

# 准零刚度磁悬浮隔振平台主动混合 控制系统设计

颜枫, 窦硕, 陈骝

(中国电子工程设计院股份有限公司, 北京 100036)

**摘要:** 为增强准零刚度磁悬浮隔振平台的隔振性能, 减轻振源振动对隔振对象的干扰, 优化其主动混合控制系统设计; 改装传感器、功率放大器和驱动设备, 将控制器调整至主动混合模式, 调整系统电路的连接方式, 完成控制硬件系统的设计; 模拟准零刚度磁悬浮隔振平台工作过程, 通过平台数据采集、特征提取和特征匹配等环节, 检测平台被隔振对象的振动状态; 测量振动状态下, 测量准零刚度磁悬浮隔振平台实时电磁力, 作为平台控制的初始值; 在电磁理论的支持下, 通过电磁力和电流控制量的计算, 从主动和混合两个方面实现磁悬浮隔振平台的主动混合控制功能; 测试实验结果表明: 主动混合控制系统应用后, 准零刚度磁悬浮隔振平台中作用在被隔振对象上的振动幅度和频率衰减率分别提高了 62.34% 和 32.005%; 在准零刚度磁悬浮隔振平台控制效果方面具有明显优势。

**关键词:** 准零刚度磁悬浮; 隔振平台; 主动混合控制; 电流控制量

## Design of Active Hybrid Control System for Quasi Zero Stiffness Magnetic Suspension Isolation Platform

YAN Feng, DOU Shuo, CHEN Liu

(China Electronics Engineering Design Institute Co., Ltd., Beijing 100036, China)

**Abstract:** To enhance the isolation performance of the quasi zero stiffness magnetic levitation isolation platform, reduce the interference of vibration sources on the isolation object, and optimize the design of its active hybrid control system. Modify the sensors, power amplifiers, and drive equipment, adjust the controller to the active hybrid mode, improve the connection relationships of the system circuit, and complete the design of the control hardware system. Simulate the working process of the quasi zero stiffness magnetic levitation isolation platform, and detect the vibration status of the isolated object on the platform through the data acquisition, feature extraction, and feature matching of the platform. The real-time electromagnetic force of the quasi zero stiffness magnetic levitation isolation platform is measured under the vibration conditions, which is taken as the initial value for the platform control. With the support of electromagnetic theory, the active hybrid control function of the magnetic levitation isolation platform is achieved from both active and hybrid aspects through the calculation of electromagnetic force and current control quantities. Experimental results show that after the application of the active hybrid control system, the vibration amplitude and frequency attenuation rate of the isolated object in the quasi zero stiffness magnetic levitation isolation platform are increased by 62.34% and 32.005%, respectively. It has obvious advantages of control effect in the quasi zero stiffness magnetic levitation isolation platform.

**Keywords:** quasi zero stiffness magnetic levitation; vibration isolation platform; active hybrid control; current control quantity

## 0 引言

磁悬浮隔振是一种高效的隔振技术, 它利用电磁原理, 通过控制电流和磁场的变化来实现隔振效果。这种技术可以有效地隔离来自地面、设备或其他振源的振动, 保证平台的稳定性和精度。与传统隔振技术相比, 磁悬浮隔振平台具有更高的稳定性和精度。传统隔振技术通常采用弹簧或阻尼器等机械结构, 容易受到温度、湿度等因素的影响, 而磁悬浮隔振平台则不受这些因素影响, 具有更高的可靠性和稳定性。因此, 这些领域对隔振器提出了更高的要求, 需要确保隔振器在低频时具有良好的跟踪性能, 而在高频

时具有较大的衰减度。这进一步提高了对隔振平台的要求。准零刚度磁悬浮隔振平台是磁悬浮隔振平台的一种类型, 准零刚度原理是物理学中的一个基本概念, 它涉及弹性体的变形和力学特性。在这个原理中, 当一个弹性体受到外部力的作用时, 它会发生微小的形变, 这种形变可以近似为零。这个原理的基本思想是, 当外部力作用于弹性体时, 弹性体内部的分子或原子会发生相对位移或旋转, 从而引起形变。然而, 由于弹性体内部的分子或原子之间的相互作用力非常强大, 使得形变非常小, 可以近似为零。与传统的隔振技术相比, 准零刚度磁悬浮隔振平台具有更高的稳定性和精度。

收稿日期: 2024-01-30; 修回日期: 2024-03-25。

作者简介: 颜枫(1989-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 颜枫, 窦硕, 陈骝. 准零刚度磁悬浮隔振平台主动混合控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 222-227.

