

# 超高稳定度智能化晶振设计技术

孙晓英

(成都天奥电子股份有限公司,四川 成都 611731)

**摘要:**在对恒温石英晶体振荡器(OCXO)工作原理及电路进行分析的基础上,采用智能化补偿(频率温度稳定度补偿和老化补偿)技术对 OCXO 频率漂移进行了补偿,并对补偿结果进行了实验测试。结果表明,智能化补偿的设计方案可实现 10 MHz OCXO 在小体积(36 mm×27 mm×13 mm)、宽温度范围下超高稳定度(频率温度稳定度 $< \pm 2.0 \times 10^{-10}$  (-40~+70 °C),日老化率 $< \pm 2.0 \times 10^{-11}$ /天)的性能指标要求。

**关键词:**超高稳定度;智能化;恒温石英晶体振荡器;老化;补偿

**中图分类号:**TN384 **文献标识码:**A

## Design of Intelligent OCXO With Ultra High Stability

SUN Xiaoying

(Chengdu Spaceon Electronics Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the operating principle and circuit of the OCXO, a design method for intelligent compensation including frequency temperature stability compensation and aging compensation to frequency drifts of the OCXO is proposed in this paper. Some experiments are carried out to test the compensation results. The results show that the ultra high stability (frequency temperature stability of less than  $\pm 2.0 \times 10^{-10}$  (-40~+70 °C, aging of less than  $\pm 2.0 \times 10^{-11}$ /d)) of a 10 MHz OCXO with the miniature size of 36 mm×27 mm×13 mm and wide temperature range can be realized by using the proposed intelligent compensation design scheme.

**Key words:** ultra high stability; intelligent; OCXO; aging; compensation

### 0 引言

高稳定度、低老化的恒温石英晶体振荡器(OCXO,简称晶振)频率源<sup>[1]</sup>是电子设备的核心部件。随着单片机技术的不断发展,目前,国外许多厂家在晶振中采取了智能化补偿技术,对晶振的频率温度稳定度、老化率、电压允差、负载允差等指标进行了进一步的优化,其频率温度稳定度指标可优于 $\pm 2 \times 10^{-10}$  (-40~+70 °C),日老化率指标优于 $\pm 2 \times 10^{-11}$ /天,体积约为 36 mm×27 mm×13 mm。国内对超高稳定度智能化晶振的研究刚起步,为实现晶振的超高稳定度<sup>[2]</sup>,我们也引入了智能化补偿技术,在高指标晶振的基础上对晶振频率漂移(包括高、低温下的频率漂移和长期频率漂移)进行智能化补偿,从而使晶振的温度稳定度和老化指标上升一个更高的量级。

### 1 理论分析

#### 1.1 频率温度特性

晶振的频率温度特性主要由晶体谐振器的频率温度特性决定。SC切晶体谐振器的拐点位于80~100 °C(与实际切角有关),且拐点 $\pm 5$  °C附近的频率变化较小,更适合于高稳晶振的应用;再通过一个加热控温电路<sup>[3]</sup>将晶振内部温度控制在晶体谐振器的拐点处,从而降低温度对晶振输出频率的影响。通过恒温控制,晶振的频率温度稳定度可得到极大的提高,但传统的恒温晶振技术能达到的频率温度稳定度在 $10^{-9}$ 量级。

#### 1.2 晶振老化特性

老化率表征的是晶振的长期频率稳定度指标,老化率越低的晶振,其长期稳定度越好。晶振的老化主要由晶体谐振器的固有老化特性决定,且老化不可逆。

引起晶体老化的原因主要包括：杂质引起的物质运动，谐振器中应力的消除，安装和焊接，结构、电极和石英中的缺陷，扩散效应，化学反应，谐振器密封盒中压力变化(漏气和除气)等。

晶振的老化率主要靠晶振内部使用的晶体谐振器进行保障，综合各种老化因素后，晶体的老化特性曲线(频率-时间曲线)可以近似地表示为

$$f(t) = A \ln(Bt + 1) + f_0 \tag{1}$$

式中： $f(t)$ 为晶振在老化周期开始后第  $t$  天的频率； $A$ 、 $B$ 、 $f_0$  为由最小二乘法拟合确定的常数。

### 1.3 补偿分析

智能化补偿晶振方案是在高精度恒温晶振<sup>[4]</sup>的基础上，通过智能补偿技术，对晶振频率漂移及老化进行补偿，以此提高晶振的频率稳定性。补偿时需从以下方面入手：

- 1) 晶振电路方面<sup>[5]</sup>。
  - a. 尽量降低晶体谐振器的激励水平。
  - b. 避免石英晶体谐振器污染。
  - c. 对电子元器件进行满功率热处理。
  - d. 隔离电源和负载对振荡频率的影响。

