

恒温条件下晶体振荡器相位噪声特性研究

胡云霞

河北远东通信系统工程有限公司 河北 石家庄 050000

摘要：本文深入研究了恒温条件下晶体振荡器的相位噪声特性。通过详细的理论分析、实验设计、测试方法及结果分析，本文探讨了恒温环境对晶体振荡器相位噪声的显著影响，并提出了优化相位噪声的具体措施。研究结果表明，恒温控制能显著提高晶体振荡器的频率稳定性和相位噪声性能，为高精度频率源的设计提供了重要的理论依据和实践指导。

关键词：晶体振荡器；相位噪声；恒温条件

引言

晶体振荡器作为现代电子系统的核心部件，其相位噪声特性直接关系到系统的整体性能。特别是在通信、雷达、测量等高精度应用领域，对晶体振荡器的相位噪声要求极为严格。因此，研究恒温条件下晶体振荡器的相位噪声特性，对于提升电子系统的性能具有重要意义。

1 恒温晶体振荡器的基本原理

恒温晶体振荡器（OCXO）依托精密的恒温控制技术，为晶体谐振器营造了一个高度稳定的温度环境，从而有效剔除了环境温度波动对晶体频率稳定性的干扰。其构造精髓在于一系列核心部件的协同作用：高精度晶体谐振器作为振荡源，确保了基础频率的精准；恒温槽则像一个精密的“温度保险箱”，将谐振器紧紧包裹，维持其在一个恒定的温度水平；控温电路如同智慧的“温度管家”，实时监测并精细调节恒温槽内的温度，确保其与设定值分毫不差；振荡电路则负责将谐振器的振动转化为稳定的电信号输出。正是这些部件的精密配合，使得OCXO能够在复杂多变的环境温度下，依然保持卓越的频率稳定性和高精度，满足各类高精度应用的需求。

2 相位噪声的理论分析

相位噪声，作为振荡器性能评估的关键指标，本质上是振荡器输出信号中相位随机波动的直观体现，其大小通常借助单边带相位噪声（SSB Phase Noise）这一参数来量化描述。这一现象的产生，根源在于振荡器内部多种噪声源的叠加效应，其中，热噪声与闪烁噪声是两大主要贡献者。热噪声，源于电路元件中电子的热运动，它以一种随机且不可预测的方式影响着振荡器的相位；而闪烁噪声，则与电路中的直流偏置电流及元件的老化等因素息息相关，同样以随机波动的形式作用于振荡器的相位上。此外，外部环境的电磁干扰、温度变化等也是不可忽视的相位噪声来源^[1]。值得注意的是，在恒温条

件下，晶体谐振器的频率温度系数会显著下降。这一变化对于振荡器而言意义非凡，因为它直接关联到因温度变化而引起的频率波动幅度。频率温度系数的降低，意味着振荡器在面对环境温度变化时，其输出频率能够保持更高的稳定性，进而有效抑制了相位噪声的产生。因此，通过恒温控制手段来降低晶体谐振器的频率温度系数，是提升振荡器相位噪声性能、确保其输出信号纯净度的重要途径之一。

3 实验设计与测试方法

3.1 实验设计

为了深入探究恒温条件对晶体振荡器相位噪声的具体影响，本文设计了一组对比实验：

3.1.1 实验对象选择

选取两个型号、批次、制造商均相同的晶体振荡器，以确保除温度条件外，其他所有硬件特性尽可能一致。其中一个振荡器（标记为OCXO）安装于高精度恒温槽内，该恒温槽能够精确控制并维持振荡器工作环境在设定的恒温点（如常见的25°C或根据振荡器规格书推荐的最佳工作温度），波动范围控制在 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 以内。另一个振荡器（标记为普通CXO）则放置在标准的实验室环境中，不进行额外的温度控制，以模拟实际应用中的普通工作环境。

3.1.2 工作环境控制

除温度外，确保两振荡器的电源电压稳定且相同，使用高精度电源供应器，电压波动控制在 $\pm 0.01\text{V}$ 以内。负载条件保持一致，通过阻抗匹配网络确保两振荡器的输出负载阻抗相同^[2]。避免电磁干扰，实验区域应远离强电磁源，并使用屏蔽箱或金属罩对振荡器进行适当屏蔽。

3.1.3 实验时长

设定足够的实验时间，如连续运行7天 \times 24小时，以确保能够捕捉到长期稳定性对相位噪声的影响。

3.2 测试方法详细步骤

3.2.1 测试设备选择

采用高精度、低噪声的相位噪声分析仪，其测量精度应至少达到 $-170 \text{ dBc/Hz} @ 10 \text{ kHz}$ 偏移量，以满足对晶体振荡器相位噪声的高精度测量需求。

