文章编号:1004-2474(2019)05-0639-04

小型低相噪恒温晶体振荡器设计

牛占鲁,苏章站

(中国电子科技集团公司第十三研究所,河北 石家庄 050051)

摘 要:根据用户需要,该文设计了一种小体积低相噪 40 MHz 恒温晶体振荡器。该振荡器采用低噪声线性稳压器(LDO)作为电源、SC-切晶体谐振器及 B 模抑制网络等设计,在减小体积的同时提高了产品的相位噪声。温控系统采用直放式加热电路,比例积分的算法,有源负载作为加热元件,提高产品的控温精度,降低环境温度变化对振荡器带来的影响。该振荡器工作稳定可靠,工作电压仅为 5 V。其温度-频率特性绝对值不大于 0.02×10^{-6}(−30～+70 ℃),相位噪声不大于−160 dBc/Hz@1 kHz 的指标。功耗仅为 0.9 W,体积仅为 20 mm×12 mm×10 mm。

关键词:小体积;低相噪;SC-切谐振器;低电压;低功耗;高稳定度

中图分类号:TN753.9 **文献标识码**:A **DOI**:10.11977/j.issn.1004-2474.2019.05.006

Deign of Miniature OCXO With Low Phase Noise

NIU Zhanlu, SU Zhangzhan

(The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: A miniature 40 MHz OCXO with low phase noise is designed according to the use needs. The oscillator is designed with low noise LDO as power processing, SC-cut crystal resonator and B-mode restrained network. The phase noise is improved while the size is reduced. The temperature control system adopts the direct heating circuit, the proportional integral algorithm, and the active load as the heating element to improve the temperature control accuracy of the product and reduce the influence of the ambient temperature change on the oscillator. The oscillator is stable and reliable, operating at only 5 V. The obsolute value of frequency-temperature characteristic is not more than 0.02×10^{-6}(−30～+70 ℃), and the phase noise is not more than −160 dBc/Hz@1 kHz. The power consumption is only 0.9 W and the size is only 20 mm×12 mm×10 mm.

Key words: small size; low phase noise; SC-cut resonator; low voltage; low power consumption; high stability

0 引言

在各种石英晶体振荡器中,恒温晶体振荡器(OCXO)是一种频率稳定性最好的高精密晶体振荡器。广泛应用于通信、导航、雷达、精密仪器仪表、测试设备中[1]。随着大规模集成电路及表面贴装技术的发展,精密仪器及通讯导航系统整机体积越来越小。整机的小型化对部件提出了越来越高的要求。为了获得更高的频率稳定度,必须采用高性能晶体谐振器、稳定的振荡电路以及结构完善、高精度的恒温槽[2]。小型低相噪恒温晶振成为近年来主要关注的对象。

根据市场需要,设计了中心频率 40 MHz、温频特性≤±2×10^{-8}(−30～+70 ℃)、相位噪声≤−160 dBc/Hz@1 kHz,体积仅为 20 mm×12 mm×10 mm的小型低相噪恒温晶振。

1 电路设计

图 1 为石英晶体振荡器电路结构框图[3]。由于产品要达到 2×10^{-8}的温频特性及 0.1 ps 的抖动指标,对于电源的处理格外重要,电源处理系统采用低噪声线性稳压器(LDO),保证了电源的温度稳定性,同时对外部电源的纹波进行处理,消除电源噪声的影响。采用放大及整形电路,同时在输出端进行阻抗匹配输出,进一步减少后级对振荡电路的影响,提高产品的稳定度。

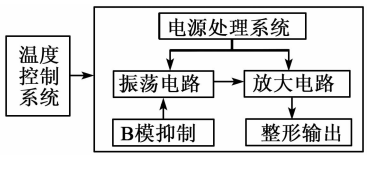

图 1 石英晶体振荡器结构原理图

收稿日期:2018-12-26

作者简介:牛占鲁(1978-),男,山东冠县人,工程师,主要从事晶体振荡器及时频技术的研究。E-mail:niuzhl@sina.com。

图 2 为采用门振荡电路的原理图[4]。图中，180 表示相位翻转 180°。振荡电路谐振器选用 SC-切 40 MHz三次泛音晶体。由于 SC-切谐振器具有 B、C 两种振动模式，C 模是具有零温度系数的振动，为所需的理想振动模式。在比 C 模频率高约 10%处有一寄生振动，称 B 模振动。因此，B 模的抑制是电路设计时需要重点考虑的问题，该抑制网络直接影响到振荡器高低温工作的可靠性，电路中，L_1、C_1用来抑制 40 MHz 的基频，L_2、C_2谐振在 40～44 MHz 处，抑制晶体 B 模振荡，同时又保证了 C 模振荡。电路中晶体工作于略高于串联谐振频率且呈现电感性的区间，此时晶体作为三点式振荡电路中的一个电感元件。

