

# 低相位噪声石英晶体振荡器关键技术研究

张成乡

河北远东通信系统工程有限公司 河北 石家庄 050200

**摘要:** 本文旨在深入探讨低相位噪声石英晶体振荡器的关键技术,分析其设计原理、性能特点及应用前景。石英晶体振荡器因其高频率稳定性和低相位噪声特性,在现代电子系统、精密时频计量等领域具有广泛应用。本文将从石英晶体的物理特性、振荡器电路设计、相位噪声优化策略等方面展开详细论述,以期为相关领域的研究与应用提供参考。

**关键词:** 石英晶体振荡器; 相位噪声; 压电效应; 频率稳定性; 电路设计

## 引言

自法国物理学家居里兄弟1880年发现压电效应以来,石英晶体振荡器因其卓越的性能逐步成为高精度频率控制的核心元件。随着现代电子技术的飞速发展,对振荡器相位噪声的要求日益提高。低相位噪声石英晶体振荡器不仅关乎系统整体的稳定性和精度,还直接影响到信号处理的质量和效率。因此,对其关键技术的研究具有重要意义。

## 1 石英晶体的物理特性与压电效应

### 1.1 石英晶体的基本性质

石英晶体,作为一种珍贵的天然矿物,其独特的晶体结构赋予了它非凡的物理特性,尤其是压电效应和逆压电效应。这两种效应的存在,使得石英晶体在受到外部机械应力时,其内部电荷分布会发生显著变化,从而在晶体两端产生符号相反的电荷,此即压电效应。而逆压电效应,则是石英晶体在受到外加电场作用时,其内部的正负电荷中心会发生相对位移,导致晶体产生机械形变。这两种效应相互依存、互为逆过程,共同构成了石英晶体振荡器工作的物理基础。

### 1.2 压电效应与逆压电效应

压电效应和逆压电效应是石英晶体的两大核心特性。压电效应具体表现为:当石英晶体受到机械应力作用时,其内部会发生极化现象,导致晶体两端表面出现符号相反的电荷。这种电荷的产生与机械应力的方向和方向密切相关,为石英晶体的电学应用提供了可能。而逆压电效应,则是压电效应的逆过程:当石英晶体处于外加电场中时,其内部的正负电荷中心会发生相对位移,导致晶体产生机械形变。这种形变的大小和方向与外加电场的大小和方向紧密相关,为石英晶体的机械应用奠定了基础<sup>[1]</sup>。石英晶体振荡器正是巧妙地利用了这一对效应:通过振荡电路将电能转化为机械能,使石英晶

体产生机械振动;然后再将机械能转化为电能,形成稳定的振荡信号。这一过程不仅实现了电能与机械能之间的高效转换,还为现代电子系统提供了高精度、高稳定性的频率源。

## 2 石英晶体振荡器的基本原理与组成

### 2.1 振荡器的工作原理

石英晶体振荡器主要由石英晶体谐振器、放大电路和反馈网络组成。当外部电源激励放大电路时,通过反馈网络将输出信号反馈至输入端,与石英晶体谐振器共同构成正反馈回路。当回路增益大于1且相位条件满足时,系统将产生自激振荡,输出稳定的频率信号。

石英晶体振荡器是一种基于石英晶体谐振器的电子振荡器,其核心工作原理是利用石英晶体的压电效应和逆压电效应。该振荡器主要由石英晶体谐振器、放大电路和反馈网络三大部分组成。当外部电源为放大电路提供激励时,电路开始工作并通过反馈网络将输出信号的一部分反馈至输入端。这样,输入信号与反馈信号共同作用于石英晶体谐振器,形成一个正反馈回路。在此回路中,若增益大于1且相位条件得到满足,即反馈信号的相位与输入信号的相位之差为360度的整数倍,那么系统将产生自激振荡。此时,振荡器便能输出一个稳定的频率信号。

### 2.2 石英晶体振荡器关键组成部分

#### 2.2.1 石英晶体谐振器

作为振荡器的核心元件,石英晶体谐振器的品质因子(Q值)对振荡器的性能有着至关重要的影响。Q值是衡量谐振器在谐振时能量存储与能量损耗之比的一个关键参数。石英晶体谐振器的高Q值意味着在谐振时,其存储的能量多而损耗的能量少,这有助于提高振荡器的频率稳定性和降低相位噪声,从而确保输出信号的纯净与稳定。

### 2.2.2 放大电路

放大电路在石英晶体振荡器中扮演着提供足够增益以维持振荡的重要角色。为了实现低噪声和高稳定性的振荡，放大电路通常采用低噪声、高稳定性的运算放大器（运放）来构建。运放的选择和设计对于确保振荡器的整体性能至关重要，因为它们直接影响到振荡器的噪声性能和稳定性。