为了实现高精度的振动隔离, 确保准零刚度磁悬浮隔振平台在受到外部干扰时能够保持稳定, 设计并开发了隔振平台主动混合控制系统。主动混合控制是一种先进的控制方法, 它将主动控制和混合控制技术相结合, 以实现更高效、更稳定的系统控制。主动控制技术通过主动地施加控制信号来改变系统的行为, 而混合控制技术则将不同种类的控制策略结合起来, 以适应不同的系统特性和需求。对此, 文献 [1] 提出系统通过广义同步控制, 使隔振平台处于持续的混沌运动状态。对混沌同步系统的多吸引子共存现象以及不同吸引子对应的线谱控制效果进行分析。针对开环控制、线性反馈控制、开环加闭环控制、开环加非线性闭环控制等迁移控制方法, 进行算法研究, 将其应用于同步系统中混沌吸引子之间的迁移控制, 间接的实现隔振平台控制功能。文献 [2] 提出一种基于线性变参数的隔振支腿控制器设计方法, 该方法能同时满足机动过程的快速响应和机动后的高稳定度姿态控制需求, 在不同力学学传递要求下表现较好。文献 [3] 提出基于磁荷模型的磁标量势求解方法, 计算浮子在磁场中的受力, 简化竖直方向的力解耦, 建立数学模型; 研制以微控制单元为中心的集成数字控制器, 实现了系统控制功能。

然而上述控制系统在实际应用过程中存在控制效果不佳的问题, 主要原因为与准零刚度磁悬浮隔振平台的适配度低, 最终导致存在明显的振动幅度大、频率高、传播速度快等现象, 为此以准零刚度磁悬浮隔振平台为控制对象, 优化设计主动混合控制系统。

## 1 准零刚度磁悬浮隔振平台主动混合控制硬件系统设计

准零刚度磁悬浮隔振平台主动混合控制系统的主要工作原理就是根据外部环境的振动情况判断是否启动隔振平台, 并确定隔振幅度, 根据隔振幅度的求解结果, 将其转换为磁悬浮空间中的磁场和电流强度, 通过对磁场和电流的主动混合控制, 实现对隔振平台的控制。由此可以将系统的控制任务分为平台启动控制和隔振程度控制两个部分, 并采用硬件和软件协同工作的方式, 达到准零刚度磁悬浮隔振平台的控制任务。在硬件系统优化设计过程中, 需要综合考虑准零刚度磁悬浮隔振平台的工作模式对相关的硬件设备进行改装, 保证控制器与隔振平台硬件之间的适配度。

### 1.1 振动传感器

振动传感器改装的目的是及时检测到准零刚度磁悬浮隔振平台工作对象的振动状态, 判断是否需要启动隔振平台。优化设计控制系统中使用振动传感器的内部组成结构如图 1 所示。

将振动传感器中的传感芯片设备用磁力负刚度弹簧来代替, 磁力负刚度弹簧由内外磁环组成, 为了保证传感器中的弹簧能够同时满足刚度和小尺寸要求, 采用将环形磁铁分成若干磁瓦的折中方式进行嵌入。综合考虑准零刚度磁悬浮隔振平台的工作环境, 选择导电性更低的 304 不锈

