

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2010.03.020

原子干涉仪中的超低频隔振系统的设计及仿真

王文超^{1,2,3}, 汤彪^{1,2,3}, 周林^{1,2,3}, 王谨^{1,2}, 詹明生^{1,2}

(1 中国科学院武汉物理与数学研究所波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071 ;

2 中国科学院冷原子物理中心, 湖北 武汉 430071 ;

3 中国科学院研究生院, 北京 100080)

摘要: 针对原子干涉仪中拉曼光反射镜对振动隔离的特殊要求, 设计了一套低频隔振系统, 采用两级被动隔振和一级主动隔振的方案, 同时对系统的机械结构和主动隔振反馈环路分别进行了详细的设计, 最后用 Matlab 的 Simulink 模块进行了仿真, 通过仿真结果显示该系统对 0.1 ~ 10 Hz 的振动隔离度可以达到 99% 以上, 表明该系统可以达到预期的隔振效果。

关键词: 激光技术; 隔振; 仿真; 原子干涉仪

中图分类号: TN24; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5461(2010)03-0367-06

Design and Matlab simulation of an ultra-low frequency vibration-isolating system for atom interferometers

WANG Wen-chao^{1,2,3}, TANG Biao^{1,2,3}, ZHOU Lin^{1,2,3},
WANG Jin^{1,2}, ZHAN Ming-sheng^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China ;

2 Center for Cold Atom Physics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

3 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A low frequency vibration-isolating system was designed in order to meet the special requirement of vibration isolation of Raman laser reflector in atom interferometers. The system uses both two-step passive and one-step active isolations. Analysis of the mechanical structure and the feedback loop was carried out in detail. The performance of the system using Matlab Simulink software was assessed, and the result shows that it has an isolation ratio up to more than 99% for 0.1 ~ 10 Hz frequency range.

Key words: laser techniques; vibration isolation; simulation; atom interferometers

1 引言

在原子干涉仪以及相关的精密测量实验中, 随机振动是影响精度的一个不可忽略的因素, 因此原子干涉仪对振动的隔离提出了较高的要求。在 1 m 高竖直喷泉原子干涉仪^[1,2]测量过程中, 原子上抛过程为

基金项目: 国家自然科学基金 (10774160, 10827404) 和国家基础研究发展规划 (2005CB724505/1) 资助课题

作者简介: 王文超 (1983 -), 江苏人, 硕士, 主要从事原子干涉仪振动控制方面的研究。E-mail: wangwen413@126.com

导师简介: 詹明生 (1961 -), 湖北人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事冷原子物理及冷原子在原子频标, 原子干涉, 原子精密测量, 量子信息等领域的研究。E-mail: mszhan@wipm.ac.cn

收稿日期: 2009-04-22; **修改日期:** 2009-06-22

100 ms 左右,在这段时间内需要对原子团施加拉曼光脉冲、对原子的内态和动能进行控制以实现原子干涉环路,而置于原子干涉仪顶部的拉曼光反射镜的机械振动幅度应远小于激光的波长,否则频率为 0.1 ~ 10 Hz 的振动将导致拉曼光位相混乱,原子干涉的信号将完全被噪声淹没。朱棣文小组^[1,2]的原子干涉仪采用主动隔振系统将拉曼光反射镜的振动噪声进行了抑制,使原子干涉仪对重力加速度 g 的测量精度达到了 10^{-9} m/s^2 的量级。通过对隔振系统的技术改进,采用精度更高的测量和反馈系统^[3,4],还可以进一步提高 g 的测量精度。本文针对原子干涉仪中拉曼光反射镜对振动隔离很高的要求(即要求对 0.1 ~ 10 Hz 的振动隔离度达到约 99%)设计了一套主-被动混合隔振系统。整个隔振系统能将约 0.1 ~ 100 Hz 影响测量精度的振动隔离。配合高精度的加速度计、超精密电磁作动器以及对机械结构的优化设计,可以达到所要求的隔振效果。考虑到用软件通过一般计算机控制延时比较大,而且对计算机的其它操作产生的中断会影响控制系统的执行,所以控制系统采用嵌入式数字信号处理器(Digital signal processor, DSP),实现快速处理以提高控制效果,同时有利于小型化。最后采用 Matlab 对隔振系统进行了仿真分析,结果表明该系统可以达到较好的效果,对以后的隔振系统具体性能指标的实现提供了一个很好的参考。