### 2.2.3 反馈网络

反馈网络在石英晶体振荡器中起着调整振荡频率和相位条件的关键作用，以确保系统能够稳定振荡。通过精心设计反馈网络的阻抗和相位特性，可以实现对振荡频率的精确控制，并满足振荡所需的相位条件。此外，反馈网络还有助于提高振荡器的稳定性，降低其对外部干扰的敏感性，从而确保输出信号的准确性和可靠性。

## 3 低相位噪声优化策略

### 3.1 晶体谐振器的选择与优化

在石英晶体振荡器的设计中，为了降低相位噪声并优化整体性能，晶体谐振器的选择与优化是至关重要的步骤。首先，高品质因子Q值是选择晶体谐振器的关键。Q值作为衡量谐振器在谐振时能量存储与能量损耗之比的重要参数，其高低直接影响到振荡器的频率稳定性和相位噪声性能。因此，在选用石英晶体谐振器时，应优先考虑那些具有高品质因子的产品。这样的谐振器在谐振时能够存储更多的能量，同时损耗的能量也较少，从而有助于提高振荡器的整体性能。其次，为了减小温度变化对振荡频率的影响，需要采取温度补偿措施。在实际应用中，可以采用恒温槽或温度补偿电路来实现这一目标。恒温槽通过保持晶体谐振器处于一个恒定的温度环境中，来减小温度变化对其性能的影响。而温度补偿电路则通过实时监测环境温度，并动态调整振荡器的参数来补偿温度变化带来的影响。这两种方法都可以有效地提高振荡器的频率稳定性，并降低相位噪声<sup>[2]</sup>。除了以上两点，还需要注意晶体谐振器的切割角度和尺寸精度。不同的切割角度会影响到晶体的谐振频率和温度特性，因此需要根据具体的应用需求来选择合适的切割角度。同时，尺寸精度也是影响谐振器性能的重要因素。尺寸偏差会导致谐振频率的偏移和相位噪声的增加，因此在制造过程中需要严格控制尺寸精度。通过选用高品质的石英晶体谐振器、采取温度补偿措施以及注意切割角度和尺寸精度的控制，可以有效地优化石英晶体振荡器的相位噪声性能，并提高其整体稳定性。

### 3.2 电路设计优化

在石英晶体振荡器的设计中，电路设计优化是降低

相位噪声、提高振荡器性能的关键环节。以下是对此环节的详细技术探讨：低噪声设计是首要考虑的因素。为了实现这一目标，需要精心选择低噪声的元器件，如低噪声的运算放大器、高品质的电阻和电容等。这些元器件的噪声特性直接影响到振荡器的输出信号质量。同时，优化电路布局和布线也是至关重要的。合理的布局可以减少电磁干扰和信号串扰，而精细的布线则可以确保信号的传输质量，进一步降低噪声。除了低噪声设计，引入适当的负反馈机制也是抑制振荡器非线性效应、降低相位噪声的有效手段。负反馈可以通过监测振荡器的输出信号，并将其与参考信号进行比较，然后调整振荡器的参数以使其输出更加稳定。这种机制可以有效地抑制振荡器中的非线性效应，如振幅波动和频率漂移，从而降低相位噪声。在实现负反馈控制时，需要考虑反馈的强度和相位。反馈强度过大会导致振荡器不稳定，而过小则无法有效抑制非线性效应。因此，需要仔细调整反馈强度，以确保其在稳定振荡和降低噪声之间取得最佳平衡。同时，反馈的相位也非常重要。如果反馈信号的相位与振荡器的输出信号相位不匹配，那么反馈信号可能会加剧振荡器的不稳定性。因此，在设计负反馈机制时，需要确保反馈信号的相位与振荡器的输出信号相位相匹配。通过低噪声设计和引入适当的负反馈机制，可以有效地优化石英晶体振荡器的电路设计，降低相位噪声，并提高振荡器的整体性能。

### 3.3 封装与隔离技术

在石英晶体振荡器的设计中，封装与隔离技术对于保护晶体谐振器免受外界环境影响、减少电磁干扰具有至关重要的作用。精密封装旨在通过采用气密性良好的封装材料和技术，为晶体谐振器提供一个稳定、可靠的工作环境。具体而言，封装材料需具备优异的防潮、防尘、防腐蚀性能，以确保晶体谐振器在长期使用过程中不会受到湿度、尘埃等外界因素的侵蚀。同时，封装工艺需严格控制，确保封装体与晶体谐振器之间的密封性达到极高标准，防止气体、水分等渗透进入封装体内部，影响振荡器的性能。在实际应用中，常见的封装材料包括金属、陶瓷和塑料等。其中，金属封装以其优异的导电性、导热性和机械强度，成为高端石英晶体振荡器的首选。陶瓷封装则以其良好的气密性和耐高温性能，在特定应用场合下展现出独特的优势。而塑料封装则以其成本低廉、加工方便的特点，广泛应用于消费类电子产品中。电磁屏蔽设计是减少外部电磁场对振荡器性能干扰的关键措施。在振荡器的工作过程中，外部电磁场可能会通过辐射或传导的方式进入振荡器内部，干

