

# 基于加速度计前馈控制的主动抑振方法\*

陈曦<sup>†</sup> 张乾 肖楠 陈瑶瑶

(中国电子科技集团公司第四十五研究所, 北京 100176)

**摘要** 超精密运动台作为半导体设备的核心部件,其伺服精度与主动抑振能力直接决定了半导体设备的性能.针对超精密运动台高速运动时,测量基准因动力学特性受到机器内部噪声的激励而产生振动,导致超精密运动台在这些模式下跟随误差变大的问题,本文研究了一种基于加速度计前馈控制的主动抑振方法,利用加速度计对被测对象加速度信号实时采集的特性精准测量谐振频点,使用相位延迟滤波器解决信号延迟,并通过设计前馈控制器对振动信号进行有效衰减.以实验室设备为例,通过 MATLAB 等软件进行数据处理与仿真验证,以及整机性能验证,确认基于加速度计前馈控制的主动抑振方法对解决高频振动引起伺服误差较差的有效性、可靠性与可行性.

**关键词** 加速度计, 前馈控制器, 主动抑振

**中图分类号**:TN305

**文献标志码**:A

## Active Vibration Suppression Method Based on Accelerometer Feedforward Control\*

Chen Xi<sup>†</sup> Zhang Qian Xiao Nan Chen Yaoyao

(The 45th Research Institute of CETC, Beijing 100176, China)

**Abstract** As the core component of semiconductor equipment, the servo accuracy and active vibration suppression capability of ultra precision motion table directly determine the performance of semiconductor equipment. In response to the problem of vibration caused by the excitation of internal noise due to the dynamic characteristics of the measuring benchmark during high-speed motion of the ultra precision motion table, which leads to an increase in tracking error of the ultra precision motion table in these modes. This article studies an active vibration suppression method based on accelerometer feedforward control. The resonant frequency point is accurately measured using the characteristic of real-time acquisition of acceleration signals of the measured object by the accelerometer. The signal delay is solved by using a phase delay filter, and the vibration signal is effectively attenuated by designing a feedforward controller. Taking laboratory equipment as an example, data processing and simulation verification were carried out using software such as MATLAB, as well as overall performance verification, to confirm the effectiveness, reliability, and feasibility of the active vibration suppression method based on accelerometer feedforward control in solving the problem of poor servo error caused by high-frequency vibration.

**Key words** accelerometer, feedforward controller, active vibration suppression

## 引言

半导体设备在集成电路、智能制造等领域发挥着至关重要的作用<sup>[1-3]</sup>。随着半导体设备指标不断提升,超精密运动台性能所要达到的伺服性能指标也不断提高<sup>[4-6]</sup>。然而,半导体设备内部的测量基准因本身的动力学特性受到机器内部噪声的激励产生振动,对伺服控制系统带来扰动,从而影响超精密运动台的伺服性能和精度<sup>[7,8]</sup>。测量基准的振动信号不仅表征了设备的运行状态,还能够被用于控制回路中的补偿策略。因此,振动信号的测量与抑制对于提升半导体设备精度至关重要。

对于振动信号的测量,最常用的传感器是加速度计<sup>[9]</sup>。根据敏感元件的不同,又可以分为压电式、电感式、电容式等。其中,电容式加速度计是基于电容原理的极距变化型传感器。在外力下两个电极之间的距离产生变化,导致电容量发生改变,再通过电容变化量计算加速度值<sup>[10]</sup>。电容式加速度计用于振动测量有着高精度、高灵敏度、易布置等优势,被广泛应用于工业振动监测、地震监测等测量领域<sup>[11-13]</sup>。通过测量分析振动信号,可以获取振动频率、振动幅度和振动模式等重要信息<sup>[14]</sup>,有利于实时监测设备的异常振动信号,并为后续振动抑制的研究提供前提和基础。

前馈控制是按扰动量进行补偿的开环控制策略,其直接对扰动进行补偿,一般由前馈控制器完成<sup>[15]</sup>。控制系统的绝大部分伺服误差都是通过反馈控制而消除的,而在反馈控制保证闭环系统稳定的基础上,应尽可能通过前馈补偿去减小伺服误差<sup>[16-18]</sup>。超精密运动台伺服误差的主要来源为参考轨迹以及干扰、噪声和振动等。前馈补偿的目的是消除参考轨迹以及扰动引起的伺服误差,以提升超精密运动台的响应速度和伺服精度<sup>[19]</sup>。本文基于加速度计对半导体设备中的机械模态与振动频率的高精度测量,设计了前馈控制器并深入研究了高频主动抑振的方法。

## 1 基本原理

### 1.1 加速度计测量原理

加速度计是用于测量载体运动加速度的惯性敏感器件,一般利用敏感质量将加速度转为力来进行测量。加速度计的力学模型为质量块—弹簧—阻

尼系统,如图1所示。当被测载体进行加速或减速运动时,质量块会产生相对于载体的位移,使弹簧发生变形。电容式加速度计采用基于位移的检测方式,将质量块的位移转变为电容变化量,从而利用差分电容检测出不同方向的加速度值<sup>[20,21]</sup>。本文采用一种纳米精度三轴加速度计对测量基准的加速度信息进行采集。

