

# 基于双模自适应切换的快速启动晶体振荡器

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:** 随着物联网 (IoT) 技术的快速发展, 低功耗、快速启动的晶体振荡器 (Crystal Oscillator, CO) 在各类电子设备中扮演着至关重要的角色。然而, 传统晶体振荡器在启动过程中存在启动时间长、能耗高的问题, 限制了其在低功耗设备中的应用。为了解决这个问题, 本文提出了一种基于双模自适应切换的快速启动晶体振荡器设计。该设计通过优化启动过程, 显著降低了启动时间和能耗, 并提升了系统整体性能。本文详细分析了双模切换机制的工作原理, 包括粗调模式和精调模式的设计, 并通过理论推导与仿真验证, 展示了该设计在提升启动速度方面的显著优势。

**关键词:** 自适应切换; 快速启动; 晶体振荡器

## 引言

晶体振荡器作为电子设备中的关键时钟源, 其稳定性和启动速度直接影响系统性能。传统晶体振荡器在启动过程中, 由于晶体谐振器的起振时间较长, 导致系统功耗增加, 特别是在采用占空比工作模式的低功耗传感器节点中更为明显。此外, 长启动时间还可能导致系统响应延迟, 影响用户体验。因此, 研究快速启动晶体振荡器对于降低系统功耗、提升设备响应速度具有重要意义。

## 1 双模自适应切换机制设计

### 1.1 工作原理概述

本文提出的双模自适应切换快速启动晶体振荡器, 结合了粗调模式和精调模式, 通过智能判断与切换, 实现快速且稳定的启动过程。粗调模式利用大频偏注入技术, 迅速激活晶体谐振器, 缩短初始起振时间; 精调模式则通过精细调整注入信号的频率和相位, 确保振荡器输出稳定且高精度的时钟信号。这种双模切换机制能够根据实际需求, 在启动速度和稳定性之间取得最佳平衡。

### 1.2 粗调模式设计

#### 1.2.1 大频偏注入技术

粗调模式的核心策略是大频偏注入技术, 此技术旨在通过向晶体振荡器的两端注入高频信号, 充分利用晶体的压电效应, 从而迅速增大晶体内部运动支路的电流, 有效加速起振过程。为了最大化注入效率, 本文精心设计了一种基于恒定频率注入的自追踪能量注入电路。该电路的关键组件是一个高精度比较器, 它负责实时监测晶体两端的正弦波信号。比较器对信号进行细致分析, 精确提取振幅和相位信息, 这些信息是确定最佳注入条件的基石。在起振过程中, 注入能量的幅度和相位必须保持动态调整, 以确保晶体始终在最佳条件下振动。自追踪能量注入电路通过一种先进的闭环反馈机制

来实现这一调整。当比较器检测到振幅或相位的变化时, 它会立即调整注入信号的参数, 确保晶体始终在最优状态下振动。这种实时调整策略不仅显著提高了注入效率, 还有效缩短了起振时间。值得一提的是, 自追踪能量注入电路还具备出色的自适应能力。它能够根据不同的晶体特性和环境条件进行智能调整。例如, 当晶体因长期使用而老化或环境温度发生变化时, 电路会自动调整注入信号的频率和幅度, 以维持最佳的起振效果<sup>[1]</sup>。这种自适应能力确保了振荡器在各种条件下都能保持稳定的性能。为了实现恒定频率注入, 电路还采用了一个稳定的频率源, 确保注入信号的频率始终保持在预设值。同时, 电路中的幅度控制模块负责根据比较器的反馈信号调整注入信号的幅度, 以确保在起振过程中注入能量始终保持在最佳水平。大频偏注入技术结合自追踪能量注入电路, 在粗调模式中发挥了至关重要的作用。这一创新设计不仅提高了注入效率, 还为实现快速启动晶体振荡器奠定了坚实的基础。

#### 1.2.2 三级放大器负阻方案

为了进一步提升晶体振荡器的启动速度, 本文在粗调模式中创新性地引入了三级放大器增加负阻的方案。在传统结构中, 负阻的最大值往往受到一定限制, 这成为制约启动速度进一步提升的瓶颈。为了突破这一限制, 本文精心设计了三级放大器负阻方案。该方案的核心在于通过增加放大器的级数, 有效提升了晶体谐振器的起振速度。具体而言, 三级放大器依次串联, 每一级都承担着放大信号和增加负阻的重任。这种设计使得负阻的值能够显著提升, 从而为晶体谐振器提供更多的能量, 加速其起振过程。除了增加放大器级数外, 该方案还巧妙地采用了自适应负阻调整技术。这一技术能够根据晶体的实际起振情况动态地调整负阻值, 确保在不同

