

高性能石英晶振晶体的频率稳定性优化与温度补偿技术研究

任丽涛

河北远东通信系统工程有限公司 河北 石家庄 050000

摘要: 本文聚焦于高性能石英晶振晶体的频率稳定性优化与温度补偿技术展开深入研究。首先阐述了石英晶振晶体频率稳定性的重要性及其影响因素,接着详细分析了频率稳定性优化的多种方法,包括晶体切割角度优化、电极材料与结构改进等。同时,深入探讨了温度补偿技术的原理与实现方式,如模拟温度补偿和数字温度补偿技术。为高性能石英晶振的设计与应用提供了理论依据和技术支持。

关键词: 石英晶振晶体; 频率稳定性优化; 温度补偿技术

1 引言

石英晶振晶体凭借其高精度、高稳定性的频率特性,在通信、导航、电子测量、航空航天等众多关键领域发挥着不可替代的作用。其频率稳定性直接决定了整个电子系统的性能和可靠性。然而,在实际应用中,石英晶振晶体的频率会受到温度、老化、振动冲击、电源电压等多种因素的干扰,其中温度变化是导致频率漂移的最主要因素。随着电子技术朝着高精度、高稳定性方向迅猛发展,对石英晶振晶体的频率稳定性提出了更为严苛的要求。因此,开展高性能石英晶振晶体的频率稳定性优化与温度补偿技术研究具有重要的现实意义和广阔的应用前景。

2 石英晶振晶体频率稳定性的影响因素

2.1 温度因素

温度变化对石英晶振晶体频率的影响源于石英晶体的物理特性。石英晶体具有压电效应,其振动频率与晶体的尺寸、弹性模量等物理参数紧密相关。当温度发生变化时,晶体会发生热胀冷缩现象,导致尺寸改变,同时弹性模量也会随之变化。例如,对于常见的AT切石英晶体,其频率温度特性呈现出典型的三次曲线关系。在-55℃至+125℃的温度范围内,未经补偿的AT切晶体频率变化率可达 $\pm 30\text{ppm}$ 左右。具体而言,在低温区域,晶体尺寸收缩,弹性模量增大,频率会升高;而在高温区域,晶体尺寸膨胀,弹性模量减小,频率会降低。

2.2 老化因素

老化是石英晶振晶体在长期使用过程中频率逐渐发生变化的现象。老化主要由晶体内部应力的释放、电极材料的迁移以及晶体结构的微小变化等因素引起。在晶体制造过程中,由于加工工艺等原因,晶体内部会存在

一定的残余应力。随着时间的推移,这些应力会逐渐释放,导致晶体的弹性模量和尺寸发生变化,进而影响频率^[1]。电极材料的迁移也会改变电极与晶体之间的界面特性,影响晶体的振动模式和频率。一般来说,石英晶振晶体在最初的1000小时内老化速率较快,频率变化可达 $\pm 1\sim\pm 2\text{ppm}$,之后老化速率会逐渐减慢。

2.3 振动与冲击因素

外部的振动和冲击会改变石英晶振晶体的振动模式,从而影响其频率稳定性。当晶体受到振动或冲击时,其内部的应力分布会发生变化,导致振动频率发生漂移。特别是在一些对振动和冲击敏感的应用环境中,如航空航天领域的飞行器、汽车电子中的发动机控制系统等,振动和冲击对晶振频率稳定性的影响更为显著。实验表明,在强烈的振动环境下,晶体的频率变化可能达到 $\pm 5\text{ppm}$ 以上。

2.4 电源电压因素

电源电压的波动也会对石英晶振晶体的频率稳定性产生一定的影响。虽然这种影响相对较小,但在一些对频率精度要求极高的系统中,也需要考虑电源电压的稳定性。电源电压的变化会改变晶振电路中的电流和电压分布,从而影响晶体的激励电平和振动状态,导致频率发生微小的变化。一般来说,电源电压每变化1%,晶体的频率变化约为 $\pm 0.1\sim\pm 0.2\text{ppm}$ 。

3 频率稳定性优化方法

3.1 晶体切割角度优化

石英晶体的切割角度对其频率温度特性有着至关重要的影响。不同的切割角度会使晶体具有不同的频率温度系数。通过精确优化晶体的切割角度,可以使晶体在特定温度范围内的频率温度特性得到显著改善,从而提