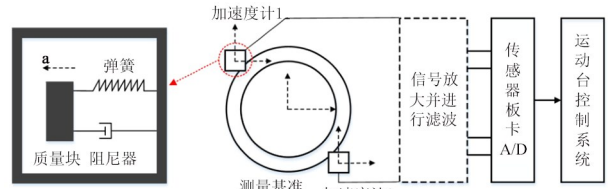


图1 加速度计传感器  
Fig. 1 Accelerometer sensor

加速度传感器的布局如图1所示,两个三轴加速度计沿测量基准中心对称安装。每个三轴加速度计能够测量 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三自由度的加速度,将加速度乘以加速度权重系数转变为力信号,作为前馈开环力施加到PID控制器后。利用被动元器件对两个 $X$ 或者 $Y$ 向加速度计测量信号加法求和可以消除测量基准旋转带来的误差。将加速度信号放大到合适的电平,经滤波器处理后输出模态信号,再利用A/D板卡进行数字化处理,最终输入到运动台控制系统。

### 1.2 前馈控制

前馈控制器的输入信号一般是对系统的某种扰动信号,其设计目标使控制系统拥有快速响应能力,并抑制干扰<sup>[22-24]</sup>。由于获取的测量基准加速度特征频率过高,运动台闭环伺服回路无法单独处理,因此将其作为前馈补偿应用于运动台。通过引入前馈控制,在前向通道中增加振动信号作用于被控对象,能够提高跟踪精度和响应速度。

测量基准加速度信号被用作运动台系统的前馈信号时,由于加速度计信号传输需要一个采样延迟时间,传感器本身的特性和模拟信号调节造成了一个轻微的相位滞后。测量基准实际加速度与运动台控制器之间的延迟会导致运动台的跟踪行为发生错误。因此,信号路径中间的时间延迟是影响加速度计前馈系统最终性能的关键因素。为处理相位延迟,前馈环节可以加入一个超前一滞后滤波器进行抵消。

### 1.3 系统振动对伺服精度的影响

测量基准与测量框架和底座之间的位置关系如图 2 所示。

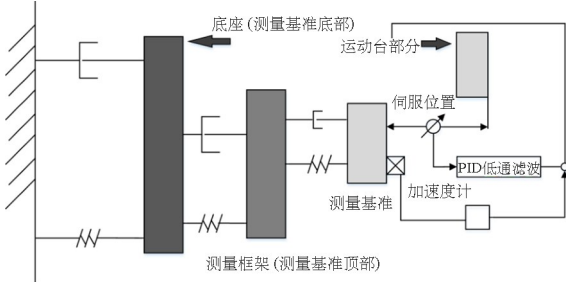


图 2 测量基准与测量框架和基座的示意图

Fig. 2 Diagram of measuring reference, measurement framework and the pedestal

该模型包括底座、测量框架、测量基准和运动台部分共 4 个质量弹簧系统。在设备运行中,来自地面振动的力、气动安装噪声以及超精密运动台高速高加速运动下产生的反力会直接或间接作用于半导体框架上,导致测量基准产生高频运动,进而影响了运动台的伺服精度。测量基准高频振动信号特征频点一般较高(甚至高达 10 kHz),超出了设备本身的伺服带宽(一般在 150~200 Hz),导致控制系统无法通过简单的反馈控制或者参数辨识削弱振动频点的影响,无法精确跟踪测量基准的高频运动。因此,如何衰减这些高频振动频点以提高控制系统的伺服精度是一个亟须解决的问题。

## 2 信号处理

### 2.1 滤波器设计

信号采集时将 PCA 板卡直连加速度计,并负责将加速度计采集到的信号进行放大处理,再将放大后的信号输出给机箱进行信号采集。这样做的目的是确保从加速度计中获得的信号能够被准确地同步采集和处理采集到加速度原始信号。在 PCA 中设计一个高频段斜率至少  $-40$  dB/1 kHz 的“驼峰滤波器”,由一个二阶低通滤波器和一个二阶高通滤波器构成,其传递函数如下:

$$H = \frac{\frac{s^2}{(2 * \pi * f_{hp})^2}}{\frac{s^2}{(2 * \pi * f_{hp})^2} + \frac{s * b_{hp}}{\pi * f_{hp}} + 1} *$$

$$\frac{\frac{s^2}{(2 * \pi * f_{lp})^2}}{\frac{s^2}{(2 * \pi * f_{lp})^2} + \frac{s * b_{lp}}{\pi * f_{lp}} + 1} + 1 \quad (1)$$

其中: $f_{hp}$  表示高频点, $f_{lp}$  表示低频点, $b_{hp}$  表示高频增益, $b_{lp}$  表示低频增益。

定义滤波器参数如下:

$f_{hp} = 56, b_{hp} = 0.13, f_{lp} = 390, b_{lp} = 0.28$ ,采样频率为 200 微秒,可得滤波器离散域传递函数如下:

$$H(Z) = \frac{Z^2 - 1.9975Z + 0.99754}{Z^2 - 1.977Z + 0.98187} * \frac{0.10768Z + 0.0982}{Z^2 - 1.5541Z + 0.75999} \quad (2)$$

绘制传递函数伯德图,如图 3 所示。根据驼峰滤波器的幅频特性可知,加速度计原始信号在经过 PCA 板卡处理后既保证了在非目标频点处有足够的衰减率,并且在 85~215 Hz 频段具有几乎平坦的幅频特性,且接近零相位失真。

