

文章编号 1004-924X(2026)16-2498-14

伺服频率对超精密机床性能影响

武海亮¹, 杨 辉^{1*}, 马善意^{2*}, 罗松保¹, 金 盈¹

(1. 北京航空精密机械研究所 精密制造技术航空科技重点实验室, 北京 100076;

2. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了分析多轴联动超精密机床控制系统的伺服频率对超精密机床动态性能的影响, 本研究建立了基于仿真与实验相结合的伺服频率匹配与性能评估方法。搭建超精密机床伺服控制系统仿真模型, 采用单一控制变量法调整伺服频率, 研究其与导轨直线电机输出精度之间的关系。仿真结果表明, 较高的伺服频率有助于抑制外部扰动对电机驱动力的影响。本研究以跟随误差和重复定位精度作为超精密机床设备性能的验证指标, 搭建位置控制实验平台, 实验结果显示, 伺服频率越高, 设备的跟随误差越小, 响应速度越快, 定位精度越高。由于设备硬件性能的限制, 伺服频率超过 8 kHz 后, 较高的伺服频率导致死区时间的占比过大, 从而削弱闭环稳定裕度, 因此伺服频率不应超过 8 kHz。针对无法将伺服频率与设备性能直接关联的难点, 本研究采用线性相关度分析, 将位置实验结果与仿真实验结果相关联, 得出特性参数与设备性能之间的直接关系, 从而选择出最优伺服频率为 8 kHz。在单晶镍车削实验中, 采用不同伺服频率, 最优伺服频率控制下的超精密机床加工工件的 S_a 与 P-V 相较于非最优伺服频率提升 23% 与 13%。最终得到最优伺服频率可有效改善表面质量, 提升超精密机床加工性能, 为超精密机床控制系统的硬件设计以及设备的性能优化提供理论依据。

关键词: 超精密机床; 伺服频率; 线性相关度; 重复定位精度; 跟随误差

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263416.2498 **CSTR:** 32169.14.OPE.20263416.2498

Influence of servo frequency on performance of ultra-precision machine tools

WU Hailiang¹, YANG Hui^{1*}, MA Shanyi^{2*}, LUO Songbao¹, JIN Ying¹

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Precision Manufacturing Technology,

Beijing Precision Engineering Institute for Aircraft Industry, Beijing 100076, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan 430074, China)

* Corresponding author, E-mail: yangh050@avic.com; 11591980386@qq.com

Abstract: To investigate the influence of servo frequency in the control system of a multi-axis coordinated ultra-precision machine tool on its dynamic performance, this study established a servo frequency matching and performance evaluation method combining simulation and experimentation. A simulation model of the ultra-precision machine tool servo control system was developed, and the effect of servo frequency on the output accuracy of the linear motor-driven guideway was examined using a single-variable approach. The

收稿日期: 2026-05-22; 修订日期: 2026-07-18.

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助 (No. 2025JYCXJJ030)

simulation results indicate that a higher servo frequency helps suppress the influence of external disturbances on motor thrust output. In this study, tracking error and repeat positioning accuracy were used as performance indices to validate the machine tool system. A position-control experimental platform was built, and the experimental results show that increasing the servo frequency reduces tracking error, improves response speed, and enhances positioning accuracy. However, due to hardware limitations, when the servo frequency exceeds 8 kHz, the proportion of dead time becomes too large, thereby reducing the closed-loop stability margin; therefore, the servo frequency should not exceed 8 kHz. To address the difficulty of directly correlating servo frequency with machine tool performance, linear correlation analysis was employed to establish a direct relationship between the positional experimental results and the simulation results, thereby identifying 8 kHz as the optimal servo frequency. In the single-crystal nickel turning experiments, the workpiece machined under the optimal servo frequency exhibited improvements of 23% in Sa and 13% in P-V compared with those machined under non-optimal servo frequencies. The results demonstrate that the optimal servo frequency can effectively improve surface quality and enhance the machining performance of ultra-precision machine tools, providing a theoretical basis for the hardware design and performance optimization of ultra-precision machine tool control systems.

Key words: ultra-precision machine tools; servo frequency; linear correlation degree; repetitive positioning accuracy; following error

1 引言

随着军事、民用领域的先进成像和照明系统、高功率光束整形应用和其他高端科学仪器等光电产品的不断发展,其对光学元件的面形精度和表面粗糙度的要求越来越高^[1]。多轴联动超精密机床是实现光学元件加工的关键载体,运动平台的动态性能直接决定了零件的精度、效率和可靠性。为了研究设备设计过程中的不同参数对超精密机床的性能影响,研究人员从机床的机械结构以及运动控制方面展开了大量研究:李棋等^[2]考虑重力的影响,分析了五轴磨床的弹性变形。路文文等^[3]针对磷酸二氢钾晶体单点金刚石飞刀切削超精密机床,通过优化筋板结构并增大导轨结合面的接触刚度,使机床最大变形量减小至 3.65 μm 。张彬、杨辉^[4]通过调整机床配重的布局和支撑点的位置来降低床身弹性变形对导轨精度的影响。Fei Ding^[5]采用一种确定性控制器设计方法来排除与控制器整定相关的不确定性,得到了基于被控对象和扰动模型的最小定位误差的控制律。Dumanli^[6]利用线性二次调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)实现极点和零位控制器的最优配置,实现了更高带宽的主动阻尼。Padilla^[7]提出多目标动态协同优化方法,完成交流伺服电机硬

件选型与控制器参数整定。Liu^[8]等提出了一种面向 MIMO 精密运动平台的数据驱动解耦矩阵在线校准方法,并在超精密晶圆台实验中验证了该方法对轴间耦合抑制和控制精度提升的有效性。Feng^[9]等针对压电纳米定位平台中的弱阻尼谐振、负载变化和高精度跟踪需求,比较了积分谐振控制、 H_∞ 控制和正位置反馈控制方法。方馨^[10]等针对永磁直线同步电机中的模型不确定性、负载扰动和参数摄动等问题,提出了基于扰动观测器的高阶非奇异快速终端滑模控制方法。

上述研究大多数基于超精密机床的机械结构参数分析了其对超精密机床的动态性能影响。然而,针对运动控制参数对设备的影响研究大多数都集中在单轴控制或局部控制性能优化分析,很少有针对整个设备动态性能展开研究的,超精密机床闭环控制的动态性能是影响加工质量和加工效率的重要因素。很小的参数波动都会影响多轴联动超精密机床的运动精度。为了较为准确地在设计阶段完成超精密机床控制系统的硬件参数的确定,本文针对多轴联动超精密机床控制系统硬件的伺服频率对设备性能的扰动影响进行深入探究,得出最优伺服频率参数,为超精密机床伺服系统硬件的参数设计、设备性能优化提供重要的理论依据。

2 理论分析

2.1 交流伺服系统基本组成

超精密机床伺服控制系统的结构组成如图 1 所示。其控制结构包括电流控制模块、速度控制模块、位置控制模块、功率驱动模块、位置反馈模块、电流反馈模块、速度反馈模块以及电机模块等。

