

# 实现 AT 切石英晶体振荡器微处理器温度补偿的新方法

王轶瑶<sup>1</sup>, 朱惠忠<sup>2</sup>, 董永贵<sup>2</sup>, 冯冠平<sup>2</sup>

(1. 清华大学微电子所, 北京 100084; 2. 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 清华大学精密仪器系, 北京 100084)

**摘要:** 本文介绍实现 AT 切石英晶体振荡器微处理器温度补偿的新方法——双频温度自测法。AT 切石英谐振器各泛音次数的频率温度曲线不同, 利用基频与 3 次泛音除一阶温度系数不同外其他各阶温度系数相等的特性, 基频的 3 倍频与 3 次泛音频率的差频输出与温度近似成线性关系。同时激励并测量基频和 3 次泛音频率, 经过微处理器计算差频实现谐振器温度自测并进行晶体振荡器的微处理器温度补偿。与使用分立温度传感器相比, 消除了测温元件与石英谐振器温度时间常数不同以及温度场梯度造成的测温误差, 提高了测温和补偿精度。

**关键词:** 石英谐振器; 温度补偿; 温度自测; 泛音

**中图分类号:** TN752.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 02-0215-03

## A Novel Implementation Method to Microprocessor Compensated Crystal Oscillator

WANG Zhe-yao<sup>1</sup>, ZHU Hui-zhong<sup>2</sup>, DONG Yong-gui<sup>2</sup>, FENG Guan-ping<sup>2</sup>

(1. Institute of Microelectronics, Tsinghua University; 2. State Key Lab. of Precision Measurement and Technology, Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This paper describes a novel method to realize microprocessor compensated crystal oscillator (MCXO) by using the dual-mode excited AT-cut quartz crystal resonator (QXR). According to the harmonic effect, normalized beat frequency of the 3rd overtone frequency and 3 times of the fundamental frequency is almost linearly dependent on the changes of ambient temperature. By stimulating the fundamental and the 3rd overtone frequencies output simultaneously, the changes of ambient temperature was measured by the beat frequency and the temperature compensation was accomplished by the utilization of the dependence of the temperature on the beat frequency and the method of pulses deletion. This temperature measurement technique can eliminate the thermal lag due to the difference in thermal time constants of the QXR and the thermistor, and can overcome the limitation of temperature field gradient. The implementation of the means in MCXO is described. The dual-mode oscillating circuit and its block diagram are given and the practical experimental data are discussed.

**Key words:** quartz crystal resonator; temperature compensation; overtone

### 1 引言

石英谐振器是最重要的频率和时间控制器件。由于制造和使用简单、成本低、频率稳定度高以及长期稳定性好, 凡频率稳定度要求高于  $10^{-5}$  的场合均需使用以石英谐振器为核心元件的石英晶体振荡器。对于高稳定度的石英晶体振荡器, 温度是影响频率稳定性最重要的因素之一, 要得到高稳定度的石英晶体振荡器, 必须尽量消除温度对频率的影响, 方法有: 使用单层或双层恒温槽以得到恒温环境; 使用具有对温度不敏感切角的石英谐振器, 例如 SC 切谐振器; 对谐振器进行温度补偿。

石英晶体振荡器的温度补偿方法从模拟温度补偿发展到现在的微处理器温度补偿, 频率的稳定度和准确度分别大约每 10 年和 20 年就提高一个数量级<sup>[1]</sup>, 但是补偿中测温方法的改进却很小, 几乎都采用分立测温元件(如热敏电阻)进行温度测量。当温度场变化时, 由于温度传感器与石英谐振器的温度时间常数不同导致温度测量出现滞后, 另外二者的空间位置不同使温度传感器在温度场梯度的影响下测量的不是谐振器的温度, 引起测温误差, 影响了补偿精度。为了克服这个缺点, Kusters 于 1978 年提出了用 SC 切石英谐振器的 b 模式进行温度自测的方法<sup>[2]</sup>, 但是由于振动活力下降太大而没能

得到应用. 1989 年, S. Schodowski 提出了利用 SC 切谐振器 c 模式的谐波效应进行温度自测的新方法<sup>[3]</sup>. 近年来, 该方法被应用到 SC 切石英晶体振荡器的温度补偿, 使频率稳定度在 -55 至 +85 的温度变化范围内达到 20ppb<sup>[4~6]</sup>.