2 隔振系统的机械结构设计

隔振系统采用两级被动隔振和一级主动隔振的方案。被动隔振系统由光学平台和减震弹簧构成。主要用来隔离 3 Hz 以上的振动噪声。如图 1 所示,光学平台是亚 Hz 级的气垫隔振平台(光学平台实际尺寸远大于置于光学平台上的隔振系统),它和弹簧一起构成了

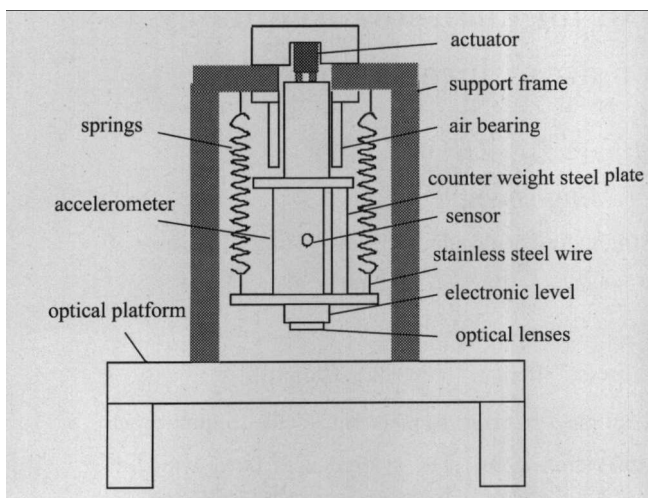


Fig.1 Structure diagram of the isolating system

两级被动隔振部分。光学平台沿重力方向的共振频率约 1.1 Hz,可以对 2 Hz 以上的振动进行有效隔离。光学平台对垂直方向的振动传递率如图 2 所示,横轴为频率,纵轴为传递率。弹簧下面悬挂被隔振的反射镜和传感器等部件时的伸长长度约 16 cm 左右,对应的共振频率约为 1.6 Hz 左右,可以对 3 Hz 以上的振动进行有效隔离。在弹簧上涂了一层阻尼脂来提高阻尼系数,在弹簧两端的连接处分别用很细的钢丝将弹簧与固定架相连接。细钢丝可以降低偏离重力方向的运动和外部的转动耦合成系统重力方向的振动。主动控制部分由机械加速度计、气浮导轨、电磁作动器和电子水平仪构成,主要用来隔离 0.1 ~ 10Hz 的振动噪声。加速度计采集的振

动信号,经前置滤波、A/D 转换、信号处理、D/A 转换,最后作为误差反馈信号驱动电磁作动器,以产生负作用力来抵消系统的振动。由于加速度计是单轴的,其内部振动传感器对直线度要求很高。但设计时内部的振动传感器并不在加速度计正中心,为了使振动传感器与整个隔振系统的中心保持一致,所以设计时在加速度计的旁边增加了一个调整重心用的钢板,来保证振动传感器与整个隔振系统的中心线对齐,以此提高加速度计的测量精度。同时由于在拉曼激光反射过程中对光束沿重力方向的直线度要求很高,系统里增加了气浮导轨和电子水平仪。气浮导轨直线度优于 $1 \mu\text{rad}$,电子水平仪分辨率可以达到 $0.1 \mu\text{rad}$ 。气浮导轨和电子水平仪一起将光学反射镜面的水平度控制在 $1 \mu\text{rad}$ 以内,同时降低水平方向的振动耦合到重力方向的几率。气浮导轨较高的直线度提高了单轴加速度计的测量精度。加速度计内部也有相应的补偿电路,自动调节加速度计内部传感器的直线度,从而弥补气浮导轨上下运动时沿重力方向微小偏移带来的测量误差。