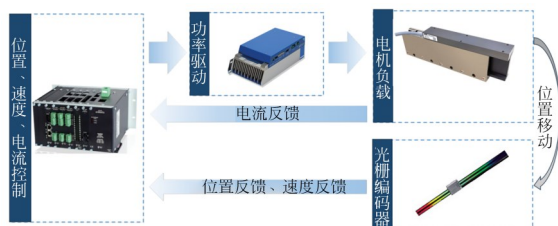


图 1 超精密交流伺服系统的基本组成

Fig. 1 Basic composition of ultra-precision AC servo system

目前超精密机床普遍应用的伺服系统控制结构如图 1 所示,位置环接收外部给出的位置和速度指令,与电机光栅的位置和速度信号比较,经过比例、积分等控制环节,生成转矩电流指令,电流环接收电流指令,与电机反馈的三相电流经过矢量变换得到的 d 轴、 q 轴电流比较,经过电流环的控制环节,生成 d 相、 q 相电压指令,经过矢量变换得到三相电压指令,生成对应的三相脉宽调制信号,控制逆变器在电机三相定子线圈上施加相应的电压波形,产生三相电流,驱动电机。为了抑制电流噪声,可以采取提高电流环采样和运行频率的方式,由于芯片处理能力有限,硬件架构使用分层控制时序约束,位置环与电流环存在固有时序层级差异,难以实现完全同频同步更新,另外位置环运行周期长也能适当提高速度反馈的分辨率。因此,目前交流伺服系统普遍采用位置环和电流环不同步的运行方式,位置环的控制周期是电流环的数倍。目前,最先进的伺服系统电流环控制周期最短能达到十微秒以内,国外一般做到几十微秒,而速度环和位置环处理周期最短分别达到上百微秒和几百微秒,而国内一般能做到几百微秒甚至几毫秒。

2.2 伺服系统三环之间的频率关系

伺服系统通常采用三环控制结构,包括电流

环、速度环和位置环,其中电流环处于最内环,位置环处于最外环。这三个环的控制频率取决于它们所在环中的位置,即越靠内的环,要求的频率越高。在力矩控制模式下,驱动器只需在电流环下工作;在速度控制模式下,驱动器需要同时使用电流环和速度环;而在位置控制模式下,驱动器需要三个环的协同控制。因此,位置环的频率决定了速度环的频率,而速度环的频率则决定了电流环的频率。

在需要提高运动精度时,对于位置环频率的要求也随之增加,因此位置环的频率是由系统特性所确定的。理论上,三个环的控制频率越高越有利,但高频率受到硬件计算能力的限制。由采样定理可知,采样频率至少为原信号频率的 2 倍才能满足要求。因此在实际超精密机床控制系统的应用过程中,一般电流环与位置环的频率关系为:

$$f_i = 4f_p, \quad (1)$$

其中: f_i 为电流环频率; f_p 为位置环频率。

本文为了更好地定量研究超精密机床控制系统特性参数对设备性能的影响,以最外环位置控制周期作为伺服频率研究变量,并在仿真和实验过程中保持电流环参数、PWM 参数与机械运动等参数一致,仅改变位置环伺服更新周期,尽可能降低其他参数变化对实验结果的影响。

2.3 伺服频率与电机电流、推力关联性

一般情况下超精密机床的电流环频率为其伺服频率的四倍,这样不会导致电流环执行步缺失。如图 2 所示,较高的伺服频率会带来更高的

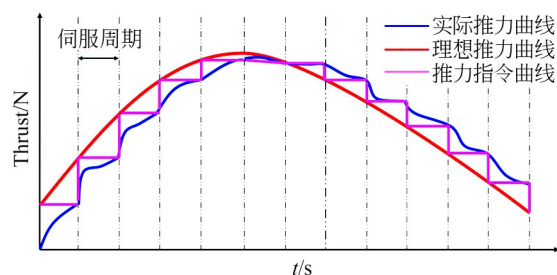


图 2 伺服频率控制下推力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thrust under servo frequency control

电流环频率,从而会使得实际推力曲线的波动更小,使得伺服系统控制的位置以及速度能够精准保持。

随着伺服频率的增加,速度环和位置环的响应频率也随之提高。在超精密机床中,随着执行频率的增加,电机的电流和推力指令的阶跃会减小,使得理想推力曲线与实际推力曲线更加接近,从而减小推力冲击与电机机械振动。因此,较高执行频率的伺服频率有助于提高电机的精度和稳定性。

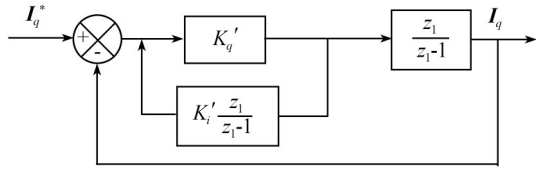


图3 电流环控制框图

Fig. 3 Current loop control block diagram

图3所示为电流环的传递函数:

$$G_I(z_1) = \frac{(K_p' + K_i')z_1^2 - K_p'z_1}{(K_p' + K_i' + 1)z_1^2 - (K_p' + 2)z_1 + 1}, \quad (2)$$

其中: K_p' 为电流环的比例系数 (S^{-1}); K_i' 为电流环积分系数 (S^{-1}); z_1 为离散时间因子 ($z_1 = e^{sT_1} = e^{j\omega T_1}$); s 为连续域拉普拉斯算子; ω 为连续频率; T_1 为电流环采样周期。

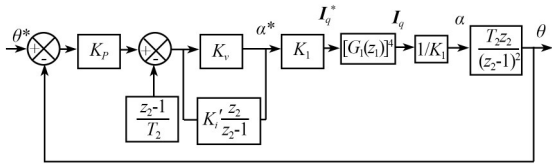


图4 交流永磁同步电机的伺服系统控制框图

Fig. 4 Servo system control block diagram of AC PMSM

图4为整个交流伺服系统的离散控制模型,推导出位置环的开环传递函数为:

$$G_m(z_1, z_2) = \frac{T_2 K_p [(K_v + k_i)z_2^2 - K_v z_2]}{z_2^3 - 3z_2^2 + 3z_2 - 1} \cdot [G_I(z_1)]^4, \quad (3)$$

其中: $n=4$ 为伺服周期对电流环周期的倍数; K_p

为位置环比例系数 (S^{-1}); K_v 为速度环比例系数 (S^{-1}); k_i 为速度环积分系数 (S^{-1}); z_2 为离散时间因子,对应伺服周期 T_2 。

直线电机电磁推力:

$$F_e = K_f i_q, \quad (4)$$

其中: F_e 为电磁推力 (N); K_f 为推力系数; i_q 为 q 轴电流。

设电流指令为 I_q^* , 实际电流为 I_q , 则闭环传递函数:

$$G_I(z_1) = I_q / I_q^*. \quad (5)$$

又电流波动定义为实际电流与理想电流的差值:

$$\Delta I(z) = I_q^* - I_q = [1 - G_I(z_1)] I_q^*. \quad (6)$$

同理, 推力波动值:

$$\Delta F(z) = K_f \Delta I(z). \quad (7)$$

因此, 波动幅值与误差传递函数 $E(z_1) = 1 - G_I(z_1)$ 的幅值成正比。

在低频段 $\omega \ll 1/T_i$, $E(z_1) \approx 0$; 但在高频段 $\omega = \pi/T_i$, 由于采样保持效应和计算延迟, $E(z_1)$ 会增大。

对于一阶对象, 闭环带宽与采样周期无关, 但离散化引入的相位滞后与 T_i 成正比。当伺服频率降低 (T_i 增大) 时, 在相同指令频率 ω 下, $E(z_1)$ 会显著上升。

由式(3)推导可得:

$$G_m(z_1, z_2) = \frac{T_2 K_p [(K_v + k_i)z_2^2 - K_v z_2]}{(z_2 - 1)^3} \cdot [G_I(z_1)]^4. \quad (8)$$

为了分析电流/推力波动, 需考虑电流环本身。但 $G_m(z_1, z_2)$ 的分母为 $(z_2 - 1)^3$, 在 $z_i = e^{j\omega T_i}$ 附近展开:

令:

$$z_i = e^{j\omega T_i} \approx 1 + j\omega T_i - \frac{1}{2} \omega^2 T_i^2 + \dots, \quad (9)$$

