

引文格式: 李忠群, 朱思佳, 丁鹏, 等. 机床进给系统控制器参数自整定研究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(18): 25020184.

LI Zhongqun, ZHU Sijia, DING Peng, et al. Research on controller parameters self-tuning of machine tool feed system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(18): 25020184.

机床进给系统控制器参数自整定研究

李忠群¹, 朱思佳^{1,2}, 丁 鹏¹, 沈群利¹, 范海路¹, 吴文镜³

(1. 湖南工业大学机械工程学院, 株洲 412007;

2. 北京航空航天大学江西研究院, 南昌 330200;

3. 高端重载机器人全国重点实验室, 顺德 528308)

[摘要] 数控机床是航空制造等精密加工领域的核心装备, 其进给伺服系统的动态特性直接决定加工精度。针对传统参数整定依赖经验, 难以兼顾快速性与平稳性的问题, 本文提出一种融合分阶段混合辨识与自适应遗传算法 (Adaptive genetic algorithm, AGA) 的协同优化策略。首先建立进给伺服系统模型, 采用频域最小二乘法为自适应扩展卡尔曼滤波提供高精度初值, 使参数辨识拟合优度提升至 0.99, 为控制器优化奠定准确模型基础。基于该模型, 利用 AGA 多目标寻优能力对归一化代价函数进行全局搜索, 系统协调快速性与平稳性的矛盾。经试验验证, 该方法在单轴往复运动中可完全消除超调, 并将调节时间缩短 5.5%, 在多轴联动轮廓加工中, 能使系统双轴最大轮廓误差、均方根误差和平均误差分别降低 68.75%、76.19% 和 77.42%, 具有良好的工程适用性。

关键词: 进给伺服系统; 分阶段混合辨识; 三环控制; 自适应遗传算法; 参数自整定

中图分类号: V26; TM359.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.25020184

Research on Controller Parameters Self-Tuning of Machine Tool Feed System

LI Zhongqun¹, ZHU Sijia^{1,2}, DING Peng¹, SHEN Qunli¹, FAN Hailu¹, WU Wenjing³

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2. Jiangxi Research Institute of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Nanchang 330200, China;

3. National Key Laboratory of High-End Heavy-Duty Robots, Shunde 528308, China)

[ABSTRACT] CNC machine tools are the core equipment in the field of precision machining such as aerospace manufacturing. The dynamic characteristics of its feed servo system directly determine the machining accuracy. Aiming at the problem that traditional parameter tuning relies on experience and is difficult to balance rapidity and stability, a collaborative optimization strategy combining staged hybrid identification and the adaptive genetic algorithm (AGA) is proposed. Firstly, the feed servo system model is established, and the frequency domain least squares method is used to provide high-precision initial states for the adaptive extended Kalman filter, so that the goodness of fit of parameter identification is increased to 0.99, which lays an accurate model foundation for controller optimization. Based on this model, the multi-objective optimization capability of AGA is used to perform global search on the normalized cost function to coordinate the contradiction between rapidity and stability. It is verified by experiments that this method can completely eliminate overshoot in uniaxial reciprocating motion and reduce the settling time by 5.5%. In multi-axis linkage contour machining, the maximum contour error, root mean square error and average contour error of the system can be reduced by 68.75%, 76.19% and 77.42% respectively, which has good engineering applicability.

收稿日期: 2025-06-17; 修回日期: 2025-11-11; 录用日期: 2026-03-10

基金项目: 高端重载机器人全国重点实验室开放课题 (HHR2025020106)

通信作者: 李忠群, 教授, 博士, 研究方向: 高效数控加工与智能制造。

Keywords: Feed servo system; Staged hybrid identification; Three-loop control; Adaptive genetic algorithm; Parameter self-tuning

航空领域正经历着日新月异的变革,为了契合日趋严格的性能标准,各类新材料、新技术在航空零部件制造中得到了广泛应用,这也对数控机床的加工性能提出了更严苛的要求。与传统数控机床相比,多轴数控机床凭借集成多个运动轴的协同控制机制,实现了多角度、多自由度的联动加工。这种独特的设计赋予了它精确执行复杂加工任务的能力,不仅能满足复杂几何形状的加工需求,还能在材料去除率、表面粗糙度、尺寸精度等关键指标上达到较高水准^[1]。

进给伺服系统作为数控机床的核心功能模块,其动态特性直接决定加工精度。在传统机床中,进给系统大多采用“旋转电机+滚珠丝杠”的模式,但这种进给系统的性能受到转速、惯性、反向间隙和滞后的限制,并且存在多个中间传动机构,导致整个直线运动系统的机械结构变得十分复杂,因此难以满足高精密加工的要求^[2]。与之相比,永磁同步直线电机(Permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM)凭借自身高精度、高效率及结构简单的显著特点,展现出了突出的技术优势^[3]。

