

HJ405 直流电压标准的设计

才 滢 牟 能

(海军计量测试中心, 辽宁葫芦岛 125000)

文 摘 介绍了高稳定性的直流电压参考标准的研制, 该标准器可取代 0.000 2 级以下的标准电池, 具有较高的应用和推广价值。

主题词 电压参考标准 稳定性 不确定度

Design of HJ405 DC voltage standard

CAI Ying Mu Neng

(Navy metrology and measurement center, Liaoning Huludao 125000)

Abstract Introduces high stable DC voltage reference standard development. This etalon may substitute standard cell below 0.000 2 class, having value of higher application and popularization.

Subject terms Voltage reference standard Stability Uncertainty

1 引 言

随着武器装备技术的发展,在武器装备的研制、生产和维护过程中,最基本的计量保障设备以直流电压校准器和数字多用表为主。对这些设备计量主要考虑的参数就是直流电压,根据相关规定,该直流电压的不确定度指标应相对于法定电压为 5×10^{-6} 。这样,为达到计量校准的目的,就需要经过检定的不确定度约为 2×10^{-6} 的电压标准的支持。以往实现这类支持是靠在校准设备中维护成组的饱和标准电池并定期的将他们送一级标准实验室去检定。但由于标准电池的抗振动和冲击能力较差、不易运输、不能短路等致命的缺点使这一方法不令人满意。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 1.018 V 电动势输出,也限制了它的使用。所以,无论是武器发展还是国内计量均需要一种新的传递标准,它应该是坚固的,高稳定的,能够在不同于一级标准实验室的环境中保持高稳定性,这就是

收稿日期: 2001-01-10

作者简介: 才滢(1972-)男,工程师。

本文介绍的电子式电压标准 HJ405 直流电压参考标准。该标准最突出的优点是能够提供高稳定性的 10 V 输出,在向 100 V 以上的直流电压量值传递过程中,噪声及热电势的影响小,可以取代一等饱和标准电池,作为一般计量单位的最高标准,还可用于高等级电压 MAP 实验中。

2 HJ405 直流固态电压标准主要设计指标

- 2.1 输出电压范围:10 V,1 V,1.018 V。
- 2.2 温度系数:(15℃ ~ 25℃) $\pm 0.05 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。
- 2.3 稳定性:10 V 年稳定性优于 2×10^{-6} ,1 V 和 1.018 V 为 5×10^{-6} 。
- 2.4 输出电阻:10 V 为 5 m Ω ;1 V,1.018 V 为 1 k Ω 。
- 2.5 噪声:(0 ~ 10 Hz) 10 V: $< 5 \mu\text{V}$ 。