2) 高精度温度补偿方面。在恒温晶振基础上引入数字补偿技术，以进一步提高频率温度稳定度。

3) 老化补偿方面。通过对晶振前期的老化数据进行测试，用最小二乘法拟合出式(1)所示对数曲线的系数  $A$ 、 $B$ 、 $f_0$ ，找到晶振的老化曲线；再通过数字补偿方式对其进行补偿，在恒温晶振原有老化基础上提高老化率指标。

## 2 电路设计

晶振总体方案设计框图如图 1 所示。

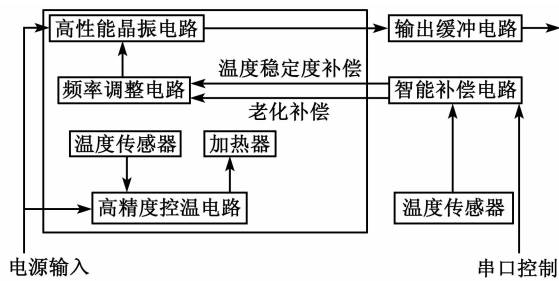


图 1 晶振总体方案框图

### 2.1 晶振电路及控温电路

晶振振荡电路<sup>[6-7]</sup>采用改进型科尔匹兹振荡电路，晶体采用 SC 切型，该电路具有结构简单、起振及易调试等优点。利用仿真软件模拟结果表明，这种电路相位噪声及输出功率均可满足要求。

控温电路采用单片机智能控制进行。恒温晶振工作时，温度检测电路将温度传感器感知的温度信

号转换为电压数字信号，据此由单片机计算出当前所需的控制温度，并将其转换为所需的控制脉冲信号发送到驱动电路，再由驱动电路控制加热电路加热，从而实现对晶体谐振器及其振荡电路的控温。

### 2.2 频率温度及老化智能补偿

温度智能补偿电路是一个基于单片机的数字式电路。电路中包括数据及程序存储电路、温度测试电路和补偿电压产生电路。温度传感器测试出的晶振温度信号经补偿电路中的模数转换器(A/D)转换成数字信号并传递到微处理器(MCU)，MCU 计算出与当前温度值对应的补偿电压的控制量，再由数模转换器(D/A)转换为模拟电压信号，经低通滤波器(LPF)滤去高频干扰信号后送入晶振的压控调谐端，实现对晶振输出频率的高、低温补偿。电路原理框图如图 2 所示。

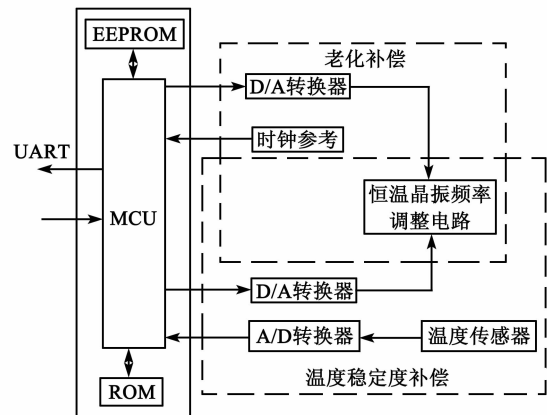


图 2 晶振智能化补偿电路原理框图

老化补偿电路包括数据及程序存储电路、时钟参考和补偿电压产生电路。由晶振的老化数据，按式(1)拟合出晶振的长期老化曲线。根据该曲线，MCU 计算出与之对应的补偿电压的控制量，并经 D/A 转换为模拟电压信号，送入晶振的压控调谐端，实现对晶振的老化补偿。

老化补偿需注意：

- 1) 晶体谐振器老化特性与封装结构有关。
- 2) 应进行预老化，避开老化较快的区间后再进行老化数据的采集。
- 3) 选用高分辨率数模转换器，以减小其对晶振短期稳定性的影响。

## 3 测试结果

### 3.1 频率温度稳定度测试结果

采用高稳定性晶振自动测试系统进行频率温度稳定度指标的测试，按 GJB1648A-2011 中 4.6.11.1 的规定，进行以下试验：

- 1) 测量温度点:  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- 2) 加电后, 各测量点稳定时间:  $(30\pm 1)\text{ min}$ 。
- 3) 频率温度稳定度的计算公式:

$$f-T_{\text{稳定性}} = \pm |(f_{\text{max}} - f_{\text{min}})| / (f_{\text{max}} + f_{\text{min}}) \quad (2)$$

式中  $f_{\text{max}}$ 、 $f_{\text{min}}$  分别为  $-40\sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$  测得的最高频率和最低频率。