条件下都能实现快速启动。当晶体开始起振时,自适应负阻调整技术会实时监测其振动状态,并根据需要调整负阻值,以保持最佳的起振条件。为了实现自适应负阻调整,电路中特别设计了一个负阻控制模块<sup>[2]</sup>。该模块通过接收来自晶体的反馈信号,实时分析晶体的振动状态,并根据分析结果调整负阻值。这种闭环控制机制确保了负阻始终与晶体的实际需求相匹配,从而实现了快速且稳定的启动过程。此外,三级放大器负阻方案还考虑了温度稳定性和电源噪声的影响。电路中采用了温度补偿和电源噪声抑制技术,以确保在不同温度和电源条件下都能保持稳定的性能。这些技术的引入进一步提升了振荡器的可靠性和稳定性。

### 1.3 精调模式设计

#### 1.3.1 相位误差自动校正技术

精调模式的核心是相位误差自动校正技术,这一技术旨在对注入信号的频率和相位进行精细调整,以确保振荡器能够输出稳定且高精度的时钟信号。相位误差自动校正技术的实现依赖于实时监测振荡器输出信号的相位,并将其与一个高精度的参考信号进行比较。这一比较过程是通过一个高精度的相位比较器完成的,它能够精确地测量两个信号之间的相位差。当相位比较器检测到相位误差时,它会通过一个反馈机制自动调整注入信号参数,以实现相位锁定。这一反馈机制是基于一个闭环控制系统设计的,它能够根据相位误差的大小和方向,智能地调整注入信号的频率和相位,以消除误差。为了实现高精度的相位调整,电路中还特别设计了一个相位调整模块。该模块能够根据相位比较器的输出信号,精确地调整注入信号的相位,以确保振荡器的输出信号与参考信号保持同步。此外,相位误差自动校正技术还考虑了温度变化和电源噪声对振荡器性能的影响。为了减小这些因素的影响,电路中采用了温度补偿和电源噪声抑制技术。温度补偿技术能够根据环境温度的变化,自动调整振荡器的参数,以保持其性能的稳定性<sup>[3]</sup>。而电源噪声抑制技术则能够有效地滤除电源中的噪声成分,提高振荡器的抗干扰能力。三级放大器负阻方案通过增加放大器级数和采用自适应负阻调整技术,成功打破了传统结构中负阻的限制,有效提升了晶体谐振器的起振速度。这一创新设计不仅实现了快速启动,还确保了在不同条件下都能保持稳定的性能。

#### 1.3.2 单端能量注入技术

在精调模式中,本文首次创新性地应用了单端能量注入技术。相较于传统的双端注入技术,单端注入技术在较大频偏条件下仍能保持较高的注入效率,这一显著

优势使得它在精调模式中具有独特的应用价值。传统双端注入技术在频偏较大时,注入效率往往会大幅下降,导致启动时间延长且不稳定。而单端能量注入技术则通过优化注入信号的路径和方式,有效解决了这一问题。它能够在较宽的频率范围内保持高效的能量注入,使得振荡器在面临较大频偏时仍能迅速且稳定地启动。此外,单端能量注入技术还表现出对注入频率误差的极强适应性。传统技术中,注入频率的微小偏差都可能导致启动时间的显著波动。然而,单端注入技术通过其独特的设计,使得启动时间几乎不随注入频率误差的波动而变化,从而进一步提升了振荡器的稳定性和可靠性。除了性能上的优势,单端能量注入技术还简化了电路设计。传统双端注入技术需要复杂的电路来实现两端信号的同步和匹配,而单端注入则仅需对一端进行信号注入,大大减少了电路的复杂性和成本<sup>[4]</sup>。这一简化不仅降低了制造成本,还提高了电路的可维护性和可扩展性。单端能量注入技术在精调模式中的应用带来了显著的性能提升和电路设计简化。它能够在较大频偏条件下保持高效的能量注入,同时表现出对注入频率误差的强适应性,使得振荡器能够在更广泛的条件下实现快速且稳定的启动。

## 2 仿真实验与结果分析

### 2.1 仿真环境设置

为了全面而准确地验证所提出的双模自适应切换快速启动晶体振荡器的性能,本研究选择基于40nm CMOS工艺进行仿真实验。仿真环境的设置考虑到了多种实际使用条件,具体设置如下:工艺角选择为TT(Typical-Typical),即典型的NMOS和PMOS晶体管性能;温度范围设定为-40°C至90°C,涵盖了常见的环境温度变化;负载电容设置为6pF,以模拟实际应用中的负载情况。通过这些细致的仿真环境设置,能够更全面地评估振荡器在不同条件下的性能表现,确保验证结果的准确性和实用性。

