我们对该类产品的市场需求作了详细的调查。从我们掌握的情况来看, 由于标准电池具有较高的稳定度指标, 因此在国内计量测试系统的应用依旧是最广泛的标准器具。目前最好的标准电池是一等饱和标准电池, 它的年稳定度为 2×10^{-6} (即 0.0002 级)。这样的一个稳定度指标不是一般的电子式电压标准所能替代的。因此在国内校准实验室中仍然采用饱和标准电池作为计量的一级标准。但在国外的计量校准实验室中已经开始采用 4 只电子式电压标准替代饱和标准电池来作为法定电压标准。本文介绍的直流电压参考标准的设计目的就是为取代一等饱和标准电池, 作为一般计量单位的最高标准, 并可以用于高等级 WAP 实验中, 作为传递标准。

2 该电子式电压标准的性能指标

- (1) 输出电压范围: 10V、1.018V、1V;
- (2) 温度系数 ($15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$): $\pm 0.05 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$;
- (3) 稳定度: 在环境温度 $19^\circ\text{C} \sim 21^\circ\text{C}$ 、
环境湿度 $< 70\% \text{ R.H}$ 下

	24 小时	30 天	1 年
10V: 0.3×10^{-6}		0.7×10^{-6}	2×10^{-6}
1 V: 0.7×10^{-6}		1.5×10^{-6}	5×10^{-6}
1.018V: 0.7×10^{-6}		1.5×10^{-6}	5×10^{-6}

(4) 输出电阻: 10V 时为 $5\text{m}\Omega$

1V、1.018V 时为 $1\text{k}\Omega$

(5) 噪声 (0~10Hz): 10V 时 $<5\mu\text{V}$

3 直流电压参考标准的整机方案

整机原理框图如图 1 所示, 由基准电路、放大电路、10V 基准电路、分压输出电路、电源电路、恒温控制电路等组成。下面对有关电路加以介绍。

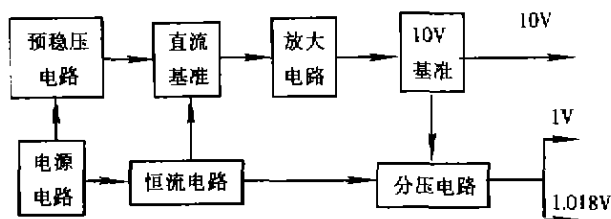


图 1 直流电压标准整机原理框图

3.1 稳压基准电路

目前, 电子式电压标准存在的不足是稳定度指标不如标准电池, 因此研究的方向就是如何提高稳定性的问题。实现这样一个目的的关键技术就在于直流基准, 也就是直流电压参考标准的核心器件的选用。我们经过对国内外相关器件的长期考查、实验, 选择了目前不确定度指标及温度系数指标最佳的 Datron 公司的电压基准 Zn21, 该器件稳定输出电压标称值为 9.8V , 其年不确定度达 $5 \times 10^{-6}/\text{年}$ 。我们通过对该器件进行严格的筛选并结合技术处理后, 得到了不确定度指标低于 $3 \times 10^{-6}/\text{年}$ 的关键器件。用这种器件如何保障整机的稳定度优于 $2 \times 10^{-6}/\text{年}$ 呢? 这里采用了平均值法提高基准稳定度指标的方案。

理论上平均值法其不确定度指标的可用公式 $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ 来衡量, 由公式可知采用 4 只稳压基准与采用多只稳压基准其不确定度指标降低并不是很显著 (例如: 4 只时是 $\bar{\sigma} = \frac{1}{2}\sigma$; 9 只时是 $\bar{\sigma} = \frac{1}{3}\sigma$...), 因此在兼顾整机成本的情况下, 我们选用了 4 只基准进行平均来获得稳定度优于 $2 \times 10^{-6}/\text{年}$ 基准电压。但同时也提出了一个新的问题, 就是如何实现电压模拟量的平均。通过研究, 最终采用了如图 2 所示方案