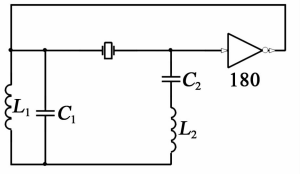

图 2 晶体振荡器电路原理图

2 晶体谐振器设计

晶体谐振器是一种基于压电效应实现的机械振动系统，其等效电路如图 3 所示。图中，C_0为静态电容，C_1为动态电容，L_1为动态电感，R_1为动态电阻。晶体谐振器自身的品质因数 Q 值是衡量晶体谐振器性能的重要因素。

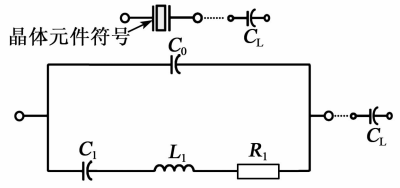

图 3 晶体谐振器等效电路图

晶体谐振器的晶片切型包括 AT-切、SC-切、BT-切等。其中较常用、生产较成熟的是 AT-切和 SC-切晶体谐振器。

SC-切谐振器的显著特点是其频率与温度间有近似的三次函数关系，因而它具有零温度系数点。与 AT-切相比，在零温度系数点附近，SC-切晶体谐振器的温度系数小 1 个数量级，且翻转点温度高，频率偏差小，高温区温频系数小，即 SC-切谐振器的温度稳定特性较好，特别适宜作恒温晶振。另外，由于 SC-切谐振器具有应力补偿和热瞬变补偿，因此，在其他性能上，与 AT-切谐振器相比，SC-切谐振器较优。SC-切谐振器具有以下优点：

1）开机特性好，适用于快速启动。

2）应力效应小，老化较小。

3）幅频效应小，能承受较强的激励电平。

4）短期稳定性较好。

5）频率温度系数小，温度稳定性较高。

另外，SC-切谐振器在抗辐射性能、抗加速度性能和抗高温性能方面，特性比 AT-切谐振器优。目前高稳定晶体振荡器中广泛应用的也是 SC-切石英晶体。

本文采用 SC-切三次泛音冷压焊封装晶体[5]，与基频模式相比，泛音模式具有较高的体积/表面积比值，这意味着表面质量对泛音模式影响较弱，同时泛音模式具有较高的 Q 值。但另一方面，泛音模式由于具有较大的电阻，增加了起振难度，且需要更大的晶片尺寸。

晶体谐振器的频率受温度影响的关系为

$$\frac{\Delta f^s}{f} = a_0(T-T_0) + b_0(T-T_0)^2 + c_0(T-T_0)^3 \tag{1}$$

式中：f 为频率标称值；$\Delta f^s/f$为晶体的温度系数，由晶体的切型和角度决定，选择合适的切角，可得到具有零温度系数的晶体。

图 4 为 SC-切三次泛音 40 MHz 晶体谐振器的温频曲线。图中，Δf 为晶振输出频率变化率。T 为温度产品要求工作温度(－30～＋70 ℃)。晶体谐振器的零温度系数点需选取在(85±5)℃内。

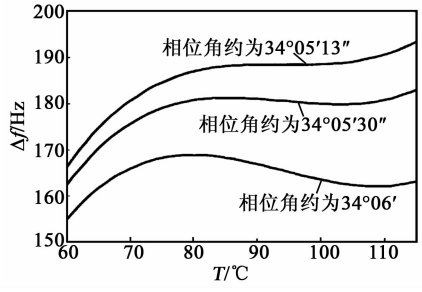

图 4 40 MHz SC-切晶体谐振器温频曲线

3 控温电路设计

晶体谐振器的频率随温度而变化，温度是影响晶体振荡器稳定度最主要的因素，控制和处理温度是提高晶振稳定度的主要手段[2]。为了达到本项目频率温度稳定性的要求，需要对振荡器的控温结构进行精确的分析和设计。在减小体积的情况下保证产品温频特性是控温电路设计的关键。小体积、高稳定晶振产品一般采用谐振器内加热方式或传统电

