

一种超小型抗振恒温晶振的研制

王 旭

(成都天奥电子股份有限公司,四川 成都 611731)

摘 要:晶体振荡器是振动敏感器件,通常在振动条件下晶振的相位噪声会恶化。该文分析了抗振恒温晶振(OCXO)的设计方法及影响因素,阐述了振动对晶振相位噪声的影响,并采用微型减振器及低加速度灵敏度晶体谐振器设计了 100 MHz 超小型抗振恒温晶振。该文研制的 100 MHz 超小型抗振恒温晶振体积仅为 25.4 mm×25.4 mm×15 mm,振动条件下相噪指标最优达到-147 dBc/Hz@1 kHz,达到了预期的研制目标。

关键词:石英晶体;抗振;小体积;恒温晶振(OCXO);低加速度灵敏度

中图分类号: TN752

文献标识码: A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.002

Development of a Miniature Anti-Vibration OCXO

WANG Xu

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

Abstract: It is well known that the crystal oscillator is a vibration-sensitive device; the phase noise of it is usually degraded under the vibration conditions. The design method and influencing factors of the anti-vibration oven controlled crystal oscillator (OCXO) are analyzed, and the effect of vibration on the phase noise of OCXO is presented. A 100 MHz ultra-compact, anti-vibration OCXO is designed with the micro vibration damper and low g -sensitivity crystal resonator. The size of the developed OCXO is only 25.4 mm×25.4 mm×15 mm, the optimal phase noise is up to -147 dBc/Hz@1 kHz offset under the random vibration condition. The expected development goal is achieved.

Key words: quartz crystal; anti-vibration; miniature size; oven controlled crystal oscillator (OCXO); low g -sensitivity

0 引言

随着空间技术的迅速发展,各种高速飞行器对其使用的电子仪器设备在振动、冲击、加速度等恶劣环境下的抗干扰能力提出了越来越高的要求。而对振动极为敏感的晶体振荡器是各类电子设备中不可缺少的高稳定基准频率源,振动对晶振输出频率稳定性及噪声的影响已不容忽视。因此有必要开展晶体振荡器的抗振技术研究,提升晶振在振动条件下的相位噪声性能。

晶振的抗振设计方法通常分为无源法和有源法两类:

1) 无源法主要是用物理法降低振动环境对晶振输出频谱的影响,包括晶体切型选择、晶体加工工艺改进及振动隔离减振等。隔离减振措施对晶振的动态相噪有较明显的改善,是目前主要的晶振减振方法,但其采用的减振器结构较大,难以小型化。

2) 有源法又称为加速度补偿法,它主要通过加速度传感器检测出外界振动环境情况,然后通过电路或软件方式补偿振动加速度所带来的晶振频移、相移,从而改善晶振在振动条件下的相位噪声^[1]。有源法受限于补偿转换精度及算法难度,对较高振动频率的补偿研究难度相对较大,目前实际工程中应用较少。

本文重点分析了晶体谐振器的加速度灵敏度和减振结构对晶振动态相噪的影响,并介绍了一种基于无源抗振技术设计的小型抗振恒温晶振,在小体积条件下实现了低动态相噪的研制目标。

1 理论分析

晶体谐振器的加速度灵敏度对晶振的相位噪声有直接相关性^[2]。在振动条件下,晶体的振荡频率会发生细微变化,振动条件下的振荡频率 $f(a)$ 为

$$f(a) = f_0(1 + \mathbf{f} \cdot \mathbf{a}) \quad (1)$$

收稿日期:2017-08-24

作者简介:王旭(1977-),男,四川省成都市人,高级工程师,主要从事晶体振荡器技术研究和产品开发的研究。

式中: f_0 为静态条件下的振荡频率; $\mathbf{f}$ 为加速度灵敏度; a 为加速度。

由于 $\mathbf{f}$ 为矢量, 其幅值为

$$|\mathbf{f}| = \sqrt{\Gamma_x^2 + \Gamma_y^2 + \Gamma_z^2} \quad (2)$$

式中 $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$ 分别为 x, y, z 3 个轴向的 $\mathbf{f}$ 。

当晶振工作在频率为 f_v 的正弦振动条件下时, 晶振的相位噪声 $L(f)$ 为

$$L(f) = 20 \log \left[\frac{(\mathbf{f} \cdot \mathbf{A}) f_0}{2 f_v} \right] \quad (3)$$