则:

$$z_i - 1 \approx j\omega T_i - \frac{1}{2} \omega^2 T_i^2, \quad (10)$$

于是:

$$(z_i - 1)^3 \approx (j\omega T_i)^3 \left(1 - \frac{3}{2} \frac{\omega T_i}{j} + \dots \right). \quad (11)$$

因此位置环开环增益的幅值:

$$|G_m(z_1, z_2)| \approx \frac{T_i K_P \cdot |k_i| e^{-j\omega T_i}}{|z_i - 1|^3} \approx \frac{T_i K_P |k_i|}{\omega^3 T_i^3} = \frac{K_P |k_i|}{\omega^3 T_i^2} \quad (12)$$

由式(12)可以得出,在固定指令频率 ω 下,位置环开环增益与 T_i^2 成反比,即与伺服频率的平方成正比,因此伺服频率与电机的电流波动以及推力波动成反比,伺服频率越小,电机的电流与转矩波动越明显。

从上述分析中可以得出较低的伺服频率会给超精密机床的永磁同步电机带来更高的电流与推力波动,从而会导致电机内部的振动和噪声,同时也会影响电机速度控制的精度与稳定性。因此较高的伺服频率可以有效提高超精密机床的速度精度与工作稳定性,从而有效提升设备性能。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真模型

为进一步说明不同的伺服频率对超精密机床交流永磁同步电机动态性能的影响,本文根据下图所示的控制模型设计了软件仿真系统平台,验证了不同伺服频率下交流伺服系统的控制效果。

仿真模型的搭建目的是得出伺服频率对设

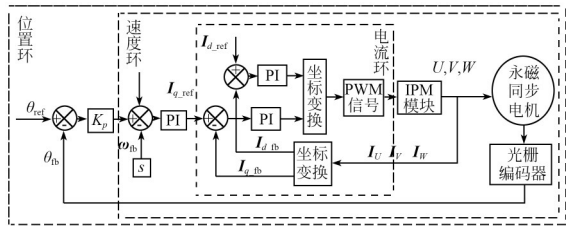


图 5 超精密机床交流伺服模型

Fig. 5 AC servo model of ultra-precision machine tool

备性能的影响趋势,超精密机床为直驱结构,交流永磁同步电机作为超精密机床的运动执行部件,在相同的硬件环境下,电机性能可以直接反映出超精密机床的设备性能。本次仿真基于北京航空精密机械研究所已有的硬件平台,对超精密机床的控制系统仿真到交流永磁同步电机。仿真系统中包含交流永磁同步电机、光栅、位置环、速度环与电流环,由于仿真只仿真到控制系统中的位置环,因此在仿真中设定位置环频率为伺服系统的伺服频率。为了更加准确地得出伺服控制系统中的伺服频率对超精密机床的影响,本次仿真在模型PWM命令前添加硬件性能模块(通信时延、死区、饱和和高频抖动),在电机的速度输出后添加机床综合误差模块(导轨等效阻尼、导轨模态、多轴耦合、摩擦和热漂移等参数)。综上,得到了超精密机床永磁同步电机的仿真总模型如图6所示。

仿真模型的主要参数如表1所示。

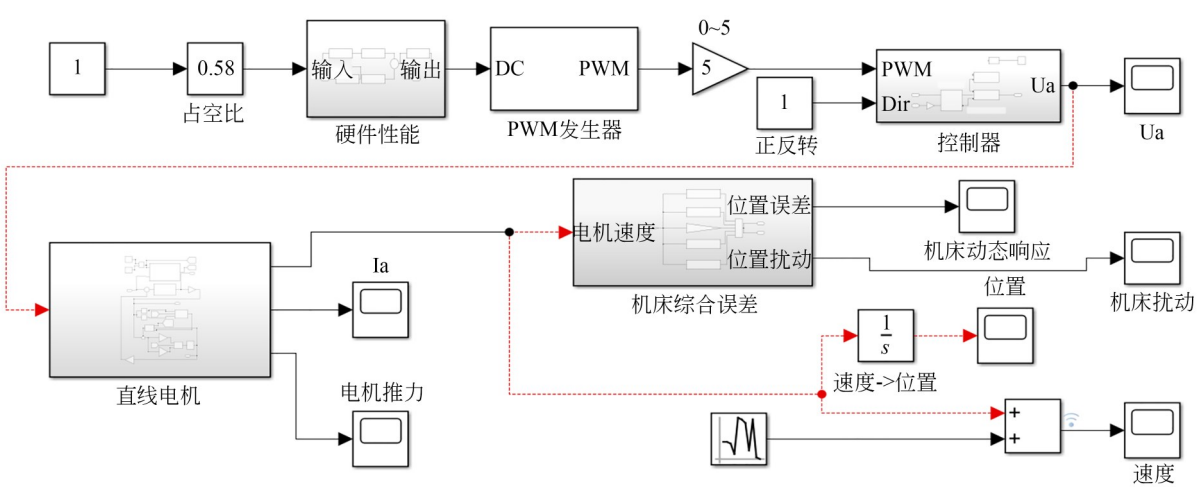


图 6 仿真模型

Fig. 6 Simulation model

表 1 仿真模型主要参数		
Tab. 1 Main Simulation Model Parameters		
参数名称	数值	单位
直流母线电压	48	V
推力系数	1	N•m/A
反电势系数	1	V/(rad/s)
电流环比例系数	0.45	—
电流环积分系数	120	s ⁻¹ -1}
位置环比例系数	35	—
位置环积分系数	0	s ⁻¹ -1}
计算延时	2.5×10 ⁻⁵	s
驱动死区宽度	由驱动器整定获得	占空比
液体静压导轨刚度	实验平台标定	N/m
液体静压导轨阻尼	实验平台标定	N•s/m
运动部件质量	45	kg

3.2 仿真结果

由于本次实验所用的 Power-UMAC 控制器的最高电流环频率不高于 40 kHz,目前超精密机床电流环频率常用的配置为 16 kHz,电流环频率需高于伺服频率,在本次仿真实验中需要控制变量,根据以上限制设定多组伺服频率与电流环频率进行控制仿真,仿真中的电流环频率与伺服频率的设置如表 2 所示(本次仿真实验通过改变仿

真模型中求解器的步长来实现对伺服频率的改变)。

表 2 伺服频率仿真实验参数	
Tab. 2 Servo cycle simulation experiment parameters(kHz)	
电流环频率	伺服频率
16	2.5
16	5
16	7
16	7.5
16	8
16	8.5
16	10

仿真中,由于交流永磁同步电机存在负载以及齿槽效应,在前期仿真分析过程中,本文对不同幅值的扰动切削力进行了对比仿真,以模拟实际加工过程中切削力幅值变化对系统动态性能的影响。结果表明,不同的切削力矩变化只影响速度波动的幅值,对仿真结果的整体趋势没有影响,因此在仿真阶段只选取了频率为 1 kHz,负载为 1 N 的恒定电机负载扰动(通过增加一个扰动模块来实现)。在相同的扰动下对不同伺服频率参数设定的控制模型进行匀速指令的控制仿真,仿真结果如图 7 所示。

