

# 时间间隔测量的双扩展内插技术研究

古 军, 詹惠琴, 习友宝

(电子科技大学自动化工程学院 成都 610054)

**【摘要】**提出了一种基于电容器充放电原理的双扩展内插法, 研究了双扩展测时内插器的工作原理和误差分析。双扩展内插法与单扩展内插法相比, 能大大提高测时分辨力, 并显著减少其内插时间, 有效地解决了单扩展内插法中高测时分辨力和快测量速率之间的矛盾。

**关键词** 时间间隔测量; 模拟内插器; 时间扩展器; 时间数字变换  
**中图分类号** TP202 **文献标识码** A

## Study of the Double Stretch Interpolation Technique for Time Interval Measurement

GU Jun, ZHAN Hui-qin, XI You-bao

(School of Automation Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** This paper proposed a double stretch interpolation method based on the charge and discharge principles of the capacitors, and studied the working principles of the double stretch time measurement interpolator and its error analysis. The double stretch interpolation method is able to greatly increase the time measurement resolution and reduce the interpolation time comparing with the single stretch interpolation technique. Therefore, the conflict between the high time measurement resolution and rapid measurement speed of the single stretch interpolation method is solved efficiently.

**Key words** time interval measurement; analog interpolator; time stretcher; time digital transformation

### 1 模拟内插法的原理

高分辨力的时间间隔测量技术在航空航天、卫星导弹、雷达定位、激光测距、时频测量、核物理探测等领域中有十分广泛的应用。时间间隔计数法是高分辨测时的最有效方法。用计数法测出的时间  $t'_x = N_0 T_0$  是时钟周期  $T_0$  的整数倍, 它与实际的被测时间  $t_x$  之间的误差  $\tau \leq T_0$ , 即残留一个小于时钟周期的“零头”时间  $\tau$ 。通常  $\tau$  是忽略不计的, 因而产生了量化误差。计数法的测时分辨力取决于量化误差, 提高时钟频率  $f_0$  可减少量化误差。但提高  $f_0$  是有限制的, 基于模拟内插法的时间扩展器是实现高分辨力测时的有效措施<sup>[1]</sup>。其原理是采用时间扩展器, 把  $\tau$  扩大  $K$  倍, 扩展时间  $T = K\tau$ , 再用时钟计数法测量  $T$ , 即  $T = N_r T_0$ , 完成了时间数字变换<sup>[2-3]</sup>。因此有:

$$t_x = t'_x + \tau = [N_0 + \frac{N_r}{K}]T_0 = \frac{T_0}{K}(KN_0 + N_r) \quad (1)$$

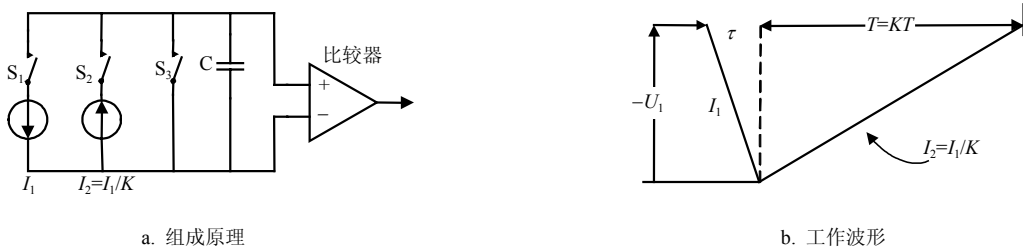


图1 模拟内插器的工作原理图

收稿日期: 2005-11-04

作者简介: 古 军(1968-), 男, 工程师, 主要从事测控技术与仪器方面的研究.

$\tau$  时间扩展器的原理如图1所示。在“零头”时间  $\tau$  期间, 恒流源  $I_1$  对电容  $C$  放电; 在时间  $T$  内, 恒流源  $I_2 (= I_1 / K)$  对电容  $C$  充电。由于  $C$  的充放电的电荷相等, 即  $I_1 \tau = I_2 T$ , 再用时钟计数法测量扩展时间  $T$ , 即  $T = N_\tau T_0$ , 则有:

$$T = \frac{I_1}{I_2} \tau = K \tau \text{ 或 } \tau = \frac{T}{K} = \frac{T_0}{K} N_\tau \quad (2)$$

