

# 定时基准晶振系统在卫星通信系统的可靠性研究

王颂宇

河北远东通信系统工程有限公司 河北 石家庄 050081

**摘要:** 本文旨在深入探讨定时基准晶振系统在卫星通信系统中的可靠性及其重要性。通过分析晶振的工作原理、在卫星通信中的具体应用、以及其对系统性能的影响, 本文提出了一系列提升晶振系统可靠性的策略和方法。研究表明, 高精度的定时基准晶振系统是保障卫星通信系统稳定运行和高精度定位的关键。

**关键词:** 定时基准晶振系统; 卫星通信; 可靠性; 应用

## 引言

卫星通信系统作为现代通信技术的重要组成部分, 广泛应用于全球定位、数据传输、电视广播等多个领域。定时基准晶振系统作为卫星通信系统的核心部件, 其稳定性和可靠性直接影响到整个系统的性能。因此, 对定时基准晶振系统的可靠性研究具有重要意义。

## 1 晶振系统理论基础

### 1.1 晶振基本原理

晶振系统的核心部分是一块石英晶体, 其工作原理基于石英晶体的压电效应。压电效应是指某些晶体在受到机械应力时会产生电势差, 反之, 当施加电压时, 晶体也会发生形变。在晶振系统中, 正是利用这一特性实现频率的稳定输出<sup>[1]</sup>。具体来说, 当电压施加在石英晶体上时, 晶体会因电场作用而发生形变。当电压撤除后, 晶体又会恢复原状, 并在这个过程中释放电压, 形成谐振现象。这种谐振现象使得晶振能够在特定的频率下稳定工作, 为电子设备提供精确的时钟信号。

### 1.2 主要类型

晶振主要分为两类: 有源晶振 (Active Crystal Oscillator, ACO) 和无源晶振 (Passive Crystal Oscillator, PCO), 它们在结构、性能和应用上有所不同。有源晶振内置振荡电路, 这意味着它不需要外部元件就能直接输出稳定的频率信号。由于内置了振荡电路, 有源晶振的性能通常更优越, 能够提供更稳定、更准确的频率输出。然而, 这种便利性也带来了更高的成本, 使得有源晶振在价格上相对较高。无源晶振则需要与外部电路配合使用, 才能产生稳定的频率信号。虽然这种配置方式增加了使用的复杂性, 但无源晶振的成本通常较低, 因此在一些对成本有严格要求的场合中更为常见。不过, 需要注意的是, 由于无源晶振需要外部电路的支持, 其性能可能略逊于有源晶振。

## 2 晶振在卫星通信系统中的应用

### 2.1 稳定卫星通信频率

晶振作为卫星通信系统的核心元件, 其稳定、可靠的频率输出对保证卫星通信信号的稳定性和可靠性至关重要。晶振通过内部晶体振荡器产生具有极高频率稳定性和精度的振荡信号, 为系统提供高精度的定时基准。该信号经过频率合成器处理后, 可生成满足卫星通信系统需求的多种通信频率, 用于卫星与地面站之间的信号传输, 确保通信信号的准确接收和发送。晶振的高稳定性有效减少了通信过程中的频率漂移和相位噪声, 提高了通信质量。

### 2.2 实现信号同步与定位

晶振在卫星通信系统中不仅负责稳定通信频率, 还通过其精准的时间基准实现信号的同步与定位功能。晶振作为高精度的时间基准源, 为系统中的各个部件提供统一的时钟信号, 确保卫星发射的信号和地面站接收的信号在时间上保持精确同步, 从而保障通信的稳定性和可靠性。在GNSS (全球导航卫星系统) 中, 晶振的作用尤为关键。它为GNSS系统提供稳定的时钟信号, 使卫星能按精确的时间间隔发射信号。地面接收器通过接收并测量这些信号的传播时间, 即可计算出自己的精确位置。

### 2.3 提高数据传输效率

晶振在卫星通信系统中扮演着多重角色, 不仅负责稳定通信频率和实现信号同步与定位, 还通过其高精度和低失真特性, 显著减少数据传输过程中的误码率, 从而提高卫星通信数据的有效性和可靠性。晶振产生的振荡信号具有极高的频率稳定性和相位一致性, 能够确保数据信号在传输过程中保持稳定的时序和幅度, 有效降低信号失真的可能性, 进而减少误码率。此外, 晶振还通过信道分配和多路复用技术进一步提高系统的传输效率。作为高精度的时间基准源, 晶振为信道分配提供稳定的时钟信号, 确保各个信道之间的时间同步和频率一

致性，从而提升信道分配的准确性和效率<sup>[2]</sup>。在多路复用技术中，晶振同样发挥着关键作用，为多路复用器提供稳定的时钟信号，确保合并过程中的数据信号保持正确的时序和相位关系，使得接收端能够准确分离出各个数据信号，实现高效的数据传输。