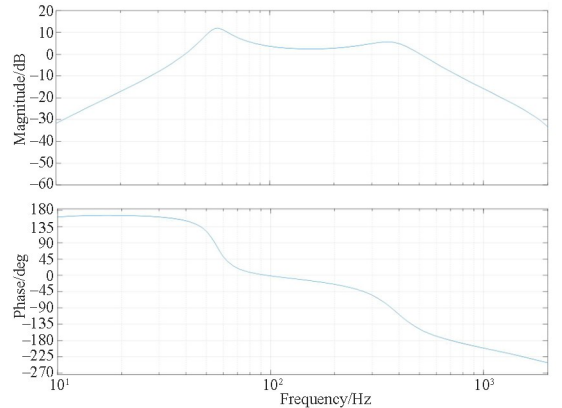


图 3 驼峰滤波器伯德图

Fig. 3 Frequency response diagram of the hump filter

### 2.2 延迟校正

由于谐振增强的频点在相位上存在一定的偏移,因此,通过 PCA 板卡输出的加速度信号还需通过延迟校正来进行相位补偿。首先计算加速度系统的滞后时间,为后续设计合适的超前滞后滤波器进行相位补偿提供理论支撑。其计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$d_{total} = d_{pca} + d_{probe} + d_{trans} \quad (3)$$

其中: $d_{total}$  为加速度系统总时延, $d_{pca}$  为 PCA 板卡时延,根据图 3 可以得到当前测试的 PCA 板卡时延在 108 Hz 接近零; $d_{probe}$  表示探头时延,本文暂时忽略不计; $d_{trans}$  表示传输时延,由下式求得:

$$d_{trans} = (1 + 2n) T \pi f_i * 180 / \pi \quad (4)$$

其中; $n$ =IO 延迟时间/采样周期,IO 延迟时间表示控制器将 IO 指令发出后到完成的过程中所消耗的时间; $T$  为采样周期; $f_i$  为需要校正相位的频点.这里假设前馈系统传输时相位恒滞后  $46^\circ$ .

综上可得前馈总延迟如下:

$$d_{\text{total}} = d_{\text{trans}} = 46/360/108 = 1.2 \text{ ms}$$

根据计算的延迟时间设计合理的超前滞后滤波器对加速度系统总时延进行超前滞后校正.本文采用的是一阶超前滞后滤波器,该滤波器形式如下:

$$H(s) = \frac{\omega_{\text{pole}}}{\omega_{\text{zero}}} \cdot \frac{s + \omega_{\text{zero}}}{s + \omega_{\text{pole}}} \quad (5)$$

其中: $\omega_{\text{pole}}$  指极点频率, $\omega_{\text{zero}}$  指零点频率.

由于加速度系统时延总是以滞后状态存在,信号相位延迟,因此选择超前环节.即一阶超前滤波器,上式也可以写成以下形式:

$$H(s) = \frac{aTs + 1}{Ts + 1}, a > 1 \quad (6)$$

其中: $T = 1/\omega_{\text{pole}}$ ,  $a = \omega_{\text{pole}}/\omega_{\text{zero}}$ .

该环节的上下截止频率分别为:

$$\omega_1 = \frac{1}{a_1 T}, \omega_2 = \frac{1}{T} \quad (7)$$

定义  $\phi_{\text{max}}$  为需要补偿的相位, $\omega_m$  为最大相位处频率,即需要校正延迟的频点.二者可与超前环节的  $a$  建立如下关系:

$$\phi_{\text{max}} = \arcsin\left(\frac{a-1}{a+1}\right) \quad (8)$$

$$\omega_m = \frac{1}{T\sqrt{a}} \quad (9)$$

结合上述公式,可知最大相位处增益为  $\sqrt{a}$ .

通过 Simulink 搭建超前滞后滤波器模型,如图 4 所示.定义 Simulink 模型中 Mass 为运动台质量、num 为传函分子部分、den 为分母部分、K 为传

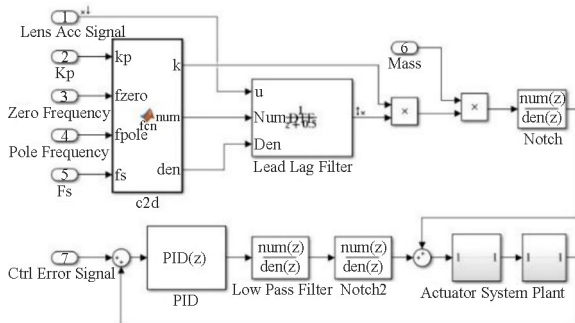


图 4 一阶超前滞后滤波器设计原理图

Fig. 4 Design principle diagram of the first-order lead lag filter

函增益,进行连续-离散零极点匹配,得到  $K$ 、 $\text{num}$ 、 $\text{den}$  的输出变量.根据延迟相位逆计算得到  $X$  轴的零点频率  $\omega_{\text{zero}} = 120$  和极点频率  $\omega_{\text{pole}} = 220$ ,前馈系数  $K_p = -0.81$ ;  $Y$  轴零点频率  $\omega_{\text{zero}} = 80$  和极点频率  $\omega_{\text{pole}} = 330$ ,前馈系数  $K_p = -0.7$ ;运动台质量  $\text{Mass} = 14 \text{ kg}$ .

注:前馈控制器最终输出时,前馈力是超精密运动台质量与前馈补偿的测量基准加速度的乘积.超精密运动台质量值的确定方法:在超精密运动台质量名义值附近微调,观察稳态误差以及加速度计频点功率谱密度的变化,确定合适的质量值.至此,超前滞后滤波器参数设计完成.