### 2.2 实施方法与步骤

在仿真实验过程中,采取以下实施方法与步骤:(1)模型建立:使用专业的电路仿真软件(如Cadence、Synopsys等)建立双模自适应切换快速启动晶体振荡器的电路模型。确保模型中包含了所有关键组件,如晶体振动片、封装体、振荡电路、分频电路和选择电路等。(2)参数设置:根据40nm CMOS工艺的参数,设置电路模型中各元件的参数值。调整电路模型中的供电电压、负载电容等参数,以匹配实际应用场景。(3)仿真运行:在设定的仿真环境下(TT工艺角、-40°C至90°C温度范围、6pF负载电容),运行电路模型进

行仿真。观察并记录仿真过程中振荡器的启动时间、能耗以及输出频率的稳定性与精度。(4)数据分析:对仿真结果进行数据分析,计算振荡器的平均启动时间、启动能耗以及输出频率的绝对精度和稳定性。将仿真结果与传统晶体振荡器的性能进行对比,评估双模自适应切

换机制的优势。(5)优化与迭代:根据仿真结果,对电路模型进行优化,以进一步缩短启动时间、降低能耗或提高输出频率的稳定性与精度。重复上述仿真运行和数据分析步骤,直到达到满意的性能表现。

### 2.3 仿真结果分析

表1 双模自适应切换快速启动晶体振荡器仿真结果专业数据表

性能指标	仿真结果数据
启动时间(粗调模式)	平均值:数十微秒
启动时间(精调模式)	平均值:11.9 $\mu$ s,最大值:13.4 $\mu$ s(温度范围:-40 $^{\circ}$ C至90 $^{\circ}$ C)
启动能耗	11.3nJ
输出频率	24MHz
绝对精度	50ppm(百万分之五十)
稳定性(相位误差校正后)	显著提升,具体数值待进一步量化分析

#### 2.3.1 启动时间分析

仿真结果清晰地展示了双模自适应切换机制在缩短启动时间方面的显著效果。在粗调模式下,晶体振荡器的启动时间从传统的数百微秒大幅缩短至数十微秒,实现了启动速度的初步提升。进一步切换至精调模式后,通过相位误差的自动校正和创新的单端能量注入技术,启动时间最终稳定在11.9 $\mu$ s左右。即使在-40 $^{\circ}$ C至90 $^{\circ}$ C的宽广温度范围内,最高稳定时间也仅为13.4 $\mu$ s。这一卓越的启动时间表现充分证明了本文提出的双模自适应切换机制在加快系统响应速度方面的有效性。

#### 2.3.2 能耗分析

在能耗方面,仿真结果同样令人鼓舞。得益于高效的能量注入和负阻调整方案,振荡器的启动能耗显著降低至11.3nJ。与传统晶体振荡器相比,这一能耗水平显著降低,对于延长低功耗设备的使用时间具有重要意义。特别是在对能耗有严格要求的便携式电子设备中,这一优势将尤为突出。

#### 2.3.3 稳定性与精度分析

在精调模式下,振荡器的输出频率稳定在24MHz,且其绝对精度达到了百万分之五十的高水平。这一精度水平足以满足大多数电子设备的时钟需求,确保了振荡器在实际应用中的可靠性。此外,通过相位误差自动校正技术的应用,振荡器的输出稳定性得到了显著提升。这意味

着在长时间运行过程中,振荡器能够保持稳定的输出频率和相位,为电子设备提供准确可靠的时钟信号。

### 结语

本文提出了一种基于双模自适应切换的快速启动晶体振荡器设计,并通过理论推导与仿真验证展示了其在启动速度、能耗和稳定性方面的显著优势。该设计结合了粗调模式和精调模式,通过智能判断与切换实现了快速且稳定的启动过程。未来工作将进一步优化电路设计,提升系统的集成度和可靠性,并探索在更广泛领域的应用。例如,可以将该设计应用于低功耗传感器节点、可穿戴设备以及物联网等领域中,为这些设备提供更加稳定、高效的时钟源。

### 参考文献

- [1]葛惟唯.基于双模自适应切换的快速启动晶体振荡器[D].东南大学,2022.
- [2]王子轩,王山虎,王鑫,等.一种基于相位误差校正技术的快速启动晶体振荡器[J].电子学报,2024,52(04):1182-1188.
- [3]张壮,吴震宇.晶体振荡器温度漂移测试系统的软件设计与实现[J].自动化与仪表,2024,39(04):135-139+143.
- [4]蒋徐前,陈磊,张鸣,等.一种频率注入型的快速起振晶体振荡器[J].电子制作,2023,31(08):83-86.