

Z_{2-4} 双积分数字电压表 的漂移自动校准

北京无线电一厂

一九七六年九月

Z 2—4 双积分数字电压表 的漂移自动校准

一、概述

Z 2—4 双积分数字电压表是为我厂 HMJ—200 大型模拟—数字混合计算机配套的产品。用于精确测量 0—1000 V 直流电压。本机采用双积分原理，对信号的平均值进行转换。模拟部分采用保护屏蔽，对常态及共态干扰有较强的抑制能力。本机对积分器，检零器采用了漂移补偿电路。测量结果用数码管显示。并有二进制及二十进制码输出，可方便地驱动打印机，把读数印在纸带上。并可自动显示极性，自动变换量程。

仪器主要性能如下：

1. 量程

基本量程 $\pm 3\text{ V}$ ，附加量程有 $\pm 30\text{ V}$ ， $\pm 300\text{ V}$ ， $\pm 1000\text{ V}$ 共四挡。除 $\pm 1000\text{ V}$ 为手动量程外，其余各挡均可实现自动或手动量程转换。

2. 精度

基本量程为满刻度的 $\pm 0.02\% + 1\text{ 字}$ 。

其他量程附加分压器误差 0.01% 。

3. 分辨率： $100\text{ }\mu\text{V}$ 。

4. 输入阻抗

基本量程： $> 1000\text{ M}\Omega$ 。

其他量程：约等于 $10\text{ M}\Omega$ 。

5. 采样方式：分定时、遥控、手动三挡。

6. 最高采样速率：每秒5次。

7. 输出：分别有二进制及二—十进制打印码输出。

二进制码：逻辑“1” $>10\text{ V}$ ，逻辑“0” $<+0.5\text{ V}$ 。

十进制码：打印电平 0 V ，不打印电平 $<-12\text{ V}$ 。

打印指令：幅度为 12 V 的负脉冲。

8. 电网电压：交流 50 赫 ， $220\text{ V} \pm 10\%$ 。

二、工作原理

Z 2—4 数字电压表采用双积分原理进行模拟—数字转换。^{[1][2]}

模—数转换工作过程分为采样时间与测量时间两段。在采样时间内，积分器对被测电压做固定时间积分，积分电容充电。在测量时间内，被测电压断开，与被测电压极性相反的参考电压被接入积分器，积分电容按固定速率放电至积分器输出为零电平为止。积分器放电时间与被测电压成正比，用计数器测量放电时间即为被测电压的平均值。工作过程简述如下：见图1， K_1 ， K_2 ， K_3 为电子开关。在 t_1 时刻，

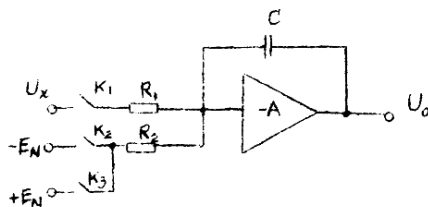


图 1

采样开始, 开关 K_1 接通, 积分器对被测电压 U_x 积分, 一直积到 t_2 时刻, $t_2 - t_1 = T_1$ 为固定时间。积分器输出电压:

$$U_{01} = \frac{-1}{R_{1c}} \int_0^{T_1} U_x dt \quad (1)$$

设 $\bar{U}_x$ 为 T_1 时间内输入被测电压的平均值,

$$\bar{U}_x = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} U_x dt$$

$$\text{则有 } U_{01} = \frac{-1}{R_{1c}} \bar{U}_x T_1$$

t_2 时刻后, 采样时间结束, K_1 断开, 与 U_x 极性相反的参考电压通过 K_2 (或 K_3) 接入积分器, 积分器开始反相积分, 过 0 时刻为 t_3 , $t_3 - t_2 = T_2$, 二次积分结束。积分器输出电压:

$$U_{02} = -\frac{1}{R_{2c}} \int_0^{T_2} (-E_N) dt = \frac{1}{R_{2c}} E_N T_2$$

积分开始和积分结束时积分器输出电压均为零, 即在 T_1 及 T_2 时间内积分器输出电压变化量相等。 $|U_{01}| = |U_{02}|$

$$\text{则有 } \frac{1}{R_{1c}} \bar{U}_x T_1 = \frac{1}{R_{2c}} E_N T_2$$

$$T_2 = \frac{R_2 T_1}{R_1 E_N} \bar{U}_x \quad (2)$$

采样时间 T_1 及测量时间 T_2 均用频率为 f 的脉冲源和同一计数器确定

$$T_1 = \frac{N_1}{f} \quad \text{及} \quad T_2 = \frac{N_2}{f}$$

$$\text{则 } N_2 = \frac{R_2 N_1}{R_1 E_N} \bar{U}_x \quad (8)$$

式中 R_1, R_2 为积分电阻, E_N 为参考电压, N_1 是预先选定的脉冲数, 则 N_2 正比于被测电压的平均值。工作过程如图 2 所示。

为使双积分数字电压表对交流 50 赫常态干扰有较强的抑制能力, 把采样时间取为工频周期的整数倍。即 $T_1 = n\tau$ 。对于 50 赫工频干扰, $\tau = 20 \text{ ms}$, 在 Z 2—4 数字表中, 取 $N_1 = 10000$, $f = 250 \text{ kHz}$, 则 $T_1 = 40 \text{ ms}$, 为工频周期的两倍。

Z 2—4 方框图如图 3。虚线以内为模拟部分, 虚线以外为数字

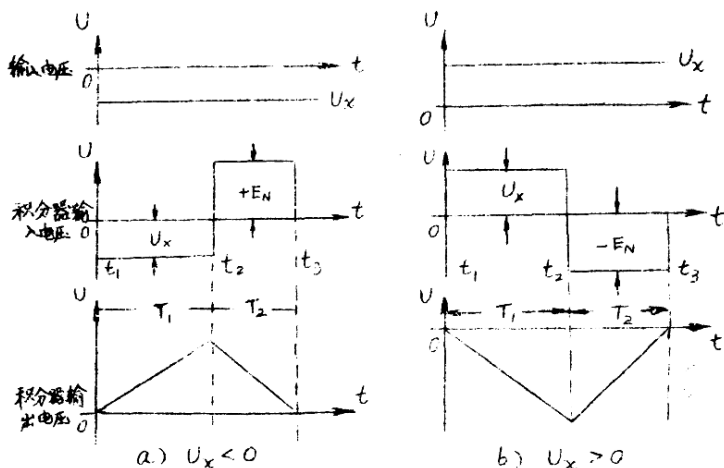


图 2

部分。为提高整机的共模抑制系数, 模拟部分采用金属盒屏蔽。模拟部分的地线(零伏线)和数字部分的地线是互相绝缘的。内外层之间通过脉冲变压器传递信号。其工作过程如下:

~4~

采样多谐振荡器定时产生采样脉冲。随即产生时刻 t_1 的脉冲, 有以下几个作用: (1) 使符号位预置“-”的位置, 计数器预置于 20000 的状态。(2) 使主控双稳翻转, 计数门打开, 计数器开始计数。(3) 通过脉冲变压器使 S_1 , S_2 两个双稳态触发器翻转, 经过推动级 Td_4 使电子开关 K_4 , K_5 打开, S_2 翻转经推动级 Td_1 使 K_1 闭合, 经 Td_2 , Td_3 使 K_2 , K_3 打开, 于是被测电压 U_x 经输入放大器进入积分器, 积分器开始第一次积分, 积分器输出端的积分电压是对零漂电压校准过的积分值。这个零漂电压是在采样休止期 (t_3 时刻以后) 存储在电容 C_1 上的。

本机量程为 3 V, 计数器容量为 29999 在 t_1 时刻计数器已预置在 20000, 再经过计数门送到计数器 10000 个脉冲, 就使计数器回到 00000 的状态, 此时产生一个溢出脉冲, 即产生 t_2 时刻的脉冲。 t_2 脉冲作用如下: (1) 使双稳 S_2 复原, K_1 断开, K_2 或 K_3 有一个闭合, 这取决于输入电压的极性。如被测电压 U_x 为正极性, 输入放大器输出电压与输入电压同极性, 积分器输出电压为负, 反相器 FX_1 输出高电平, FX_2 为低电平, “与”门 YM_2 使 Td_3 输出高电平, 而使 K_3 接通, 即负参考源接入积分器。反之, 如 U_x 为负极性, 则 Td_2 输出高电平使正参考源接入积分器。(2) t_2 脉冲耦合到符号门 YM_3 以产生置“+”脉冲, 当 U_x 为正时, FX_1 为高电平, T_2 脉冲才能通过 YM_3 , 使符号双稳置“+”。

t_2 时刻后, 积分器开始第二次积分, 积分电容放电, 积分器输出电压趋向于零伏。当积分器输出电压通过零伏电平时, 检零器翻转, 使 FX_1 , FX_2 改变状态。这“跳变”经“或”门产生 t_3 脉冲。 t_3 脉冲作用如下: (1) 使 S_1 复原, 经 Td_4 使 K_4 , K_5 开关闭合, 积分器输入端接零电位, 积分器检零器全部零漂存储在电容 C_1 上, 这就