### 3 前馈控制器设计

#### 3.1 建模分析

根据图 2 进行受力分析,设计模型.定义底座的质量为  $m_{\text{BF}}$ 、位置变化量为  $x_{\text{BF}}$ 、阻尼系数为  $c_{\text{BF}}$ 、弹簧系数为  $K_{\text{BF}}$ ;测量框架的质量为  $m_{\text{MP}}$ 、位置变化量为  $x_{\text{MP}}$ 、阻尼系数为  $c_{\text{MP}}$ 、弹簧系数为  $K_{\text{MP}}$ ;测量基准的质量为  $m_{\text{L}}$ 、位置变化量为  $x_{\text{L}}$ 、阻尼系数为  $c_{\text{L}}$ 、弹簧系数为  $K_{\text{L}}$ ;  $F$  为前馈力,与测量基准加速度和运动台质量成正比.

底座受力模型:

$$-m_{\text{BF}}\ddot{x}_{\text{BF}} = -F + c_{\text{BF}}\dot{x}_{\text{BF}} + K_{\text{BF}}x_{\text{BF}} + c_{\text{MP}}(\dot{x}_{\text{BF}} - \dot{x}_{\text{MP}}) + K_{\text{MP}}(x_{\text{BF}} - x_{\text{MP}}) \quad (10)$$

整理可得:

$$-m_{\text{BF}}\ddot{x}_{\text{BF}} = (K_{\text{BF}} + K_{\text{MP}})x_{\text{BF}} - K_{\text{MP}}x_{\text{MP}} + (c_{\text{BF}} + c_{\text{MP}})\dot{x}_{\text{BF}} - c_{\text{MP}}\dot{x}_{\text{MP}} - F \quad (11)$$

框架受力模型:

$$-m_{\text{MP}}\ddot{x}_{\text{MP}} = -c_{\text{MP}}(\dot{x}_{\text{BF}} - \dot{x}_{\text{MP}}) - K_{\text{MP}}(x_{\text{BF}} - x_{\text{MP}}) + c_{\text{L}}(\dot{x}_{\text{MP}} - \dot{x}_{\text{L}}) + K_{\text{L}}(x_{\text{MP}} - x_{\text{L}}) \quad (12)$$

整理可得:

$$-m_{\text{MP}}\ddot{x}_{\text{MP}} = -K_{\text{MP}}x_{\text{BF}} + (K_{\text{MP}} + K_{\text{L}})x_{\text{MP}} - c_{\text{MP}}\dot{x}_{\text{BF}} + (c_{\text{MP}} + c_{\text{L}})\dot{x}_{\text{MP}} - c_{\text{L}}\dot{x}_{\text{L}} \quad (13)$$

测量基准受力模型:

$$-m_{\text{L}}\ddot{x}_{\text{L}} = -c_{\text{L}}(\dot{x}_{\text{MP}} - \dot{x}_{\text{L}}) - K_{\text{L}}(x_{\text{MP}} - x_{\text{L}}) \quad (14)$$

整理可得:

$$-m_{\text{L}}\ddot{x}_{\text{L}} = -K_{\text{L}}x_{\text{MP}} + K_{\text{L}}x_{\text{L}} - c_{\text{L}}\dot{x}_{\text{MP}} + c_{\text{L}}\dot{x}_{\text{L}} \quad (15)$$

模型标准化后,可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{BF} \\ \dot{x}_{MP} \\ \dot{x}_L \\ \ddot{x}_{BF} \\ \ddot{x}_{MP} \\ \ddot{x}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_{BF}+K_{MP}}{m_{BF}} & \frac{K_{MP}}{m_{BF}} & 0 & -\frac{c_{BF}+c_{MP}}{m_{BF}} & \frac{c_{MP}}{m_{BF}} & 0 \\ -\frac{K_{MP}}{m_{MP}} & -\frac{K_{MP}+K_L}{m_{MP}} & 0 & \frac{c_{MP}}{m_{MP}} & -\frac{c_{MP}+c_L}{m_{MP}} & -\frac{c_L}{m_{MP}} \\ 0 & \frac{K_L}{m_L} & -\frac{K_L}{m_L} & 0 & \frac{c_L}{m_L} & -\frac{c_L}{m_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{BF} \\ x_{MP} \\ x_L \\ \dot{x}_{BF} \\ \dot{x}_{MP} \\ \dot{x}_L \end{bmatrix} + \frac{1}{m_{BF}} F \quad (16)$$

### 3.2 前馈补偿

为了帮助控制器对这些高频振动做出响应,解决振动导致的精度降低问题,在设计控制器和陷波器后注入一个加速度前馈信号.在所有反馈滤波器之后注入前馈信号能够有效避免镜头加速度与运动台电机力之间的相位滞后,提升电机驱动控制的跟踪性能,提高控制系统的稳定性.然而,由于加速度计的高灵敏度特性,除了目标频率外,还会引入其他频率,该频率由于无法针对性抑制,前馈控制中会直接作用于系统,进而导致系统误差增加.为解决这一问题,引入了滤波器和陷波器对前馈信号进行整定.设计如图 5 所示的前馈控制器,在加速度计超前滞后输出后增加两个二阶前馈滤波器和额外的两个陷波器.

在前馈控制策略中,该误差信号首先需要经过两个二阶低通滤波器进行滤波,该过程的目的是防止激励特定的共振频率并滤除不需要的频率组分.在经过低通滤波器之后,还可能存在一些单频干扰信号,需要采用两个额外的陷波器进行信号处理,以去除单频窄带信号的干扰.

