

新型固态电压标准的研制

TM833.21

于 滢* 李 莉

文 摘 介绍了低成本、高稳定的固态电压标准器的研制, 该标准器可取代 0.000 5 级以下的标准电池, 具有较高的应用和推广价值。

主题词 固态电压标准器 稳定性 不确定度

电子式

在电学计量中, 标准电池长期以来均作为电气测量的标准器使用。从国家电动势基准, 到各个测试领域, 其电动势标准均以标准电池为重要的标准器之一。标准电池有稳定性好的优点, 年稳定性最好可小于 $0.5 \mu\text{V}$, 但缺点也显而易见, 首先是它的温度系数大 (一般为 $-40 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), 即使采用准确的“温度—电动势”修正公式, 其温度的影响仍较复杂; 其次是不易运输, 抗震动和冲击性能较差, 最致命的缺点是不能发生短路, 一旦短路就可能彻底损坏。

近年来, 电子式电压标准以温度系数小, 不怕冲击和震荡以及不怕短路等优点, 已逐步取代相应等级的标准电池。但主要是国外研制的产品, 不仅有技术垄断、价格昂贵缺点, 而且不易于在国内测试领域的普及。而国内开发的该产品, 又存在年稳定性低, 技术落后、成本偏高的现象, 且与国外同类产品相比差距较大, 在此情况下, 我们研制了这种能接近国际水平的固态电压标准器。

1 固态电压标准的性能指标

1.1 输出电压范围: 10 V, 1 V, 1.018 V

1.2 温度系数($15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$), $\leq 0.05 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

1.3 稳定性: 环境温度: $19^\circ\text{C} \sim 21^\circ\text{C}$

环境湿度: $< 70\% \text{ R.H}$

	24 h	30 d	1 y
10 V	1×10^{-6}	2×10^{-6}	5×10^{-6}
1 V	2×10^{-6}	4×10^{-6}	10×10^{-6}
1.018 V	2×10^{-6}	4×10^{-6}	10×10^{-6}

收稿: 2000-03-28

* 辽宁葫芦岛市 38610 部队 89 分队 助理, 28 岁, 125000

1.4 电网调整率($220\text{ V} \pm 10\%$)

$$S_{\text{r}} = 0.2 \times 10^{-6}$$

1.5 负载调整率(10 V 输出: $0 \sim 10\text{ mA}$)

$$S_{\text{L}} < 5 \times 10^{-6}$$

1.6 输出电阻 10 V: $5\text{ m}\Omega$

$$1\text{ V}, 1.018\text{ V}: 1\text{ k}\Omega$$

1.7 噪声($0 \sim 100\text{ kHz}$)

$$10\text{ V}: 50\text{ }\mu\text{V}_{\text{rms}}$$

2 电路原理

电路原理框图是由含稳压基准电路、输出扩流电路、分压输出电路、高稳电源电路、恒温控制电路和温度修正电路等组成,见图1。

其中,稳压基准电路部分在选择时进行了细致的考虑,最终选择了美国 National Semiconduttore 公司的 LM399。LM399 具有性能好、容易购买等优点。我们从中筛选出年稳定性优于 4×10^{-6} 的电压基准,再采用多只基准电压平均技术,可使整机年稳定性优于 10×10^{-6} 。

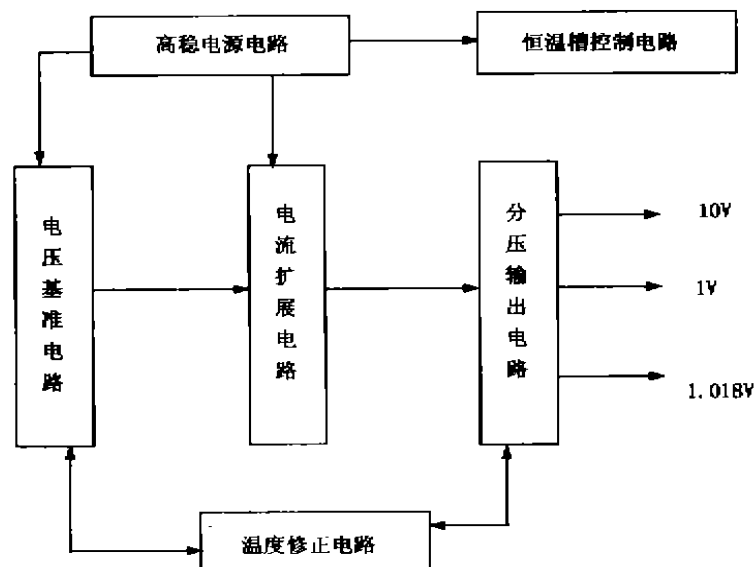


图1 固态电压标准硬件方框图

下面介绍有关电路:

2.1 稳压基准电路

由于是4只LM399并联使用,所以它的平均值作为基准电压可以抑制LM399的随机变化量,由于它们之间是相互独立的,从误差理论分析,该平均稳压值的稳定性可达到 $2 \times 10^{-6} / 1\,000\text{ h}$ 。