式中  $T$  比  $\tau$  扩展了  $K$  倍,  $K \gg 1$ , 通常  $K$  取  $10 \sim 1\,000$  之间。由式(1)可见, 采用内插技术把分辨时间从  $T_0$  减小到  $T_0/K$ , 然而增加了插入的测量时间  $KT_0$ 。即模拟内插法获得高的测时分辨率和短的测量时间之间是矛盾的。

## 2 双时间扩展模拟内插法的设计

为解决上述矛盾, 本文提出了一种双时间扩展的内插法, 其原理如图2所示。它是对单内插的扩展时间  $T$  (见图1) 计数测量产生的“零头”时间  $\tau_R$ , 进行再次扩展测量。图2中设计有  $I_1$ 、 $-I_2$  和  $I_3$  三个恒流源, 三者保持固定倍率关系, 即  $I_1 = K_1 I_2$ ,  $I_2 = K_2 I_3$ , 通常  $I_3 \ll I_2 \ll I_1$ , 即  $K_1 \gg 1$ ,  $K_2 \gg 1$ 。双扩时内插器的工作过程如图3所示, 它可分为等待期、 $\tau$  采样期、 $\tau$  扩展期、 $\tau_R$  采样期和  $\tau_R$  扩展期等5个时段。

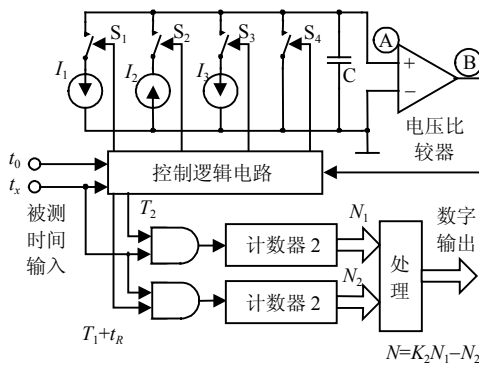


图2 双扩展模拟内插器原理图

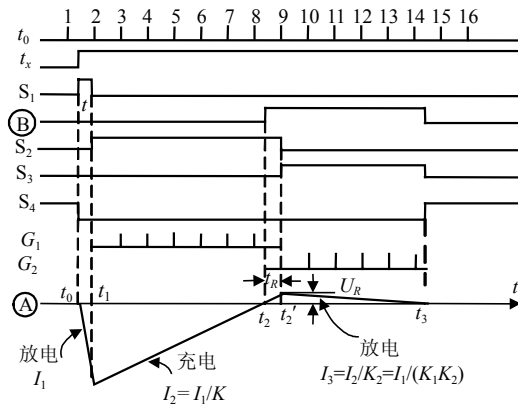


图3 双扩展模拟内插器工作时序波形图

(1) 等待期:  $S_4$  接通,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  断开, 电容  $C$  被短路, (A) 点电压为  $0\text{ V}$ 。比较器输出 (B) 点为低电平。

(2)  $\tau$  采样期: “零头”时间  $\tau$  脉冲的持续期, 即  $t_0 \sim t_1$  期间,  $S_1$  接通,  $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  断开,  $I_1$  对电容  $C$  放电, (A) 点电压由  $0\text{ V}$  下降到  $-U_1$  (见图3), 则:

$$-U_1 = -(I_1 / C)(t_1 - t_0) = -(I_1 / C)\tau \quad (3)$$

(3)  $\tau$  扩展期: 在  $t_1 \sim t_2$  期间,  $\tau$  结束,  $S_2$  接通,  $S_1$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  断开,  $I_2$  对  $C$  充电, (A) 点电压线性上升, 在  $t_2$  时刻升到  $0$  电平时, (A) 点电压跨越零点, 比较器状态翻转, (B) 点输出一个正跳变信号, 则有:

$$-U_1 + (I_2 / C)(t_2 - t_1) = -U_1 + (I_2 / C)T_1 = 0 \quad (4)$$

式中  $T_1 = t_2 - t_1$ 。由式(3)和(4)可得:

$$T_1 = \frac{I_1}{I_2} \tau = K_1 \tau \text{ 或 } \tau = \frac{T_1}{K_1} \quad (5)$$

式中  $K_1 = \frac{I_1}{I_2}$  为  $\tau$  的时间扩展倍率。电容  $C$  经过一次快速放电和慢速充电后, 得到把  $\tau$  扩展了  $K_1$  倍的  $T_1$ 。