扰晶体谐振器的正常工作,导致相位噪声增加、频率稳定性下降等问题<sup>[3]</sup>。为了加强电磁屏蔽效果,可以采用多种技术手段。首先,可以在振荡器的外部设置金属屏蔽罩,利用金属的导电性将外部电磁场引导至接地端,从而避免其对振荡器内部的干扰。其次,可以在电路布局和布线时采取合理的措施,如缩短信号线的长度、避免信号线之间的交叉干扰等,以减少电磁辐射和传导。此外,还可以采用特殊的屏蔽材料和技术,如吸波材料、多层屏蔽结构等,进一步提高振荡器的电磁屏蔽性能。

#### 4 应用前景与挑战

##### 4.1 应用前景

低相位噪声石英晶体振荡器凭借其高精度和稳定性,在多个领域展现出广泛的应用前景。特别是在通信、雷达、测控以及卫星导航等领域,其重要性尤为突出。在通信领域,随着5G技术的快速发展和物联网的兴起,对高精度、低噪声的频率源需求日益增加。低相位噪声石英晶体振荡器能够提供稳定的频率输出,确保通信系统的同步和准确性,从而提高通信质量和可靠性。在雷达和测控领域,低相位噪声石英晶体振荡器同样发挥着关键作用。雷达系统需要高精度的频率源来确保信号的准确发射和接收,而测控设备则需要稳定的频率源来提供准确的测量基准。低相位噪声石英晶体振荡器的应用,能够显著提高雷达和测控设备的性能。此外,在卫星导航领域,低相位噪声石英晶体振荡器也是不可或缺的关键组件。卫星导航系统需要高精度的时钟源来确保定位的准确性,而低相位噪声石英晶体振荡器正是提供这种高精度时钟源的理想选择。

##### 4.2 面临挑战

尽管低相位噪声石英晶体振荡器在多个领域具有广泛的应用前景,但其发展过程中仍面临一些挑战。首先,高频段发展瓶颈是一个显著的问题。石英晶体振荡器的工作原理基于石英晶体的压电效应,而石英晶体自身的物理特性限制了其在高频段的应用。随着通信技术的不断发展,对更高频率的振荡器需求日益增加,然而石英晶体振荡器在高频段的设计和实现面临诸多挑战。例如,高频振动可能导致晶体的机械强度下降,从而影

响振荡器的稳定性和寿命。此外,高频段振荡器的设计需要更精细的电路和更高的元器件精度,这进一步增加了技术实现的难度<sup>[4]</sup>。其次,成本与技术难度也是低相位噪声石英晶体振荡器发展面临的挑战之一。为了实现低相位噪声和高稳定性,需要采用高品质的石英晶体谐振器和低噪声元器件。然而,这些元器件的成本通常较高,且技术实现难度较大。高品质的石英晶体谐振器需要精确的切割和加工工艺,以确保其谐振频率的稳定性和准确性。同时,低噪声元器件的设计和制造也需要先进的工艺和技术支持。这些因素都增加了低相位噪声石英晶体振荡器的制造成本和技术难度。低相位噪声石英晶体振荡器在发展过程中面临高频段发展瓶颈和成本与技术难度等挑战。为了克服这些挑战,需要不断推动技术创新和工艺改进,以提高振荡器的性能和降低成本。同时,也需要关注市场需求和应用场景的变化,以开发出更适应实际应用需求的低相位噪声石英晶体振荡器。通过持续的研究和发展,有望在未来进一步拓展低相位噪声石英晶体振荡器的应用领域,并推动相关技术的进一步发展。

#### 结语

低相位噪声石英晶体振荡器是现代电子系统中不可或缺的关键元件。通过深入研究其物理特性、优化电路设计以及采用先进的封装与隔离技术,可以有效提升振荡器的性能。未来,随着相关技术的不断进步和应用领域的不断拓展,低相位噪声石英晶体振荡器将发挥更加重要的作用。

#### 参考文献

- [1]陶俊江.低相位噪声石英晶体振荡器关键技术研究[D].电子科技大学,2023.
- [2]夏春城.超低相位噪声晶体振荡器关键技术研发.四川省,成都世源频控技术股份有限公司,2022-08-18.
- [3]曾承伟.低噪声、高精度CMOS石英晶体振荡器设计[D].长沙理工大学,2017.
- [4]谢海情,曾承伟,曾健平等.一种低噪声交叉耦合结构集成石英晶体振荡器[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(02):117-121.