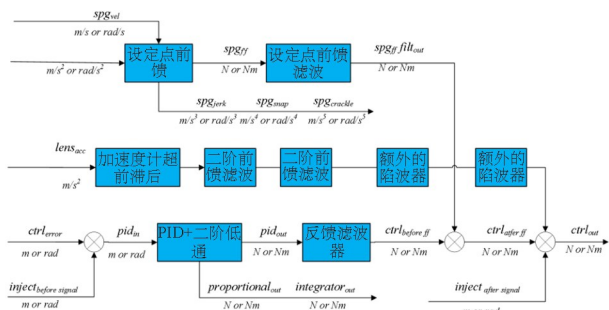


图 5 加速度计前馈抑振原理图

Fig. 5 Principle diagram of the feedforward vibration suppression based on accelerometer

### 4 仿真与实验

#### 4.1 仿真

定义底座的质量  $m_{BF}=4000$  kg、阻尼系数  $c_{BF}=0.001$ 、弹簧系数  $K_{BF}=e^9$  N/m;测量框架质量  $m_{MP}=2000$  kg、阻尼系数  $c_{MP}=0.012$ 、弹簧系数  $K_{MP}=72000$  N/m;测量基准质量为  $m_L=200$  kg、阻尼系数  $c_L=0.024$ 、弹簧系数  $K_L=720000$  N/m;信号经过一个 5 KHz 的高通滤波器(HP)后,对比无加速度前馈抑振(NO FF)和有加速度前馈抑振(FF),两种情况的频域结果如图 6 所示.

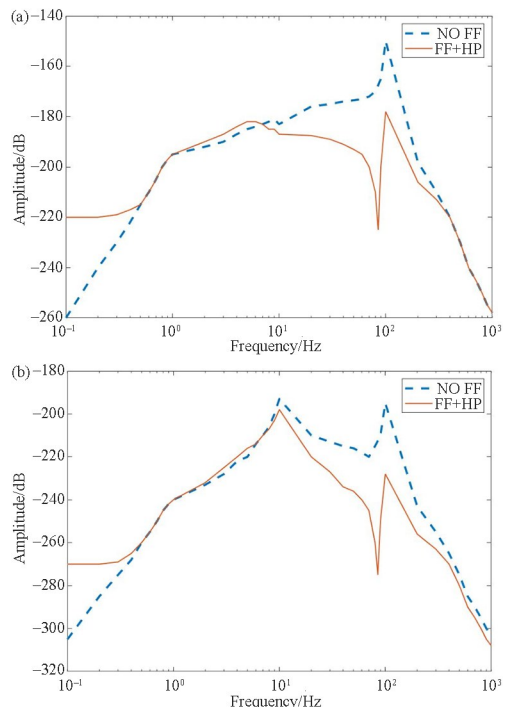


图 6 伺服误差伯德图:(a)测量基准顶部;(b)测量基准底部  
Fig. 6 Bode diagram for the servo error:(a) Top of the measuring reference;(b) Bottom of the measuring reference

分析图 6 可知,在 1 Hz 处阻尼表现良好,对应测量基准底部频率,10 Hz 峰值对应底座特征频

率,98 Hz 则是测量基准的固有频率。

通过图 7 的仿真对比图和表 1 可知,未开启主动抑振时系统伺服误差为 20 nm,其 MSD 为 6.5 nm,MA 可以忽略不计。开启主动抑振后,系统伺服误差降为 5 nm,MSD 为 3 nm。综合总体效果,可以确定加速度计前馈抑振效果是非常明显的。

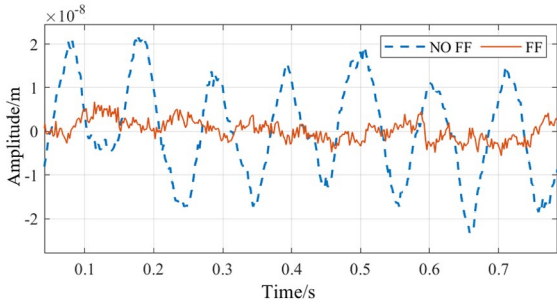


图 7 抑振前后的伺服误差

Fig. 7 Servo error before and after vibration suppression

表 1 抑振前后的伺服误差的平均值(MA)和标准差(MSD)  
Table 1 MA and MSD for servo error before and after vibration suppression

轴	指标	无前馈	有前馈
X 轴	MA	3.640 760e-12	1.334 903e-12
	MSD	6.585 518e-09	3.478 920e-09

## 4.2 实验

以实验室半导体设备为例,在测量基准 X 和 Y 两个方向上安装三轴加速度计后,采集 PCA 板卡输出到机箱的加速度信号。首先确认 X 和 Y 轴信号在 70~300 Hz 的频段范围内存在相同的谐振增强频点,确认采集信号的正确性。根据设备实测数据,探头时延与 PCA 板卡时延当作零处理,可以得到 Y 轴在 96 Hz 处有 46° 的相位滞后,约 1.3 ms。同理可得 X 轴在 98 Hz 处相位滞后。根据滞后时间,设计合理超前环节,调整前馈系数  $K_p$  到 -0.7,质量  $m$  设定为 14 kg。

迭代调整增益系数,分别得到 X 轴和 Y 轴的最优抑振参数。如图 8、图 9 可以分别得到 X 轴在 98 Hz 处相干性变低,误差功率谱在 98 Hz 有明显 15 dB 衰减。Y 轴在 96 Hz 处、相干性变低,误差功率谱在 96 Hz 有明显 20 dB 衰减。