直线电机进给伺服系统作为机电一体化系统,其性能受机械与伺服控制系统的影响,机电耦合建模能准确反映其运动状态。众多学者在相关领域开展了研究:姚延风等^[4]综合考量了机械结构和控制系统间的相互作用,提出了刚柔-机电耦合的进给系统模拟仿真方法;李加进^[5]和雷中舵^[6]采用有限元仿真技术,深入探究了超精密机床主轴-进给系统,揭示了其动态耦合机理,并成功构建包含机械、电磁、控制多领域耦合的动态数学模型;Yang等^[7]提出了一种“多体理论+有限元”的方法,考虑进给系统关键部件的柔性变形,建立了相应的刚柔耦合模型;Bui等^[8]使用自适应线性神经网络对直线电机进行参数识别,实现了更快的收敛速度和更高的准确性;李忠群等^[9]针对PMLSM进给伺服系统开展了建模研究,提出基于卡尔曼滤波的机械参数辨识方法,同时运用试凑法实现了控制参数的优化;冯立文等^[10]运用“传递函数分析+曲线整定法”完成了飞行器动导数试验装置上直线电机控制参数的智能整定;Vesović等^[11]建立了一种元启发式优化算法,用于获得比例-积分反馈控制器的参数;Yang等^[12]将固定时间滑模控制策略融合在PMLSM速度环控制器设计中,显著改善了系统的动

态响应特性与控制精度;周伟等^[13]将前馈和反馈控制结合,提出了一种“三环PID+三前馈控制”的复合控制方法,大幅度降低了机床的动态误差。在此基础上,为进一步降低高精度加工中的轮廓误差,相关研究从基础的交叉耦合控制^[14]演进为融合任务坐标系变换^[15-17]、迭代学习^[18]、滑模控制^[19]及神经网络前馈^[20]等方法的复合系统,实现了轮廓跟踪精度与鲁棒性的综合提升。

尽管以上研究从参数辨识、控制器设计、轮廓误差补偿等不同角度对进给伺服系统进行了研究,但可同步实现机械参数辨识与控制参数自整定,并系统验证其改善多轴轮廓精度效果的研究仍较为匮乏。本文聚焦直线电机驱动的数控机床进给系统,鉴于其高动态响应需求,提出了一套涵盖机电耦合建模、分阶段混合参数辨识,以及基于自适应遗传算法(AGA)的三环协同控制优化方法。该方法不仅旨在提升单轴伺服性能,更将所获整定策略应用于多轴系统,通过轮廓精度试验验证其整体有效性,从而为进给系统提供一套从参数自整定到轮廓精度保障的完整解决方案。

1 机床进给伺服系统建模

PMLSM是一个多变量特性的复杂高阶系统,从结构上看,可将其视为旋转电机沿径向切开并展平后的结构。通过Clark变换和Park变换,能够推导出PMLSM在 d - q 坐标系下的电压方程^[21]。

$$\begin{aligned} u_d &= R_a i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v_e \varphi_q \\ u_q &= R_a i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau} v_e \varphi_d \end{aligned} \quad (1)$$

式中, u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; φ_d 、 φ_q 分别为 d 、 q 轴磁链; R_a 为电枢电阻; τ 为极距; t 为时间; v_e 为电机行波磁场运动速度。磁链方程可表示为

$$\begin{aligned} \varphi_d &= L_d i_d + \varphi \\ \varphi_q &= L_q i_q \end{aligned} \quad (2)$$

式中, L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; φ 为永磁体产生的磁链,为恒定值。电磁推力方程为^[22]

$$F = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \varphi i_q = K i_q \quad (3)$$

式中, K 为电机推力系数, $K = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \varphi$ 。

将电磁推力作为外力,与等效质量、粘性阻尼和库仑摩擦力共同构建关于位移的直线电机机械传动方程,即

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + f \quad (4)$$

式中, c 为粘性阻尼系数; m 为运动部分的等效质量; f 为库仑摩擦力; x 为位移量。电枢中的电压平衡方程与反电动势为

$$u_i = R_a i_q + L \frac{di_q}{dt} + u_e \quad (5)$$

$$u_e = K_e \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

式中, u_i 为直线电机绕组电压; L 为电机绕组电感; u_e 为反电动势; K_e 为反电动势系数。联立式(1)~(6),将永磁同步直线电机与机械传动系统串联起来,消除中间变量电机绕组电流,可得开环直线进给伺服系统模型。

$$u_i = \frac{Lm}{K} \frac{d^3 x}{dt^3} + \left(\frac{Lc + R_a m}{K} \right) \frac{d^2 x}{dt^2} + \left(\frac{R_a c + Lf}{K} + K_e \right) \frac{dx}{dt} + \frac{R_a f}{K} \quad (7)$$

式(7)中,选取电机电驱绕组电压为输入,机械传动运动位移为输出进行拉普拉斯变换,可得开环进给伺服系统机电耦合模型结构图,如图1所示,其中, s 为拉普拉斯算子; v 为电机运动速度。