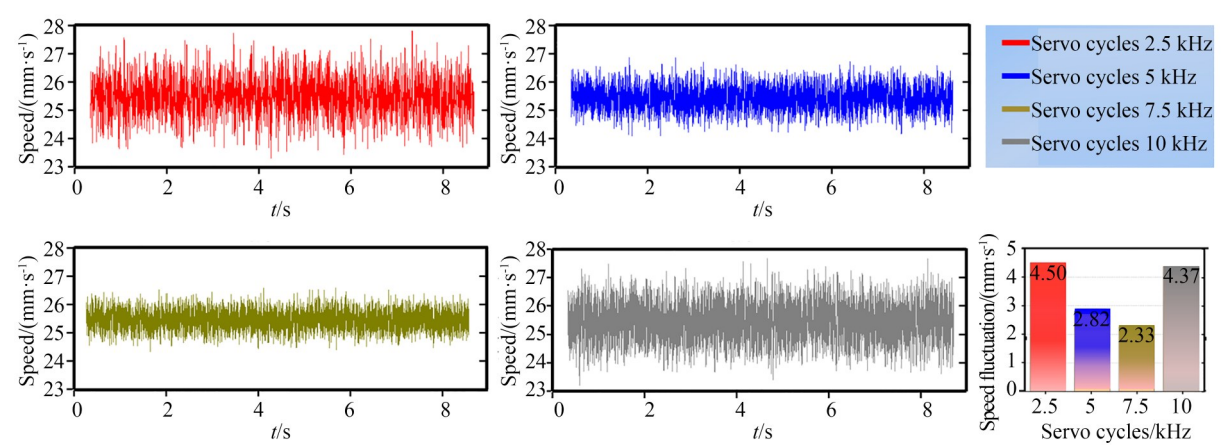


图 7 不同伺服频率下的速度波动
Fig. 7 Speed fluctuation under different servo cycles

从图中可以看出,在 1 N,1 kHz 的推力扰动下,不同伺服频率对应的匀速阶段速度波动幅值存在明显差异。当伺服频率分别为 2.5 kHz,5

kHz,7.5 kHz 和 10 kHz 时,电机匀速阶段的速度波动值分别为 4.50 mm/s,2.82 mm/s,2.33 mm/s 和 4.37 mm/s。在 2.5~7.5 kHz 的伺服频

率范围内,频率每升高 2.5 kHz,其速度波动值分别降低 37%,17%。达到 10 kHz 后,速度波动值相较于 7.5 kHz 升高了 88%。这说明较高的伺服频率可以有效抑制外来扰动对电机速度稳定性的影响,但是随着硬件性能的限制,伺服频率超过 7.5 kHz 后,电机的速度稳定性明显变弱。

上述仿真结果反映了伺服频率对电机速度

稳定性的影响趋势,但仅依据 2.5 kHz,5 kHz,7.5 kHz 和 10 kHz 四组参数尚不足以准确确定最优伺服频率。为进一步细化最优频率区间,在 7.5 kHz 附近补充设置了 7 kHz,8 kHz 和 8.5 kHz 三组伺服频率参数,并开展进一步仿真分析,以获得更精确的伺服频率优化结果。相应仿真结果如图 8 所示。

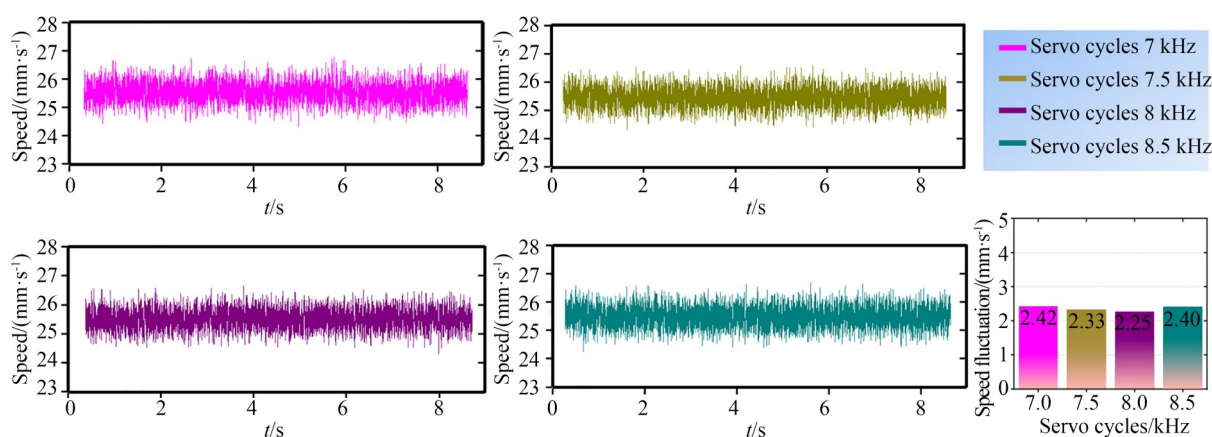


图 8 不同伺服频率下的速度波动

Fig. 8 Speed fluctuation under different servo cycles

从图中可以看出,在 1 N,1 kHz 的推力扰动作用下,当伺服频率分别为 7 kHz,7.5 kHz,8 kHz 和 8.5 kHz 时,匀速阶段速度波动值分别为 2.42 mm/s,2.33 mm/s,2.25 mm/s 和 2.40 mm/s。结果表明,在 7~8 kHz 范围内,随着伺服频率提高,系统对外部扰动的采样与修正能力增强,速度反馈更新更加及时,电机速度波动逐渐减小;当伺服频率提高至 8.5 kHz 时,速度波动反而增大,说明系统性能在 8 kHz 附近出现拐点。

该现象主要与伺服控制硬件链路的非理想特性有关。实际伺服闭环过程由编码器采样、控制器运算、总线通信、驱动器响应及功率器件开关等环节共同组成,并非理想的瞬时反馈过程。随着伺服频率升高,单个控制周期显著缩短,计算延时、通信延时、PWM 更新延时、驱动器死区时间和采样保持延时在控制周期中所占比例增加。即使各环节绝对延时基本不变,其相对于控制周期的等效相位滞后也会增大,从而降低闭环系统稳定裕度。此外,当伺服更新频率过高时,功率驱动器的死区补偿误差、开关器件有限响应速度、电流采样同步误差以及母线电压波动等因

素更加突出,使实际输出电压与控制器期望电压之间产生偏差^[11]。该偏差会引入占空比失真和低频扰动,并可能激发液体静压导轨、主轴及机械传动链的局部模态,进而放大机床运动误差^[12]。

因此,8 kHz 为该伺服系统的综合性能临界频率。在 8 kHz 以下,采样频率提高带来的控制精度提升占主导作用;而 8 kHz 以上,通信延时、计算延时、驱动器死区、PWM 非线性和硬件抖动等非理想因素开始占主导作用,导致速度波动重新增大。

4 实验分析

4.1 跟随误差与重复定位精度

液体静压导轨是超精密机床的重要运动执行部件,各个轴的动态精度直接影响着超精密机床的设备性能。重复定位精度作为气体静压主轴与液体静压导轨的重要精度指标,通常用来描述在相同的运行条件下多次运动定位误差的最大范围。伺服轴多次运动的位置精度直接影响

设备的加工性能,对加工产品表面质量的可重复性有着最为直接的影响。重复定位精度是目前超精密机床行业内广泛认可的,用来表征超精密机床运动精度的关键参数^[13]。因此本研究将重复定位精度作为设备性能的验证指标。

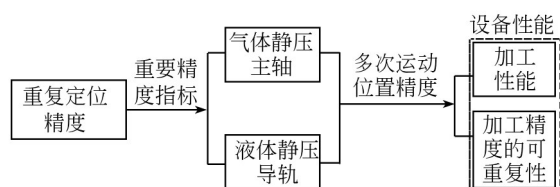


图9 重复定位精度与设备性能之间的关系

Fig. 9 Relationship between repetitive positioning accuracy and machine tool performance

为了确定不同伺服频率下多轴联动超精密机床的静态稳定性,以超精密机床直线轴的跟随误差作为超精密机床静态稳定性的指标。由仿真实验得出设备性能与运动轴的速度波动有着直接关系,所以本次实验添加了跟随误差实验,具体实验方法如下。