来实现电压模拟量的平均。

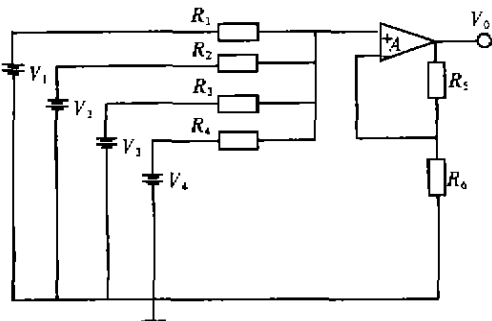


图 2 4 只 Zn21 获得基准电压的方法

图 2 中 V_1, V_2, V_3, V_4 为 Zn21 基准, 输出电压为 9.8V ; R_1, R_2, R_3, R_4 为自制的 0.001% 精密电阻, 每只电阻采用绝对均匀的一根材质绕制而成, 阻值为 $10\text{k}\Omega$; R_5, R_6 的阻值分别为 $2\Omega, 998\Omega$; 运放采用国产的 F07A。

3.2 放大电路

该部分电路的关键在于运放的选取, 主要实现扩流的目的。本仪器要求运算放大器的失调电压 V_{io} 一年内的时漂与 5°C 的温漂之和不大于 $2\mu\text{V}$; 输入偏置电流 I_b 一年的时漂与 5°C 的温漂之和不大于 0.386nA ; 失调电流 I_{io} 一年的时漂与 5°C 的温漂之和不大于 0.46nA ; 开环增益 A_{vo} 大于 3×10^5 。根据以上要求, 我们选择 F07A 型运算放大器作为本直流电压参考标准的运算放大器。F07A 是 OP07A 的国产化产品, 是一种低噪声、低失调、低漂移、非斩波稳零的双极型运算放大器, 价格也不高, 上述四项指标如下:

(1) 失调电压温漂为 $0.1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 时漂为 $0.1\mu\text{V}/\text{月}$ 。年漂移 $\leq 0.1\mu\text{V} \times 12 = 1.2\mu\text{V}$, 5°C 的温漂: $0.1 \times 5 = 0.5\mu\text{V}$, $1.2\mu\text{V} + 0.5\mu\text{V} = 1.7\mu\text{V} < 2\mu\text{V}$;

(2) 输入偏置电流 $I_b = 0.7\text{nA}$, 温漂为 $8\text{pA}/^\circ\text{C}$, 时漂未给出标准, 但它的年漂移不会超过 I_b 的 10% , 即 $\leq 0.07\text{nA}$, 所以 $0.07\text{nA} + 5 \times 8 \times 10^{-3}\text{nA} = 0.11\text{nA} < 0.38\text{nA}$;

(3) 失调电流 $I_{io} = 0.3\text{nA}$, 年漂移不大于 0.03nA , 温漂为 $5\text{pA}/^\circ\text{C}$ 。所以 $0.03\text{nA} + 5 \times 5 \times 10^{-3}\text{nA} = 0.055\text{nA} < 0.46\text{nA}$;

(4) 开环增益 $A_{vo} = 5 \times 10^5 > 3 \times 10^5$ 。

以上四项指标均满足设计要求, 故可选择 F07A 做为关键的运放器件。

3.3 10V 基准与输出分压电路

10V 基准电路是利用直流基准电路产生的基准电压产生标准的 10V 基准输出。分压输出电路直接影响 1V 和 1.018V 输出的稳定度,所以该部分分压电阻的选择是非常关键的。我们经过长期的考核筛选,最终选择了 RX-73 系列精密线绕电阻做分压电阻器件。

3.4 高稳定电源电路

由于要求整机的性能指标较高,所以对于供电电源的选取也是较关键的。该仪器选用了国营七四九厂生产的 ZF403 高精度正负电源组件,其稳定度指标为 5×10^{-5} 。其使用简单且外围器件少。

3.5 恒温槽控温电路

温度系数指标靠整机恒温的措施来保证。由于要达到较高的整机指标,对于稳压基准及分压电阻受温度变化产生的影响也是不可忽视的。所以我们采用了恒温槽来保持稳压基准和分压电阻的使用温度恒定。在本仪器设计时,考虑到环境温度及使用环境条件等因素,控温范围设计在 $40^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$,这部分电路的关键是保温材料的选用。

4 整机不确定度分析

整机的不确定度主要取决于基准,所以下面对基准的不确定度做如下分析(电路见图 2),其中, $R_1=R_2=R_3=R_4=R$, V_1, V_2, V_3, V_4 为相同的电压基准。