并联电路如图 2 所示。

2.2 输出扩流电路

该部分电路的关键在于运放的选取, 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 $6.95\ \mu\text{V}$; 输入偏置电流 I_{ib} 一年的时漂与 5°C 的温漂之和不大于 $0.386\ \text{nA}$; 失调电流 I_{id} 一年的时漂与 5°C 的温漂之和不大于 $0.46\ \text{nA}$; 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 OP07A 的国产化产品, 它是一种低噪声、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。这四项指标如下:

1) 失调电压温漂为 $0.2\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 、时漂为 $0.2\ \mu\text{V}/\text{月}$ 。

$$\text{年漂移} < 0.2\ \mu\text{V} \times 12 = 2.4\ \mu\text{V}$$

$$5^{\circ}\text{C 的温漂: } 0.2 \times 5 = 1\ \mu\text{V}$$

$$2.4\ \mu\text{V} + 1\ \mu\text{V} = 3.4\ \mu\text{V} < 6.95\ \mu\text{V}$$

2) 输入偏置电流 $I_{ib} = 0.7\ \text{nA}$, 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_{ib} 的 10%, 即 $< 0.07\ \text{nA}$ 。

3) 失调电流 $I_{io} = 0.3\ \text{nA}$, 年漂移不大于 $0.03\ \text{nA}$, 温漂为 $5\ \text{pA}/^{\circ}\text{C}$ 。

$$0.03\ \text{nA} + 5 \times 5 \times 10^{-3}\ \text{nA} = 0.085\ \text{nA} < 0.46\ \text{nA}$$

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

2.3 输出分压电路

分压输出电路直接影响 $1\ \text{V}$ 和 $1018\ \text{V}$ 输出的稳定性, 所以该部份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。

2.4 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较关键。我们选用国营七四九厂生产的 ZF403 高精度正负电源组件, 其特点是使用简单且电压稳定性较高, 外围器件少。

2.5 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不可忽视。所以我们采用了恒温槽来保持稳压基准和分压电阻使用温

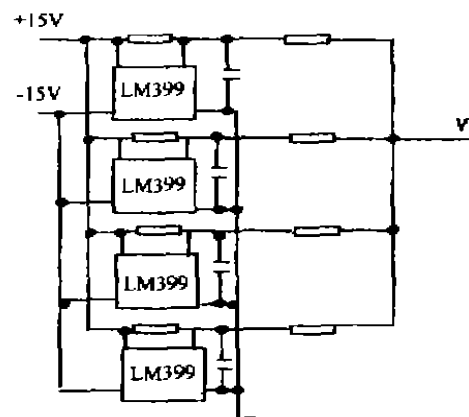


图 2 LM399 并联电路图

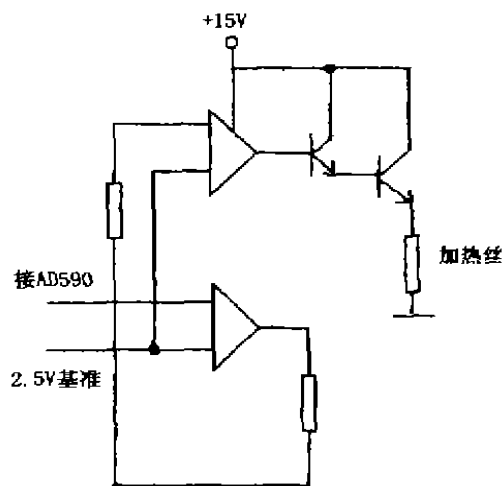


图 3 控温电路图

度的恒定。控温电路如图 3 所示。测温元件选用 AD590, 电压基准选用 1403。

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 $30^{\circ}\text{C} \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 。这部分电路的关键是保温材料的选用。

3 整机不确定度分析

本机方案电路图如图 4 所示。

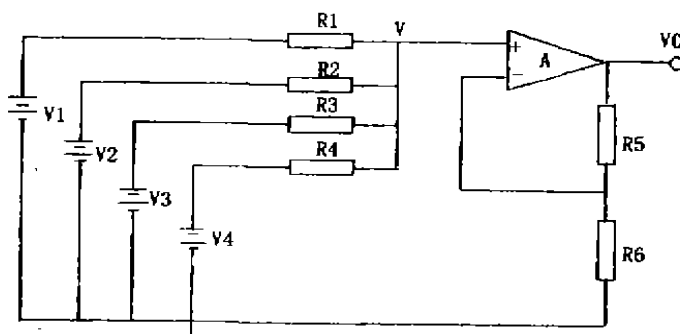


图 4 方案框图

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

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

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

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。

对式(2)两边取对数得

$$\ln V_0 = \ln(1 + \frac{R_5}{R_6}) + \ln V \quad (3)$$

对式(3)求全微分整理得

$$\frac{dV_0}{V_0} = \frac{R_5}{R_5 + R_6} (\frac{dR_5}{R_5} - \frac{dR_6}{R_6}) + \frac{dV}{V} \quad (4)$$