(1) 跟随误差检测

利用超精密机床液体静压导轨的光栅尺对其跟随误差进行检测,本次实验采用光栅尺确定电机的实际位置与指令位置并进行差值比较,其主要基于莫尔条纹细分的原理,当光栅尺上的光栅条纹与另一个光栅尺的条纹同步移动时,相对位置的微小变化会引起光束的微小偏移,这些偏移被读数头捕捉并转化为电信号。通过测量电信号的变化,可以获得相对运动的位置等信息。光栅尺由光栅、读写头、信号处理电路等组成,读数头将光线反射到信号处理电路中,电路将信号处理为数字信号,经过放大后输出。光栅尺的分辨率取决于栅距的大小和读数头的细分能力,本实验中采用的光栅尺栅距为 $4\text{ }\mu\text{m}$,经过 65 536 倍细分,可以达到 0.061 nm 的分辨率。

(2) 直线轴重复定位精度检测

搭建的超精密机床直线轴静态稳定性测试平台如图 10 所示,包括液体静压导轨、Power-UMAC 运动控制器、传感器和数据采集系统等。

与上节中机床直线轴运动误差检测及补偿原理相同,由于本次实验所使用的平台为北京航空精密机械研究所自研的 Nanosys-T300 平台,

其导轨的有效行程为 250 mm ,所以本次测量长度为 200 mm ,往返测量三次,测量 0 mm , 50 mm , 100 mm , 150 mm , 200 mm 共 5 个点,测量轨迹如图 11 所示。

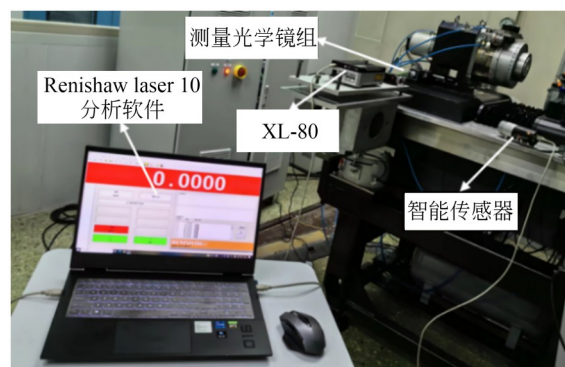


图10 液体静压导轨定位精度测量

Fig. 10 Positioning accuracy measurement of linear guideway

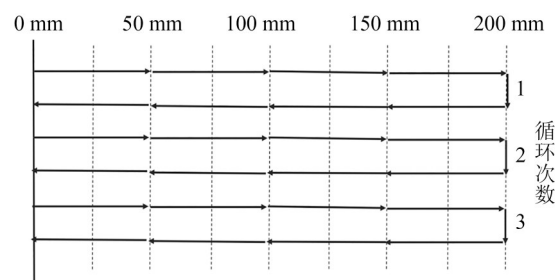


图11 200 mm 直线导轨重复定位精度循环测量图

Fig. 11 Cyclic measurement of repetitive positioning accuracy for 200 mm linear guideway

4.2 实验结果

不同伺服频率相同电流环频率 (16 kHz) 的效果主要验证以下两方面:跟随误差和重复定位精度。实验过程中保证实验平台在相同的实验环境和工况下,通过改变运动控制器的伺服频率来验证其对超精密机床设备性能的影响效果。

(1) 跟随误差实验结果

为了验证仿真实验结果,本节将以跟随误差作为验证仿真结果的一个指标,通过改变运动控制器的伺服频率,使用直线导轨上的光栅尺对跟随误差进行测量,测量结果如图 12 所示。

从图中实验结果可以看出,当伺服频率处于 $2.5\sim 7.5\text{ kHz}$ 范围内时,实验平台直线导轨的跟随误差随伺服频率升高而逐渐减小。伺服频率每升高 2.5 kHz ,实验平台直线导轨跟随误差降

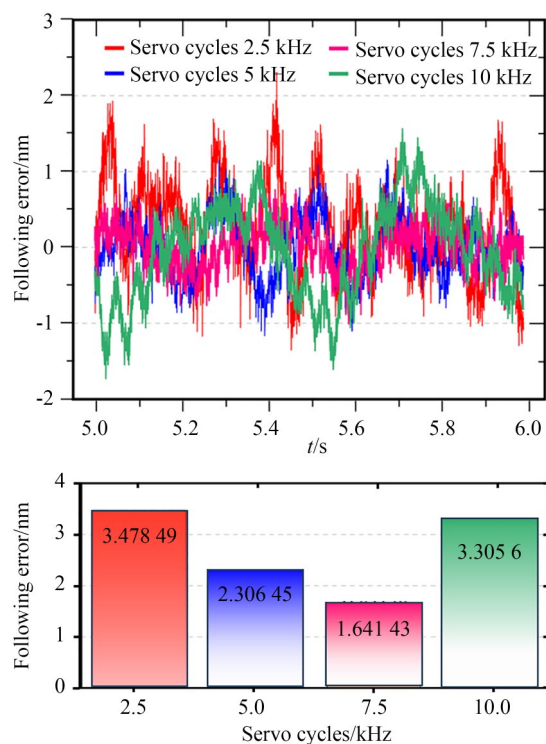


图 12 不同伺服频率下直线导轨的实际跟随误差曲线

Fig. 12 Actual following error curves of linear guideway under different servo frequencies

幅分别为 34%, 28%, 当伺服频率进一步提高至 10 kHz 时, 直线导轨跟随误差反而明显增大, 甚至高于 5 kHz 条件下的跟随误差, 与仿真结果趋势基本一致。为进一步增强最优参数判定的可靠性, 本文通过增加局部频率采样点, 提高了最优频率区间附近的数据密度, 细化最优频率区间, 在 7.5 kHz 附近补充设置了 7 kHz, 8 kHz 和 8.5 kHz 三组伺服频率参数, 进一步细化跟随误差验证实验, 以获得更精确的伺服频率优化结论。相应仿真结果如图 13 所示。

实验结果表明, 当伺服频率由 2.5 kHz 提高至 8 kHz 时, 直线导轨跟随误差逐渐减小, 说明在该频率范围内, 提高伺服频率能够缩短控制周期, 增强系统动态响应能力和扰动抑制能力, 从而提升轨迹跟踪精度。然而, 当伺服频率超过 8 kHz 后, 跟随误差未继续降低, 反而呈现增大趋势。结合前文分析可知, 过高的伺服频率会增加控制器 CPU 计算负载, 实时任务调度裕量减小, 同时驱动器死区补偿误差、开关器件响应延迟、电流采样同步误差及母线电压波动等非理想因

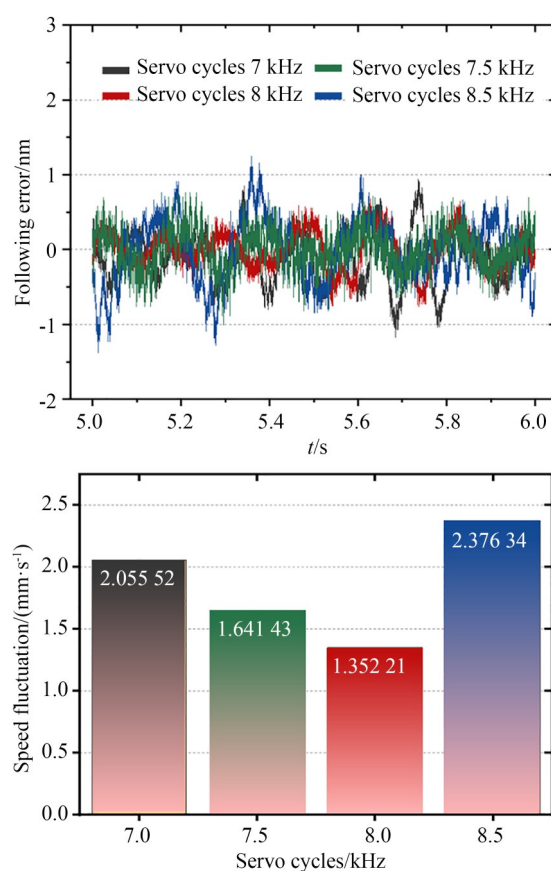


图 13 不同伺服频率下直线导轨的实际跟随误差曲线

Fig. 13 Actual following error curves of linear guideway under different servo frequencies