(4)  $\tau_R$  采集期: 对  $T_1$  计数测量的残留“零头”时间  $\tau_R$  再次扩展和测量, 以进一步提高  $\tau$  的测量分辨力。在图3中以  $t_2$  时刻的 (B) 点的跨零信号为  $\tau_R$  的起点, 以跨零信号之后的第1个时钟(图3中第9号时钟)出现的时刻  $t_2'$  为  $\tau_R$  的终点, 在  $\tau_R = t_2' - t_2$  期间,  $I_2$  继续对  $C$  充电, (A) 点电压充到  $U_R$ 。

$$U_R = \frac{I_2}{C}(t_2' - t_2) = \frac{I_2}{C} \tau_R \quad (6)$$

(5)  $\tau_R$  扩展期: 在  $t_2'$  时刻  $S_3$  接通,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_4$  断开,  $I_3$  对  $C$  慢速放电, 在  $t_3$  时刻 (A) 点电压线性下降到  $0\text{ V}$ ,  $S_3$  断开, 停止放电, 即经历了第2次扩展期  $T_2 = t_3 - t_2'$  之后, 则有:

$$\frac{I_3 T_2}{C} = U_R \quad (7)$$

由式(6)和式(7)得:

$$T_2 = \frac{I_2}{I_3} \tau_R = K_2 \tau_R \text{ 或 } \tau_R = \frac{T_2}{K_2} \quad (8)$$

式中  $K_2 = \frac{I_2}{I_3}$  为对  $\tau_R$  的时间扩展倍数。即  $T_2$  是  $\tau_R$  的  $K_2$  倍扩展。计数器1在时间  $T_1 + \tau_R$  内对时钟  $T_0$  计数, 其计数值为  $N_1$ , 即:

$$T_1 + \tau_R = N_1 T_0 \quad (9)$$

计数器2在时间  $T_2$  内对时钟  $T_0$  计数, 其计数值为  $N_2$ , 即:

$$T_2 = N_2 T_0 \quad (10)$$

根据式(5)、(8)~(10)可得双扩展内插法的基本关系为:

$$\tau = \frac{T_1}{K_1} = \frac{(T_1 + \tau_R) - \tau_R}{K_1} = [(T_1 + \tau_R) - \frac{T_2}{K_2}] / K_1 = \frac{T_0}{K_1 K_2} (K_2 N_1 - N_2) = N T_s \quad (11)$$

式中  $T_s = \frac{T_0}{K_1 K_2}$  为时间  $\tau$  的量化单位, 即双扩展内插法的时间分辨力, 称为分辨时间。

### 3 双扩展内插器的误差分析

式(11)表明, 在把时间间隔  $\tau$  转换成数字量  $N = K_2 N_1 - N_2$  中, 由于  $T_1 + \tau_R$  期为  $T_0$  的整数倍, 故  $N_1$  无量化误差。而  $T_2$  与  $T_0$  之间不一定是整数倍的关系, 故  $N_2$  仍存在量化误差  $\Delta N_2$ 。此外, 还有标准时钟周期  $T_0$  不稳、扩展系数  $K_1$  和  $K_2$  的变化所产生的误差  $\Delta T_0$ 、 $\Delta K_1$  和  $\Delta K_2$  等。根据误差传递公式, 可得测量  $\tau$  的总误差为:

$$\Delta \tau = \frac{\partial \tau}{\partial T_0} \Delta T_0 + \frac{\partial \tau}{\partial K_1} \Delta K_1 + \frac{\partial \tau}{\partial K_2} \Delta K_2 + \frac{\partial \tau}{\partial N_2} \Delta N_2 = \frac{T_0}{K_1 K_2} (K_2 N_1 - N_2) \left( \frac{\Delta T_0}{T_0} - \frac{\Delta K_1}{K_1} \right) + \frac{N_2 T_0}{K_1 K_2} \left( \frac{\Delta K_2}{K_2} - \frac{\Delta N_2}{N_2} \right) = \frac{T_0}{K_1 K_2} (K_2 N_1 - N_2) (\gamma_{T_0} - \gamma_{K_1}) + \frac{T_0}{K_1 K_2} N_2 \gamma_{K_2} - \frac{T_0}{K_1 K_2} = \frac{T_0}{K_1 K_2} [(K_2 N_1 - N_2) (\gamma_{T_0} - \gamma_{K_1}) + N_2 \gamma_{K_2} - 1] \quad (12)$$