### 3 晶振系统可靠性的影响因素

#### 3.1 外部环境因素

卫星通信系统通常工作在恶劣的环境中，如高真空、极端温度、强辐射等。这些因素会对晶振的性能产生显著影响，导致频率漂移、相位噪声增加和可靠性下降。具体而言，高真空环境可能导致晶振内部的材料发生物理和化学变化，影响其振荡特性；极端温度则会引起晶振内部元件的热膨胀和收缩，导致频率漂移；而强辐射环境则可能干扰晶振的电子电路，增加相位噪声。

#### 3.2 设备老化与磨损

长期使用后，晶振设备会因老化和磨损而出现性能下降。这包括晶体质量的变化、电路元件的老化等。晶体的老化可能导致其振荡频率的稳定性降低，而电路元件的老化则可能引入额外的噪声和失真，进而影响晶振的稳定性和精度。此外，长期的机械振动和冲击也可能导致晶振内部的机械结构发生微小变化，进一步影响其性能。

#### 3.3 系统设计因素

系统设计的合理性以及实现过程中的质量控制也是影响晶振系统可靠性的重要因素。不合理的电路设计可能导致晶振受到不必要的电磁干扰，降低其性能。例如，电源线的布局不当可能引入电源噪声，干扰晶振的正常工作。此外，不恰当的封装形式也可能对晶振的性能产生负面影响。例如，如果封装材料选择不当或封装工艺不合理，可能导致晶振受到外部环境的过度影响，降低其可靠性。因此，在系统设计和实现过程中，需要充分考虑晶振的特性和要求，确保其能够在恶劣的卫星通信环境中稳定、可靠地工作。

### 4 提升晶振系统可靠性的策略

#### 4.1 采用高精度晶振技术

##### 4.1.1 恒温晶振（OCXO）

恒温晶振通过精密的温度控制系统，将晶体谐振器保持在恒定的温度下工作。这一恒定温度通常设定在晶体的最佳工作温度点，以减少温度变化对晶体振荡频率的影响。恒温晶振包括加热电阻、温度传感器和温度控制电路等核心部件。加热电阻用于提供热量，温度传感器实时监测晶体谐振器的温度，并将温度信息反馈给温度控制电路。温度控制电路则根据温度传感器的反馈信

号，调整加热电阻的功率，以保持晶体谐振器在恒定的温度下工作。由于恒温晶振能够在恒定的温度下工作，其频率稳定性非常高，几乎不受外部环境温度变化的影响。这使得恒温晶振在需要极高频率稳定性的卫星通信系统中得到广泛应用。

##### 4.1.2 温补晶振（TCXO）

温补晶振通过内置的温度补偿电路来抵消温度变化对晶体振荡频率的影响。它利用热敏电阻等温度传感器感知环境温度的变化，并通过调整电路参数来补偿由此引起的频率漂移。温补晶振主要包括晶体谐振器、温度传感器、温度补偿电路等部件。温度传感器实时监测环境温度，并将温度信息传递给温度补偿电路。温度补偿电路则根据温度信息调整电路参数，以补偿温度变化对晶体振荡频率的影响。温补晶振能够在一定范围内对温度变化进行补偿，提高晶振的频率稳定性。虽然其频率稳定性略低于恒温晶振，但温补晶振具有体积小、功耗低等优点，在某些应用场景下更具优势。

##### 4.1.3 量子晶振

量子晶振利用量子力学原理来实现极高精度的频率输出。它可能基于原子或离子的能级跃迁等量子现象来产生稳定的振荡信号。量子晶振的核心部件可能包括原子钟或离子阱等量子系统。这些系统通过精确控制量子态的跃迁过程来产生稳定的振荡信号。量子晶振具有极高的频率稳定性和精度，能够满足对时间基准要求极高的应用场景。然而，由于其技术复杂性和成本较高，目前尚未在卫星通信系统中广泛应用。但随着量子技术的不断发展，量子晶振有望在未来成为提升卫星通信系统可靠性的重要手段。

### 4.2 强化封装与气密性测试

真空封装通过创造一个接近真空的工作环境，有效减少了晶振在谐振时受到的空气阻尼。空气阻尼是影响晶振稳定性和精度的重要因素之一，其减少有助于提高晶振的Q值（品质因数），进而提升晶振的频率稳定性和相位噪声性能。在真空环境中，晶振的动态电阻值也会相应降低。动态电阻值的大小直接关系到晶振的功耗和发热量，其降低有助于减少晶振的功耗，提高能效比，并延长晶振的使用寿命。真空封装还能有效隔绝外部环境对晶振的干扰，如湿度、温度变化等。这种隔绝作用使得晶振能够在更恶劣的工作环境中保持稳定的性能输出。封装工艺流程包括：一是基底加工：选择合适的基底材料（如陶瓷、金属等），并进行切割、抛光、清洗等加工处理，以确保基底表面平整、无杂质<sup>[3]</sup>。二是薄膜沉积：在基底上沉积一层或多层薄膜作为保护层，以