PID控制器的应用在机械自动化领域非常普遍,特别是在电机控制方面备受瞩目^[23],因此,在开环进给伺服系统模型中引入电流、速度、位置三环控制,得到进给

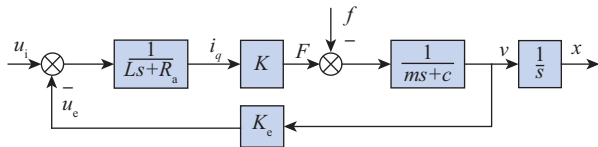
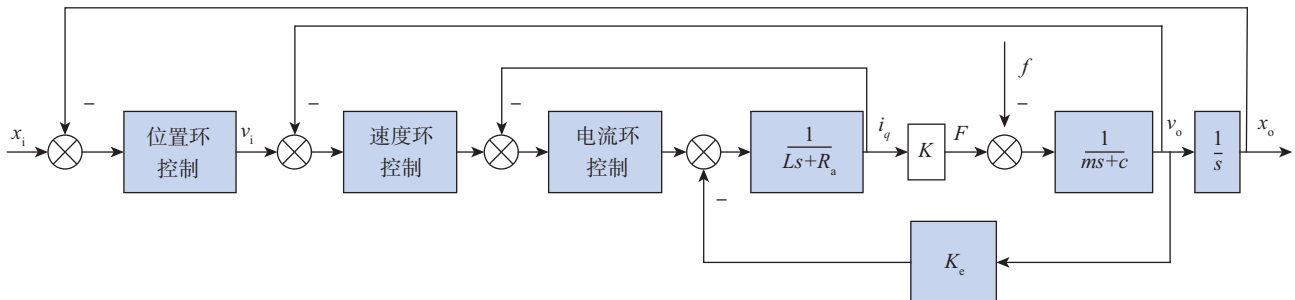


图1 开环进给伺服系统机电耦合模型结构图

Fig.1 Block diagram of open-loop feed servo electromechanical coupling system



注: x_i 为进给伺服系统位置输入; v_i 为进给伺服系统速度输入; v_o 为进给伺服系统速度输出; x_o 为进给伺服系统位置输出。

图2 进给伺服系统机电耦合模型结构图

Fig.2 Structural diagram of electromechanical coupling model for feed servo system

伺服系统机电耦合模型,如图2所示。

2 数控机床进给伺服系统机械传动模型参数辨识

数控机床进给伺服系统动态性能受机械传动模型参数影响。PMLSM作为进给系统的主要部分,对其进行参数辨识能够实现电机的精确控制^[24]。传统卡尔曼滤波在处理多源非线性耦合时存在局限性,其线性化假设与模型冲突,参数初始化依赖先验知识且收敛速度慢。为此,本文提出“分阶段混合辨识”方法,先用频域最小二乘确定初始参数,再用自适应噪声协方差调整的扩展卡尔曼滤波(Adaptive noise covariance adjustment extended Kalman filter, AEKF)在方程线性化时辨识参数并调整噪声协方差。

2.1 扩展卡尔曼滤波辨识

扩展卡尔曼滤波递推公式为^[25]

$$\begin{aligned} \hat{x}_{\bar{k}} &= f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) \\ P_{\bar{k}} &= S_{k-1} P_{k-1} S_{k-1}^T + Q_{k-1} \\ P_k &= \frac{P_{\bar{k}} H^T}{H P_{\bar{k}} H^T + R_k} \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_{\bar{k}} + K_k (z_k - h(\hat{x}_{\bar{k}})) \\ P_k &= (I - K_k H) P_{\bar{k}} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\hat{x}_{\bar{k}}$ 、 $\hat{x}_{k-1}$ 分别为 k 、 $k-1$ 时刻的先验估计值; u_{k-1} 为 $k-1$ 时刻系统控制输入向量值; $f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1})$ 为非线性转移函数; $P_{\bar{k}}$ 和 P_k 分别为 k 时刻先验和后验协方差; S_{k-1} 为系统状态转移函数对状态向量在当前估计状态处求偏导的雅可比矩阵; Q_{k-1} 为过程噪声协方差矩阵; R_k 为测量噪声协方差矩阵; H 为测量雅可比矩阵; $\hat{x}_k$ 为 k 时刻的后验估计值; $h(\hat{x}_{\bar{k}})$ 为预测测量值; K_k 为扩展卡尔曼滤波增益; z_k 为 k 时刻系统测量向量值。

2.2 自适应调整扩展卡尔曼滤波噪声协方差

为了实现系统实时状态自动调整噪声协方差,设定 k 时刻的状态修正量为 d_k ;信息估计误差为 c_k ; k 时刻状

态修正量的协方差和新息协方差分别为 D_k 和 C_k , 由此可得:

$$\begin{aligned} c_k &= z_k - h(\hat{x}_k) \\ d_k &= \hat{x}_k - \hat{x}_{k-1} \\ C_k &= HP_k H^T + R_k \\ D_k &= P_k - P_{k-1} \end{aligned} \quad (9)$$