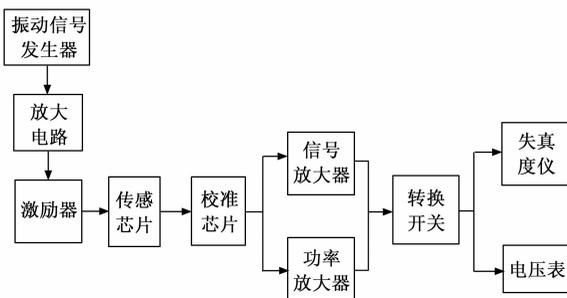


图 1 振动传感器内部结构图

钢作为传感器的外壳材料, 底座与套筒以及套筒与端盖之间采用过盈配合, 相关部件的接触面都需要进行绝缘处理。

### 1.2 电磁传感器

电磁传感器的工作内容是感知隔振平台电流和磁场状态, 从而实现对隔振平台工作状态的检测, 检测结果为系统控制的初始值。安装电磁传感器的工作原理如图 2 所示。

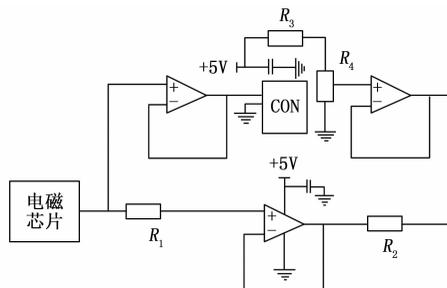


图 2 电磁传感器工作原理图

电磁铁线圈和金属导体的距离直接影响电涡流效应的强弱, 而电涡流效应的强弱又会影响电磁线圈中电流和电压的相位关系, 即阻抗变化<sup>[4]</sup>。整个过程可以理解: 电磁铁线圈发射能量, 根据其于金属导体位置的不同, 反射的能量也不同, 从而判断金属导体的位移情况。电磁传感器改装过程中, 将电磁线圈被密封在传感器探头中, 前置装置中的稳频振荡电路发射一个高频振荡电流信号。这个信号不仅用于信息传输, 还增强了传感器的抗干扰能力。

### 1.3 功率放大器

该控制系统需要控制通入电磁作动器中的电流, 因此对功率放大倍数要求较高, 并且要求功率放大器在工作过程中不能产生自激振荡。因此, 采用了 PWM 形式的功率放大器<sup>[5]</sup>。PWM 形式的功率放大器的主要部件是 PWM 式晶体管, 其功率损耗比线性功率放大器低, 其损耗量在系统的允许范围内。

### 1.4 驱动设备

驱动设备的作用对象主要为磁悬浮隔振器和控制器, 在磁悬浮隔振器驱动过程中主要是通过实时改变输入电压, 改变磁流变悬置中磁流变液的流变特性, 产生实时可变的阻尼, 实时输入电压由 D/A 转换电路获得<sup>[6]</sup>。根据输入与输出的要求, 使用 MC9S12XS128 内部集成的 PWM 模块发

送控制信号，即 PWM 脉冲信号，并选择 L298 作为 PWM 输出控制芯片。通过设置芯片 I/O 口输出到 L298 的 IN1 和 IN2 引脚电平，可以实现输出电压的方向和电压值控制<sup>[7]</sup>。在系统控制器驱动过程中，改变 PWM 信号的占空比和周期，并通过驱动设备的 IN3 和 IN4 引脚将驱动信号直接传输给主动混合控制器。

### 1.5 主动混合控制器

主动混合控制器是系统隔振平台控制功能的实现元件，改装的控制器由主动控制和混合控制两个部分组成。改装结果如图 3 所示。

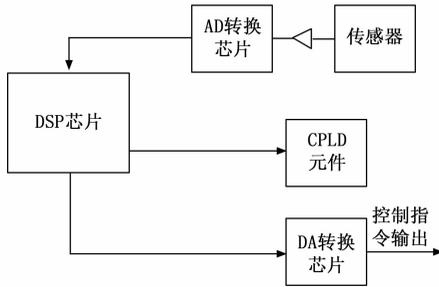


图 3 主动混合控制器改装结构图

主动控制器的核心芯片为 DSP，在运行过程中主要通过接收驱动器和传感器的输出信号，通过对信号的分析处理作出控制决策，并生成主动控制指令。混合控制器的核心部件为 CPLD 芯片，即复杂可编程逻辑器件，该芯片具有丰富的 I/O 通道，能够弥补 DSP 的 I/O 有限的缺点<sup>[8]</sup>。当 DSP 通过地址线和控制信号写入 CPLD 后，CPLD 会进行译码，进而控制 AD 转换器和 DA 转换器数据的输入与输出。

### 1.6 系统电路设计

为保证硬件系统中各个元件之间的数据传输效率，在各个硬件设备上添加一个串行通信接口，并对其内部电路分布情况进行调整，调整结果如图 4 所示。

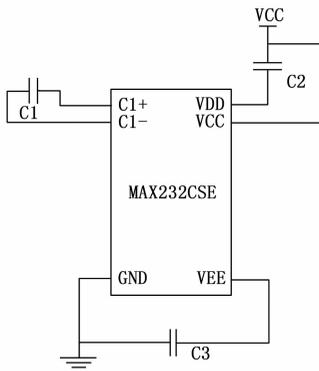


图 4 硬件设备串行接口电路图

图 4 中，RS-233 电平采用负逻辑，式中逻辑 1 的电压范围为  $-3 \sim -5$  V，逻辑 0 的电压范围为  $+3 \sim +15$  V。这种电平标准适用于设备间通信距离不超过 15 m、传输速度最

大为 20 kB/s 的数据传输领域，能够满足准零刚度磁悬浮隔振平台主动混合控制硬件系统间的数据传输需求<sup>[9]</sup>。然而，在与系统终端进行数据传输时，由于串口信号采用正负逻辑关系，这与控制器的逻辑信号电压定义不符。为了解决这个问题，可以在图 4 所示的串行接口电路中加入一个电平转换芯片 MAX232，该芯片能够实现不同类型电平的转换，从而实现控制器与终端设备间的信号传输<sup>[10]</sup>。通过 9 芯串行电缆连接系统终端后，即可进行数据传输。