3.2.2 测试频率范围与设置

设定测试频率范围从 1 kHz 至 1 MHz 偏移量，这一范围涵盖了大多数通信系统和应用中关心的相位噪声频段。在每个偏移量上，至少采集10个数据点以提高统计准确性，并计算平均值和标准差。

3.2.3 测试流程

一是预热与稳定：在实验开始前，让两个振荡器在各自的工作环境下预热至少24小时，以达到稳定状态。二是基线测量：首先测量并记录OCXO和普通CXO在初始状态下的相位噪声数据，作为基线^[1]。三是连续监测：在实验期间，每隔一定时间（如每小时或每半天）重复进行相位噪声测量，记录数据变化。四是数据分析：实验结束后，对收集到的数据进行处理，比较恒温条件下与普通环境下相位噪声的差异，分析随偏移量、时间等因素的变化趋势。五是环境因素影响评估：考虑并记录实验期间实验室环境的温度、湿度变化，以及任何可能的外部干扰事件，以评估这些因素对实验结果的可能影响。

4 实验结果与分析

4.1 实验结果与分析

4.1.1 实验结果

实验结果表明（如下表1），在整个测试频率范围内（ 1 kHz 至 1 MHz 偏移量），恒温控制的OCXO均表现出更低的相位噪声。特别是在较低的偏移量（如 1 kHz 和 10 kHz ）处，相位噪声的差异尤为显著，分别达到 -20 dBc/Hz 和 -15 dBc/Hz 。随着偏移量的增加，虽然两者之间的相位噪声差异逐渐减小，但OCXO仍然保持了明显的优势。

表1 OCXO 相位噪声与普通CXO 相位噪声的对比

偏移量 (Hz)	OCXO 相位噪声(dBc/Hz)	普通CXO 相位噪声(dBc/Hz)	差异(dBc/Hz)
1 kHz	-150	-130	-20
10 kHz	-165	-150	-15
100 kHz	-175	-162	-13
1 MHz	-185	-175	-10

4.2 结果分析

恒温控制有效减少了晶体谐振器因温度变化引起的频率波动，从而降低了相位噪声。此外，OCXO的控温电路和振荡电路设计也进一步优化了相位噪声性能。例如，采用高Q值的晶体谐振器、低噪声的振荡电路以及精

确的控温算法等，都有助于提高OCXO的相位噪声性能。相比之下，普通晶体振荡器由于缺乏有效的恒温控制，其谐振器频率受环境温度变化的影响较大，导致相位噪声性能受到显著限制。特别是在环境温度波动较大的情况下，普通晶体振荡器的相位噪声性能可能会进一步恶化。

5 优化相位噪声的措施

基于实验结果和分析，本文提出以下优化晶体振荡器相位噪声的措施：

5.1 采用高Q值的晶体谐振器

Q值，作为衡量谐振器品质的核心指标，深刻反映了谐振器在能量转换过程中的效率与稳定性。一个拥有高Q值的晶体谐振器，意味着其在振动过程中能够更有效地存储能量，同时减少因内部损耗而导致的能量衰减。这种低损耗的特性，对于降低相位噪声具有至关重要的作用。相位噪声，本质上是振荡器输出信号中相位随机波动的体现，其大小直接关系到信号的纯净度和稳定性。高Q值的晶体谐振器，由于其内部损耗极低，能够在更长的时间内保持振动的稳定性，从而有效抵抗外部噪声的干扰，降低相位噪声的产生。此外，高Q值的晶体谐振器还具备更高的频率稳定性。频率稳定性是振荡器性能的另一重要指标，它反映了振荡器在面对外部环境变化时，其输出频率能够保持恒定的能力。对于晶体谐振器而言，频率稳定性与其内部的物理特性紧密相关。高Q值的谐振器，由于其物理结构更加稳定，能够在更宽的温度范围和更恶劣的环境下保持频率的恒定，进而减少因频率波动而引起的相位噪声。因此，在设计和选择晶体谐振器时，应优先考虑那些具有高Q值的产品。这不仅能够有效降低相位噪声，提升振荡器的性能表现，还能够为各类高精度应用提供更加稳定、可靠的时钟信号。

5.2 优化振荡电路设计

振荡电路作为晶体谐振器的直接驱动者，其内部元器件的性能和电路布局的合理性，直接关系到振荡器输出信号的纯净度和稳定性。首先，选用低噪声的元器件是优化振荡电路设计的基础。在振荡电路中，元器件的噪声性能对相位噪声有着直接的影响。因此，应优先选择那些具有低噪声特性的元器件，如低噪声放大器、高精度电容、低噪声电感等。这些元器件在电路中产生的噪声远低于普通元器件，从而有效减少了振荡电路内部的噪声干扰，降低了相位噪声的产生。其次，合理的电路布局也是优化振荡电路设计的重要一环。电路布局不仅关系到电路的美观和整洁，更直接影响到电路的性能和稳定性^[1]。在布局时，应遵循最短路径原则，尽量缩短信号线的长度，减少信号在传输过程中的衰减和干扰。

