

随机振动中晶体振荡器的有源降噪设计*

邓联文¹, 尹芊奕¹, 胡照文¹, 李 璨¹, 胡俊琪¹, 单庆晓²

(1. 中南大学 物理与电子学院, 湖南 长沙 410083;

2. 长沙学院 电子与通信工程系, 湖南 长沙 410022)

摘要:针对晶体振荡器在振动下会发生输出频率漂移的问题,在分析声学有源降噪技术和加速度对晶体振荡器输出相位噪声的影响机理基础上,提出降低随机振动中晶体振荡器噪声的方法。在晶体振荡器外围电路中嵌入加速度传感器、模数转换器、数模转换器和数字处理器,构建对晶体振荡器相位噪声进行实时补偿的有源降噪系统。结果表明:设计的有源降噪系统在0.03g/Hz振动幅度、10~850 Hz频率范围的随机振动条件下,能达到20 dB的相位噪声补偿效果。

关键词:有源降噪;晶体振荡器;相位噪声补偿

中图分类号:TN752.2 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2018)01-074-04

Design of active noise control method for crystal oscillator under random vibration

DENG Lianwen¹, YIN Qianyi¹, HU Zhaowen¹, LI Can¹, HU Junqi¹, SHAN Qingxiao²

(1. School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Department of Electronic and Communication Engineering, Changsha University, Changsha 410022, China)

Abstract: Crystal oscillator output frequency often drifts under vibration. Therefore, based on the analysis of the acoustic active noise control technology and the mechanism of acceleration effect on crystal oscillator phase noise, a method of reducing crystal oscillator phase noise under vibration was proposed. The simulation about the acoustic active noise control system obtained that the theory of acoustic noise reduction can be used in crystal oscillator phase noise reduction. By adding acceleration sensor, analog-to-digital converter, digital-to-analog converter and digital processor in the peripheral circuit of crystal oscillator, the phase noise real time compensation active noise control system was constructed. The results show that the active noise control system achieves 20 dB phase noise compensation under the random vibration of 0.03g/Hz amplitude range and 10~850 Hz frequency range.

Key words: active noise control; crystal oscillator; phase noise compensation

石英晶体振荡器作为最常用的基准频率源,在加速度作用的随机振动影响下,输出信号可能出现频偏,频谱中的相位噪声也可能恶化^[1]。传统降低晶体振荡器加速度敏感性的方法是采用机械缓冲措施,该类方法能有效减小850 Hz以上高频振动的幅度,但可能导致低频振动幅度的增大;文献[2]提出采用一种双谐振器电路来解决这一问题,但会使整体成本明显提高;文献[3]使用反馈电路对晶振频率进行实时补偿并获得良好的补偿效果,但只能在100 Hz内实现补偿。在工业生产领域采用有源降噪技术能大幅度降低大型机械工作时的高分贝低频噪声,在建筑领域采用有源降噪技术可以有效抑制建筑物内部或外部噪声,降噪幅度可达5~15 dB^[4]。

1 声学有源降噪原理分析

有源降噪方法主要是基于声场空间和时间相干性,根据声场的线性叠加原理,两列频率相同、同向传播的声波会在空间产生抵消或者相加的干涉现象,根据两列声波的相位和幅值,干涉结果会导致能量增加或减少。假设初级声源为 $P_p = A\cos(\omega - \varphi)$,人为地加上满足相干条件的次级声源 $P_s = \beta A\cos(\omega - \varphi + a)$,则叠加后总的声场平均能量密度为:

$$E_{ps} = \frac{(P_p + P_s)^2}{2\rho_c^2} = \frac{A^2}{4\rho_c^2}(1 + 2\beta\cos a + \beta^2) \quad (1)$$

在空间次级声源作用前后的声级差为:

$$\Delta L_p = 10\lg(1 + 2\beta\cos a + \beta^2) \quad (2)$$

* 收稿日期:2016-11-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61136005,11373075);湖南省科技计划资助项目(2015JC3041)