如图 10 所示,台阶状为对应模态,补偿前明显受多个模态影响,补偿后消除中间模态。

在设计前馈控制器时,额外增加了陷波器,这样可以灵活地对测量基准上其它振动频点进行抑制并且不会增加系统控制的延迟从而稳定鲁棒性。

如图 11 所示,可以看出消除测量基准一阶振动模态后,对 200~700 Hz 的较高频率进行抑振,对比

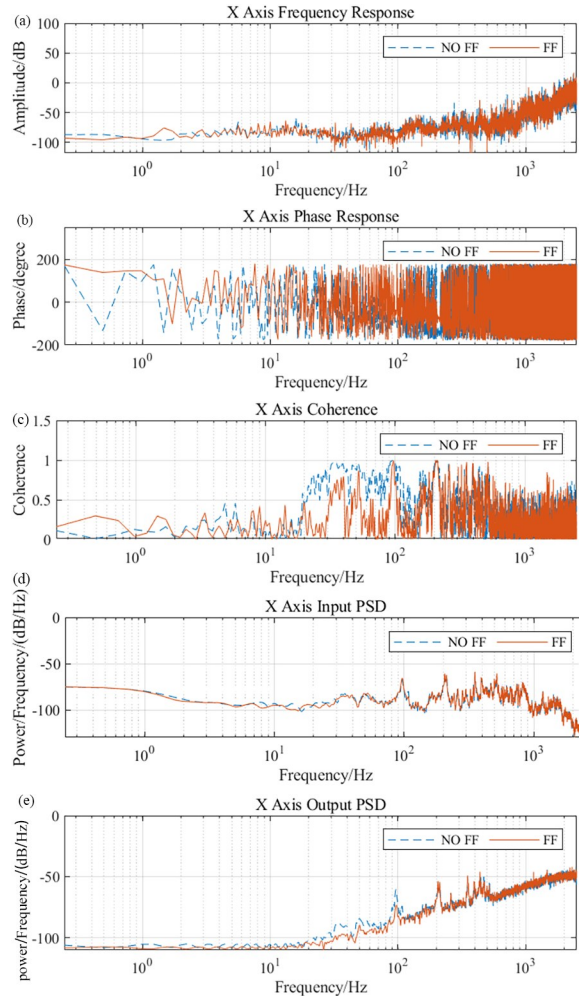
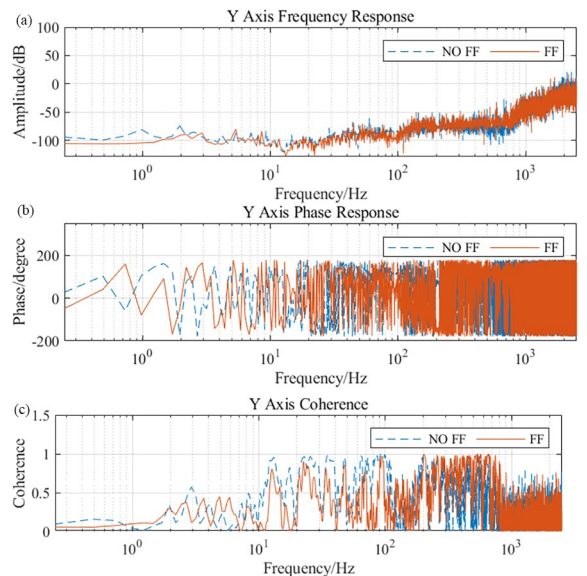


图 8 X 轴抑振前后对比图:(a)测量基准加速度增益;(b)相位;(c)相干性;(d)输入功率谱;(e)输出功率谱

Fig. 8 Contrast diagram of X-axis before and after vibration suppression:(a) Measurement reference acceleration gain;(b) Phase;(c) Coherence;(d) Input power spectrum;(e) Output power spectrum



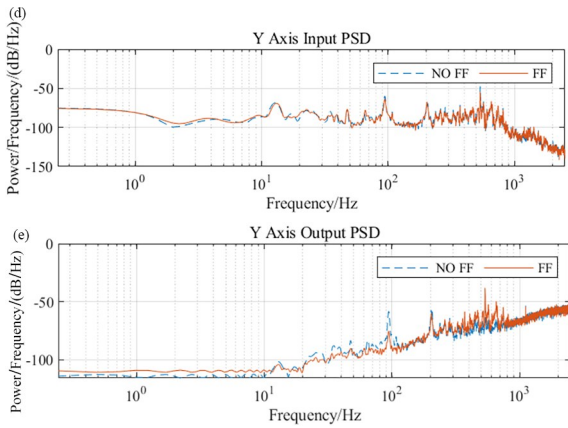


图 9 Y 轴抑振前后对比图:(a)测量基准加速度增益;

(b)相位;(c)相干性;(d)输入功率谱;(e)输出功率谱

Fig. 9 Contrast diagram of Y-axis before and after vibration suppression: (a) Measurement reference acceleration gain; (b) Phase; (c) Coherence; (d) Input power spectrum; (e) Output power spectrum