## 2 磁悬浮隔振平台主动混合控制系统软件功能设计

综合考虑准零刚度磁悬浮隔振平台的工作原理和工作环境，从平台启动和平台工作参数两个方面，实现系统的准零刚度磁悬浮隔振平台主动混合控制功能。

### 2.1 模拟准零刚度磁悬浮隔振平台工作过程

基于准零刚度原理，通过精确控制磁场和电流，使平台与支撑结构之间产生微小的形变，从而实现隔振。这种技术可以有效地隔离来自地面、设备或其他振源的振动，保证平台的稳定性和精度。在准零刚度磁悬浮隔振平台的实际运行过程中，一旦检测到对象存在振动现象，立即接通电流，结构启动悬浮装置，使得上部结构与基础脱离，在空中悬浮一段时间，从而彻底隔断振动作用对主体结构的破坏，振动结束后断开电流，被隔对象重新恢复正常的工作状态<sup>[11]</sup>。准零刚度磁悬浮隔振平台的工作和响应原理如图 5 所示。

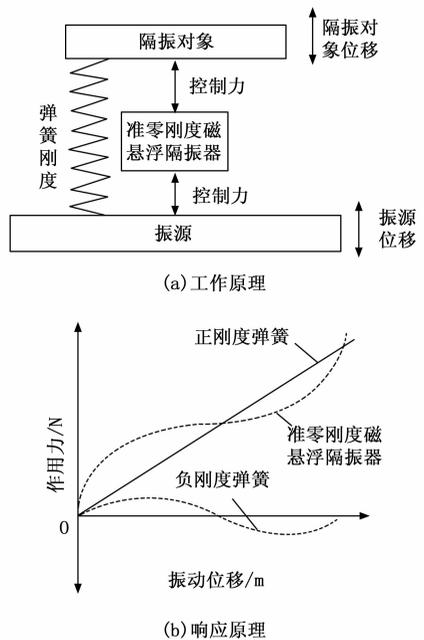


图 5 准零刚度磁悬浮隔振平台工作、响应原理图

准零刚度磁悬浮隔振平台工作的动力学方程为：

$$M_{\text{object}} x_g = -\dot{q} x_g + F_{\text{excitation}} - F_h \quad (1)$$

式中， $M_{\text{object}}$  为平台隔振对象质量， $x_g$  为隔振器的工作位移， $F_{\text{excitation}}$  和  $F_h$  分别为外界激振力和传递到隔振对象上的

合力,  $\psi$  为隔振器内部弹簧的阻尼值。在隔振平台上, 将气腔中的气体看作是一种理想的气体, 并假定其动力学过程是一个绝热的过程<sup>[12]</sup>。因此, 空气弹簧在初始状态下的活塞力平衡方程可以量化表示为:

$$P_0 S_{\text{piston}} = M_{\text{load}} M_{\text{object}} g + P_t S_{\text{piston}} \quad (2)$$

式中,  $P_0$  和  $P_t$  分别为空气弹簧内部的初始气体压强和  $t$  时刻气体压强,  $M_{\text{load}}$  为施加在活塞上的负载质量,  $S_{\text{piston}}$  为隔振器中的活塞面积,  $g$  为重力加速度。如果隔振平台的被振对象出现振动现象时, 隔振平台空气弹簧的压力满足如下条件:

$$(P_0 + \Delta P) \cdot S_{\text{piston}} = M_{\text{load}} g + \Delta F + P_t S_{\text{piston}} \quad (3)$$

式中,  $\Delta P$  和  $\Delta F$  分别为气腔内气体压强变化量和振动现象产生的负载力变化量<sup>[13]</sup>。隔振平台运行过程中准零刚度隔振器的非线性刚度为:

$$G = \frac{k_{\text{incline}} L_0}{(P_0 + \Delta P) \cdot S_{\text{piston}} \Delta x_{\text{level}}} \quad (4)$$

式中,  $k_{\text{incline}}$  为倾斜弹簧刚度,  $L_0$  为倾斜弹簧的初始长度,  $\Delta x_{\text{level}}$  为静平衡状态下弹簧的水平位移量。隔振平台通过机械弹簧提供稳定支撑, 并预压缩以确保稳定性。在无电流状态下, 电磁吸力实现平衡, 保持被隔振对象处于初始位置。永磁体则用于平衡正刚度, 实现准零刚度效果<sup>[14]</sup>。电磁铁则负责动态调节磁场强度, 以实现对电磁吸力的灵活调控。通过电磁吸力的调整, 致使隔振器内部弹簧产生明显位移, 从而实现隔振对象与振源之间的隔离。