本文介绍 AT 切石英谐振器的双频温度自测和微处理器温度补偿. 利用振荡电路同时激励 AT 切石英谐振器的基频和 3 次泛音使其工作在双谐振模式下, 基频三倍频后与 3 次泛音的差频近似为温度的线性函数, 因此通过测量差频来测量谐振器的温度. 微处理器根据温度计算频率的偏移量, 对谐振频率进行抽取实现温度补偿. 与 SC 切相比, AT 切实现双频温度自测的难点在于如何减小滞后和频率温度的不确定性.

### 2 双频测温的基本原理

石英晶体谐振器的频率温度特性是切角和泛音次数的函数. 根据石英谐振器的频率方程以及密度、晶片尺寸和弹性常数等随温度变化的规律, 得到频率温度特性的表达式:

$$f_i/f_i(T_0) = T_{f,i}^{(1)} \cdot T + T_{f,i}^{(2)} \cdot T^2 + T_{f,i}^{(3)} \cdot T^3 + \dots \quad (1)$$

式中  $i = 1, 3, 5, \dots$  为泛音次数,  $T$  为任意温度,  $T_0$  为参考温度,  $f$  为温度变化量  $T = T - T_0$  时的频率变化量,  $T_{f,i}^{(n)}$  为  $i$  次泛音在参考温度点的  $n$  阶频率温度系数, 是  $T_0$  的函数. 从式(1), 基频和三次泛音频率随温度的变化分别可以写成:

$$f_1/f_1(T_0) = T_{f,1}^{(1)} \cdot T + T_{f,1}^{(2)} \cdot T^2 + T_{f,1}^{(3)} \cdot T^3 \quad (2)$$

$$f_3(T)/f_3(T_0) = T_{f,3}^{(1)} \cdot T + T_{f,3}^{(2)} \cdot T^2 + T_{f,3}^{(3)} \cdot T^3$$

定义差频表达式:

$$f_b(T) = 3f_1(T) - f_3(T) \quad (3)$$

于是有:

$$f_b(T) = 3 f_1(T) - f_3(T) \quad (4)$$

设  $f_3(T_0)/f_1(T_0) = \dots$ , 其中  $\dots$  为非整数并且其温度系数很小, 实验得到对于 AT-切谐振器有  $\dots = 3$ . 把式(2), (3)代入到式(4)得到:

$$\frac{f_b(T)}{f_b(T_0)} = \frac{3 T_{f,1}^{(1)} - T_{f,3}^{(1)}}{3 - \dots} T + \frac{3 T_{f,1}^{(2)} - T_{f,3}^{(2)}}{3 - \dots} T^2 + \frac{3 T_{f,1}^{(3)} - T_{f,3}^{(3)}}{3 - \dots} T^3 \quad (5)$$

根据谐波效应<sup>[7]</sup>, 谐振器 3 次泛音频率与基频的一阶温度系数不同, 而其他各阶对应温度系数近似相等, 因此计算可知式(5)中  $T^2$  和  $T^3$  项与  $T$  项相比小两个数量级可以忽略, 式(5)简化为:

$$f_b(T)/f_b(T_0) = (3 T_{f,1}^{(1)} - T_{f,3}^{(1)}) T / (3 - \dots) \quad (6)$$

即差频相对输出是温度的线性函数, 因此可以通过测量差频的相对变化量来测量谐振器的温度. 图 1 为实测的谐振器基频和 3 次泛音频率随温度的变化曲线, 图 2 为差频相对变化量随温度变化的曲线, 可见差频是温度的单调函数, 并且近似呈线性关系, 进一步的计算表明由于忽略高次项  $T^2$  和  $T^3$  等原因引入的非线性度误差小于 2%.

### 3 双频晶体振荡器的激励电路

双频温度自测能够实现的基础是当石英谐振器被外电路激励时, 各阶固有频率都同时被激励、同时存在, 但是只有与

选频网络的频率相同或接近的固有频率被筛选出来成为输出信号, 并且该频率占有绝大部分的能量, 形成谐振峰. 在扫频仪上可以看出, 基频的谐振峰是最大的.