对式(1)求全微分得

$$\frac{dV_1}{R_1} - \frac{V_1}{R_1^2} dV_1 + \frac{dV_2}{R_2} - \frac{V_2}{R_2^2} dV_2 + \frac{dV_3}{R_3} - \frac{V_3}{R_3^2} dV_3 + \frac{dV_4}{R_4} - \frac{V_4}{R_4^2} dV_4 =$$

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right) dV - \left(\frac{dR_1}{R_1^2} + \frac{dR_2}{R_2^2} + \frac{dR_3}{R_3^2} + \frac{dR_4}{R_4^2}\right) V$$

两边同时除以“V”整理得

$$\frac{dV}{V} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right)} \left[\frac{V_1}{V R_1} \times \frac{dV_1}{V_1} + \frac{V_2}{V R_2} \times \frac{dV_2}{V_2} + \frac{V_3}{V R_3} \times \frac{dV_3}{V_3} \right.$$

$$\left. + \frac{V_4}{V R_4} \times \frac{dV_4}{V_4} + \frac{dR_1}{R_1^2} \right]$$

$$\left(1 - \frac{V_1}{V}\right) + \frac{dR_2}{R_2^2} \left(1 - \frac{V_2}{V}\right) + \frac{dR_3}{R_3^2} \left(1 - \frac{V_3}{V}\right) + \frac{dR_4}{R_4^2} \left(1 - \frac{V_4}{V}\right) \quad (5)$$

由于 V_1, V_2, V_3, V_4 的电压值均在6.95 V左右,与V的差值不大于0.2 V。因此

$$\left|1 - \frac{V_i}{V}\right| \leq \left|1 - \frac{9.995}{10}\right| \approx 0.03 \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

将 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 和 $\left|1 - \frac{V_i}{V}\right| = 0.03$ 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 $\frac{R_5}{R_5 + R_n}$ 接近于0故得

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

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

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

$$20 \times 10^{-6} \times \frac{1}{3} = 6.67 \times 10^{-6}$$

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

$$20 \times 10^{-4} \times \frac{1}{3} = 6.67 \times 10^{-4}$$

因此整机的不确定度为

$$u_1 = \sqrt{\left(\frac{\delta_1}{2}\right)^2 + (0.0075 \delta_R)^2}$$

将相应的数据代入可知

$$u_v < 3 \times 10^{-6}$$

因此整机的扩展不确定度为

$$u_y = K \cdot u_v = 3 \times 3 \times 10^{-6} = 9 \times 10^{-6}$$

通过分析, 该设计方案完全可以满足设计指标。

4 结束语

国外从 70 年代开始研制电子式电压标准。70 年代中期, 美国 FLUKE 公司研制出年稳定性为 30×10^{-6} 、温度系数为 $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 的产品。到了 80 年代 DATRON 公司的 4910 型直流电压参考标准, 输出 10 V、1 V、1.018 V 三种电压, 10 V 输出的月稳定性达到 0.7×10^{-6} 、年稳定性为 4×10^{-6} 、温度系数为 $0.05 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。而到了 90 年代, 美国 WAVETEK 公司研制的 WUK7000 系列直流电压参考标准, 在性能指标上又上了一个台阶。其可输出 10 V、1 V、1.018 V 三种电压的参考标准, 10 V 输出的年稳定性可达 0.5×10^{-6} 、1 V 和 1.018 V 输出的年稳定性可达 2×10^{-6} 、温度系数为 0.05×10^{-6} 。这些电子式电压参考标准不怕冲击、震动、短路, 10 V 标准也便于向 100 V 和 1 000 V 量值传递, 可取代 0.000 5 级以下的标准电池。

国内也从 80 年代初开始研制电子式直流电压标准。90 年代初, 最具代表性的是北京无线电技术研究所的 BY2501 型直流电压参考标准。它的月稳定性为 10×10^{-6} 、年稳定性为 30×10^{-6} 、温度系数 $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。只能取代 0.005 级以下的标准电池, 与国外同类产品的差距较大。

目前我们研制的水平接近国外先进产品, 可输出 10 V、1 V、1.018 V 的固态电压标准的关键技术是提高整机稳定性。我们从 1992 年开始这方面的研究, 1993 年的样机达到年稳定性 1×10^{-5} , 要进一步提高稳定性指标, 主要受基准器件的限制。近 6 年来, 我们对国内外各种电压基准器件进行了大量的实验测试工作。发现美国 FLUKE 公司和 WAVETEK 公司的电压基准指标较好, 但难于购买。而美国 National Semiconductor 公司的产品性能也较好, 且容易购买。我们可以从中筛选出年稳定性优于 4×10^{-6} 的电压基准, 采用多只基准电压平均技术, 可使整机年稳定性优于 2×10^{-6} 。

Development of a new type of the solid-state Voltage standard

Cai Ying Lih

Abstract The paper presents development of Low-Cost, high stable solid-state voltage etalon. This etalon may replace standard cell below 0.000 5 class and has higher applied and popularized cost.

Subject terms Solid-seate voltage standard Stability Uncertainty