基于指数平滑法, 联立式(8)和(9)可得过程和观测噪声更新方程如下。

$$\begin{aligned} R_k &= R_{k-1} + \beta(C_k - HP_k H^T - R_{k-1}) \\ Q_k &= Q_{k-1} + \alpha(D_k - Q_{k-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, α 和 β 表示平滑因子。

本研究通过 Morell^[26] 推导出的频域最小二乘 $\theta = [\text{Re}(\tilde{X}^H \tilde{X})]^{-1} \text{Re}(\tilde{X}^H \tilde{z})$ 与 AEKF 辨识组成成分阶段混合参数辨识框架, 其技术架构如图3所示。

基于上述流程, 本文首先对四轴加工中心试验平台的直线轴进给伺服系统机械传动模型进行参数辨识, 该系统由高创 CDHD2 驱动器与华中数控系统配合使用, 进给轴采用 FANUC 电机直接驱动, 电机推力系数 K 为 84.79 N/A。

基于式(4)的机械传动动力学公式, 采用辨识算法对 m 、 c 和 f 3 项参数进行开环辨识。以实际采集的直线

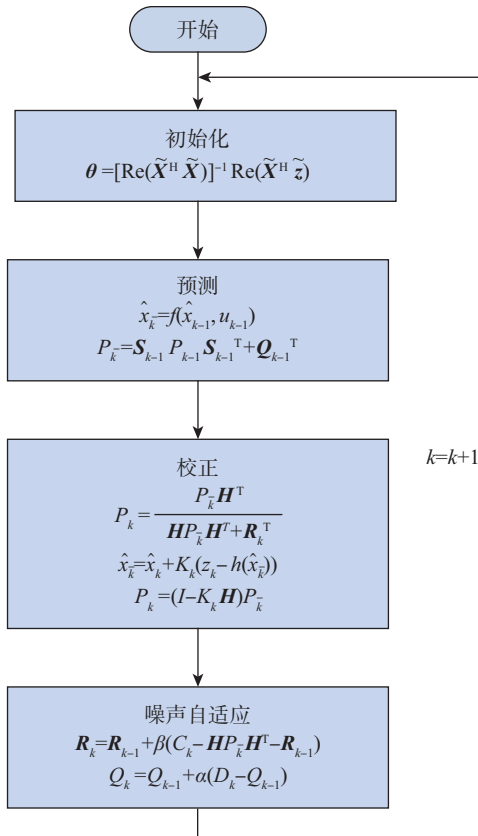


图3 分阶段混合辨识流程图

Fig.3 Flow chart of staged hybrid identification

电机 q 轴电流为输入, 速度 v 作为输出, 如图4所示。

考虑到电磁推力 $F=K \cdot i_q$, 且实际系统中存在电流偏差 I_o , 将实际采集电流表示为 $\tilde{I}(t) = i_q + I_o$, 代入式(4)得:

$$K\tilde{I}(t) = m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + f + KI_o \quad (11)$$

用符号函数 $\text{sign}(\frac{dx}{dt})$ 体现库仑摩擦力的方向特性, 得到:

$$K\tilde{I}(t) = m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + f \cdot \text{sign}\left(\frac{dx}{dt}\right) + KI_o \quad (12)$$

将式(12)所示的位移动力学方程转换为速度动力学方程, 结合线性回归方程可得式(13)。

$$K\tilde{I}(t) = m \frac{dv}{dt} + cv + f \cdot \text{sign}(v) + KI_o \quad (13)$$

为在频域中进行参数辨识, 对该时域方程进行离散采样, 并在 $k=1, 2, \dots, N$ 时刻采集速度和电流。对方程两边进行快速傅里叶变换, 将时域信号转换至频域。利用傅里叶变换的微分性质, 时域中的微分运算在频域中转化为乘以 $j\omega_k$ 的运算, 从而得到频域动力学线性回归方程如下。

$$K\tilde{I}(k) = m \cdot j\omega_k \tilde{v}(k) + c\tilde{v}(k) + f \cdot \text{sign}(\tilde{v}(k)) + KI_o \quad (14)$$