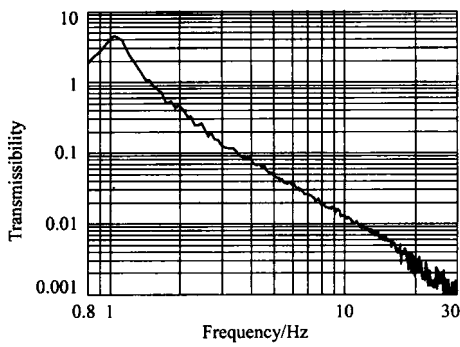


Fig.2 Vertical transmissibility of the optical platform

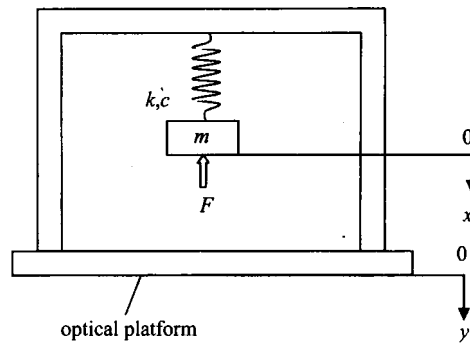


Fig.3 Mechanical model of vibration-isolating system

3 振动模型

隔振系统的简化力学模型如图 3 所示， m 是需要隔振的物体，我们以光学平台不动时 ($y = 0$)， m 的静平衡位置为原点 ($x' = 0$)。不锈钢弹簧弹性系数 k ，阻尼系数为 c 。 F 为作动器产生的作用力。光学平台作为一个基座，其振动可以由加速度计测出来。这里只考虑弹簧和物体组成的隔振系统。 m 的运动方程为 [6]

$$\ddot{x} + 2\xi_0\omega_0(\dot{x} - \dot{y}) + \omega_0^2(x - y) = \frac{F}{m}, \tag{1}$$

其中 $\xi_0 = \frac{c}{2m\omega_0}$ ， $\omega_0^2 = \frac{k}{m} = \frac{g}{L}$ (L 为弹簧离开平衡位置时的伸长量)。我们这里选取 $\xi_0 = 0.017$ ， $L = 16 \text{ cm}$ ， $m = 20 \text{ kg}$ 。 X 、 Y 分别为 x 、 y 的拉普拉斯变换。

当外界施加的作用力 $F = 0$ 时，由方程 (1) 得到 \ddot{X} 对 \ddot{Y} 的传递函数为

$$\frac{\ddot{X}}{\ddot{Y}} = \frac{2\xi_0\omega_0 S + \omega_0^2}{S^2 + 2\xi_0\omega_0 S + \omega_0^2} \tag{2}$$

当光学平台的振动 $\ddot{Y} = 0$ 时，得到 \ddot{X} 对 F 的传递函数为

$$\frac{\ddot{X}}{F} = \frac{S^2}{S^2 + 2\xi_0\omega_0 S + \omega_0^2} \tag{3}$$

对 m 施加作用力 $F = F_a + F_v$ ， $F_a = -mQ\ddot{x}$ ， $F_v = -2m\omega_0 H\dot{x}$ 后得到运动方程

$$(1 + Q)\ddot{x} + 2\omega_0(\xi_0 + H)\dot{x} - 2\omega_0\xi_0\dot{y} + \omega_0^2(x - y) = 0, \tag{4}$$

则系统传递函数为

$$\frac{\ddot{X}}{\ddot{Y}} = \frac{2\xi_0\omega_0 S + \omega_0^2}{(1 + Q)S^2 + (2\xi_0\omega_0 + 2\omega_0 H)S + \omega_0^2} \tag{5}$$