式中 A 为加速度的幅值。

通常情况下, 晶振在实际工作时的振动条件更多为随机振动, 在随机振动条件下, 晶振的相位噪声为

$$L(f) = 10 \log \left[\frac{(\mathbf{f} \cdot \mathbf{f}_0)^2 G(f)}{2 f^2} \right] \quad (4)$$

式中: $G(f)$ 为加速度能量谱密度; f 为相位噪声偏离载频位置。

由式(4)可见, 通过减小 $G(f)$ 或 $\mathbf{f}$ 可降低振动环境对晶振相位噪声的影响。因此, 通常采用减振器来进行振动隔离, 同时还可通过对晶体谐振器制作工艺的优化及对晶体谐振器加速度灵敏度的筛选等手段, 来达到减小 $\mathbf{f}$ 的目的。

2 产品设计

2.1 减振结构设计

我们在晶振内部设计了一个微型减振器, 减振器与内部一小体积晶振连接构成一个被动减振系统。减振器可抽象为如图1所示的模型^[3]。

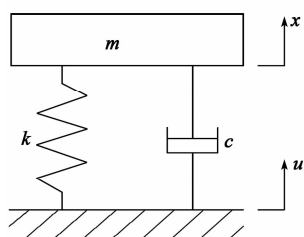


图1 减振器模型

减振器模型的传输函数为

$$G(s) = \frac{x}{u} = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k} \quad (5)$$

式中: m 为被隔振物体的质量; k 为减振装置的弹性系数; c 为减振装置的阻尼系数; x 和 u 分别为被隔振物体和固定基座的位移。

由式(5)可知, 减振对振动的隔离效果与减振材料的弹性系数、减振结构的阻尼系数和被减振物体的质量等有关^[4]。

在综合对比了多种减振材料与结构后, 本设计

中选择高密度不锈钢钢丝绳为隔振材料, 减振结构采用专门设计的多支点固定支架将内部晶振悬挂, 通过试验验证, 可使传递到晶振上的加速度减小。同时为提高隔振系统的性能, 避开随机振动谱的共振频率, 我们对被隔振晶振进行了配重设计, 配合减振结构将减振器谐振频率设定为低于 50 Hz。图2为晶体振荡器内部减振结构示意图。

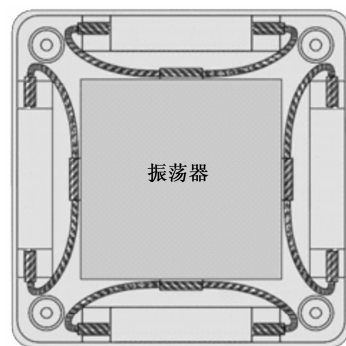


图2 减振结构示意图

由于本设计中的抗振恒温晶振体积很小, 对减振器的加工和装配精度要求较高。为了达到最好的减振效果, 在减振组件与内部振荡器的连接与装配时, 要求采用细软的线缆, 避免连接线缆对减振组件谐振频率造成的影响。同时在晶振的结构腔体内部需填充缓冲材料, 防止在振动和冲击时内部发生碰撞。本文设计的减振器可对自谐振频率外的振动进行有效隔离, 特别是对 1 kHz 附近的高频振动有很好的隔离效果。

2.2 晶体谐振器设计及筛选

由于晶体谐振器是影响晶振在振动条件下频率稳定度的主要根源, 因此, 对于抗振晶振的晶体谐振器有很多严格要求, 最重要的考虑因素是晶体谐振器的 $\mathbf{f}$ 。我们主要通过对晶体谐振器设计工艺改进及对晶体谐振器的 $\mathbf{f}$ 的筛选来确保晶体谐振器的 $\mathbf{f}$ 满足要求。

晶体的 $\mathbf{f}$ 由晶体结构决定, 不同切型的晶体会有不同的 $\mathbf{f}$ 。如 SC 切晶体的 $\mathbf{f}$ 比 AT 切晶体更优。多年来有关降低 $\mathbf{f}$ 的研究工作, 还大量体现在改进晶体的结构安装和加工工艺上。应用平凸和双凸的晶片比平片的 $\mathbf{f}$ 低, 双凸晶片因有很好的对称性而应用效果更好。泛音晶体比基频晶体的 $\mathbf{f}$ 低, 支架结构也对晶片的力频效应影响较大。本设计中, 为保证更优的加速度灵敏度, 采用四点支撑结构的 SC 切泛音晶体设计^[5]。另外, 晶片的修磨、电极的质量和位置等都对 $\mathbf{f}$ 有一定影响, 在晶体谐振器加工过程中均进行了考虑。