式中, ω_k 为 k 时刻的频率点; $\tilde{v}(k)$ 为 k 时刻的实际速度; $\tilde{I}$ 为 k 时刻的采集电流; $\text{sign}(\tilde{v}(k))$ 用来判断摩擦力方向与速度方向是否一致。将上述 k' 个方程组变换成矩阵形式求解, 各矩阵分量为

$$\tilde{z} = K \begin{bmatrix} \tilde{I}(1) \\ \tilde{I}(2) \\ \vdots \\ \tilde{I}(k') \end{bmatrix}, \tilde{X} = \begin{bmatrix} j\omega_k \tilde{v}(1) & \tilde{v}(1) & \text{sign}(\tilde{v}(1)) & K \\ j\omega_k \tilde{v}(2) & \tilde{v}(2) & \text{sign}(\tilde{v}(2)) & K \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ j\omega_k \tilde{v}(k') & \tilde{v}(k') & \text{sign}(\tilde{v}(k')) & K \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(15)导入频域最小二乘 $\theta = [\text{Re}(\tilde{X}^H \tilde{X})]^{-1} \text{Re}(\tilde{X}^H \tilde{z})$ 得出结果 θ :

$$\theta = [m \quad c \quad f \quad I_o]^T \quad (16)$$

由 θ 可得到辨识结果 m 、 c 和 f , 具体初始化值见表1。同时, 以 1 ms 周期采集电机电流和实际速度数据(图5)。

基于待辨识的参数变量与输出数据, 设定状态向量为 $x_k = [v_k \quad m_{k-1} \quad c_{k-1} \quad f_{k-1} \quad I_{o(k-1)}]^T$ (17)

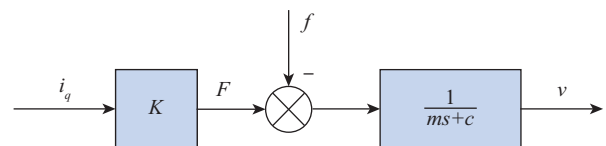


图4 机械传动结构图

Fig.4 Mechanical transmission structure diagram

式中, v_k 为 k 时刻的速度; m_{k-1} 、 c_{k-1} 、 f_{k-1} 分别为 $k-1$ 时刻的等效质量、粘性阻尼系数和库仑摩擦力; $I_{o(k-1)}$ 为 $k-1$ 时刻的电流偏置。

结合式(4), 根据前向欧拉离散化方法, 状态更新方程为

$$v_k = v_{k-1} + \frac{T(F_k - c_{k-1}v_{k-1} - f_{k-1}\text{sign}(v_{k-1}) - I_{o(k-1)})}{m_{k-1}} \quad (18)$$

式中, T 为离散时间; F_k 为 k 时刻的电磁推力。联立式(10)和(14)得到状态向量的雅可比矩阵为

$$v_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_k}{\partial v_{k-1}} & \frac{\partial v_k}{\partial m_{k-1}} & \frac{\partial v_k}{\partial c_{k-1}} & \frac{\partial v_k}{\partial f_{k-1}} & \frac{\partial v_k}{\partial I_{o(k-1)}} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

如图6所示, 当未对 AEKF 进行初始化时, 得到机械传动参数辨识结果(图6(a))。随后, 将表1中的机械传动参数作为 AEKF 辨识的初始值, 并把式(19)代入式(8)和式(10), 使 m 、 c 和 f 这3项参数在迭代过程

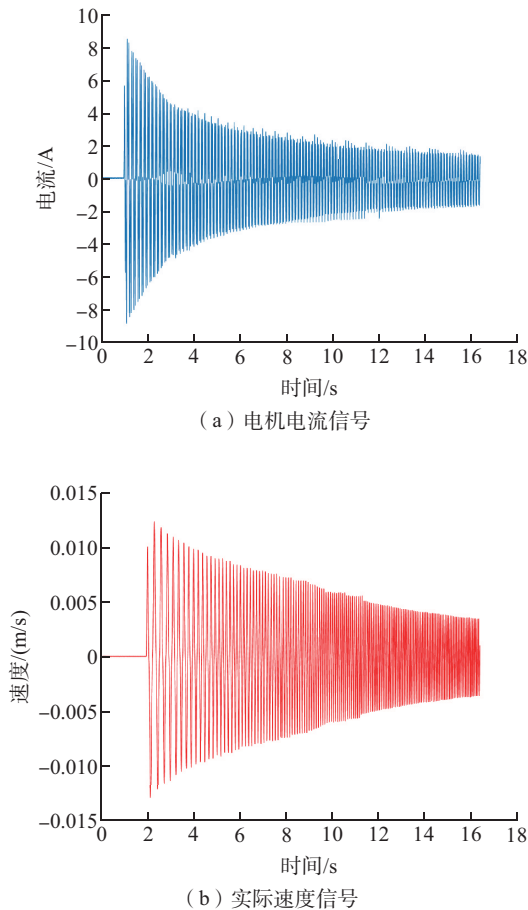
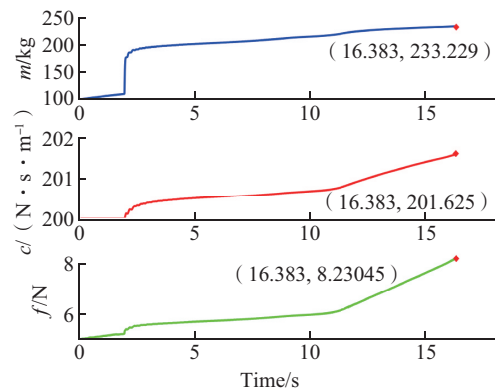