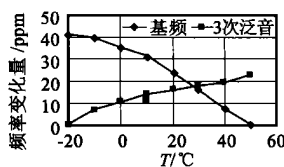


图 1 基频和 3 次泛音频率随温度变化曲线

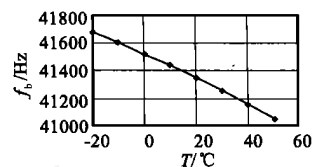


图 2 差频输出随温度变化曲线

双频测温法实现的关键是要用振荡电路同时激励石英谐振器的基频和 3 次泛音. 用两个独立的石英晶体振荡器通过石英晶体耦合在一起, 每个振荡器的选频网络有自己特定的参

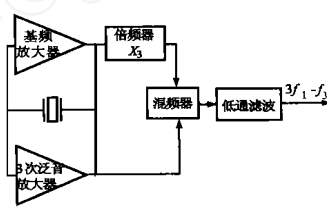


图 3 双谐振模式振荡电路方框图

数, 分别选频输出基频和 3 次泛音频率, 以实现双谐振模式振荡. 图 3 是激励双频输出的振荡电路的原理框图. 为了提高振荡器的稳定性, 在设计和制造谐振器时需要注意的是, 谐振器的两个模式活力不能相差太大, 否则由于两个模式同时存在于选频网络中, 活力大的振荡模式会抑制活力小的振荡模式而导致其振荡非常不稳定或根本不能起振. 在振荡电路的具体实现中, 可以选择分立元件构成振荡器<sup>[3]</sup>, 也可以选择集成门电路构成振荡器. 分立元件构成的振荡电路控制参数要求精确, 振荡频率稳定性高, 而集成门电路构成的振荡器起振容易, 但频率稳定性稍差. 本文采用集成门电路构成双频晶体振荡器, 采用 C 和 L 构成的串联储调谐网络用来对信号进行选频和解耦, 以抑制不需要的信号.

图 4 是微处理器温度补偿的石英晶体振荡器的方框图. 补偿的过程中没有采用变容二极管对谐振频率进行牵引, 而是采用微处理器控制的脉冲增

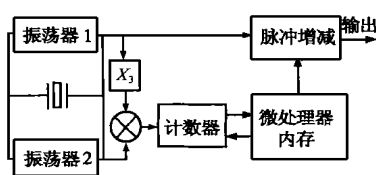


图 4 微处理器温度补偿方框图

减(抽取)的办法. 微处理器中存有  $f_1(T)$  和  $f_b(T)$  之间的关系, 根据  $f_b(T)$  决定应该增减的脉冲数, 从而实现对晶体振荡器的补偿.

### 4 结果与讨论

影响温度自测精度的一个因素是振荡器频率输出随温度变化的不重复性, 如图 5 所示为二次升温过程中基频输出随温度变化的关系曲线. 由于随温度变化存在着不重复性和非线性, AT 切谐振器的单一频率不能用于温度测量. 考虑到同时激励的基频和 3 次泛音频率随温度变化时是相互关联的, 两者的差模信号会减小不重复性, 图 6 所示为同样两次升温过程中  $f_b(T)$  随温度变化的曲线,  $f_b(T)$  的重复性要好于单频的重复性.

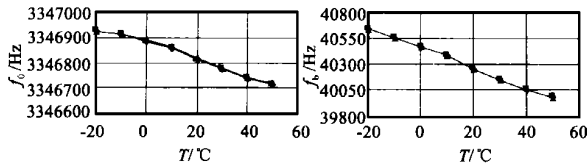


图 5 基频对温度的重复性

图 6 差频对温度的重复性

当使用热敏电阻(或其他测温元件)时,石英晶体振荡器的频率输出与温度之间存在着热滞后,即一个温度循环中在升温 and 降温过程的同一个温度点上,振荡器的频率输出不同。当温度为动态过程时,这种滞后是由于谐振器本身存在滞后,并且热敏电阻不能准确测量谐振器温度的结果;当温度已经达到稳态时,热滞后产生的原因是谐振器本身的滞后。目前,谐振器滞后的原因还不能很好地解释<sup>[8]</sup>,这是影响温度自测精度的另一个原因。图 7 所示为从 -20 到 +50 一个温度循环时振荡器输出基频频率的相对变化量随温度变化的曲线,其中测温元件阻值为 100 欧姆的铂电阻,从图中可以看出,升温 and 降温两条曲线不重合,存在着比较明显的热滞后。当采用双模式温度自测方法时,这种热滞后可以得到有效的减小,并且趋近于线性关系,如图 8 所示。