4 反馈系统的设计

方程 (5) 是理想的传递函数，根据传递函数可建立反馈系统，其结构如图 4 所示。原理框图中的自定义滤波器 [5,8] 包括：一个一阶高通滤波器和三个一阶低通滤波器。(6) 式一阶高通滤波器主要用来滤除 0.001 Hz 以下的传感器的热噪声以及温度漂移等带来的噪声。(7) 式对应三个一阶低通滤波器，前两个环节 $G_{21}G_{22}$ 滤除了 100 Hz 以上的噪声，是用来维持闭环系统的稳定性。但是仅仅由 $G_{21}G_{22}$ 组成的低通滤波环节在高频处约 10 ~ 80 Hz 频段内的下降沿并不陡峭，所以又设置了一个滞后补偿环节来提高高频处

的滚降系数。最后高频输出的增益在频率为 40 Hz 时变为 1, 因为 40 Hz 以上相对较高频率的振动信号已经没必要做为反馈信号放大后去控制振动了。

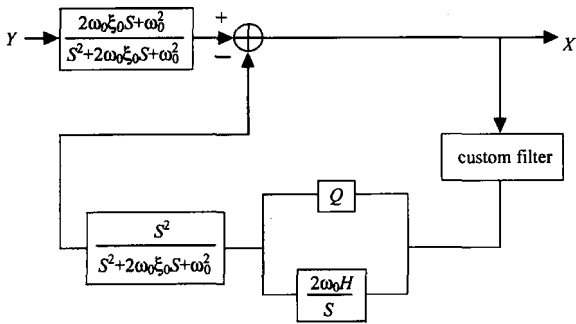


Fig.4 Schematic of the vibration-isolating system

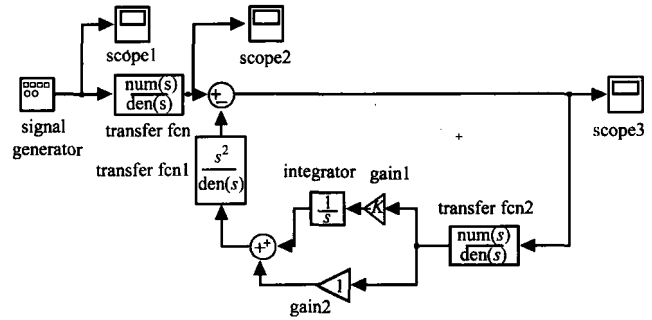


Fig.5 Simulation model of the vibration-isolating system

低通滤波器的形式为

$$G_1 = A \frac{\frac{1}{\omega} S}{\frac{1}{\omega} S + 1} \quad (A \text{ 为比例因子}), \tag{6}$$

取 $f = 0.001 \text{ Hz}$ ($\omega = 2\pi f$, 下同), 滞后补偿环节形式为

$$G_{2n} = B_n \frac{\frac{1}{\omega_{1n}} S + 1}{\frac{1}{\omega_{2n}} S + 1} \quad (B_n \text{ 为比例因子}), \tag{7}$$

分别取

$$f_{11} = 0.1 \text{ Hz}, f_{21} = 0.004 \text{ Hz}, B_1 = 25;$$

$$f_{12} = 80 \text{ Hz}, f_{22} = 1.6 \text{ Hz}, B_2 = 50;$$

$$f_{13} = 100 \text{ Hz}, f_{23} = 1.6 \text{ Hz}, B_3 = 8.$$

最后得到总的传递函数形式 (即所有传递函数串联) 为

$$G = G_1 G_{21} G_{22} G_{23}, \tag{8}$$

这里自定义滤波器传递函数 G 本身就包含了下文所述的 PID 的比例项。所以图 4 中的 Q 设置为 1; H 设置为 1.57。

角频率和比例因子根据 A 、 B_n 实际振动随频率分布、系统稳定性、稳态误差以及电磁作动器作用力大小等情况而定, 并通过修改相应的程序段具体调整, 最后还需要将上面所描述的模拟滤波器数字化才能实现数字化处理, 这里不作介绍。