式中  $\gamma_{T_0} = \frac{\Delta T_0}{T_0}$ ;  $\gamma_{K_1} = \frac{\Delta K_1}{K_1}$ ;  $\gamma_{K_2} = \frac{\Delta K_2}{K_2}$ ;  $\gamma_{N_2} = \frac{\Delta N_2}{N_2} = \frac{1}{N_2}$ 。由式(11)和式(12)得  $\tau$  的相对误差  $\gamma_\tau$  为:

$$\gamma_\tau = \frac{\Delta \tau}{\tau} = \gamma_{T_0} - \gamma_{K_1} + \frac{N_2}{K_2 N_1 - N_2} (\gamma_{K_2} - \gamma_{N_2}) = \gamma_{T_0} - \gamma_{K_1} + \frac{N_2}{N} \gamma_{K_2} - \frac{1}{N} \quad (13)$$

讨论:

(1)  $\gamma_{T_0} = \frac{\Delta f_0}{f_0}$  是由晶振频率不稳所引起的时基误差。通常  $\gamma_{T_0}$  可控制在  $10^{-6} \sim 10^{-8}$  以下。

(2)  $\gamma_{K_1} = \frac{\Delta K_1}{K_1}$  为  $K_1$  值变化引起的误差。 $\gamma_{K_1} = \pm \left( \left| \frac{\Delta I_1}{I_1} \right| + \left| \frac{\Delta I_2}{I_2} \right| \right) = \pm (|\gamma_{I_1}| + |\gamma_{I_2}|)$ 。恒流源  $I_1$  和  $I_2$  的误差  $\gamma_{I_1}$  和  $\gamma_{I_2}$

通常为  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。 $\gamma_{K_1}$  是  $\tau$  测量的主要误差来源, 减小它的一个有效的措施是采用校准技术<sup>[4]</sup>。

(3)  $\frac{N_2}{N} \gamma_{K_2}$  为  $K_2$  变化引起的相对误差。通常  $(N_2/N) \ll 1$ 。若希望此项分误差小于  $\pm 1$  误差, 即:  $\frac{N_2}{N} \gamma_{K_2} \leq \frac{1}{N}$  或  $\gamma_{K_2} \leq \frac{1}{N_2}$ 。例如, 若  $K_2 = 100$  倍, 即满度值的  $N_{2\max} = 100$ , 要求  $\gamma_{K_2} \leq \frac{1}{N_{2\max}} = 10^{-2}$ , 这容易做到。

(4)  $1/N$  为  $N_2$  的量化误差, 此项分误差对  $\gamma_\tau$  的贡献为  $1/N$  而不是  $1/N_2$  ( $N \gg N_2$ )。

### 4 双扩展与单扩展模拟内插器的比较

(1) 测量分辨力和测量时间的比较: 设计内插扩时器时, 希望分辨时间  $T_S$  和内插时间  $T_M$  两者越小越好, 即希望乘积值  $T_S \times T_M$  愈小愈好。对单扩展:

$$T_{S_1} \times T_{M_1} = \frac{T_0}{K} K T_0 = T_0^2 \quad (14)$$

对双扩展:

$$T_{S_2} \times T_{M_2} = \frac{T_0}{K_1 K_2} (K_1 + K_2) T_0 = \left( \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \right) T_0^2 \quad (15)$$

式(14)和式(15)表明, 当 $T_0$ 一定时, 单扩展的 $T_{S_1} \times T_{M_1}$ 乘积为一常数, 即减小 $T_{S_1}$ 和减小 $T_{M_1}$ 之间是矛盾的。双扩展 $T_{S_2} \times T_{M_2}$ 之积比单扩展小, 且随着 $K_1$ 、 $K_2$ 值的提高而减小。乘积值减少的倍率 $G$ 为:

$$G = \frac{T_{S_1} \times T_{M_1}}{T_{S_2} \times T_{M_2}} = \frac{T_0^2}{[(1/K_1) + (1/K_2)] T_0^2} = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \quad (16)$$