3 直流电压参考标准的方案设计

整机原理框图如图 1 所示。

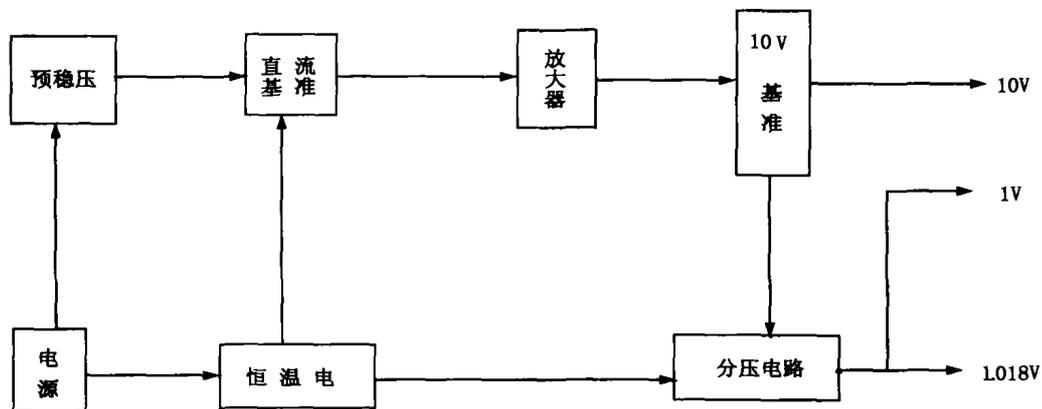


图 1 整机原理框图

包含基准电路、放大电路、10 V 基准电路、分压输出电路、电源电路、恒温控制电路等组成。下面介绍有关电路的设计。

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性指标不如标准电池,因此,研究的方向就是如何提高稳定性的问题。实现这样的—个目标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 Zn21 电压基准,其年稳定性指标达 $5 \times 10^{-6}/\text{a}$,我们通过对该器件进行严格的筛选并结合技术处理后,得到了稳定性指标优于 $3 \times 10^{-6}/\text{a}$ 的关键器件。并且在 90 d 时间里对随机挑选的器件进行了监测,监测数据表明,技术处理后的器件噪音较小,漂移率为 $(-0.2 \times 10^{-6} \sim 0.24 \times 10^{-6})/\text{m}$ 。使用这种器件如何

保障整机的稳定性优于 $2 \times 10^{-6}/a$ 呢? 这里采用了平均值法提高基准稳定性指标的方案, 理论上平均值法的不确定度指标可用公式 $\sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ 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的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 $\bar{\sigma} = \frac{1}{3}\sigma \dots$), 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性优于 $2 \times 10^{-6}/a$ 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图 2 所示方案来实现电压模拟量的平均。

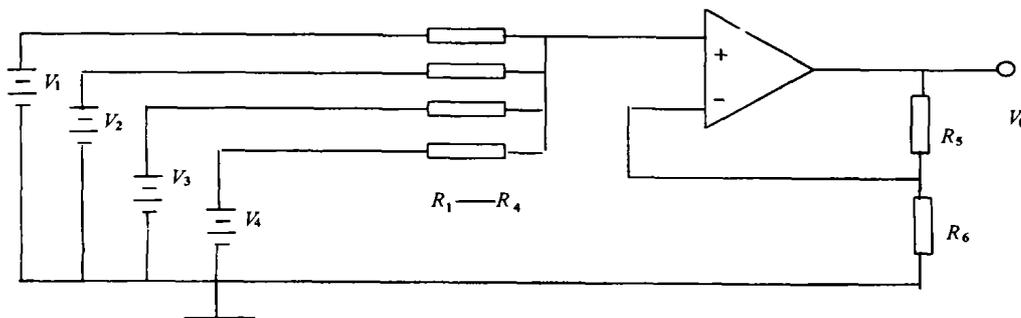


图 2 实现电压稳压基准电路图

图 2 中, V_1, V_2, V_3, V_4 为 Zn21 基准, R_1, R_2, R_3, R_4 为精密电阻, 每只电阻采用绝对均匀的一根材质绕制而成, 阻值为 $10 \text{ k}\Omega$, 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_{id} 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_{ib} 一年的时漂与 5°C 的温漂之和不大于 0.386 nA ; 失调电流 I_{id} 一年的时漂与 5°C 的温漂之和不大于 0.46 mA ; 开环增益 A_{vd} 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 OPO7A 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, 价格合理。各项指标均满足设计要求。

3.3 10 V 基准与输出分压电路

10 V 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 10 V 基准输出; 分压输出电路直接影响 1 V 和 1.018 V 输出的稳定性, 所以该部分分压电阻的选择是非常关键的, 我们经过对 RX-73 系列精密线绕电阻长期的考核, 最终采用筛选出的温度系数一致的电阻构成了分压电路。

3.4 高稳电源电路

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 ZF403 高准确度正负电源组件, 其稳定性指标为 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 $40^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$,这部分电路的关键是保温材料的选用。

4 整机方案不确定度分析

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(电路图见图2所示)。其中, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$; V_1, V_2, V_3, V_4 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

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

$$V_0 = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right)V \quad (2)$$

下面定量分析各元件稳定性对输出电压 V_0 稳定性的影响。

$$\text{对公式(2) 两边取对数得} \quad \ln V_0 = \ln\left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) + \ln V \quad (3)$$