设运算放大器 A 为理想放大器,则有

$$\frac{V_1-V}{R_1} + \frac{V_2-V}{R_2} + \frac{V_3-V}{R_3} + \frac{V_4-V}{R_4} = 0 \quad (1)$$

由于 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ 故有

$$V = \frac{V_1+V_2+V_3+V_4}{4}, \text{ 即 } V \text{ 为 } V_1+V_2+V_3+V_4 \text{ 的平均值。}$$

值。

$$V_o = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) V \quad (2)$$

对式(2)两边取对数,并求全微分及对式(1)求全微分,经整理,最后可得各元件稳定度对输出电压 V_o 稳定度的定量计算公式

$$\begin{aligned} \frac{dV}{V} = & \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right)} \\ & \cdot \left[\frac{dV_1}{VR_1} + \frac{dV_2}{VR_2} + \frac{dV_3}{VR_3} + \frac{dV_4}{VR_4} + \frac{dR_1}{R_1^2} \left(1 - \frac{V_1}{V}\right) \right. \\ & \left. + \frac{dR_2}{R_2^2} \left(1 - \frac{V_2}{V}\right) + \frac{dR_3}{R_3^2} \left(1 - \frac{V_3}{V}\right) + \frac{dR_4}{R_4^2} \left(1 - \frac{V_4}{V}\right) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

由于 V_1, V_2, V_3, V_4 的电压值均在 9.8V 左右,与 V 的差值不大于 0.2V,因此

$$\left|1 - \frac{V_i}{V}\right| \leq \left|1 - \frac{9.6}{9.85}\right| \approx 0.03 \quad (i=1,2,3,4)$$

将 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ 和 $|1-V_i/V|=0.03$ 代入式(3)中得

$$\begin{aligned} \frac{dV}{V} = & \frac{1}{4} \left(\frac{dV_1}{V_1} + \frac{dV_2}{V_2} + \frac{dV_3}{V_3} + \frac{dV_4}{V_4} \right) \\ & + 0.0075 \left(\frac{dR_1}{R_1} + \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} + \frac{dR_4}{R_4} \right) \end{aligned}$$

由于 $\frac{R_5}{R_5+R_6}$ 接近于 0 故有 $\frac{dV_o}{V_o} = \frac{dV}{V}$, 所以

$$\begin{aligned} \frac{dV_o}{V_o} = & \frac{1}{4} \left(\frac{dV_1}{V_1} + \frac{dV_2}{V_2} + \frac{dV_3}{V_3} + \frac{dV_4}{V_4} \right) \\ & + 0.0075 \left(\frac{dR_1}{R_1} + \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} + \frac{dR_4}{R_4} \right) \end{aligned}$$

各元件参数的变化相互独立,服从正态分布,则 V_o 的不确定度计算如下。

电压基准的 B 类不确定度为

$$3 \times 10^{-6} \times \frac{1}{3} = 1 \times 10^{-6}, \text{ 其中包含因子 } K=3.$$

同理电阻 $R_1=R_2=R_3=R_4$ 的 B 类不确定度为

$$3 \times 10^{-5} \times \frac{1}{3} = 1 \times 10^{-5}$$

因此整机的不确定度为

$$u = \sqrt{\left(\frac{u_v}{2}\right)^2 + (0.0075u_R)^2}$$

将相应的数据代入可知

$$u < 0.6 \times 10^{-6}$$

因此整机的扩展不确定度为

$$u_{\text{扩}} = K \cdot u = 3 \times 0.6 \times 10^{-6} = 1.8 \times 10^{-6}$$

在以上的不确定度分析中只考虑了 R_1, R_2, R_3, R_4 对整机不确定度的影响,当然运放对整机不确定度指标也有影响,但由于选用优质器件,使其相对于 R_1, R_2, R_3, R_4 的影响来说极小,故在分析中未加考虑。

通过上面的分析,我们便可得出该设计方案完全可以满足设计指标。

5 实测性能指标

不管直流电压参考标准的设计思路如何,最终反映的结果应该是整机实测性能指标。下面给出我

们对该直流电压参考标准的实测性能指标及电学一级站对其 30 天不确定度指标的测试结果(采用标准为自行建标的直流电压工作基准)。

实测数据如下:

(1)电网调整率测试:设计指标为百万分之 0.02,实测指标为百万分之 0.01;

(2)输出电阻的测试:设计指标小于 $5\text{m}\Omega$,实测指标为 $0.4\text{m}\Omega$;

(3)温度系数的测试:设计指标小于百万分之 0.5,实测指标为百万分之 0.4;

(4)噪声的测试:设计指标小于 $5\mu\text{V}$ (0~10Hz),实测指标为 $3.2\mu\text{V}$ (0~10Hz);

(5)稳定度测试:设计指标为 $2\times 10^{-6}/\text{年}$,实测指标为 $1.6\times 10^{-6}/\text{年}$ 。

国家电学一级站对本直流电压参考标准的 30 天稳定度指标进行了测试,结果为 0.36×10^{-6} ,小于设计指标 0.7×10^{-6} 。

经过以上测试,各项指标均满足设计要求。表 1 是直流电压参考标准与国内外同类产品的比较。

表 1 与国内外同类产品的性能比较

型号	制造厂	10V 年稳定度	价 格
4912	DATRON	1.5×10^{-6}	10000 美元
732B	FLUKE	2×10^{-6}	5000 美元
BY2051	北无所	30×10^{-6}	5000 元
直流电压参考标准	海军计量测试中心	2×10^{-6}	20000 元

6 结 论

直流电压参考标准在指标达到目前最好的 4912 的水平基础上,体积仅为 4912 的 1/3;重量为 4912 的 1/8,成本价是其售价的 1/4。所以说该直流电压参考标准可以满足目前电学计量领域的需求,且便于携带,不怕冲击、振动和短路,具有显著的经济效益和推广价值。

参 考 文 献:

- [1] 直流电压标准检定规程[S].GJB.2659-96. 中国计量出版社,1996.
- [2] 李继凡等编.精密电气测量[M].中国计量出版社,1986.
- [3] 电压校准技术[Z].FLUKE 公司,1990.
- [4] 刘敏智.不确定度原理[M].中国计量出版社,1993.

作者简介:

杨振吉(1957-),男,硕士,高级工程师,毕业于大连理工大学。

收稿日期:2001-04-30

(刘家新 编发)

(上接第 24 页)周期变化的趋势,说明该电度表现场计量误差有一定的规律可循。在今后的一段时间内可以采用常规的方法进行抽测,并记录下抽测时的负荷情况等,综合出具测试报告。

(3)若误差的趋势线幅度变化较大,而且无规律,对这种电度表应该不断地进行误差监测,以不断完善电度表现场计量的误差信息。并可根据“电网关口电度表误差分析辅助软件”提供的信息及图表,提出充足理由,对表计进行更换等等。有实际数据和科学依据地指导电度表的技术及管理工作。

4 结 论

综上所述,我们可以看到:

(1)实际测量中,每一次单独测试的误差(或者是连续几次测量的误差),由于现场条件各不相同(包括环境条件的不同以及负荷变化等)而有差别,甚至相差很大。因此用某一个点的误差值来描述电度表现场计量的误差,是不能说明问题的,同时也有很大的人为因素。

(2)电度表现场计量的误差,不仅决定于电度

表本身的相对误差,还与现场条件以及负荷曲线有关,并且是非线性关系。用误差曲线的方式来描述电度表现场计量的误差特性,比用某一个误差值来描述更科学、更直观、更确切。因此,本课题提供了用电度表现场计量误差线图来描述关口电度表现场计量误差的手段和方法。

(3)考核电度表现场计量的稳定性(现场计量的重复性)势在必行。

电度表是一种计量器具,因此其测量(计量)的稳定性(现场测量的重复性)是电度表误差特性的重要指标和信息。长期以来的常规现场校验法对电度表的现场计量重复性,不能给出一个定量的描述,也不清楚电度表现场计量误差的趋势曲线。而这些则是掌握电度表现场计量误差特性的重要线索,有助于线损管理以及电量的追补,以及对关口电度表的管理。

作者简介:

吴涛(1966-),女,硕士,高级工程师。

收稿日期:2001-05-18

(刘家新 编发)