图5 采集所得的电机电流和实际速度数据
Fig.5 Collected motor current and actual speed data

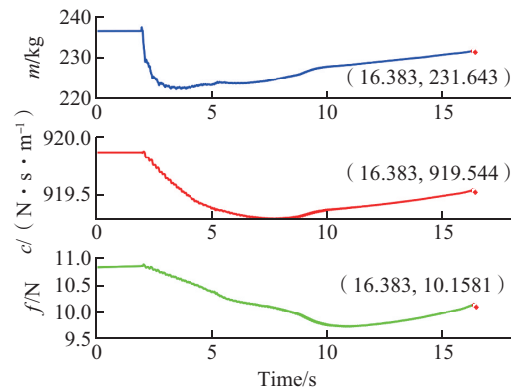
中不断更新。最终, 获得机械传动参数辨识结果(图6(b))。

将上述机械传动参数导入 MATLAB/Simulink 仿真模型, 以实际电流作为输入激励, 分别进行未初始化与初始化 AEKF 参数辨识仿真。对比仿真速度与实测速度数据后, 得到仿真与实际速度拟合曲线, 如图7所示。初始化前, AEKF 在 8 s 之后的仿真速度为正值时, 与实际速度存在微小偏差; 初始化后, AEKF 速度曲线与实际速度的契合度显著提高, 其动态响应特性更贴合真实系统, 能够更精准地反映系统的实时状态。

为对比两种辨识方法的拟合效果, 绘制仿真速度与实际速度的差值曲线(图8)。结果显示, 在 2~4 s 内, 未初始化的 AEKF 速度差值约为 ± 0.02 m/s, 初始化的 AEKF



(a) 未初始化机械传动参数辨识结果



(b) AEKF 参数辨识结果

图6 机械传动参数辨识结果

Fig.6 Identification results of mechanical transmission parameters

表1 初始化辨识结果

Table 1 Initial identification results

参数名称	值
等效质量 m/kg	236.453
粘性阻尼系数 $c/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	919.870
库仑摩擦力 f/N	10.830

速度差值约为 ± 0.007 m/s; 8 s后, 前者在 ± 0.01 m/s振荡, 后者稳定在 ± 0.005 m/s, 更接近0。由此可见, 初始化后的AEKF对实际速度的估计更为准确。

为量化评估两种方法的拟合精度, 引入拟合优度指标(如 R^2)定量分析, 计算仿真与实测速度偏差平方和, 从统计层面客观比较拟合效果。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{v}_i - \bar{v})^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (20)$$

式中, v_i 为第 i 个实际速度值; $\hat{v}_i$ 为第 i 个仿真速度值; $\bar{v}$ 为实际速度的均值。量化分析结果显示, 初始化前后辨识方法的判定系数 R^2 分别为0.97和0.99, 表明初始化使模型拟合优度提升了约2%。

3 进给伺服系统三环控制设计与参数自整定功能开发

直线电机驱动的进给伺服系统采用电流-速度-位置从内到外的控制结构, 三环相互配合, 共同确保系统

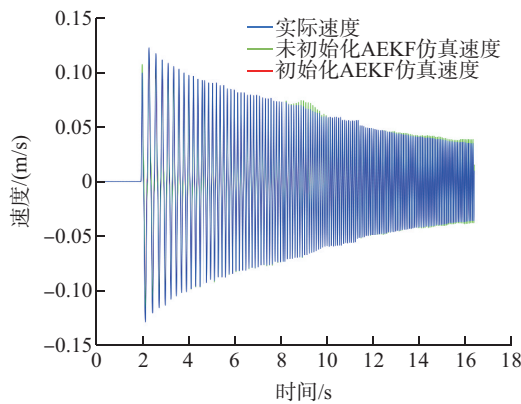


图7 仿真速度与实际速度拟合结果图

Fig.7 Fitting results graph of simulated speed and actual speed

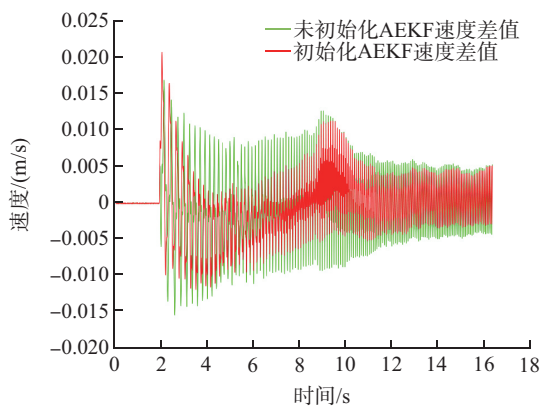


图8 两种辨识方法的速度差值图

Fig.8 Speed difference of two identification methods

的稳定、高效和精准运行。

3.1 电流环控制设计

电流环作为进给伺服系统的第1个设计环节, 由直线电机的电阻、电感, 以及滤波器、控制器、SPWM逆变器组成。为实现电流控制的快速响应, 通常采用PI控制。由于电流环的响应速度大于其他环的响应速度, 在进行伺服系统整体设计时可电流环看作数值为1的增益^[27]。