是需要补偿的零漂电压。(2) t_3 耦合到外温, 使主控双稳复原, 计数门关闭, t_3 脉冲经单稳 DW_1 延迟后产生一个寄存指令使在 T_2 时间内计下的数移至寄存器并译码后显示出来。单稳 DW_2 将 t_3 脉冲延迟后产生打印指令脉冲, 由打印机将读数打印在纸带上。

三、Z 2—4 数字表漂移补偿电路

数字电压表模拟电路的漂移引起数字电压表的读数误差及刻度误差。为保证测量的准确度, 则对模拟电路的漂移指标要求是严格的。

[3][4] 这就需要对模拟电路的元件进行严格的选配, 在调试电路时须花费较大的精力。作一台高精度的数字电压表须花较大的代价。Z 2—4 数字表采用了漂移校准电路, 在电路中只增加了少数元件, 但是对积分器和检零器电路的漂移指标大大放宽, 从而降低了对元件的要求及减少了调试中的困难。而整机的漂移却大大减小。

假定积分放大器输入漂移为 θ , 在积分过程中直接加在积分器输入电压上。在采样时间为 $U_x + \theta$, 在测量时间为 $-E_N + \theta$ 。所以漂移电压 θ 的影响一方面相当于被测电压增加了 θ 引起读数误差, 另一方面又相当于参考电压减小了 θ 引起刻度误差。图 4 说明了积分漂移产生的误差。

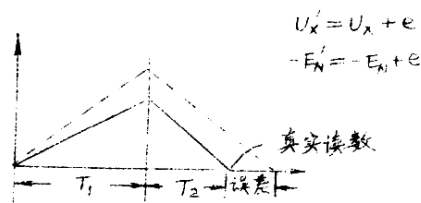


图 4

检零器的漂移即在两次积分过程中起始电平与积分结束时电平不一致，也就是在第二次积分过程中过零电平有改变，这样就影响测量时间 T_2 ，如图5所示：

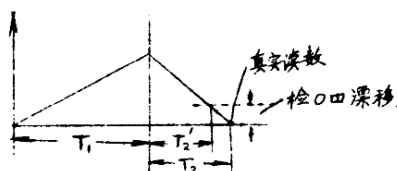


图 5

下面分析存储在电容 C_1 上的电荷可有效地补偿积分器和检零器的漂移。〔5〕

假定积分器相加点等效漂移电压为 e_1 ，检零器输入端等效漂移电压为 e_2 ，积分器增益为 A_1 ，检零器增益为 A_2 ，积分器、检零器接成闭环时，包括 C_1 的积分器闭环增益为 G_1 ，积分器输出电压为