## 2.2 检测平台被隔振对象振动状态

平台被隔振对象实时振动数据的采集结果是系统控制程序的启动条件, 利用控制系统中的振动传感器设备, 采集振动数据从而判断被隔对象是否存在明显的振动现象<sup>[15]</sup>。传感器设备作用下, 被隔振对象实时振动数据的采集结果为:

$$z(t) = 2Gx_{\text{vibrate}} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

式中,  $x_{\text{vibrate}}$  为被隔振对象在单一方向上的振动位移,  $\omega$  和  $\varphi$  分别为振动信号频率和相位值, 按照上述方式可以得出任意时刻振动数据的采集结果。以初始采集的振动数据为处理对象, 采用特征提取与匹配的方式, 得出振动状态的检测结果<sup>[16]</sup>。被隔振对象振动数据特征提取结果为:

$$\tau = \left[ \frac{3}{4} \gamma z(t)^3 - z(t) f_{\text{incentive}}^2 \right]^2 + [2\zeta z(t) f_{\text{incentive}}]^2 \quad (6)$$

式中,  $\gamma$  和  $\zeta$  分别为刚度比和阻尼比,  $f_{\text{incentive}}$  为简谐激励频率。那么当前被隔振对象振动特征的匹配结果为:

$$\lambda = \frac{\tau \cdot \tau_{\text{vibrate}}}{\|\tau\| \cdot \|\tau_{\text{vibrate}}\|} \quad (7)$$

式中,  $\tau_{\text{vibrate}}$  为振动状态下信号的标准特征, 将式(6)的计算结果代入式(7)中, 即可得出两者特征之间匹配度的计算结果<sup>[17]</sup>。若计算得出匹配度高于阈值  $\lambda_0$ , 说明当前被隔振对象处于振动状态, 否则认为该对象无振动现象, 完成准零刚度磁悬浮隔振平台被隔振对象振动状态的检测工作。

## 2.3 测量准零刚度磁悬浮隔振平台实时电磁力

根据准零刚度磁悬浮隔振平台工作过程的模拟结果,

确定隔振平台的电磁力与弹簧位移之间存在直接关系, 因此需要对隔振平台控制对象的电磁力进行测量<sup>[18]</sup>。准零刚度磁悬浮隔振平台的电磁力主要就是平台中隔振器的电磁力, 电磁力的测量结果为:

$$F_{\text{ele}}(t) = \frac{\mu_0 N^2 S_m \lambda \left[ \frac{I_1^2}{(0.005 - q)^2} - \frac{I_2^2}{(0.005 + q)^2} \right]}{4} \quad (8)$$

式中,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $N$  为隔振器中的线圈匝数,  $S_m$  为磁极面积,  $I_1$  和  $I_2$  分别为上下线圈电流,  $q$  为气隙变化量。

## 2.4 实现磁悬浮隔振平台主动混合控制

综合考虑准零刚度磁悬浮隔振平台中刚度、电流、电磁力以及力的传递情况, 确定准零刚度磁悬浮隔振平台电磁力的控制目标, 结合实时电磁力的测量结果, 对平台的控制量进行计算。隔振平台控制目标需要满足一个条件, 首先, 需要确保正刚度始终大于负刚度, 否则系统可能会失稳<sup>[19]</sup>。具体来说, 如果负刚度过大, 隔振器上的动子和静子可能会吸附在一起。因此, 在相同的位移下, 弹性力需要始终大于电磁力。根据对当前被隔振对象振动状态与程度的检测结果, 得出准零刚度磁悬浮隔振平台的磁力控制目标为:

$$F_c = \kappa_{\text{transfer}} (x_{\text{vibrate}} M_{\text{object}} g) \quad (9)$$