由式(16)可见, 当单、双扩展两者分辨力相同, 即 $T_{S_1} = T_{S_2}$ 时, 双扩展的内插时间 $T_{M_2}$ 比单扩展 $T_{M_1}$ 减小 $G$ 倍。例如, 当选择时钟 $T_0 = 10$  ns时, 若设计 $K = 2\ 500$ , 则测时分辨力达 $T_{S_1} = T_{S_2} = 10$  ns / 2 500 = 4 ps。采用单扩展, 内插时间 $K T_0$ 为25  $\mu$ s。采用双扩展, 取 $K_1 = K_2 = 50$ , 内插时间为 $(K_1 + K_2) T_0 = 1$   $\mu$ s。比单扩展的内插时间减少了25倍。或者, 当两者内插时间相同时, 即 $T_{M_1} = T_{M_2}$ , 则分辨时间 $T_{S_2}$ 比 $T_{S_1}$ 减小 $G$ 倍。例如, 当 $T_0 = 10$  ns, 若内插时间设定为1  $\mu$ s, 双扩展的分辨时间可达4 ps, 而单内插只能达100 ps, 即相差25倍。

(2) 测量误差的比较: 根据式(2), 单扩展内插器测量 $\tau$ 的总合误差

$$\Delta\tau = \frac{\partial\tau}{\partial T_0} \Delta T_0 + \frac{\partial\tau}{\partial K} \Delta K + \frac{\partial\tau}{\partial N} \Delta N = \frac{T_0 N}{K} \left( \frac{\Delta T_0}{T_0} - \frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta N}{N} \right) = \frac{T_0 N}{K} (\gamma_{T_0} - \gamma_K + \gamma_N) \quad (17)$$

单扩展 $\tau$ 测量的相对误差为:

$$\gamma_\tau = \frac{\Delta\tau}{\tau} = \gamma_{T_0} - \gamma_K + \gamma_N \quad (18)$$

比较单双扩展方式的 $\gamma_\tau$ 表达式(18)和(13)可见, 时钟误差 $\gamma_{T_0}$ 和量化误差 $\gamma_N (=1/N)$ 对 $\gamma_\tau$ 的影响相同。而扩展系数误差的影响却不一样: 单扩展为 $\gamma_K$ , 双扩展主要考虑 $\gamma_{K_1}$ 的影响(由于 $(N_2/N_1)\gamma_{K_2} \ll \gamma_{K_1}$ )。若单、双扩展分辨力相同, 即 $K = K_1 K_2$ , 例如, 同为1 024倍时, 单扩展的 $K = 1\ 024$ , 双扩展的 $K_1 = K_2 = \sqrt{1\ 024} = 32$ 。由于单扩展的倍率 $K = I_1/I_2$ 很大时,  $I_2$ 的数值很小(微安数量级), 当电路漏电流等的影响, 易导致 $I_2$ 和 $K$ 的不稳, 使误差 $\gamma_K$ 剧增。而双扩展的 $K_1 = 32$ ,  $K_1$ 较小, 因而稳定性较好, 误差 $\gamma_{K_1}$ 比 $\gamma_K$ 小。

## 4 结 论

本文在电容充放电原理的单扩展内插法的基础上, 提出了一种双扩展内插法。理论分析表明, 双扩展法在提高测时的分辨力和减少测量时间上, 比单扩展内插法优越。当单、双扩展两者分辨力相同时, 内插时间双扩展比单扩展减小 $G$ 倍。或者, 当单、双扩展两者内插时间相同时, 分辨时间双扩展比单扩展减小 $G$ 倍。误差分析表明, 双扩展的扩展系数误差主要取决于第一次扩展 $K_1$ 的误差, 由于双扩展进行 $K_1$ 和 $K_2$ 倍的两次扩展, 相当于单扩展的 $K_1$ 乘以 $K_2$ 倍的扩展, 即双扩展的每次扩展倍率比单扩展低很多, 低扩展倍率不仅实现的技术难度可降低, 而且精度易保证。因此, 双扩展内插法测时分辨力和精度高, 内插时间短, 实现简便, 有较大的实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 陈杰美, 古天祥. 电子测量仪器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986, 354-356.
- [2] 余翔, 周正中. 高精度频率测量方法及特性分析[C]. 成都: 电子科技大学学术论文专集, 1999, 98-103.
- [3] Kostam O J, Myllyla R. Time-to-digital converter with an analog interpolation circuit[J]. Rev.Sci.Instr., 1986, 51: 2 880-2 885.
- [4] 古军, 习友宝. 高分辨力测时扩展器的校准技术的研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, (5)(增刊): 66-69.

编辑 漆蓉