作者简介:邓联文(1969—),男,湖南洞口人,教授,博士,博士生导师,E-mail:denglw@csu.edu.cn

从式(2)可以看出,当 β 越接近1时, a 越接近 π , $|\Delta L_p|$ 的值越大。在实际中,次级声源的幅度和相位要与初级声源完全一样是难以达到的。如采用反馈式自适应系统,能更有效地使次级声源幅值接近于1,相位接近于 π 。图1为反馈式自适应有源降噪系统示意图^[4]。 $d(n)$ 、 $y(n)$ 、 $e(n)$ 分别为初级声源信号、次级声源信号(反噪声信号)、误差噪声信号, $e(n)$ 同时向系统外和 T2F 输出,T2F 表示时域到频域的变换,F2T 表示频域到时域的变换, W_k 为控制滤波器系数,UPDATE 表示控制滤波器系数更新算法,该算法一般采用 FxLMS 以加强系统的稳定性和鲁棒性^[5]。待系统稳定后, $e(n)$ 达到最小值。

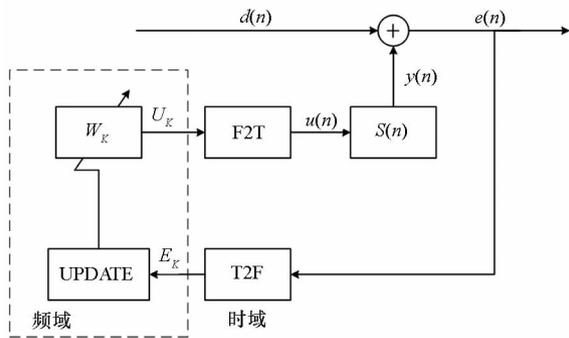


图 1 反馈式自适应有源降噪系统

Fig. 1 Feedback adaptive active noise control system

2 晶体振荡器有源降噪系统

2.1 设计原理

由于随机振动可以分解成多个正弦振动的矢量叠加,因此晶振加速度敏感性矢量可由该方向单个正弦振动计算得出。考虑一个轴的情况,当晶振受到加速度大小为 a ,频率为 f_v 的正弦振动作用时,由于石英晶体的正压电效应,输出频率会发生漂移,如果用 $f(a)$ 表示此时晶振的输出频率,则有:

$$f(a) = f_0 + \Delta f_a = f_0 + \Gamma \cdot a \cdot f_0 \quad (3)$$

$$L_v = \left[\frac{\Gamma \cdot a \cdot f_0}{2f_v} \right]^2 \quad (4)$$

其中 f_0 为载波频率, Δf_a 为频偏量, Γ 为晶体的加速度敏感度矢量, L_v 为载波偏离 f_v 的相位噪声^[3,6]。

对压控晶振的晶振压控端(Voltage control of Crystal Oscillator, VCO)施加电压可对谐振频率进行控制和牵引,由控制电压 V_c 的牵引作用产生的频率改变量为:

$$\Delta f_v = \frac{V_c}{V_{cc}} \cdot k_v \cdot f_0 \quad (5)$$

式中, V_{cc} 是控制电压的最大范围, k_v 表征的是晶

振的压控灵敏度。

在加速度 a 和控制电压 V_c 的共同作用下,压控晶振的最终输出频率为:

$$f_{out} = f_0 + \Delta f = f_0 + (\Delta f_v + \Delta f_a) \quad (6)$$

由于电场和声场一样具有相干性,向晶振压控端 VCO 施加实时变化 V_c 可补偿加速度带来的晶振频偏,基于这一原理可使用有源降噪技术对随机振动中晶振的相位噪声进行补偿。但区别于图1的有源降噪系统,随机振动中晶振输出的频偏是和晶振标频一同调制输出的,可使用自相关提取误差信号。需要对图1所示的系统 and 文献[3]中的基本电路进行综合并改进,改进后的系统如图2所示。