式中,  $\kappa_{\text{transfer}}$  为传递系数, 被隔振对象质量  $M_{\text{object}}$  的计算公式如下:

$$M_{\text{object}} = \frac{4Gd_y F_c (L - L_1)}{Lg} \quad (10)$$

式中,  $L_1$  和  $L$  分别为隔振器的初始长度和目标长度,  $d_y$  为压簧被竖直压缩的距离。那么隔振平台电磁力控制量的计算结果为:

$$\Delta F = F_c - F_{\text{ele}}(t) \quad (11)$$

将式(8)和式(9)的计算结果代入式(11)中, 即可完成对电磁力控制量的计算。在电磁理论的支持下, 得出隔振平台电流控制量的计算结果为:

$$\Delta I_k = \frac{M_{\text{object}} \Delta F_k}{NLB} \quad (12)$$

式中,  $L_c$  和  $B$  分别为导线在垂直于磁场方向的长度以及磁感应强度。按照上述方式得出准零刚度磁悬浮隔振平台电磁力和电流控制量的计算结果<sup>[20]</sup>。生成包含控制量的控制指令, 主动控制模块主要用来控制隔振平台电流、混动控制模块用来控制平台电磁力, 通过硬件系统中主动混合控制器的运行, 完成系统的磁悬浮隔振平台主动混合控制任务, 进而达到隔绝振动的目的。

## 3 系统测试

为了测试优化设计准零刚度磁悬浮隔振平台主动混合控制系统对隔振平台的控制效果, 设计系统测试实验。由于隔振平台的运行目的是实现对象与振源之间的隔离, 因此控制系统的控制目标就是成功驱动平台, 完成相应的隔离任务, 因此此次系统测试实验主要通过隔振对象振动属性的测试, 反映系统控制功能。

### 3.1 系统测试实验准备

在实验开始之前,需要配置准零刚度磁悬浮隔振平台、被隔振对象以及振源,并对优化设计控制系统的硬件环境进行安装与调试,保证系统输出的控制指令能够成功作用在准零刚度磁悬浮隔振平台上。

配置的准零刚度磁悬浮隔振平台由隔振器、载荷识别器、隔振基座、导向装置等部分组成,隔振器由滑轨、弹簧、螺纹杆共同组成。采用 65 Mn 弹簧钢,其弹性模量为 200 GPa,切变模量为 780 002 N/mm<sup>2</sup>,泊松比为 0.2。拉簧的中径为 12 mm,圈数为 55 圈;压簧的中径为 14 mm,圈数为 12 圈。隔振器中胶垫刚度为 2.3 kN/mm。准零刚度磁悬浮隔振平台的载荷识别器包含驱动电路、激光位移传感器、步进电机、螺杆及电动缸等关键部件。电动缸安装于载荷平台下方,负责单自由度位移的调节。电机用于调节连杆的铰接位置,确保中间铰接点满足设计要求。载荷平台的调节由 57 系列电机与 60 电缸协同完成,连杆的调节由 42 系列步进电机完成。在准零刚度磁悬浮隔振平台上放置平板结构的金属试件作为被隔振对象,振源为高速旋转机械设备,为保证实验结果的可信度,实验环境中设置振源的工作参数均不相同,振动频率为 50 Hz、振幅为 50 μm 的振动信号如图 6 所示。

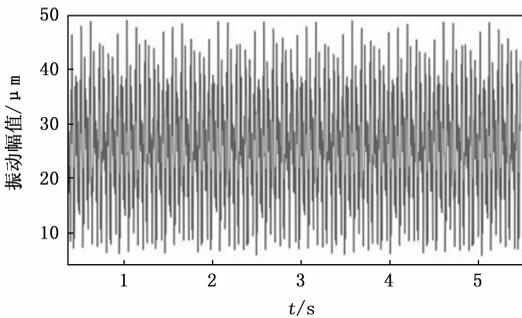


图 6 振源初始振动波形图

由图 6 可知,不同振幅、不同相位下的振动信号生成结果,将生成的振动信号直接作用在准零刚度磁悬浮隔振平台的被隔振对象。在此基础上,根据准零刚度磁悬浮隔振平台主动混合控制硬件系统的优化设计结果,确认磁悬浮隔振平台的振动传感器安装结构如图 7 所示。

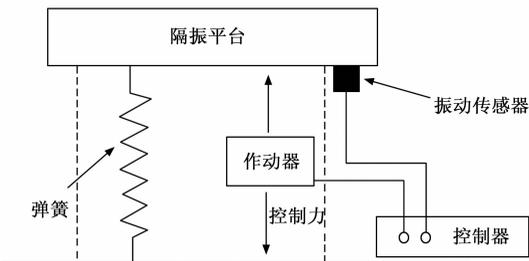


图 7 磁悬浮隔振平台的振动传感器安装结构

集硬件系统中传感器设备的运行数据,将其与预期数据进行比对,完成对传感器设备的调试。同时启动控制器判断该设备是否能够成功生成具有针对性的控制指令。若硬件设备运行存在异常,需要对相关设备进行更换或重新连接,否则证明硬件系统调试成功,可以执行实验的下一步操作。