高频率稳定性。AT切晶体是目前应用最为广泛的切割方式之一，它具有较好的频率温度特性。在 -20°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内，AT切晶体的频率变化率相对较小，通常在 $\pm 5\text{ppm}$ 以内。然而，为了进一步提高频率稳定性，研究人员对切割角度进行了更精细的优化。例如，通过对AT切晶体进行微调切割，将切割角度精确控制在一定范围内，可以使晶体在 -10°C 至 $+60^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内频率变化率降低到 $\pm 2\text{ppm}$ 以下。除了AT切，还有一些其他切割方式，如BT切、SC切等。BT切晶体在低温环境下具有较好的频率稳定性，但在高温环境下频率变化较大；SC切晶体则具有更宽的温度稳定范围，在 -55°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内频率变化率可控制在 $\pm 10\text{ppm}$ 左右。通过根据具体的应用需求选择合适的切割角度或进行多切割角度晶体的组合，可以实现对不同温度范围内的频率稳定性优化。

3.2 电极材料与结构改进

电极材料和结构对石英晶振晶体的频率稳定性也有着不可忽视的影响。选择合适的电极材料可以降低电极与晶体之间的界面效应，减少频率的漂移。常用的电极材料有金、银、铝等。金电极具有良好的导电性和化学稳定性，能够减少电极与晶体之间的化学反应，降低界面电阻，从而提高频率稳定性。实验表明，采用金电极的石英晶振晶体，在相同的环境条件下，频率稳定性比采用铝电极的晶体提高了约20%。然而，金电极的成本较高。银电极的导电性也较好，但容易氧化，会影响频率稳定性。铝电极成本低，但与晶体的附着力相对较差，且在高温下容易发生迁移^[2]。为了改善电极的性能，研究人员还对电极的结构进行了优化。例如，采用薄电极结构可以降低电极的质量负载效应，提高晶体的振动频率稳定性。通过将电极厚度从传统的100nm降低到50nm，晶体的频率稳定性提高了约15%。此外，改变电极的形状，如采用圆形、椭圆形等特殊形状的电极，也可以优化晶体的电场分布，减少频率的漂移。

3.3 封装技术优化

封装是石英晶振晶体制造过程中的关键环节，封装的质量直接影响到晶体的频率稳定性。优化封装技术可以减少外界环境对晶体的影响，提高晶体的密封性和机械强度。气密性封装是一种常用的优化封装技术。通过采用金属-玻璃封装或陶瓷封装等方式，将晶体密封在一个密闭的空间内，防止水分、灰尘等杂质进入晶体内部。实验表明，采用气密性封装的石英晶振晶体，在潮湿环境下工作1000小时后，频率变化率仅为 $\pm 0.5\text{ppm}$ ，而未采用气密性封装的晶体频率变化率达到了 $\pm 3\text{ppm}$ 。同时，合理的封装结构设计也可以减小封装应力对晶体

的影响。例如，采用弹性支撑结构将晶体固定在封装体内，可以缓冲外界振动和冲击对晶体的作用，减少频率的漂移。通过优化封装体的尺寸和形状，使其与晶体的振动模式相匹配，也可以降低封装应力对频率稳定性的影响。

3.4 制造工艺改进

提高石英晶振晶体的制造工艺水平是优化频率稳定性的重要途径。在晶体的加工过程中，严格控制加工精度，减少晶体表面的缺陷和损伤，可以降低晶体的内部应力，提高频率稳定性。采用高精度的切割和研磨工艺，可以将晶体的尺寸精度控制在 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 以内，表面粗糙度控制在 $\text{Ra}0.05\mu\text{m}$ 以下。这样可以减少晶体表面的微观不平整对振动模式的影响，提高频率的一致性和稳定性。此外，先进的清洗和镀膜工艺也是保证晶体性能的关键。采用等离子清洗技术可以有效去除晶体表面的杂质和污染物，提高电极与晶体之间的附着力。采用真空镀膜技术可以保证电极的均匀性和厚度精度，进一步提高晶体的频率稳定性。

4 温度补偿技术

4.1 模拟温度补偿技术

模拟温度补偿技术是通过在石英晶振电路中引入温度敏感元件，如热敏电阻、热电偶等，来检测环境温度的变化，并根据温度变化调整电路中的参数，从而实现对晶体频率的补偿。

4.1.1 热敏电阻补偿

热敏电阻的阻值随温度的变化而变化，通过将热敏电阻接入晶振电路中，可以改变电路的等效电阻或电容，进而调整晶体的振荡频率。例如，在串联谐振电路中，将热敏电阻与晶体串联。当温度升高时，热敏电阻的阻值减小，电路的等效电阻减小，从而使晶体的振荡频率升高，补偿因温度升高引起的频率下降。在实际应用中，热敏电阻的补偿效果受到其温度特性和电路参数的影响^[3]。为了获得较好的补偿效果，需要精确选择热敏电阻的类型和参数，并进行合理的电路设计。例如，采用负温度系数（NTC）热敏电阻，其阻值随温度升高而减小。通过实验优化热敏电阻的阻值和电路中的其他元件参数，可以使晶体在 -20°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内频率变化率从补偿前的 $\pm 8\text{ppm}$ 降低到 $\pm 5\text{ppm}$ 左右。