经实验测试, 频率温度稳定度指标可达到  $\pm 1.2 \times 10^{-10}$ 。

### 3.2 日老化率测试结果

完成频率温度稳定度指标测试后, 采用晶振老化自动测试系统采集晶振的长期老化数据, 如图 3 所示。按 GJB1648A-2011 中 4.6.35.2.2 的规定, 进行以下试验:

- 1) 老化时间: 30 天。
- 2) 每天记录至少一组数据。
- 3) 采集到的老化数据按式(1)进行数据拟合。

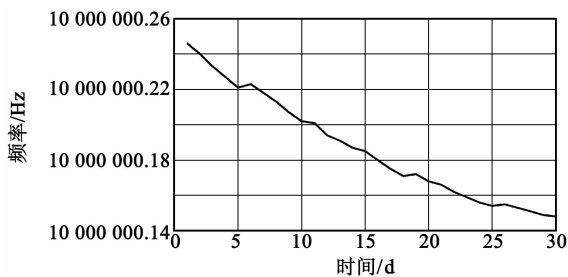


图 3 老化补偿前长期老化数据图

由采集的数据计算出未进行老化补偿的该晶振在 30 天的总频率偏移约为  $\pm 9.8 \times 10^{-9}$ , 采用最小二乘法对采集的数据按式(1)进行数据拟合后得出:

$$f_0 = 10\,000\,000.246\,922\,4 \quad (3)$$

$$A = -0.097\,378\,352\,468\,846\,8 \quad (4)$$

$$B = 0.066\,969\,512\,227\,851\,2 \quad (5)$$

晶振的日老化率为  $-2.242 \times 10^{-10}/\text{d}$ 。

为了达到日老化率  $< \pm 2.0 \times 10^{-11}/\text{d}$  的指标, 通过数字补偿的方式对其进行补偿, 补偿后采集的长期老化数据如图 4 所示。老化补偿后日老化率达到  $-1.892 \times 10^{-11}/\text{d}$ 。

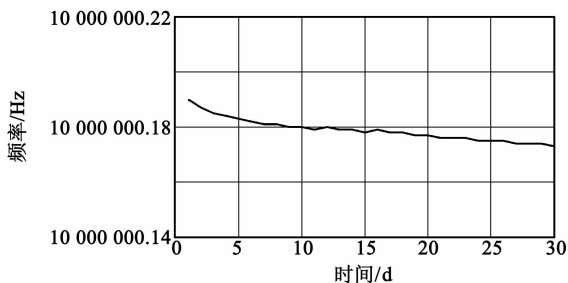


图 4 老化补偿后长期老化数据图

设计的 10 MHz 超高稳定度的恒温晶振实物照片如图 5 所示。

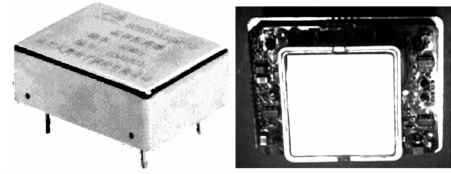


图 5 晶振实物照片

综上所述, 10 MHz 超高稳定度恒温晶振经实验测试, 在工作电压  $+12\text{ V}$ 、 $-40\sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$  的宽温度范围、 $36\text{ mm} \times 27\text{ mm} \times 13\text{ mm}$  的封装体积内, 频率温度稳定度和日老化率指标达到预期研制目标。

### 4 结束语

采用智能化补偿技术对恒温晶振的频率漂移进行了智能化补偿, 实现了 10 MHz 晶振在小体积、宽温度范围内超高稳定度的目标, 具有很好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 赵声衡, 赵英. 晶体振荡器[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 熊琦, 曾健平. 高稳恒温石英晶体振荡器的设计[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 43-45.
- [3] 阎玉英, 徐国盛. 几种恒温槽控温电路的分析探究[J]. 无线电工程, 2014(11): 69-72.
- [4] 秦玉浩, 朱虹, 杨磊, 等. 优良短期稳定度 10 MHz 恒温晶振研制[J]. 压电与声光, 2014, 36(6): 1006-1009. QIN Yuhao, ZHU Hong, YANG Lei, et al. Development of high short-term stability 10 MHz OCXO[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2014, 36(6): 1006-1009.
- [5] 蒋松涛. 一种小型超低相噪恒温晶振的设计[J]. 压电与声光, 2015, 37(3): 420-422. JIANG Songtao. Design of a miniature OCXO with ultra low phase noise[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(3): 420-422.
- [6] 阎玉英, 张振友. 一种小型压控恒温晶体振荡器的设计[J]. 无线电工程, 2007, 37(3): 62-64.
- [7] 秦玉浩, 蒋韦, 贾玉玲, 等. 小型高稳定度 10 MHz 恒温晶振的研制[C]//北京: 2011 全国时间频率学术会议论文集, 2011: 188-189.