对式(3) 求全微分整理得

$$\frac{dv_0}{v_0} = \frac{R_5}{R_5 + R_6} \left(\frac{dR_5}{R_5} - \frac{dR_6}{R_6}\right) + \frac{dv}{v} \quad (4)$$

对式(1) 求全微分得

$$\begin{aligned} & \frac{R_1 d(V_1 - V) - (V_1 - V) dR_1}{R_1^2} + \frac{R_2 d(V_2 - V) - (V_2 - V) dR_2}{R_2^2} \\ & + \frac{R_3 d(V_3 - V) - (V_3 - V) dR_3}{R_3^2} + \frac{R_4 d(V_4 - V) - (V_4 - V) dR_4}{R_4^2} = 0 \end{aligned}$$

对上式进行整理得

$$\begin{aligned} & \frac{dV_1}{R_1} - \frac{V_1}{R_1^2} dR_1 + \frac{dV_2}{R_2} - \frac{V_2}{R_2^2} dR_2 + \frac{dV_3}{R_3} - \frac{V_3}{R_3^2} dR_3 + \frac{dV_4}{R_4} - \frac{V_4}{R_4^2} dR_4 = \\ & \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right) dV - \left(\frac{dR_1}{R_1^2} + \frac{dR_2}{R_2^2} + \frac{dR_3}{R_3^2} + \frac{dR_4}{R_4^2}\right) V \end{aligned}$$

两边同时除以 V 整理得

$$\begin{aligned} \frac{dV}{V} = & \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right)} \left[\frac{dV_1}{VR_1} + \frac{dV_2}{VR_2} + \frac{dV_3}{VR_3} + \frac{dV_4}{VR_4} + \frac{dR_1}{R_1^2} \left(1 - \frac{V_1}{V}\right) \right. \\ & \left. + \frac{dR_2}{R_2^2} \left(1 - \frac{V_2}{V}\right) + \frac{dR_3}{R_3^2} \left(1 - \frac{V_3}{V}\right) + \frac{dR_4}{R_4^2} \left(1 - \frac{V_4}{V}\right) \right] \quad (5) \end{aligned}$$

由于 V_1, V_2, V_3, V_4 的电压值均在 $9.98 V$ 左右,与 V 的差值不大于 $0.2 V$ 。

因此 $|1 - \frac{V_i}{V}| \leq |1 - \frac{9.78}{9.98}| \approx 0.03 \quad (i = 1, 2, 3, 4)$

将 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 和 $|1 - \frac{V_i}{V}| = 0.03$ 代入式(5) 中得

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

由于式(4) 中的 $\frac{R_5}{R_5 + R_6}$ 接近于 0, 故有 $\frac{dV_0}{V_0} = \frac{dV}{V}$, 所以

$$\frac{dV_0}{V_0} = \frac{1}{4} \left(\frac{dV_1}{V_1} + \frac{dV_2}{V_2} + \frac{dV_3}{V_3} + \frac{dV_4}{V_4} \right) + 0.0075 \left(\frac{dR_1}{R_1} + \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} + \frac{dR_4}{R_4} \right)$$

即 $u_{V_0} = \frac{1}{4} (u_{V_1} + u_{V_2} + u_{V_3} + u_{V_4}) + 0.0075 (u_{R_1} + u_{R_2} + u_{R_3} + u_{R_4})$

各元件参数的变化相互独立, 均从正态分布, 则 V_0 的不确定度计算如下

电压基准的 B 类不确定度为 $u_V = 3 \times 10^{-6} \times \frac{1}{3} = 1 \times 10^{-6}$;

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

因此整机的不确定度为 $u_V = \sqrt{\left(\frac{u_V}{2}\right)^2 + (0.0280 u_R)^2}$

将相应的数据代入可知: $u_V < 0.6 \times 10^{-6}$;

因此整机的扩展不确定度为 $u_{\text{扩}} = K \times u_V = 3 \times 0.6 \times 10^{-6} = 1.8 \times 10^{-6}$

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 R_1, R_2, R_3, R_4 的影响来说极小, 故在分析中未加考虑。