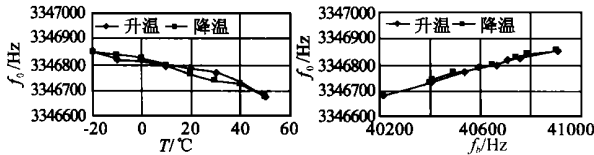


图 7 基频对温度的滞后

图 8 基频对差频的滞后

由于 AT 切石英谐振器与 SC 切石英谐振器相比不具有应力和温度补偿的特性,因此 AT 切谐振器的频率温度不确定性要比 SC 切谐振器的大,这给温度自测带来一定的困难。实验表明,通过选择合适的老化和冲击参数对谐振器进行老化和冲击可以减小谐振器频率温度不确定性和滞后,以提高温度自测的精度。另外,有一部分 AT 切谐振器有明显的活力下降的现象,表现为频率对温度较大的不确定性和非单调性,对于这种谐振器,冲击和老化都不能减小测量误差,因此这种谐振器不能用于双模式温度自测。这种谐振器的品质因数在温度变化过程中没有显著变化。作者正在寻找活力下降与其他性能之间的关系以剔除这种谐振器。

实验采用 AT 切石英晶体谐振器,参数如表 1 所示,采用集成门电路构成振荡器。经过补偿后,谐振器的温度漂移从补偿前的 -20 ~ +40 漂移  $\pm 20\text{ppm}$ ,减小到  $\pm 0.2\text{ppm}$ 。

表 1 谐振器参数

尺寸	基频	3 次泛音	拐点	电压	工作电流
$\phi 12.6\text{mm}$	3.3346MHz	9.9999MHz	20	5V	9mA

## 5 结论

用 AT 切石英晶体谐振器的双谐振模式进行温度自测可以实现晶体振荡器的微处理器温度补偿,这是一种测温的新

方法。这种测温方法消除了由于分立测温元件和谐振器温度时间常数不同而造成测温时间上的不准确,也消除了由于二者空间距离而造成测温的空间上的不准确。实验表明,用双模式温度自测实现晶体振荡器的微处理器温度补偿,可以达到较好的效果。通过提高谐振器的重复性和减小滞后以进一步提高双模式测温的精度,双模式温度自测会成为温度补偿中测温的重要方法。

## 参考文献:

- [1] 吴培才,刘进忙,胡国平. 温度补偿晶体振荡器 [M]. 北京:国防工业出版社,1994.
- [2] J. A. Kusters, M. C. Fischer, J. G. Leach. Dual mode operation of temperature and stress compensated crystals [A]. Proceedings of the 32nd Annual Symposium on Frequency Control [C], 1978:389 - 397.
- [3] S. Schodowski. Resonator self-sensing using a dual-harmonic-mode crystal oscillator [A]. Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control [C], 1989:2 - 8.
- [4] I. V. Abramson. Two-mode quartz resonator for digital temperature compensated quartz oscillator [A]. Proceedings of the 46th Annual Symposium on Frequency Control [C], 1992:442 - 447.
- [5] A. V. Kosykh, I. V. Abramson, V. P. Bagaev. Dual-mode crystal oscillator with resonator excited on B and C modes [A]. Proceedings of the 48th Annual Symposium on Frequency Control [C], 1994:578 - 586.
- [6] F. J. Azcondo, J. C. Blanco, J. Peire. New digital compensation technique for the design of a microcomputer compensated crystal oscillator [J]. IEEE transactions on Industrial Electronics, 1995, 43 (3) :307 - 315.
- [7] A. Ballato, T. Lukaszek. High-order temperature coefficients of frequency of mass-loaded piezoelectrical crystal plates [A]. Proceedings of the 26th Annual Symposium on Frequency Control [C], 1975:10 - 20.
- [8] R. L. Filler, J. R. Vig. Resonators for the microcomputer compensated crystal oscillator [A]. Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control [C], 1989:8 - 15.

## 作者简介:



王 王 1972 年出生,1995 年毕业于清华大学精密仪器系,获工学学士学位,并直读本系机械电子工程专业博士研究生。师从冯冠平研究员,主要从事石英谐振器力敏机理及数字式力敏传感器的研究。现为清华大学微电子所博士后,主要从事 RF MEMS 的研究。



朱惠忠 副研究员,1958 年出生,分别于 1982 年和 1988 年在洛阳工学院获得学士和硕士学位,1995 年获得清华大学工学博士学位。目前主要研究方向为石英谐振式力敏传感器、化学传感器及免疫传感器,发表学术论文 30 余篇。