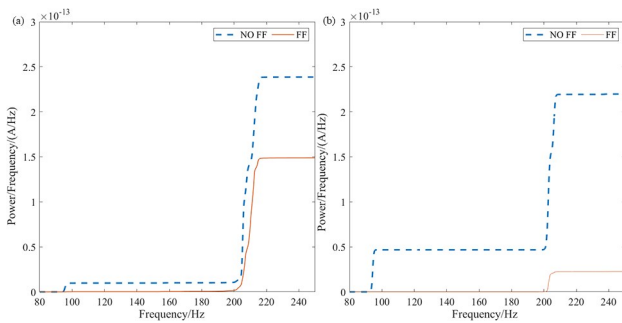


图 10 抑振前后对比图:(a)X 轴模态;(b)Y 轴模态

Fig. 10 Contrast diagram before and after vibration suppression: (a) X-axis modal state; (b) Y-axis modal state

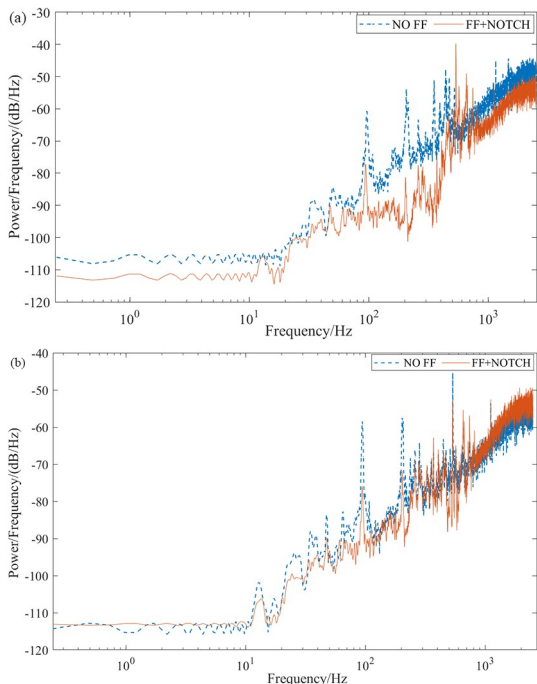


图 11 增加额外陷波后功率谱对比图:(a)X 轴;(b)Y 轴

Fig. 11 Power spectrum contrast diagram after adding extra notch: (a) X-axis; (b) Y-axis

抑振前后效果明显.

最后,通过对比开启抑振前后 X/Y 两自由度伺服误差.如图 12 所示,可以看出 X 轴伺服精度由 20 nm 降到亚纳米级,Y 轴的伺服精度由 20 nm 降低至 5 nm,提高了超精密运动台的跟踪性能.

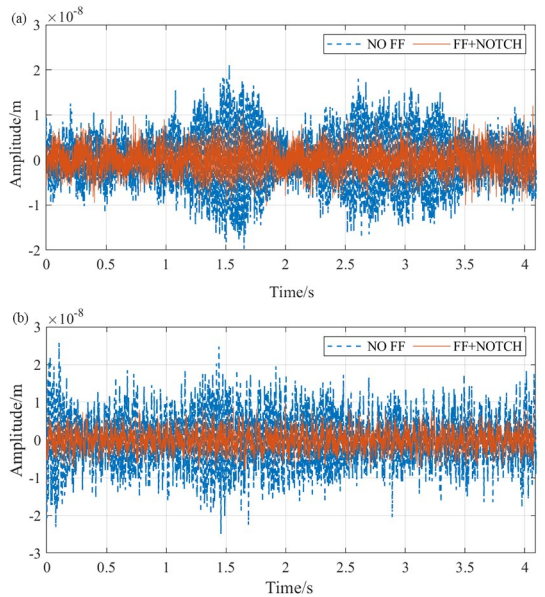


图 12 伺服误差抑振前后对比图:(a)X 轴;(b)Y 轴

Fig. 12 Servo error contrast diagram before and after vibration suppression: (a) X-axis; (b) Y-axis

## 5 结论

通过对被控对象的建模仿真与实验验证,不难发现,加速度计信号经过带通滤波器处理后,目标频点处数据精准低频段衰减滤除杂波干扰.经过超前滞后滤波器延迟校正后,能足够精准地将抑振频点相位与控制系统相位对应,达到点对点精准抑振.对比 X 轴和 Y 轴开启主动抑振算法前后伺服误差的功率谱,可以看出 X 轴在 98 Hz (Y 轴在 96 Hz) 频点处开启抑振后,明显存在 15~20 db 的衰减.分析系统模态台阶图,可以明显看出开启抑振后消除多个模态影响.由于前馈控制器设计的灵活性,测量基准上其它影响性能的频率可通过增加的额外陷波器进行抑制,且抑制效果良好.最后通过对比振动前后伺服精度由 20 nm 提升到 5 nm 超精密运动台的主动抑振效果显著.

综上所述,基于加速度计的前馈主动抑振方法可以有效解决由于超精密运动台高速运动时测量基准振动问题,同时前馈控制器的额外滤波可以更灵活有效地抑制除固有频率外的高频振动,显著提高半导体设备超精密运动台的伺服精度.