素在单个控制周期中的影响更加突出, 最终导致系统实际控制性能下降。因此, 综合考虑跟随误差、系统响应能力和运行稳定性, 实验平台的最优伺服频率可确定为 8 kHz。

(2) 直线导轨重复定位精度实验结果

跟随误差实验是为了验证在不同伺服频率下导轨的速度波动, 但是由于其使用的是液体静压导轨上自带的光栅尺进行测量, 所得的实验结果具有一定的局限性, 后续使用 XL-80 激光干涉仪对直线导轨的重复定位精度进行检测, 补充跟随误差实验, 使实验结论更具说服力。实验结果如图 14 所示。

在实验中, 通过设置不同伺服频率进行直线导轨位置控制实验, 并计算得到直线导轨的重复定位精度。当伺服频率为 2.5 kHz, 5 kHz, 7.5 kHz, 8 kHz, 8.5 kHz 和 10 kHz 时, 重复定位精度分别为 2.3 μm , 2.0 μm , 1.5 μm , 1.2 μm , 1.6 μm 和 2.4 μm 。需要说明的是, 本次测试结果均为裸

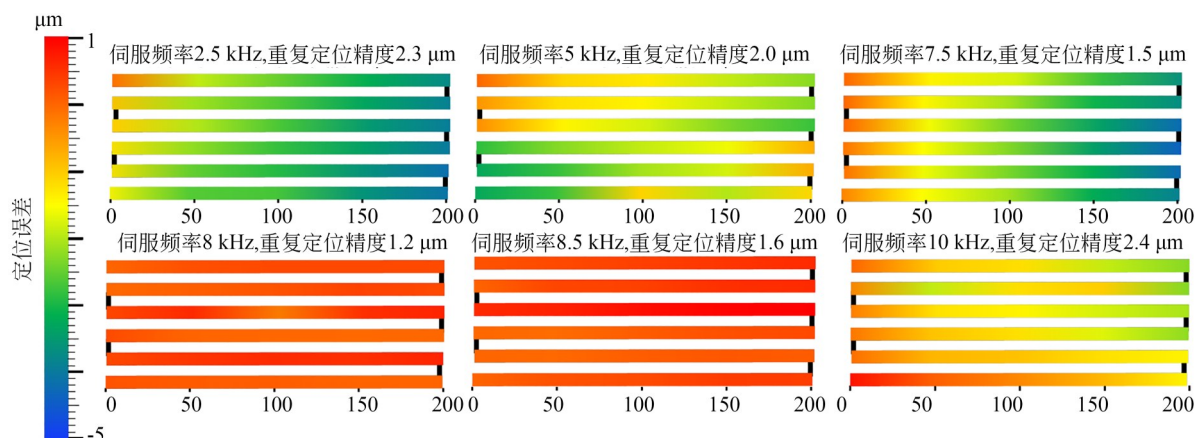


图 14 不同伺服频率下直线导轨的重复定位误差

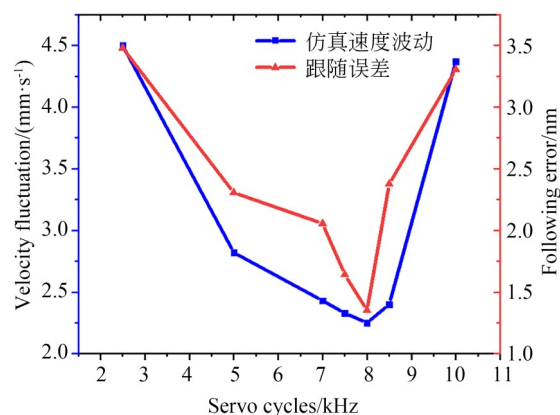
Fig. 14 Repetitive positioning error of linear guideway under different servo frequencies

检数据,未进行误差补偿,因此测量数值相对偏大,但不影响不同伺服频率下重复定位精度变化趋势的判断。实验结果表明,当伺服频率处于 2.5~8 kHz 范围内时,直线导轨的重复定位误差随伺服频率升高而逐渐减小,当伺服频率在 2.5~7.5 kHz 范围内时,伺服频率每升高 2.5 kHz,直线导轨的重复定位误差降幅分别为 13%,25%,与仿真结果的降幅基本相同。由此可得,伺服频率越高,液体静压导轨的重复定位精度越高,设备性能越好。但是在伺服频率超过 8 kHz 时,跟随误差明显增大,因此在综合考虑控制器硬件性能的前提下,尽量使系统保持高伺服频率运行,使得超精密机床拥有良好的响应速度,因此,伺服频率 8 kHz 时重复定位精度最优。

4.3 最优伺服频率的选择

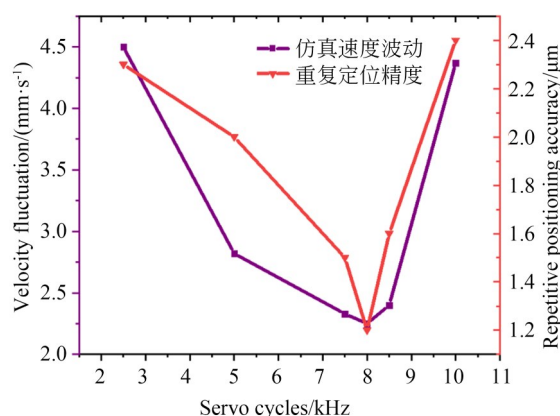
目前超精密机床的运动控制器基本上都是全数字控制,其控制系统的性能和控制周期之间存在密切的关联,而在大多数的伺服控制系统中,各个伺服系统环节的控制周期都是固定的,并且这些周期在底层软件中被固化,一旦出厂后就无法进行修改。但是对于 Power-UMAC 运动控制器,其电流环频率与伺服频率都是可以更改的,为本次实验的可行性奠定了基础。本节通过仿真结果与实验数据得出如图 15 所示的不同伺服频率下超精密机床速度的波动值与跟随误差、重复定位精度之间的关系。

由仿真结果与实验数据进行比对可得,伺服频率与超精密机床的速度波动值、跟随误差、以及重复定位精度之间均成反比关系,且其在 0~



(a) 速度波动与跟随误差

(a) Velocity fluctuation and following error



(b) 速度波动与重复定位精度

(b) Velocity fluctuation and repetitive positioning accuracy

图 15 不同伺服频率下的仿真结果与实验数据

Fig. 15 Simulation results and experimental data under different servo frequencies

10 kHz 的频率区间内线性拟合斜率近似,为了验证速度波动值与跟随误差、重复定位精度之间的线性相关度,将实验数据代入到式(13)中:

$$\rho_{xy} = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (13)$$

其中: x_i 为仿真速度波动值; y_i 为跟随误差与重复定位精度; $\bar{X}$, $\bar{Y}$ 为两组数据的平均值; n 为样本数量; ρ_{xy} 为相关系数。

接近 1: 强正相关; 接近 -1: 强负相关; 接近 0: 无线性相关。数据代入式(5)得到: 在 0~10 kHz 的范围内速度波动值与跟随误差以及重复定位精度之间的线性相关度分别为 0.934, 0.919。由于其大于 0.9, 所以它们之间存在显著的相关性。