防止外部环境对晶振的干扰。常用的薄膜沉积技术包括物理气相沉积 (PVD)、化学气相沉积 (CVD) 等。三是真空腔室形成：通过键合技术将基底与薄膜连接在一起，形成真空腔室。键合过程需要精确控制温度、压力等参数，以确保腔室的密封性和稳定性。四是气密性测试：在封装完成后，对真空腔室进行气密性测试，以验证封装的密封性能。测试方法包括压力差法、氦质谱检漏法等，具体选择取决于测试需求和条件。

#### 4.3 优化焊接与频率微调

##### 4.3.1 优化焊接工艺

选用高精度、可编程的焊接设备，如自动焊接机或精密烙铁，确保焊接过程中的温度、时间等参数精确可控。根据晶振的材质、尺寸和焊接要求，合理设置焊接电流、电压、焊接时间等参数。例如，对于多引脚贴片晶振，焊接时间应控制在2秒左右，以防止过热损坏晶振内部电容。采用正交试验设计或响应面法等试验设计方法，通过少量试验找到最优的焊接参数组合。确保焊接环境清洁、干燥，避免灰尘、湿气等污染物对焊接质量的影响。使用助焊剂时，应选择无腐蚀性、易清洗的产品，并在焊接后及时清洗干净，以免绝缘电阻不符合要求。

##### 4.3.2 频率微调过程稳定性控制

采用高精度的频率测量设备，如网络分析仪或频率计，对晶振的频率进行精确测量。根据晶振的类型和性能要求，选择合适的频率微调方法。例如，对于石英晶振，可以采用真空蒸着法或离子束刻蚀法进行频率微调。在微调过程中，注意控制微调量的大小和方向，避免过度微调导致晶振性能下降。制定详细的微调操作规程，明确微调步骤、参数设置和注意事项。在微调过程中，保持环境稳定，避免温度、湿度等外界因素对微调结果的影响。对微调后的晶振进行全面的电气性能测试，包括频率稳定性、相位噪声等指标。确保成品晶振的频率符合目标值要求范围，并对测试结果进行记录和分析。

#### 4.4 引入驯服技术

在卫星通信和导航系统中，利用卫星信号（如GPS的1PPS信号）对本地晶振进行驯服，是提高晶振长期稳定性和精度的一种有效方法。一个典型的驯服系统通常包括以下几个主要组成部分：GPS接收机、数字锁相环

(PLL)、恒温晶振 (OCXO)、温度补偿电路<sup>[4]</sup>。驯服过程为：GPS接收机接收卫星信号并提取出高精度的1PPS秒脉冲信号。该信号作为驯服过程的基准信号，具有极高的稳定性和精度。数字锁相环中的鉴相器测量本地晶振输出信号与GPS 1PPS信号之间的相位误差。相位误差反映了晶振频率与基准信号频率之间的差异。环路滤波器根据鉴相器输出的相位误差信号生成控制电压信号，该信号用于调整晶振的控制参数（如谐振电路的电容或电感值），以减小相位误差。随着驯服过程的进行，相位误差逐渐减小，晶振频率逐渐逼近基准信号频率。通过持续的驯服过程，晶振的频率长期漂移得到有效校正。即使在GPS信号丢失或中断的情况下，由于晶振本身具有较高的短期稳定性以及驯服过程中积累的频率校正信息（如通过PLL内部的记忆功能或外部存储设备保存），晶振仍能保持较高的频率稳定性输出。

#### 结语

定时基准晶振系统在卫星通信系统中扮演着至关重要的角色。其稳定性和可靠性直接影响到整个系统的性能和定位精度。通过采用高精度晶振技术、优化系统设计与实现、引入驯服技术以及加强维护与监测等措施，可以显著提高晶振系统的可靠性，保障卫星通信系统的稳定运行和高精度定位服务。未来，随着技术的不断发展，晶振系统将在卫星通信系统中发挥更加重要的作用。

#### 参考文献

- [1]王习东,杨业泉,冯文杰,等.基于卫星授时和晶振驯服的高精度频率源系统设计[J/OL].电子设计工程,1-7[2024-07-20].
- [2]左朝阳,刘苏谚,谭哲,等.基于北斗信号的恒温晶振驯服系统的研究与实现[C]//中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心,北京市经济和信息化局,北京市顺义区人民政府.第十三届中国卫星导航年会论文集——S05时间频率与精密授时.西安电子科技大学;,2022:5.
- [3]李辉,吴华兵,赵当丽.晶振对飞行器时频同步系统的影响[J].时间频率学报,2021,44(03):163-171.
- [4]孙伟强,高阳,刘建春.晶振误差对长航时高精度惯性导航系统的影响分析[C]//中国惯性技术学会.惯性技术发展动态发展方向研讨会文集——惯性基导航、制导与控制技术发展新趋势.天津航海仪器研究所,2022:5.