## 参考文献

- [1] CHEN H, LI L X, LI R G, et al. Design and analysis of a long-stroke and high-precision positioning system for scanning beam interference lithography [J]. *Electronics*, 2023, 12(24): 4960.
- [2] 严尧, 张丽, 陈龙祥. 时滞动力学与控制研究进展 [J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(8): 1-5.  
YAN Y, ZHANG L, CHEN L X. Progress in dynamics and control of time-delayed systems [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(8): 1-5. (in Chinese)
- [3] 王雯雯, 赖磊捷, 李朋志, 等. 压电微动台数据驱动迭代前馈补偿与自适应抑振 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(6): 833-842.  
WANG W W, LAI L J, LI P Z, et al. Data-driven iterative feedforward compensation and adaptive vibration suppression of piezoelectric micro-motion stage [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(6): 833-842. (in Chinese)
- [4] KASEMSINSUP Y, ROMAGNOLI R, HEERTJES M, et al. Reference-tracking feedforward control design for linear dynamical systems through signal decomposition [C]//2017 American Control Conference (ACC). Seattle, WA, USA. New York: IEEE, 2017: 2387-2392.
- [5] BLANKEN L, VAN DEN MEIJDENBERG I, OOMEN T. Inverse system estimation for feedforward: a kernel-based approach for non-causal systems [J]. *IFAC-PapersonLine*, 2018, 51(15): 1050-1055.
- [6] 王向朝, 戴凤钊. 集成电路与光刻机 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
WANG X C, DAI F Z. Integrated circuit and lithographic tool [M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [7] EVERS E, VAN DE WAL M, OOMEN T. Beyond decentralized wafer/reticle stage control design: a double-Youla approach for enhancing synchronized motion [J]. *Control Engineering Practice*, 2019, 83: 21-32.
- [8] 张博, 胥奇, 李映辉. 不同作动器布局 and 时滞下柔性悬臂梁振动控制研究 [J]. *动力学与控制学报*, 2021, 19(6): 41-45.  
ZHANG B, XU Q, LI Y H. Study on vibration control of a flexible cantilever beam with different actuator layouts and time delays [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2021, 19(6): 41-45. (in Chinese)
- [9] 冯杰. 加速度计动态特性测试系统的设计与实现 [D]. 西安: 西安工业大学, 2023.  
FENG J. Design and implementation of accelerometer dynamic characteristic testing system [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023. (in Chinese)
- [10] AHMADIAN KOOCHAKSARAIE R, BARAZANDEH F, BARATI H. A novel design of capacitive MEMS multi-range accelerometer; FEM and numerical approach [J]. *Physica Scripta*, 2023, 98(11): 115026.
- [11] 刘志强, 夏磊, 张猛, 等. MEMS 力平衡加速度传感器以测量误差最小为目标的控制算法 [J]. *动力学与控制学报*, 2022, 20(6): 94-100.  
LIU Z Q, XIA L, ZHANG M, et al. Control algorithm of a mems force-balance accelerometer for minimizing the measurement error [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2022, 20(6): 94-100. (in Chinese)
- [12] HEMMATI K D, GANJI B A. Retraction Note: a new structure and modeling of a three-axis MEMS capacitive accelerometer with high dynamic range and sensitivity [J]. *Microsystem Technologies*, 2023, 29(2): 289.
- [13] 陈曦, 陈国兴, 步石, 等. 基于加速度计的前馈补偿方法 [J]. *电子工业专用设备*, 2023, 52(6): 95-102.  
CHEN X, CHEN G X, BU S, et al. A feedforward compensation algorithm based on accelerometers [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2023, 52(6): 95-102. (in Chinese)
- [14] 时浩翔, 宋晓娟. 充液挠性航天器时变滑模控制及振动抑制 [J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(7): 19-28.  
SHI H X, SONG X J. Time-varying sliding mode control and vibration suppression of liquid-filled flexible spacecraft [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(7): 19-28. (in Chinese)
- [15] JIANG Y, YANG K M, ZHU Y, et al. Optimal feedforward control with a parametric structure applied to a wafer stage [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2014, 228(2): 97-106.

- [16] DE ROZARIO R, VOORHOEVE R, AANGENENT W, et al. Global feedforward control of spatio-temporal mechanical systems: with application to a prototype wafer stage [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50(1): 14575–14580.
- [17] 付雪微. 有铁芯直线电机推力波动的分析与补偿方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
FU X W. Analysis and method research of compensation for force ripple of iron linear motor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [18] FENG Z, LING J, MING M, et al. Data-based double-feedforward controller design for a coupled parallel piezo nanopositioning stage [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2017, 231(10): 881–892.
- [19] 李振哲, 华璟, 孙杰, 等. 低频振动控制用阻尼器流固耦合仿真 [J]. *动力学与控制学报*, 2022, 20(4): 91–96.  
LI Z Z, HUA J, SUN J, et al. Fluid structure coupling simulation of damper for low frequency vibration control of satellite flexible appendages [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2022, 20(4): 91–96. (in Chinese)
- [20] YANG H J, LV R Z, REN M Y. Research progress on interface circuit of capacitive micro accelerometer [J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2023, 32(15): 2330006.
- [21] 李开富, 蒋婷, 郭小伟, 等. 三质量块 MEMS 三轴电容式加速度计的设计 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(10): 193–201.  
LI K F, JIANG T, GUO X W, et al. Design of three mass block MEMS triaxial cap-active accelerometer [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(10): 193–201. (in Chinese)
- [22] LIAN J K, AN D W, CHEN M Y, et al. Design and feedforward control of a two-degree-of-freedom positioning stage with bidirectional piezoelectric drive [J]. *Precision Engineering*, 2023, 81: 158–166.
- [23] 陈兴林, 刘川, 刘杨, 等. 精密运动平台宏微控制系统的设计 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(6): 2318–2323.  
CHEN X L, LIU C, LIU Y, et al. Dual-stage actuator control system design for precision motion platform [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(6): 2318–2323. (in Chinese)
- [24] CAO M S, BO Y M, GAO H B. Combined feedforward control and disturbance rejection control design for a wafer stage: a data-driven approach based on iterative parameter tuning [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 181224–181232.