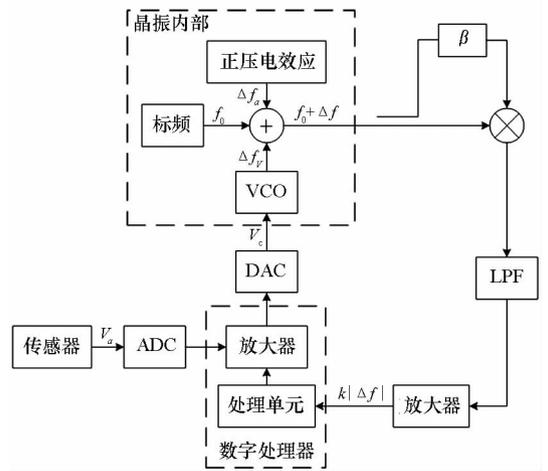


图 2 随机振动下晶振有源降噪系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of active noise control system under random vibration

图2中通过加速度传感器检测当前晶振环境的加速度,并通过模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)将数据输入到数字处理器进行算法处理,再通过数模转换器(Digital-to-Analog Converter, DAC)将处理后的数据送到晶振压控端 VCO,产生与加速度引起的频偏相反的反向频偏量 Δf_v ,加速度频偏量 Δf_a 和反向频偏量 Δf_v 相加得到误差频偏 Δf 。由于晶振输出 f_{out} 为 Δf 和标频 f_0 的调制输出,需要经过自相关滤波后,从晶振输出中提取 $k|\Delta f|$ 。数字处理器检测 $k|\Delta f|$ 并实时修正 V_c 。待整个系统稳定后, $k|\Delta f|$ 达到最小值,实现晶振频率 f_{out} 稳定输出。由于采用实时修正 V_c 的技术,本系统的频率补偿范围可以高达上千赫兹。

2.2 仿真验证

在反馈型有源降噪系统中,系统延迟在晶振系统中主要是由系统中各部分的数据处理时间、传感器检测带宽和晶振压控带宽三部分导致^[7-8]。由

于 DAC 输出是一种阶梯状电压, DAC 的精度决定 V_c 阶梯电压与所需补偿电压的相似度^[9]。

使用图 2 所示的降噪系统, 设随机振动频谱如图 3 所示, ADC 与 DAC 均为十二位, 系统延时为 $50 \mu\text{s}$ 。仿真结果如图 4 所示, 图 4 (a) 和图 4 (b) 分别为时域的初始噪声和补偿后噪声。

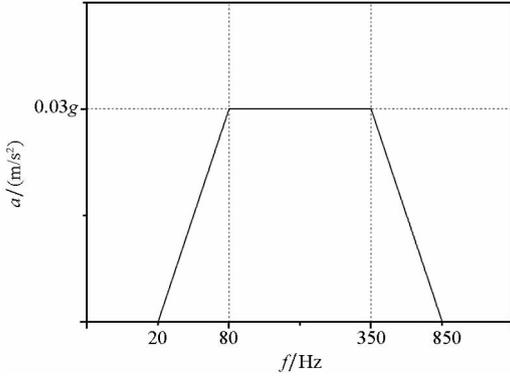
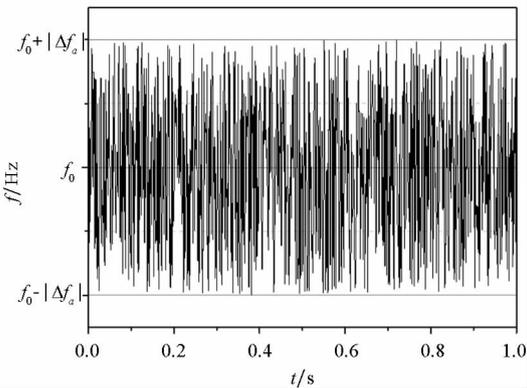
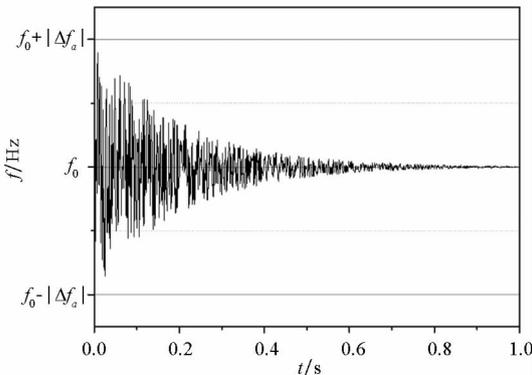