### 3.2 系统测试实验过程

联合 Matlab/Simulink 与 STM32CubeMX 软件进行系统开发,并利用自动代码生成技术。首先,在 Matlab 的 Simulink 软件中安装 STM32-MAT/TARGET 工具箱,这可以生成代码的外设驱动库。然后,新建工程并添加 MCUCONFIG 模块,导入 .ioc 芯片配置系统控制程序运行文件。使用 armKeil 软件打开 C 代码工程,添加液晶屏显示、模数转换校准及开启、定时器的 PWM 信号开启等初始化语句。最后,启动系统控制软件程序。同时启动准零刚度磁悬浮隔振平台、振源和主动混合控制系统的控制程序,通过振动状态检测、电磁力测量等步骤,完成控制任务,并输出主动混合控制结果。图 8 为振源振动频率为 50 Hz、振幅为 50 μm 下的控制系统输出结果,输出幅值为 9 μm、20 Hz。

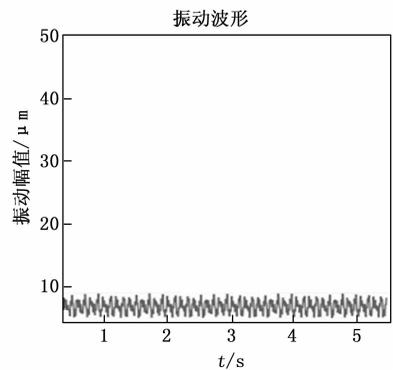


图 8 磁悬浮隔振平台主动混合控制系统输出结果

重复上述操作,为了展现优化设计系统在控制效果上的优越性,特设了两组对比系统:一是基于混沌同步与迁移控制的传统隔振控制系统,二是基于 LPV 的隔振平台控制系统。在相同的实验环境中,利用振动传感器主动收集了隔振平台上被隔振对象的振动数据,这些数据将直接作为控制效果的测试依据。通过这样的对比实验,可以清晰地看出优化设计系统在隔振控制上的显著优势。为实现对系统控制效果的量化测试与对比,设置振动幅度衰减率和振动频率衰减率作为测试指标,振动幅度衰减率反映的是控制系统作用后被隔振对象实际振动幅值的变化情况,该指标的测试结果为:

$$\eta_{\text{attenuation}} = \left( \frac{\varphi_z - \varphi_K}{\varphi_z} \right) \times 100\% \quad (13)$$

式中,  $\varphi_z$  和  $\varphi_K$  分别为振源的初始幅值 and 控制系统作用下被隔振对象的振动幅值。另外,振动频率衰减率的测试结果为:

$$\eta_{\text{attenuation}} = \left( \frac{f_z - f_K}{f_z} \right) \times 100\% \quad (14)$$

设置振源一个初始值,并驱动隔振平台发出响应,收

式中,  $f_z$  和  $f_K$  分别为振动频率的初始值和控制值。最终计算出振动幅度和频率衰减率越高, 证明对应系统的控制效果越优。

### 3.3 系统测试实验结果与分析

通过不同控制系统作用下被隔振对象的实际振动数据的统计, 得出反映系统控制效果的测试结果, 如表 1 所示。

表 1 隔振平台主动混合控制系统控制效果测试数据表

实验组别	振源数据		基于混沌同步与迁移控制的隔振控制系统		基于 LPV 的隔振平台控制系统		优化设计准零刚度磁悬浮隔振平台主动混合控制系统	
	幅值/ $\mu\text{m}$	频率/ Hz	幅值/ $\mu\text{m}$	频率/ Hz	幅值/ $\mu\text{m}$	频率/ Hz	幅值/ $\mu\text{m}$	频率/ Hz
1	50	50	42	45	38	40	9	20
2	60	50	55	42	45	42	15	25
3	80	50	78	40	63	46	27	22
4	50	100	46	79	39	77	10	62
5	60	100	58	80	50	76	16	58
6	80	100	77	80	47	74	25	55
7	50	200	44	188	37	156	11	98
8	60	200	54	183	39	162	18	93
9	80	200	74	185	52	134	22	95

将表 1 中的数据代入式 (13) 和式 (14) 中, 计算得出两种传统控制系统作用下振动幅度衰减率的平均值分别为 7.93% 和 27.35%, 平均振动频率衰减率分别为 14.33% 和 21.22%, 而在优化设计系统作用下振动幅度和频率衰减率的平均值分别为 73.98% 和 49.78%, 由此可以看出优化设计系统控制下, 振动幅度和频率的衰减率更低, 由此证明优化设计系统具有更高的控制效果。