5 实测性能指标

无论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。由专家对 HJ405 进行实物鉴定, 测试数据如下:

a. 电网调整率测试: 设计指标 0.02×10^{-6} , 实测指标 0.01×10^{-6}

b. 输出电阻的测试: 设计指标小于 $5 \text{ m}\Omega$, 实测指标 $0.4 \text{ m}\Omega$

c. 温度系数的测试: 设计指标 0.5×10^{-6} , 实测指标 0.4×10^{-6}

d. 噪声的测试: 设计指标小于 $5 \mu\text{V}$ ($0 \sim 10 \text{ Hz}$), 实测指标 $3.2 \mu\text{V}$

由于时间关系, 在鉴定之前由国家电学一级站对该直流电压参考标准的 30 d 稳定性指标进行了测试, 结果为 0.36×10^{-6} , 小于设计指标 0.7×10^{-6} 。

通过上面的测试 HJ405 的性能指标达到了国际先进水平。

到目前为止, 该固态电压标准已投入工作一年时间, 图 3 为其 1 d 内稳定性特性分布图。

图 3 中的数据是采用 FLUKE 的 K - V 分压器和灵敏的零值检测器相对与刚校准的 0.000 2 级饱和标准电池的稳定性评定的。

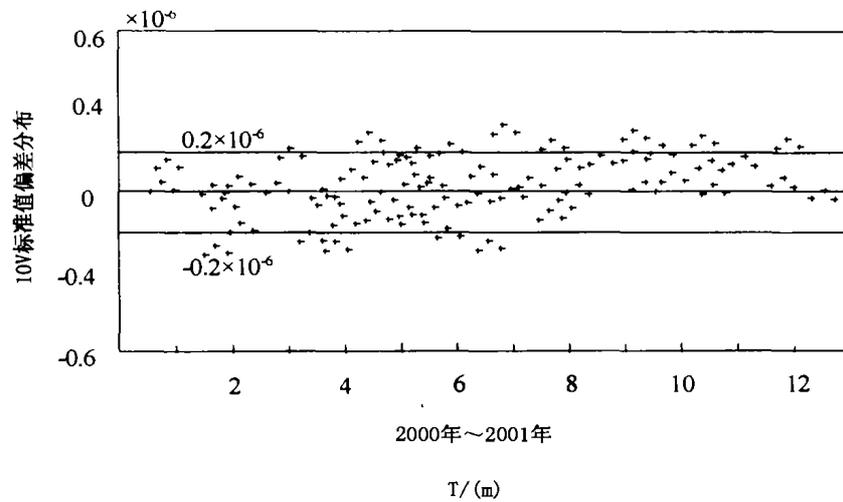


图3 一年内稳定性特性分布图

一年的测试数据表明 HJ405 的设计指标完全优于 2×10^{-6} 的设计值。

表1 直流电压参考标准与国内外同类产品的比较

型号	制造厂	10V 年稳定性	价格
4912	DATRON	2×10^{-6}	10000 美元
BY2051	北京无线电计量测试研究所	30×10^{-6}	5000 元
HJ405	海军计量测试中心	2×10^{-6}	20000 元

其中 4912 型是目前国外同类产品的最好水平,年稳定性为 2×10^{-6} , 售价为 10 000 美元。我们研制的 HJ405 直流电压参考标准年稳定性指标设计值为 2×10^{-6} , 且其售价仅为 20 000 元人民币。BY2051 是国内性能较好的产品,其 $30 \times 10^{-6}/a$ 的指标与 HJ405 直流固态电压标准相比相差一个数量级。

6 结束语

HJ405 直流电压参考标准不仅指标达到了国际先进水平,而且在体积、重量及价格上都拥有绝对的优势。该直流电压参考标准便于携带,且不怕冲击、振动和短路,可以满足目前军队和国内电学计量的需求,且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(GJB.2659-96)[M].北京:中国计量出版社,1996.
 [2] 李继凡等编.精密电气测量[M].北京:中国计量出版社,1986.