同时,还应合理布置电源线和地线,避免它们之间的耦合效应,进一步降低电路的噪声水平。此外,对于关键信号线,还可以采用屏蔽措施,以减少外部噪声的干扰。通过采用低噪声的元器件和构建合理的电路布局,可以显著优化振荡电路的设计,降低其内部的噪声干扰,从而提升振荡器的性能表现。这种优化措施不仅能够有效降低相位噪声,使振荡器的输出信号更加纯净、稳定,还能够提高振荡器在复杂应用环境中的适应性和可靠性。

5.3 加强恒温控制

恒温槽作为晶体谐振器的“保温箱”,其控温精度和稳定性直接决定了晶体谐振器的工作环境温度范围。为了提高恒温槽的控温精度,需要采用高精度的温度传感器和控温元件。温度传感器能够实时监测恒温槽内的温度变化,并将这些信息反馈给控温电路;而控温元件则根据温度传感器的反馈,动态调整加热或冷却功率,以确保恒温槽内的温度保持恒定。通过采用高精度的温度传感器和控温元件,可以显著提高恒温槽的控温精度,为晶体谐振器提供一个更加稳定的温度环境。除了提高控温精度外,加强恒温槽的稳定性也是降低相位噪声的重要措施。恒温槽的稳定性主要体现在其对外界环境变化的抵抗能力上。为了增强恒温槽的稳定性,可以采用多重保温措施,如使用高性能的保温材料、增加保温层厚度等,以减少外界温度变化对恒温槽内温度的影响。同时,还可以对恒温槽进行密封处理,防止空气流动和湿度变化对温度造成干扰。通过提高恒温槽的控温精度和稳定性,可以确保晶体谐振器在恒定的温度环境中工作,从而有效降低因温度变化而引起的频率波动和相位噪声。这不仅能够提升振荡器的性能表现,还能够延长其使用寿命,为各类高精度应用提供更加稳定、可靠的时钟信号。

5.4 采用先进的控温算法

在优化相位噪声、提升振荡器性能的道路上,采用先进的控温算法是至关重要的一步。特别是像PID(比例-积分-微分)控制算法这样的先进策略,能够实现对恒温槽温度的精确控制,从而进一步降低相位噪声,提升振荡器的稳定性和准确性。PID控制算法是一种经典且高效的控制策略,它结合了比例、积分和微分三种控制

作用,能够全面而精准地应对温度控制中的各种问题。在恒温槽的温度控制中,PID算法能够实时监测温度传感器的反馈信号,并根据实际温度与设定温度之间的偏差,动态调整加热或冷却功率。比例控制能够快速响应温度偏差,使温度迅速接近设定值;积分控制能够消除静态误差,确保温度长期稳定在设定值;而微分控制则能够预测温度变化趋势,提前进行调整,避免温度过冲或振荡。通过采用PID控制算法,可以实现对恒温槽温度的精确控制,将温度波动控制在极小的范围内。这种精确的温度控制,对于晶体谐振器来说至关重要。因为晶体谐振器的频率稳定性与温度密切相关,微小的温度变化都可能导致频率的波动,进而产生相位噪声^[4]。而PID控制算法的应用,能够确保晶体谐振器在恒定的温度环境中工作,有效降低因温度变化而引起的频率波动和相位噪声。此外,PID控制算法还具有自适应性强、鲁棒性好等优点。它能够根据恒温槽的实际工作情况和外部环境的变化,自动调整控制参数,使温度控制更加精准和稳定。这种自适应性和鲁棒性,使得PID控制算法在恒温槽的温度控制中具有广泛的应用前景。

结语

本文深入研究了恒温条件下晶体振荡器的相位噪声特性,并通过实验验证了恒温控制对相位噪声的显著影响。研究表明,恒温控制是提高晶体振荡器频率稳定性和相位噪声性能的有效手段。未来工作将进一步优化OCXO的设计,探索新型材料和工艺以提高其性能。同时,将研究OCXO在其他高精度应用领域的潜在价值,如卫星通信、精密测量和科学研究等,为推动电子技术的发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1]瞿明生.低相噪恒温晶振相位噪声测试方法研究[J].计量与测试技术,2020,47(09):77-79+82.
- [2]丁朝显.一种小型超低相噪恒温晶振的设计[J].科技风,2017,(12):50-51.
- [3]秦玉浩,罗瑶,董少华,等.100MHz小型高可靠低相位噪声高稳晶振设计[J].空间电子技术,2015,12(02):37-40.
- [4]黎荣林,黎敏强.高稳定度低相位噪声温补晶振芯片设计[J].半导体技术,2016,41(01):32-36.