3.2 速度环控制设计

速度环通常由控制器、机械传动结构和电流环组成。机械传动结构承载着速度环的主要运行任务, 其动态性能极大地影响着整个进给伺服系统的表现。当电流环简化成增益为1的比例环节, 且机械传动模型得到准确辨识后, 合理选择控制器成为关键。加工过程中, 进给伺服系统的速度环通常采用PI控制以实现快速响应, 如图9所示。

忽略库仑摩擦力这一干扰因素, 依据梅逊增益公式可得到基于PI控制的速度环控制闭环传递函数, 即

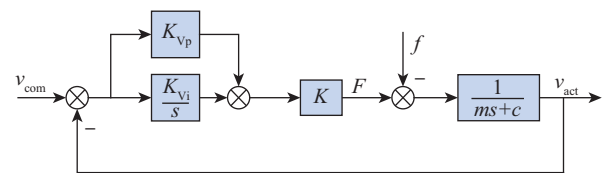
$$G_v = \frac{K(K_{vp}s + K_{vi})}{ms^2 + (K_{vp}K + c)s + K_{vi}K} \quad (21)$$

同时, 在机械传动结构中引入双反馈环节, 能够实现速度环的PDF控制。PDF控制具备对动态变化的预判能力, 可显著增强系统的抗干扰性能, 进而实现高效且稳定的控制效果, 其具体结构如图10所示。

由图10可推导出该系统的闭环传递函数为

$$G_v = \frac{K_{vi}K_{vp}K}{ms^2 + (c + K_{vp}K)s + K_{vi}K_{vp}K} \quad (22)$$

在PDF控制架构的基础上, 通过在速度指令通道引入前馈补偿机制, 可构建具有速度环PDF控制结构的先进控制系统。这种改进方案既能弥补系统延迟、提升跟踪精度, 又能降低参数变化对控制效果的影响, 可显著提



注: K_{vp} 为速度环比例增益; K_{vi} 为速度环积分增益; v_{com} 为速度环速度输入; v_{act} 为速度环速度输出。

图9 基于PI控制的速度环控制结构图

Fig.9 Structure diagram of speed loop based on PI control

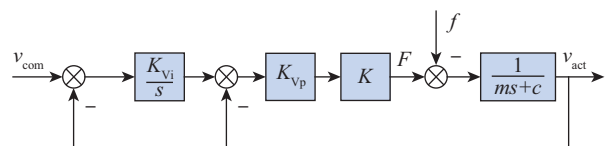


图10 基于PDF控制的速度环控制结构图

Fig.10 Structure diagram of speed loop based on PDF control

高加工精度和动态响应性能,具体结构如图 11 所示。

由图 11 可得到基于 PDFF 控制的速度环控制闭环传递函数为

$$G_v = \frac{K_{vf}K_{vp}Ks + K_{vi}K_{vp}K}{ms^2 + (c + K_{vp}K)s + K_{vi}K_{vp}K} \quad (23)$$

从控制模型的角度分析,PDFF 控制器相较于 PI 和 PDF 的核心优势在于其前馈-反馈复合结构所带来的控制任务分离:反馈回路(PI 部分)负责抑制扰动与保证稳定性,而前馈回路则依据被控对象的动态特性来设定理想的控制指令,以补偿其惯性延迟。这种指令跟踪与抗干扰性能可独立优化的双自由度设计,从根本上解决了 PI 与 PDF 等单自由度结构在参数调整时无法兼顾动态响应与稳定性的固有矛盾。具体而言,其优势机理在于系统无需等待误差产生,即可通过前馈通道“预先”发出控制信号,直接对抗对象的惯性延迟;从传递函数(式(23))的视角看,此过程通过引入恰当的零点,有效抵消了被控对象主导极点所造成的滞后效应,从而显著减小系统响应的相位滞后,这从理论上赋予了 PDFF 控制器更快的指令跟踪速度与更高的跟踪精度。

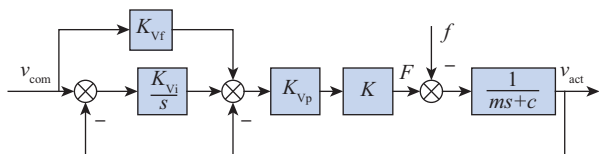
为评估 PI、PDF 及 PDFF 3 种控制器在机械传动系统速度环控制中的性能,本文提出一种基于 AGA 的多控制器参数自整定方法。首先,建立控制系统的离散化模型,运用双线性变换对式(21)~(23)离散化,并分析其数字实现特性;接着,设计带动态约束的遗传算法,通过限定参数边界、自适应调整权重等方式实现参数的并行优化;最后,从频域稳定性、时域响应速度和鲁棒性 3 方面验证控制器性能。AGA 参数自整定流程如下。