阻丝加热方式。综合考虑工艺实现难度及成本等因素,本设计采用了改进后的传统加热方式,使用有源负载取代电阻丝作为加热源。在充分利用负载耗散功率的同时减小了产品的体积。控温电路原理图如图 5 所示。

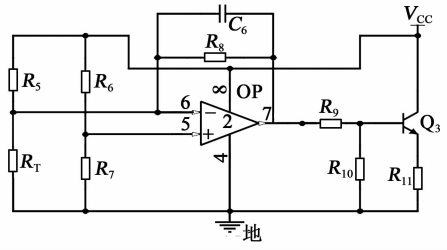

图 5　控温电路原理图

恒温控制是指一个电伺服系统持续向恒温槽加热,通过改变加热电流来补偿环境温度的变化。当外界温度降低时,嵌在恒温槽中的热敏电阻 R_T 会发生变化引起桥路不平衡,桥路输出电压经高增益差分放大器放大,驱动功率器件对恒温槽进行加热,以补偿降低的温度,同理,当外界温度升高时,桥路输出电压减小,恒温槽加热电流也相应减小,最终达到热平衡。

通过精心设计的恒温槽可使晶振的稳定度达到 10^{-8} 量级,但由于电路的开环增益不是无穷大等原因,造成恒温槽内随外界温度变化存在温度波动。单层恒温的热增益一般为 300,因此必然存在温度的波动[6]。恒温槽变化对晶体温频特性的影响如图 6 所示[7]。

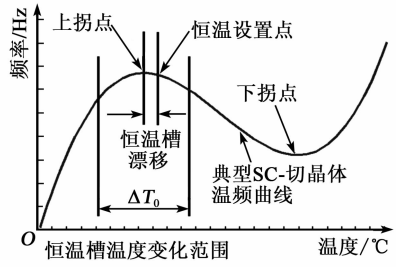

图 6　恒温槽对温频特性的影响

由图 6 可知,恒温槽随外界温度的变化而产生的变化量为 ΔT_0,在外界温度不变的情况下,恒温槽本身还存在温度的漂移,通常的设计为调节恒温设置点在上拐点附近,以期达到理想的效果,但由于 ΔT_0 的存在,必然引起振荡器输出频率的变化。在设计中,我们选择控温点在晶体谐振器频率随温度变化最平坦处的上拐点。

如何评估恒温槽的控温精度一直是困扰恒温晶振设计的难题。由于 SC-切晶体谐振器的 B 模振荡频率与温度近似于线性关系[7],可让产品振荡在 B 模,并通过测试 B 模振荡频率,感知晶体内部晶片的"真正"温度。利用晶体 B 模这一特性可对恒温晶振的温度控制系统进行精确的评估。理论上 B 模曲线近似为线性,斜率约为

$$\frac{\Delta f}{\Delta T} = -25.5\times10^{-6}(℃^{-1}) \tag{2}$$

该斜率表示,随着外界温度的升高,晶体的频率逐渐降低,且温度每变化 1 ℃,频率变化 -25.5×10^{-6},即变化率为 $-25.5\times10-6/℃$。

本产品温度控制选择了比例积分反馈的连续式控温电路,通过比例积分反馈回路对温度进行精确控制,通过调试控温电路的放大增益、积分常数等参数达到提高控温电路的灵敏度、控温精度及环境适应性的目的[8]。

调节控温电路的积分、微分参数,使得放大增益较大的情况下仍能较快的保持稳定。将恒温槽的温度调至晶体的拐点温度处,测试其 B 模曲线的斜率,测试曲线如图 7 所示。

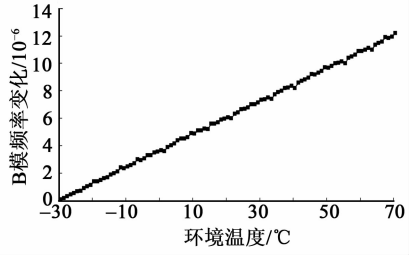

图 7　恒温晶振的 B 模频率温度特性

由图 7 可知,在控温电路的作用下,当外界环境从 −30 ℃升温到 +70 ℃时,晶振输出频率变化 Δf 约为 12.2×10^{-6},由式(2)计算可知,该产品恒温槽的控温精度为

$$\Delta T = \frac{\Delta f}{-25.5\times10^{-6}} = \frac{12.2}{25.5} = 0.47(℃) \tag{3}$$