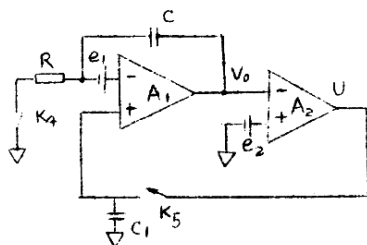


图 6

U_0 ，检零器输出电压为 U 。

如图6所示，先考虑积分器的漂移，此时假定检零器无漂移，即

$e_2 = 0$ 。当第二次积分结束，开关 K_4 ， K_5 接通时：

积分器输出为 $-A_1(e_1 - U)$ 此电压输入到检零器。

检零器输出为 $-A_2[-A_1(e_1 - U)] = U$

$$U = \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2} e_1$$

对于高增益的积分器、检零器。有 $A_1 A_2 \gg 1$

$$U \doteq e_1$$

即采用漂移补偿电路后，由积分器相加点等效漂移电压 e_1 引起检零器输出电压漂移也为 e_1

其次考虑检零器漂移 假定 $e_1 = 0$ 。

检零器输出为 $-A_2(U_0 - e_2)$ 此电压又返回积分器。

积分器输出 $U_0 = G_1[-A_2(U_0 - e_2)]$

$$U_0 = \frac{G_1 A_2}{1 + G_1 A_2} e_2$$

对高增益 G_1 、 A_2 ，则有 $G_1 A_2 \gg 1$ $U_0 \doteq e_2$

在检零器输出端由检零器漂移引起的误差信号：

$$\begin{aligned} U &= -A_2(U_0 - e_2) \\ &= -A_2\left(\frac{G_1 A_2}{1 + G_1 A_2} e_2 - e_2\right) \\ &= \frac{A_2 e_2}{1 + G_1 A_2} = \frac{1}{\frac{1}{A_2} + G_1} e_2 = \frac{e_2}{G_1} \end{aligned}$$

对 $A_2 \gg 1$

用线性叠加法计算采用漂移补偿电路后，在检零器输出端，由积分器、检零器漂移 e_1 、 e_2 引起的误差信号：

$$U = e_1 + \frac{e_2}{G_1} \quad (4)$$

如不采用漂移补偿网络, 同样在积分器、检零器输入端等效漂移电压分别为 e_1 和 e_2 时, 在检零器输出端引起的误差为:

$$U' = A_1 A_2 e_1 + A_2 e_2 \quad (5)$$

由(4)、(5)式比较可看出采用漂移补偿电路后, 可以很好的抑制积分器检零器引起的漂移。

采用漂移补偿电路以后, 积分器和检零器闭环内任何调零电位器失去调零作用。所谓之零偏均被补偿。闭环内任何一级差分电路所用的晶体管均不须严格挑选, 只挑 β 大致相当即可。唯一只要求积分器输入端为高阻抗, 以便存贮在 G_1 上的零漂电压不致被泄放。本机采用结型场效应管做积分器的输入级, 我们选用的 3DJ14 型场效应管输入阻抗为 $10^9 \Omega$ 数量级, 是足够满足要求了。

检零器开环增益不能太高, 太高时在接成闭环时易自激, 增益太小又会影响零区缺字。我们采用的检零器增益为 6000—8000, 接成闭环后不自激。而在施密特电路前又加一个小放大器来提高施密特电路的灵敏度, 使零区不缺字。

积分放大器必须有足够高的开环增益, 以保证有良好的线性度。此外积分器的频带不能太窄, 否则会影响零区附近的读数显示不出来。Z2—4 积分器增益为 4×10^4 。积分器中 G_1 — G_3 为积分电容, G_7 — G_9 为零漂电压寄存电容。R₃₆, R₃₇, R₃₈ 为漂移反馈网络, 试当调整 R₃₆—R₃₈ 的阻值, 可使得漂移得到抑制。C₅、C₆ 及 R₂₂ 可改变积分器的频带, 以改善零点附近的线性。

经过上述补偿后，输入放大器的漂移仍然直接影响整机的漂移指标。为最大限度地降低零点漂移采取了以下措施：第一级差放级的电源由2DW70稳压管提供，这样可在相当大的程度上减轻由于 $\pm 24V$ 电源漂移引起的放大器的漂移。并采用微功率对管2NV41G工作在微功率条件下以减小漂移。对管参数要严格挑选，尤其是它们之间的 V_{BE} 之差应保持在1 mV之内， β 值之差应小于5%。集电极负载电阻采用精密线绕电阻，取其温度系数小。为提高输入阻抗第一级对管前采用结型场效应管作跟随器，工作在零温度系数点，输入阻抗高达1000 $M\Omega$ 以上。第一级安装在绝缘性能较好的聚四氟乙烯板上，以减小漏电流对输入阻抗和漂移的不良影响。输入放大器为四级直接耦合差分级，开环增益达30万—100万倍以上，从而保证了有优良的线性。

采取以上措施以后，放大器零漂仍可能有 $10\mu V/^{\circ}C$ ，如进一步改进漂移指标，输入放大器可采用斩波放大器或采用放大器断续工作，周期地进行漂移校准。

参 考 文 献

- [1] 积分式数字电压表选编
- [2] Z 2—4 型双积分式数字电压表
- [3] DS—14 型双斜率积分式数字电压表
电子试验 1975 第4期
- [4] DYS—10 型双积分式数字电压表—整机分析
电子技术参考资料 1972 第一期
- [5] Three-phase A/D conversion has
high accuracy and low cost
E. D. N. 1973 VOL 18 NO 2

北京无线电一厂 1974. 7.