5 隔振效果的仿真

根据上面所建立的系统结构图和前面所提供的具体的参数用 Matlab 建立相应的仿真模型^[9,10] 如图 5 所示。模型中采用了最常用的比例 - 积分 - 微分 (Proportional-integral-derivative, PID) 技术。增大比例系数有利于减少稳态误差, 提高响应速度, 但是过大的比例系数会使系统存在比较大的振荡, 使系统的稳

定性变坏。增大积分时间, 有利于减少稳态误差, 但也会导致系统振荡变强, 甚至导致系统不稳定。微分器主要用于提高系统的响应速度。这里只采用了 PI 调节器^[5]。

图 5 中的信号发生器可以产生各种信号, 由示波器 1 读出。信号发生器产生的信号经弹簧 (传递函数 1) 后的振动情况, 由示波器 2 读出。后半部分的反馈系统包括自定义滤波器 (传递函数 3)、PI 控制器以及 (3) 式 \dot{X} 对 F 的传递函数。示波器 3 读出的是信号发生器产生的信号经过整个系统后的振动效果。

这里选取 0.001 ~ 100 Hz 频段内的 3 个频率 0.1 Hz、0.3 Hz 和 5 Hz 的正弦振动信号进行仿真对比, 得到的仿真结果分别如图 6、图 7、图 8 所示。纵轴为加速度的幅度, 单位为 10^{-6} m/s^2 , 横轴为时间, 单位为 s。其中, 信号源、被动隔振和主被动混合隔振分别对应图 5 中示波器 1,2,3 输出的振动信号。为了方便显示隔振系统的效果, 只截取了第 200 ~ 230 s 之间的仿真信号。