通过对产品控温精度的评估,采用比例积分控温技术后,在环境温度变化 100 ℃时,晶体谐振器的温度仅降低 0.47 ℃,可满足产品温频特性对控温精度的要求。

4　测试结果

经实际测试,设计中研制的 40 MHz 小体积恒温晶体振荡器测试指标如表 1 所示。图 8 为样品在 25 ℃～−30 ℃～+70 ℃的频率波动图。图 9 为相位噪声图。图 10 为产品实物照片。

表 1 40 MHz 晶体振荡器测试指标结果

项 目	指 标
输出幅度/dBm	+7.5
频率温度稳定度	$\pm 1.1\times10^{-8}$
相位噪声	−162 dBc/Hz@1 kHz
老化率/天	1×10^{-9}
外形尺寸/mm	20×13×10
稳态功耗/W	≤1
工作温度/℃	−30～+70

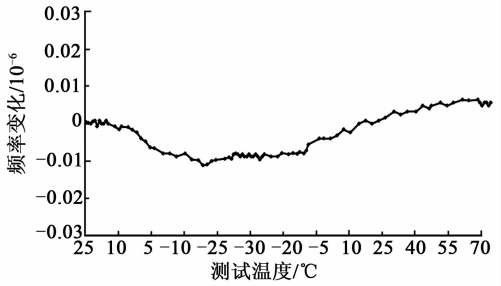

图 8 样品 25 ℃～−30 ℃～+70 ℃的频率波动

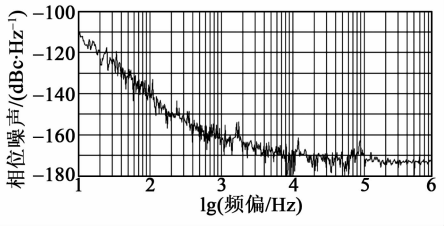

图 9 相位噪声实测结果

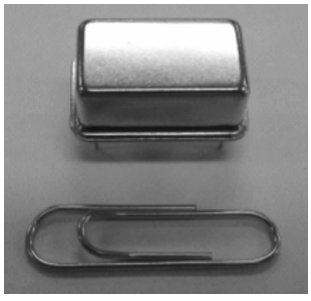

图 10 实物照片

5 结束语

针对指标要求，分析了 SC-切晶体谐振器的特点，找出了温度控制设计的关键点，介绍了恒温槽控温精度的评估方法。设计的产品综合运用低噪声 LDO，SC-切晶体谐振器，B 模抑制网络等设计。在减小体积的同时提高了产品的相位噪声。经实际测试，产品指标完全满足用户要求，具有体积小，稳定高及相位噪声低的特点。产品用于通信及雷达等设备中，可提高整机系统指标，减小体积和降低功耗。具备很好的应用前景和较显著的经济效益。

参考文献：

[1] 秦玉浩. 10 MHz 高稳晶振仿真技术研究[J]. 空间电子技术，2015(4)：50-53.

[2] 赵声衡. 晶体振荡器[M]. 北京：科学出版社，2008.

[3] 孙兵锋. 小型化 10 MHz 恒温晶体振荡器设计[J]. 波谱学杂志，2014，31(3)：389-396.

[4] 孙晓英. 一种基于门振荡电路的恒温晶振设计[J]. 电子技术与软件工程，2015(17)：118-119.

[5] 曾志林. 一种超稳晶体振荡器的设计与实现[J]. 无线电工程，2017，47(6)：75-78.

[6] SERGE G. Temperature processing of an ultra stable quartz oscillator[J]. UFFC IEEE，2001，48(6)：1539-1546

[7] JOHN R V. Quartz crystal resonators and oscillators for frequency control and timing applications[R]. U. S.：Army Communications-Electronics Command，2001.

[8] 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 & Acoustooptics，2015，37(3)：420-422.

欢迎订阅《压电与声光》杂志