从大量试验数据可看出,晶体谐振器 Γ 的数据较分散,在生产过程中很难对其加以控制。因此,可采用对晶体谐振器进行 Γ 筛选的方式来选择 Γ 相对较好的晶体谐振器。我们设计了晶体谐振器的 Γ 的筛选装置,通过将晶体谐振器固定连接在振荡器上,对振荡器在振动及翻转试验时相位噪声及频率变化进行测量,最终计算得到被测晶体谐振器的 Γ 。晶体谐振器的 Γ 筛选装置如图 3 所示。由于晶体谐振器的 Γ 无法进行批量测试,测试效率偏低,测试成本相对较高。

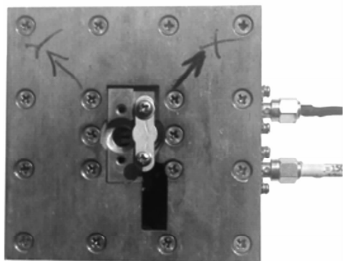


图 3 晶体谐振器加速度灵敏度筛选装置

本设计中采用的晶体谐振器要求 $\Gamma < 3 \times 10^{-10}/g (g=9.8 \text{ m/s}^2)$ 。同时,对晶体谐振器的品质因数(Q)值、拐点、频差及等效电阻等参数也有严格要求,应避免电路参数出现较大偏离,造成各种分布电容、电抗等影响 Γ 。

3 测试结果

3.1 测试方法

我们通过测试晶振在振动条件下的相位噪声来对本设计进行验证,测试时将晶振刚性安装在专门设计的工装上进行振动相噪测试。振动测试系统由振动台、振动控制器、加速度传感器及信号源分析仪 E5052B 组成。振动试验的测试系统如图 4 所示。

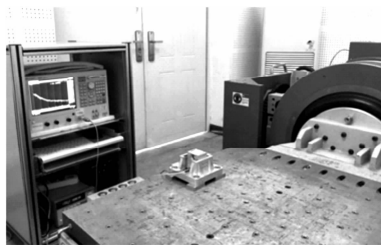


图 4 振动测试系统

相位噪声测试对环境的敏感度较高,特别是在振动条件下,输出线缆和电源线的扰动、电磁干扰及其他干扰都会影响测试结果的准确度。因此,对振动测试系统的抗干扰能力需进行重点考虑。

我们对本文设计的小型抗振恒温晶振在随机振动条件下进行了相位噪声测试。随机振动加速度谱密度为 $4 (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$,振动频率谱为 $50 \sim 2\,000 \text{ Hz}$ 。

振动谱曲线如图 5 所示。

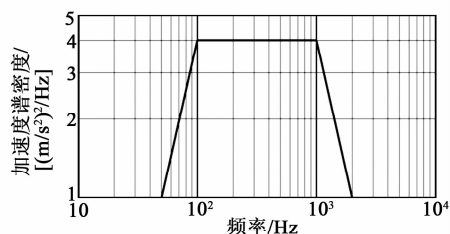


图 5 随机振动试验谱

3.2 测试结果分析

本文设计的小型抗振恒温晶振在振动条件下的相位噪声测试结果如图 6 所示。测试结果表明,晶振在 3 个轴向动态相噪均优于 $-147 \text{ dBc/Hz} @ 1 \text{ kHz}$ 。由测试结果可看出,晶振对频率 1 kHz 附近的振动有很好的减振效果,但在减振器 50 Hz 的自谐振频率附近振动放大。由于本设计中的晶振体积很小,质量较小,其内部减振器自谐振频率降低难度较大。因此,本设计晶振产品可用于对偏离载频 1 kHz 相位噪声要求较高的应用场合。

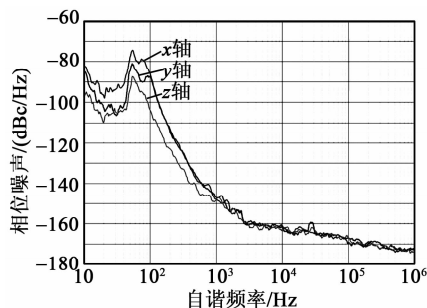


图 6 晶振在振动条件下相位噪声测试结果

图 7 为本文设计的小型抗振恒温晶振实物示意图。产品封装尺寸仅为 $25.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。



图 7 小型抗振恒温晶振实物

4 结束语

本文通过多点支撑无源隔振设计和低加速度灵敏度晶体谐振器筛选,设计了一种小型低相噪抗振

(下转第 322 页)