图 3 随机振动频谱
Fig. 3 Random vibration spectrum



(a) 随机振动下晶振输出频率

(a) Output frequency of crystal oscillator under random vibration



(b) 使用降噪系统后的晶振输出频率

(b) Output frequency of crystal oscillator under random vibration

图 4 有源降噪系统应用前后的晶振输出
Fig. 4 Crystal oscillator output before and after using active noise control system

由图 4 (b) 可知, 降噪系统作用约 0.8 s 的时间后就能达到稳定降噪的效果, 该时间主要取决于 FxLMS 达到稳定状态所需的运算时间。由于 DAC 输出是一种阶梯状电压, 因此补偿频偏 Δf_v 也是阶梯状。图 5 为含有源降噪系统的晶振的各输出量的时域对比, 系统稳定后, 加速度带来的频偏 Δf_a 与阶梯补偿频偏 Δf_v 幅值相同、相位相反, 但是存在一定的相位延迟。

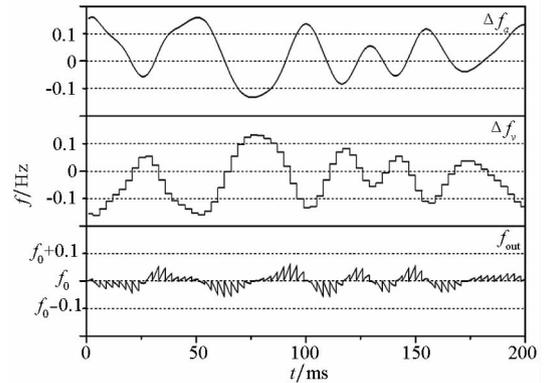


图 5 正压电效应引起的频偏 Δf_a 、 V_c 控制的反向频偏 Δf_v 和晶振输出频率 f_{out} 的时域波形对比
Fig. 5 Comparison of the time domain waveform of piezoelectric effect frequency offset Δf_a , V_c controlled reverse frequency offset Δf_v and crystal oscillator output frequency f_{out}

图 6 为有源降噪系统相位噪声补偿效果对比。可以明显看出, 振动对晶振的相位噪声造成 $15 \sim 20 \text{ dB}$ 的恶化影响, 经有源降噪系统补偿后, 相位噪声基本恢复至静态水平。

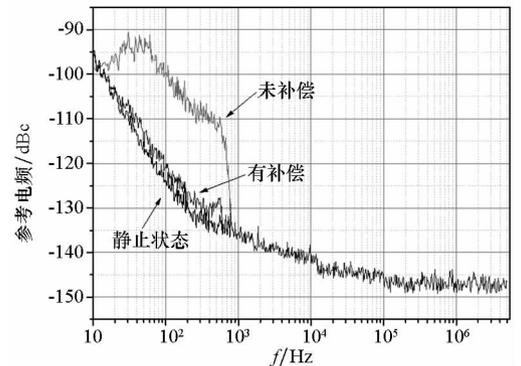


图 6 仿真相位噪声补偿效果对比

Fig. 6 Comparison of phase noise compensation by simulation

2.3 实验分析

搭建的晶振有源降噪实验测试系统如图 7 所示。晶振有源降噪系统参数如下: 晶振标称频率为 10 MHz , 加速度敏感 x 系数为 $6.75 \times 10^{-7} \text{ Hz/g}$, 压控系数为 1×10^{-5} ; 加速度传感器检测带宽为

22 kHz, ADC 与 DAC 均为十二位。实验系统主要构成:采用 81150A 函数发生器对小型振动台进行控制,振动频谱如图 3 所示;采用 E5052A 进行相位噪声测量。实验外界条件为:室温 20℃,标准大气压。

系统的补偿相位噪声效果如图 8 所示。可见使用有源降噪系统后,输出相位噪声得到显著改善。由于晶振在振动过程中存在不同程度的缓冲,高频振动幅度相比于仿真中要小,而且实际有源降噪系统的延迟要大于仿真所设延迟,因此补偿效果不如仿真所示。在 45 Hz 处达到了最高约 20 dB 的补偿,基本实现有源降噪系统的降噪功能。