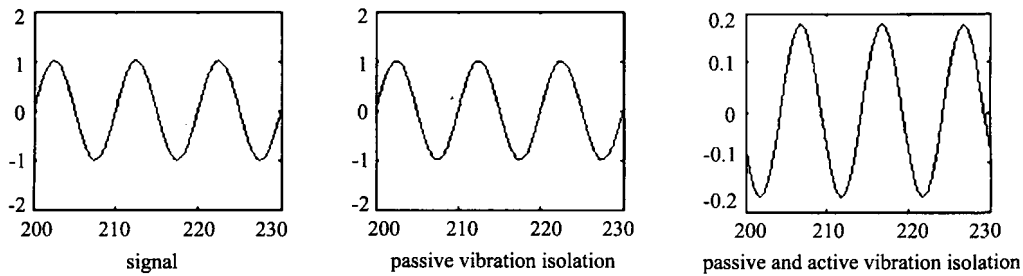


Fig.6 Vibration isolation effect of $f = 0.1 \text{ Hz}$

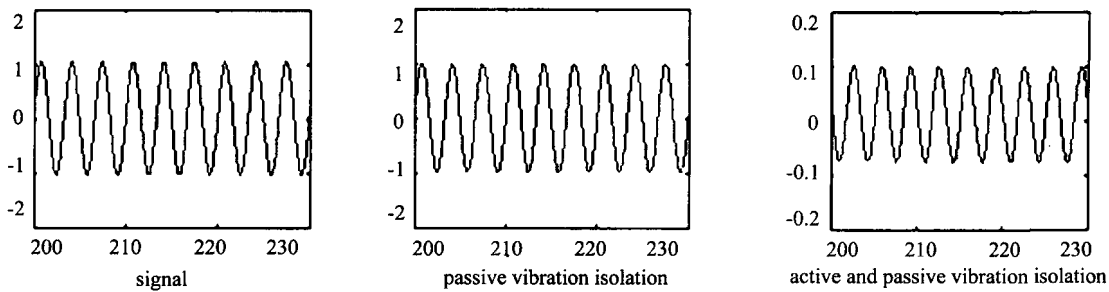


Fig.7 Vibration isolation effect of $f = 0.3 \text{ Hz}$

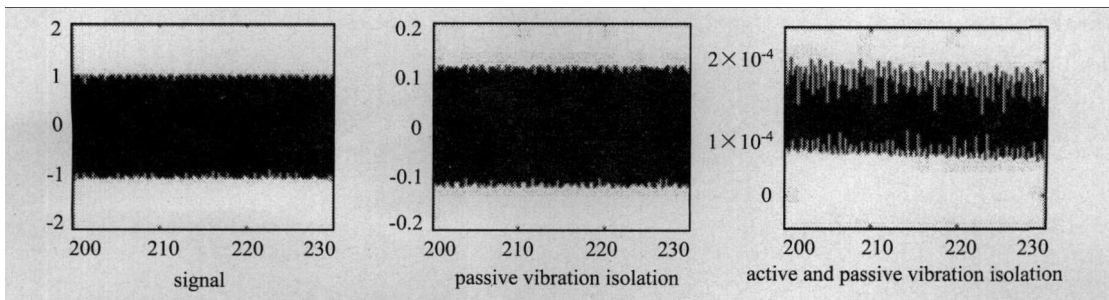


Fig.8 Vibration isolation effect of $f = 5 \text{ Hz}$

通过仿真分析表明对 0.1 Hz 左右的振动通过所设计的系统后传递率约为 20%, 0.3 Hz 左右的振动传递率约为 1%, 5 Hz 左右的振动传递率约为 0.01%。同时 0.3 ~ 10 Hz 频段内的振动传递率都要低于 1%。所设计的隔振系统的隔振效果要明显优于被动隔振系统, 尤其是低频部分被动隔振系统所不能涉及的区域, 主动隔振系统体现了它的优越性。图中的主被动混合隔振系统中对于高频部分振动超调量比较大, 过度到稳态的时间比较长, 这是由于在设置图 5 的仿真系统时缺少了微分环节, 根据实际要求可以加入微

分环节提高系统对高频部分的响应速度,降低超调量。在叠加图 2 中光学平台的隔振效果后,整个系统对 0.3 ~ 100 Hz 地面的振动噪声隔离度可以达到 99% 以上。

6 小 结

本文针对原子干涉仪中光学系统的隔振需求,设计了一套主-被动组合隔振系统,通过建立单轴隔振系统的结构及力学模型,选取具体参数,用 Matlab 进行了模拟仿真,结果表明该系统可以达到较好的隔振效果。该系统弥补了被动隔振系统的不足,有助于提高原子干涉仪的测量精度,也可用于其它精密测量和超精密加工的振动控制领域。

参考文献:

- [1] Hensley J M, Peters A, Chu S. Active low frequency vertical vibration isolation [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, 70: 2735-2741.
- [2] Peters A, Chung K Y, Chu S. High-precision gravity measurements using atom interferometry [J]. *Metrologia*, 2001, 38(1): 25-61.
- [3] Newell D B, Richman S J, Nelson P G, *et al.* An ultra-low-noise, low-frequency, six degrees of freedom active vibration isolator [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, 68(8): 3211-3219.
- [4] Braccini S, Bradaschia C, Del Fabbro R, *et al.* Seismic vibration mechanical filters for the gravitational waves detector VIRGO [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, 67(8): 2899-2902.
- [5] Mei Xiaorong. *Automatic Control Principle* (自动控制原理)[M]. Beijing: Sience Press, 2002: 149-172 (in Chinese).
- [6] Gu Zhongquan, Ma Kougen, Chen Weidong. *Active Vibration Control* (振动主动控制)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997 (in Chinese).
- [7] Cheng Peiqing. *Digital Signal Processing* (数字信号处理教程) [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 (in Chinese).
- [8] Huang Qun. *Research on the Theory of Active Vibration Isolation System and Simulation on Piezoelectric Actuator* (基于压电作动器的主动隔振系统理论与仿真研究) [D]. Xi'an: Master Thesis of Northwest Polytechnical University, 2006 (in Chinese).
- [9] Liu Jingkun. *Advanced PID Control and Matlab Simulation* (先进 PID 控制 MATLAB 仿真) [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2004 (in Chinese).