4.1.2 热电偶补偿

热电偶是利用两种不同金属的热电效应来测量温度的元件。将热电偶产生的热电势引入晶振电路中，通过放大和转换电路将其转换为相应的控制信号，调整电路中的参数，实现对晶体频率的补偿。热电偶补偿具有测

量精度高、响应速度快等优点,但电路设计相对复杂。在实际应用中,需要根据热电偶的特性设计合适的放大和转换电路。通过实验验证,采用热电偶补偿技术可以使晶体在-10℃至+50℃的温度范围内频率变化率降低到 $\pm 4\text{ppm}$ 左右。然而,热电偶的成本相对较高,且对安装和使用环境有一定的要求。模拟温度补偿技术具有结构简单、成本低等优点,但补偿精度相对较低,且补偿范围有限。其补偿效果受到温度敏感元件的精度、线性度以及电路参数的稳定性等因素的影响。

4.2 数字温度补偿技术

数字温度补偿技术是利用数字信号处理技术对石英晶振晶体的频率进行补偿。该技术通常包括温度传感器、模数转换器(ADC)、微处理器和数模转换器(DAC)等部分。

4.2.1 工作原理

温度传感器实时检测环境温度,并将温度信号转换为模拟电信号。模数转换器将模拟电信号转换为数字信号,微处理器根据预先存储的温度-频率补偿数据,计算出相应的补偿量,并通过数模转换器将补偿量转换为模拟控制信号,调整晶振电路中的参数,实现对晶体频率的精确补偿。例如,采用高精度的数字温度传感器,其测量精度可达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。模数转换器的分辨率一般为12-16位,能够将温度信号精确转换为数字信号。微处理器中存储的温度-频率补偿数据是通过大量的实验测量得到的,涵盖了不同温度下晶体的频率变化情况。

4.2.2 补偿算法

数字温度补偿技术的关键在于补偿算法的设计。常用的补偿算法有查表法、多项式拟合法等。查表法是将不同温度下对应的频率补偿量存储在微处理器的存储器中,根据实时检测到的温度值,通过查表的方式获取相应的补偿量。例如,将温度范围划分为 1°C 的间隔,在每个温度点上测量晶体的频率变化量,并将其存储在存储器中。当检测到温度为 25°C 时,微处理器直接从存储器中读取 25°C 对应的补偿量,通过DAC转换为模拟信号对晶振电路进行调整。查表法的优点是实现简单,补偿速度快,但需要占用较大的存储空间^[4]。多项式拟

合法则是根据晶体的频率温度特性曲线,用多项式函数来拟合频率与温度之间的关系。例如,采用三次多项式 $f(T)=a_0+a_1T+a_2T^2+a_3T^3$ 来拟合频率与温度的关系,其中 $f(T)$ 为频率, T 为温度, a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为多项式系数。通过实验测量不同温度下的频率值,利用最小二乘法拟合出多项式系数。在实时补偿过程中,微处理器根据检测到的温度值计算多项式的值,得到补偿量。多项式拟合法的优点是存储空间占用小,但计算量相对较大,补偿精度取决于多项式的阶数和拟合精度。数字温度补偿技术具有补偿精度高、补偿范围广、可编程性强等优点。通过实验验证,采用数字温度补偿技术可以使晶体在-20℃至+70℃的温度范围内频率变化率降低到 $\pm 1\text{ppm}$ 以下,甚至可以达到 $\pm 0.5\text{ppm}$ 左右。然而,数字温度补偿技术的成本相对较高,电路设计也较为复杂,需要微处理器、ADC、DAC等多个元件的协同工作。

结语

本文深入研究了高性能石英晶振晶体的频率稳定性优化与温度补偿技术,通过优化晶体切割角度、改进电极材料与结构、封装技术和制造工艺等手段,有效提升了频率稳定性。数字温度补偿技术相较于模拟技术,提供了更高的补偿精度和更广的补偿范围。未来的研究方向包括探索新型晶体材料与结构以进一步改善频率温度特性和稳定性;开发结合人工智能和机器学习的智能温度补偿技术,实现自动优化补偿参数;以及研究集成化与微型化的温度补偿电路和晶体封装技术,以适应电子设备小型化趋势,支持高性能石英晶振的设计与应用发展。

参考文献

- [1]任津莹.基于主动补偿法改善压控晶振频率温度特性的研究[D].长安大学,2022.
- [2]侯月婷.基于最小二乘法的交变温度下晶振频率漂移预测算法[D].河北工业大学,2022.
- [3]贾丽娜,彭慧丽,于德江,等.高稳晶振短期频率稳定度的仿真分析[J].宇航计测技术,2021,41(03):27-33.
- [4]何力睿,章巍,熊嘉明,等.保持模式下恒温晶振频率补偿方法[J].导航定位与授时,2019,6(01):87-91.