通过综合考虑仿真结果、位置实验结果以及线性相关度, 实验结果与仿真结果存在显著的相关性, 超精密机床的设备性能在 0~8 kHz 频率范围内随着伺服频率的增大而显著增强, 但是当伺服频率高于 8 kHz 时, Power-UMAC 运动控制器的等效相位滞后也会增大, 闭环系统稳定裕度降低, 因此多轴联动超精密机床若选择同类型超精密数控系统配置, 则最优参数应选择在 8 kHz。

4.4 不同伺服频率控制下的切削验证实验

本文研究对象面向多轴联动超精密机床控制系统, 但为准确分析伺服频率对系统动态响应和定位精度的影响规律, 仿真与位置实验阶段采用单轴直线导轨独立位置控制模式进行研究。其主要原因在于, 多轴联动工况下系统性能同时受到轴间耦合误差、轨迹规划以及各轴机械动态特性差异等因素影响, 难以单独剥离伺服频率这一变量对系统性能的作用。因此, 本文首先在单轴条件下开展伺服频率影响机理分析和参数优化, 以保证实验变量的独立性和结论的可靠性。在此基础上, 进一步通过多轴联动加工实验验证优化伺服频率在实际超精密加工中的工程有效性。

由于镍及镍合金具有机械强度大、塑性良好等性能, 所以其广泛应用于航空航天、电子工

业、注塑模具等领域。纯镍的机械性能如表 3 所示, 对纯镍材料的加工能够很好地反应设备的加工性能, 可以比较完整地反应加工过程中的设备缺陷^[14], 所以本研究通过对纯镍工件的加工实验验证超精密机床控制系统最优参数的有效性。

表 3 纯镍的机械性能

Tab. 3 Mechanical properties of pure nickel

性能	数值
抗拉强度 $\sigma_b / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	50~90
伸长率 $\delta / \%$	2~20
布氏硬度 $HB / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	120~240

采用本次研究所搭建的超精密实验平台, 运动控制器采用的是 Power-UMAC 运动控制器, 设置其伺服频率为 5 kHz, 8 kHz; 在 $23 \pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的环境下进行镀镍工件的加工工艺实验, 如图 16 所示。

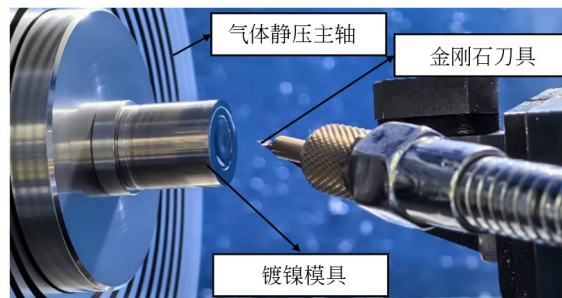


图 16 工艺实验加工过程

Fig. 16 Machining process of process experiment

采用的加工工艺参数(主轴转速 1 300 r/min, 进给量 $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$, 背吃刀量 $1 \mu\text{m}$)使用不同伺服频率控制下的超精密机床对单晶镍样件进行单点金刚石车削。通过下图所示的白光干涉仪与日本松下公司所产的 UA3P 对加工工件的表面质量进行测量^[15]。

从图 18 可以看出, 在不同伺服频率条件下, 加工表面刀纹分布存在明显差异。与 5 kHz 条件相比, 8 kHz 条件下加工表面的刀纹明显减少, 表面形貌更加均匀。采用白光干涉仪对不同伺服频率下加工获得的单晶镍表面进行检测, 结果表明: 当伺服频率为 8 kHz 时, 工件表面 S_a 为 4.6

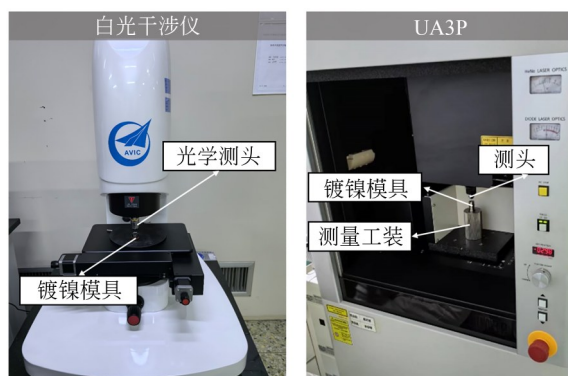


图 17 测量设备

Fig. 17 Measuring equipment

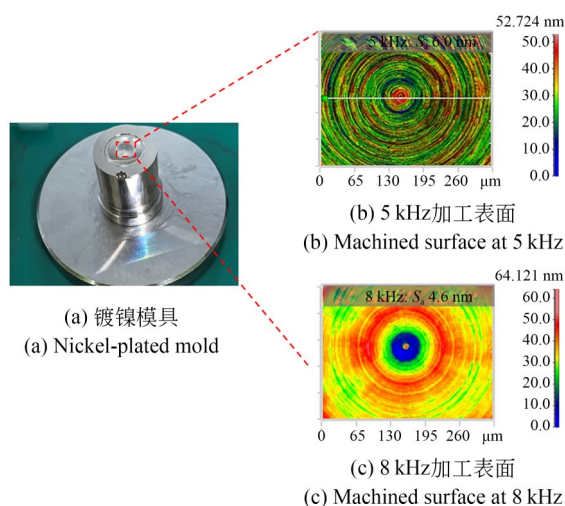


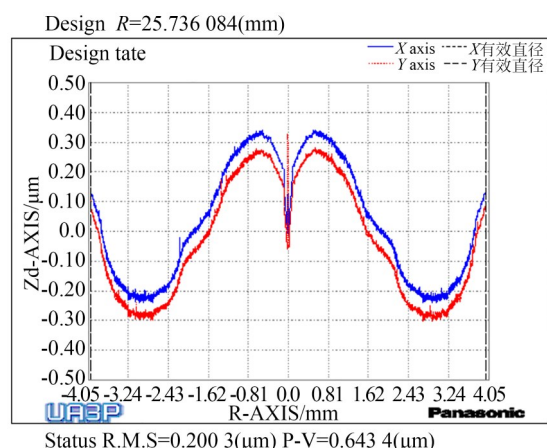
图 18 优化控制参数下单晶镍已加工表面

Fig. 18 Machined surface of single crystal nickel with optimized control parameters

nm;伺服频率为 5 kHz 时,工件表面 S_a 为 6.0 nm。相比于 5 kHz 条件,8 kHz 条件下加工表面 S_a 降低约 23.3%。

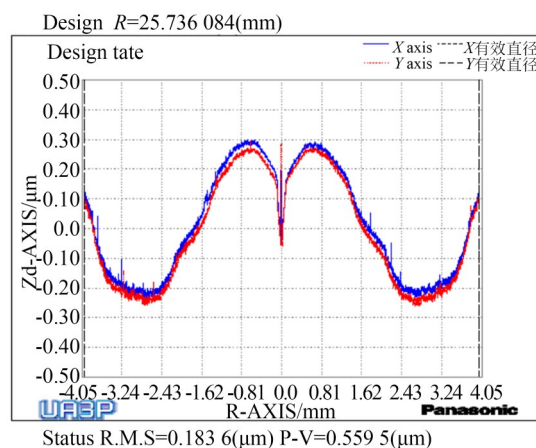
在最优的伺服频率为 8 kHz 的控制条件下,加工出的单晶镍表面 P-V 值为 0.559 5 μm ;非最优伺服频率为 5 kHz 时,单晶镍表面的 P-V 值为 0.643 4 μm 。与 5 kHz 条件相比,8 kHz 条件下加工表面的 P-V 值降低约 13.0%。