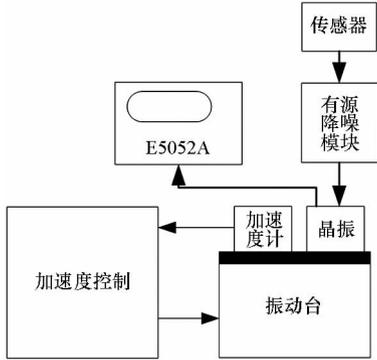


图7 实验测试系统

Fig. 7 Experimental test system

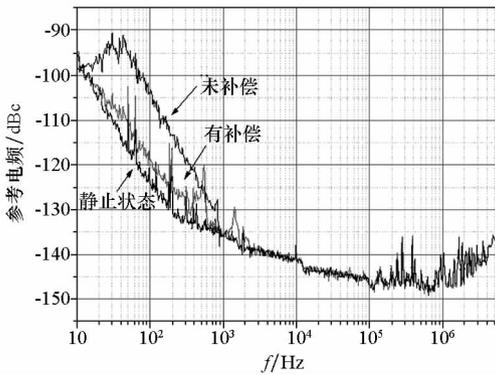


图8 实验相位噪声补偿效果对比

Fig. 8 Comparison of phase noise compensation in the experiment

3 结论

仿真分析结果证明基于声学降噪原理的有源降噪技术,可以应用于随机振动中晶体振荡器的

降噪设计,解决因加速度效应引起的晶振振荡器相位噪声恶化问题;通过在晶体振荡器外围电路中嵌入加速度传感器、模数转换器、数模转换器和数字处理器等模块,能构建对晶体振荡器相位噪声进行实时补偿的有源降噪系统;在 0.03g/Hz 随机振动条件下能实现对晶体振荡器相位噪声高达 20 dB 的补偿效果。

参考文献 (References)

- [1] Filler R L. The acceleration sensitivity of quartz crystal oscillators; a review [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1988, 35 (3): 297 - 305.
- [2] Fry S J, Burnett G A. Reducing the acceleration sensitivity of AT-strip quartz crystal oscillators [C]//Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium, 2010: 25 - 30.
- [3] 陈亮朋, 单庆晓. 振动对 BiSAR 频率基准源影响及其补偿技术研究 [J]. 压电与声光, 2013, 35 (6): 858 - 861. CHEN Liangpeng, SHAN Qingxiao. Study on the impact compensation technology of crystal oscillator on BiSAR [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35 (6): 858 - 861. (in Chinese)
- [4] Wisler A, Panahi I. Design of a three-channel feedback ANC system to cancel HVAC noise in a 3-dimensional enclosure [C]//Proceedings of the 41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2012: 3179 - 3190.
- [5] 赵洪亮, 李晓东, 田静. 单频反馈 ANC 系统的一种新算法 [J]. 声学技术, 2003, 22 (z2): 328 - 330. ZHAO Hongliang, LI Xiaodong, TIAN Jing. A new algorithm for tonal feedback ANC system [J]. Technical Acoustics, 2003, 22 (z2): 328 - 330. (in Chinese)
- [6] 刘中艳, 单庆晓, 耿云玲. 基于 81150A 的晶体振荡器振动测试平台设计 [J]. 测试技术学报, 2014, 28 (5): 396 - 399. LIU Zhongyan, SHAN Qingxiao, GENG Yunling. Design of crystal oscillator vibration test platform based on 81150A [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2014, 28 (5): 396 - 399. (in Chinese)
- [7] Ji L Z, Shan Q X, Tang Q. A quantitative testing method of quartz resonators' acceleration sensitivity based on a MEMS sensor [C]//Proceedings of China Satellite Navigation Conference, 2012, 160: 571 - 581.
- [8] Ji L Z, Shan Q X, Yang J. Experimental research on the acceleration sensitivity of quartz crystal oscillators [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 241/242/243/244: 869 - 875.
- [9] Shan Q X, Yang J, Chen J Y. Real-time digital compensation to reduce acceleration's sensitivity in quartz resonator [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83 (6): 064706.