## 4 结束语

准零刚度磁悬浮隔振平台是一种先进的振动隔离技术, 广泛应用于精密仪器、高端制造等领域。随着技术的不断发展, 准零刚度磁悬浮隔振平台的应用前景将更加广阔。通过准零刚度磁悬浮隔振平台主动混合控制系统的优化设计, 为隔振平台的精准运行提供技术支持, 间接提升平台的隔振效果。采用主动混合控制的方式能够充分利用主动控制和混合控制的优点, 弥补各自的不足。通过主动控制技术, 可以实现隔振平台行为的精确控制, 而混合控制技术则能够根据平台的不同状态和需求, 选择合适的控制策略, 实现更全面的隔振平台控制, 在控制效果方面的优势, 具有更高的应用价值。

### 参考文献:

- [1] 左兆伦, 俞翔, 李爽, 等. 基于混沌同步与迁移控制的隔振系统线谱控制方法 [J]. 振动与冲击, 2021, 40 (16): 245-252.
- [2] 唐育聪, 朱庆华, 刘付成, 等. 基于 LPV 的主动隔振平台单

- 支腿鲁棒控制器设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (7): 1796-1801.
- [3] 邹圣楠, 刘畅, 邓舒同, 等. 基于混合式磁浮平台的解耦及控制分析 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57 (3): 540-548.
- [4] 铁世萃, 王花兰. 新型准零刚度果蔬运输隔振系统设计 [J]. 包装工程, 2022, 43 (17): 102-108.
- [5] 赵权, 李韶华, 冯桂珍. 一种准零刚度车载隔振系统的设计与试验研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40 (6): 55-63.
- [6] 李占龙, 张正, 姜稳稳, 等. 磁环型准零刚度隔振系统动态特性 [J]. 兵工学报, 2023, 44 (6): 1784-1794.
- [7] 韩超, 刘桂祥, 邵晓麟, 等. 准零刚度隔振器非线性削弱方法研究 [J]. 核动力工程, 2022, 43 (s1): 121-126.
- [8] 王梦同, 柴凯, 刘树勇, 等. 准零刚度隔振器设计及振动控制技术 [J]. 船舶工程, 2022, 44 (s1): 352-359.
- [9] 黄伟, 徐建, 陆新征. 基于准零刚度的被、主动混合控制研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2021, 44 (1): 79-82.
- [10] 任志英, 邱涛, 刘扭扭, 等. 推进轴系纵向高承载准零刚度隔振器的研究 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2023, 44 (1): 52-57.
- [11] 汪新, 刘彦琦, 宋春芳, 等. 含机械调频式动力吸振器的准零刚度隔振系统隔振性能分析 [J]. 固体力学学报, 2022, 43 (4): 446-455.
- [12] 张春松, 李学勇, 张硕, 等. 适应负载变化的准零刚度扭转隔振器设计与分析 [J]. 振动与冲击, 2022, 41 (23): 307-314.
- [13] 吴明亮, 赵晨名, 张来喜. 准零刚度振动控制系统的研究进展 [J]. 南京理工大学学报, 2021, 45 (1): 18-26.
- [14] 翁泽宇, 刘胜利, 吴晓郁, 等. 新型三维平移自由度 Delta 机构准零刚度隔振平台及特性 [J]. 兵工学报, 2022, 43 (3): 667-675.
- [15] 马建国, 帅长庚, 李彦. 电磁-气囊主被动混合隔振系统抗冲击设计研究 [J]. 船舶力学, 2021, 25 (1): 120-127.
- [16] 翟明达, 张博, 李晓龙, 等. 基于模糊 PID 控制的准零刚度磁悬浮隔振平台的设计与实现 [J]. 西南交通大学学报, 2023, 58 (4): 886-895.
- [17] 李东辉, 李晨, 张业伟, 等. 杠杆型串联非线性能量阱整星隔振系统的振动控制 [J]. 振动与冲击, 2022, 41 (16): 278-284.
- [18] 付源, 李树森, 刘九庆, 等. 双级驱动隔振系统反共振频率控制器设计与验证 [J]. 光学精密工程, 2021, 29 (8): 1899-1909.
- [19] 彭远生, 代洪华, 张皓, 等. 仿生抗冲击 Stewart 隔振平台的动力学与控制 [J]. 西北工业大学学报, 2021, 39 (2): 258-266.
- [20] 杨鸿杰, 代锋, 刘磊, 等. 综合大质量偏心与弹簧横向刚度超静主动隔振平台动力学解耦控制研究 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (1): 1-9.