由工艺加工实验可以看出,8 kHz 伺服频率对应的加工效果优于 5 kHz,说明较优伺服频率可在一定程度上减小系统等效相位滞后,改善轨迹跟随性能,并进一步提升超精密切削加工表面质量。因此,优化伺服频率对于提高多轴联动超精密机床的动态响应能力及加工表面质量具有积极作用。



(a) 伺服频率为 5 kHz 的 P-V 值 0.643 4

(a) P-V value of 0.643 4 at a servo frequency of 5 kHz



(b) 伺服频率为 8 kHz 的 P-V 值 0.559 5

(b) P-V value of 0.559 5 at a servo frequency of 8 kHz

图 19 UA3P 检测结果

Fig. 19 UA3P measurement results

5 结 论

本文建立了基于仿真与实验相结合的伺服频率匹配与性能评估方法。通过理论分析和模拟仿真得出伺服频率对超精密机床动态性能的影响机理和规律,通过在不同伺服频率下进行超精密机床导轨位置控制实验的验证,最终得出结论如下:

(1) 根据多轴联动超精密机床的控制系统特性建立了超精密机床交流伺服控制系统的数学模型,通过单一控制变量法调整伺服系统中的伺服频率,研究其与输出电流波动、推力波动以及速度波动之间的影响关系。在 2.5~8 kHz 之间。

较高的伺服频率可以有效抑制外来扰动转矩的影响。而在 8 kHz 以上,通信延时、计算延时、驱动器死区和硬件抖动等在整个控制周期中所占比例迅速增大,导致速度波动重新增大。

(2)本文通过单一控制变量探究伺服频率对超精密机床稳定性的影响。通过位置控制实验,得出伺服频率越高,设备的响应速度越快,重复定位精度越高。考虑到设备硬件性能的限制,针对基于 Power-UMAC 运动控制器搭建的超精密机床,伺服频率不应超过 8 kHz。对于不同控制系统搭建的超精密机床,其较优伺服频率也可采用本文建立的仿真与实验相结合的伺服频率匹配及性能评估方法开展进一步验证。

(3)综合仿真、实验及相关性分析可知,伺服

频率在 2.5~8 kHz 范围内对系统性能改善显著,其中 8 kHz 综合性能最优。基于该参数开展单晶镍金刚石车削实验,结果表明优化伺服频率可有效改善表面质量,提升多轴联动超精密机床加工性能。

作者贡献声明:

武海亮:论文构思、数据管理、软件、形式分析、调查研究、方法论、验证、可视化呈现、初稿写作、审核与编辑写作;

杨辉:论文构思、获取资助、项目管理、提供资源、指导、审核与编辑写作;

马善意:提供资源、指导、审核与编辑写作;

罗松保:指导与审核;

金盈:验证分析。

参考文献:

- [1] 尹韶辉,张乐贤,陈逢军,等.小口径非球面加工技术及装备综述[J].光学技术,2013,39(2):103.
YIN S H, ZHANG L X, CHEN F J, *et al.* Review of machining technology and equipment for small aspheric surface [J]. *Optical Technique*, 2013, 39(2): 103. (in Chinese)
- [2] 李棋,赵岩,方辉,等.五轴数控刀具磨床有限元分析及结构优化[J].组合机床与自动化加工技术,2023(5):169-173.
LI Q, ZHAO Y, FANG H, *et al.* Finite element analysis and structure optimization of five axis NC tool grinder[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2023 (5): 169-173. (in Chinese)
- [3] 路文文,戚泽海,关佳亮,等.KDP晶体精密机床静动态特性及实验模态分析[J].工具技术,2020,54(8):56-61.
LU W W, QI Z H, GUAN J L, *et al.* Static and dynamic characteristics and experimental modal analysis of KDP crystal in precision machine[J]. *Tool Engineering*, 2020, 54(8): 56-61. (in Chinese)
- [4] 张彬,杨辉.五轴超精密加工机床底座设计技术研究[J].航空精密制造技术,2022,58(2):6-9.
ZHANG B, YANG H. Research on design technology of five-axis ultra-precision machining machine base [J]. *Aviation Precision Manufacturing Tech-*
nology, 2022, 58(2): 6-9. (in Chinese)
- [5] DING F, LUO X C, LI D, *et al.* Optimal controller design for ultra-precision fast-actuation cutting systems[J]. *Micromachines*, 2022, 13(1): 33.
- [6] DUMANLI A, SENCER B. Optimal high-bandwidth control of ball-screw drives with acceleration and jerk feedback[J]. *Precision Engineering*, 2018, 54: 254-268.
- [7] PADILLA-GARCIA E A, RODRIGUEZ-ANGELES A, RESÉNDIZ J R, *et al.* Concurrent optimization for selection and control of AC servomotors on the powertrain of industrial robots[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 27923-27938.
- [8] LIU K X, LIU Y, SONG F Z, *et al.* Data-driven calibration of decoupling matrix for MIMO precision motion stages [J]. *ISA Transactions*, 2024, 150: 223-231.
- [9] FENG H, PANG A P, ZHOU H B. High precision robust control design of piezoelectric nanopositioning platform [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 10357.
- [10] 方馨,王丽梅,张康.基于扰动观测器的永磁直线电机高阶非奇异快速终端滑模控制[J].电工技术学报,2023,38(2):409-421.
FANG X, WANG L M, ZHANG K. High order nonsingular fast terminal sliding mode control of permanent magnet linear motor based on disturbance observer [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(2): 409-421. (in Chinese)

- [11] 王连芳. 电压源型 PWM 逆变器死区效应补偿策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
WANG L F. *Dead-time Compensation Strategy for Voltage-source PWM Inverter* [D]. Jinan: Shandong University, 2008. (in Chinese)
- [12] SONG F Z, LIU Y, XU J X, *et al.* Iterative learning identification and compensation of space-periodic disturbance in PMLSM systems with time delay [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(9): 7579-7589.
- [13] 乔政, 刘玉涛, 吴言功, 等. 辊筒模具超精密机床系统设计与工艺[J]. 光学精密工程, 2018, 26(7): 1661-1671.
QIAO Z, LIU Y T, WU Y G, *et al.* Design and process of ultra-precision drum roll lathe[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(7): 1661-1671. (in Chinese)
- [14] 董晓彬, 周天丰, 庞思勤, 等. 玻璃模压成形用微沟槽磷化镍模具的超精密切削加工[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 2986-2993.
DONG X B, ZHOU T F, PANG S Q, *et al.* Ultraprecision microgroove machining of nickel phosphorous plating mold for glass molding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12): 2986-2993. (in Chinese)
- [15] CHEN F J, YIN S H, HUANG H, *et al.* Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspheric surfaces with on-machine measurement [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(5): 480-486.

作者简介:



武海亮(1999—),男,宁夏吴忠人,助理工程师,2021年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2024年于北京航空精密机械研究所获得硕士学位,主要从事超精密加工设备的控制系统研究。E-mail:1159198036@qq.com

通讯作者:



杨辉(1967—),男,浙江宁波人,博士,研究员,航空工业集团首席专家,1989年、1992年、1999年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位。主要研究方向:超精密加工机理、超精密加工工艺、超精密加工设备及其基础元部件集成技术。E-mail: yangh050@avic.com

通讯作者:



马善意(1997—),男,广西南宁人,博士研究生,2019年于华北电力大学获得学士学位,2022年于北京航空精密机械研究所获得硕士学位,现就读于华中科技大学,主要研究方向:难加工材料能场辅助超精密加工、脆性材料椭圆振动切削机理、多能场辅助超精密制造装备。E-mail:857436391@qq.com