(1) 种群初始化与权值函数设计。

首先,设定 PI、PDF 和 PDFF 控制器待整定参数的初始化参数范围、种群数量和迭代次数。适应度函数能够引导算法收敛至最优解,合理选择适应度函数至关重要。通常取适应度函数 f 的倒数作为代价函数,方便优化计算与比较。本文综合考虑控制器输出、系统误差、调节时间和系统输出变化量,为各因素分配不同权值构建代价函数。

$$BsJ = \int_0^\infty (w_1|e(t)| + w_2u^2(t) + w_3|y(t) - y(t-1)|)dt + w_4t_u \quad (24)$$

式中, $e(t)$ 为系统误差; $u(t)$ 为控制器输出; $y(t)$ 为系统



注: K_{vf} 为速度环前馈系数。

图 11 基于 PDFF 控制的速度环控制结构图

Fig.11 Structure diagram of speed loop based on PDFF control

输出; t_u 为调节时间; w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 为权值; BsJ 为进给伺服系统代价函数。

权值的设定依据与最终取值基于系统化的归一化处理方法。由于各性能指标量纲和数量级不同,直接设定权值会导致优化过程被数值较大的项主导。为解决此问题,采用基于初始种群统计的归一化方法。

基准值计算方法如下:在算法初始化阶段,随机生成 80 组控制器参数,对每组参数施加阶跃输入并记录系统响应,计算每个个体的 4 项性能指标值。

$$\begin{aligned} I_{1i} &= \int_0^T |e_i(t)| dt \\ I_{2i} &= \int_0^T u_i^2(t) dt \\ I_{3i} &= \int_0^T |y_i(t) - y_i(t-1)| dt \\ I_{4i} &= t_{u,i} \end{aligned} \quad (25)$$

式中, I_{ni} 表示第 i 个个体的第 n 项性能指标值。这种方法确保了各分项在归一化后具有相近的数量级,使权值的选择能够真实反映对各项性能的相对重视程度。

取所有个体指标值的算术平均值作为归一化基准值:

$$B_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{ni}, \quad n=1,2,3,4 \quad (26)$$

基于初始种群的统计结果,得到的归一化基准值: $B_1=15.3$, $B_2=8.7$, $B_3=12.1$, $B_4=0.25$, 归一化后,各分项变为无量纲且数量级相近的纯数值,将代价函数重构为归一化形式:

$$BsJ = \int_0^\infty \left(\frac{w_1}{15.3} |e(t)| + \frac{w_2}{8.7} u^2(t) + \frac{w_3}{12.1} |y(t) - y(t-1)| \right) dt + \frac{w_4}{0.25} t_u \quad (27)$$

基于进给伺服系统对高精度、快响应、无超调的核心要求,通过系统性权衡,最终确定的权值取值: $w_1=1.0$, $w_2=0.2$, $w_3=0.4$, $w_4=0.6$ 。

(2) 选择。

为解决传统遗传算法未考虑个体差异,优秀个体可能随机淘汰的问题,本文采用轮盘赌选择方法。此方法依据个体适应度值构建选择概率分布,让适应度高的个体更易被选中,以保留和优化优秀个体。

$$\text{cum}(i) = \frac{\sum_{j=1}^i f_i(j)}{\sum_{n=1}^{\text{Size}} f_i(n)} \quad (28)$$

式中, $\text{cum}(i)$ 为累积概率; Size 为种群个数; $n=1,2,\dots,i,\dots,\text{Size}$; $\sum_{n=1}^{\text{Size}} f_i(k)$ 为总适应度值; $i \in (0, \text{Size})$, $\sum_{j=1}^i f_i(j)$ 为前 i 总适应度值。代码运行时,轮盘赌选择法通过比较累积概率值和随机概率值来选择个体进入下一代种群。

此方法使高适应度个体被选概率高,也给低适应度个体生存机会,避免算法过早局部最优,该过程持续进行,直至选中个体数量达到种群规模。

(3)交叉。

传统交叉操作直接设定交叉概率,无法兼顾算法初期高交叉概率增种群多样性、末期低交叉概率保优质个体的需求。为解决此问题,本文采用自适应交叉概率方法。

$$P_a = P_{a_min} + \frac{(P_{a_max} - P_{a_min})(f_{i_max} - f_i)}{(f_{i_max} - f_{i_avg})}, f_i < f_{i_avg}$$

$$P_a = P_{a_min}, f_i > f_{i_avg}$$
(29)

式中, P_a 为交叉概率; P_{a_max} 和 P_{a_min} 为交叉概率最大和最小值; f_{i_avg} 为平均适应度值; f_{i_max} 为最大适应度值。

(4)变异。

和交叉操作一样,变异操作也需在算法初期设高变异概率增种群多样性,后期为防止破坏优秀个体要降低概率。解决此问题,可仿照自适应交叉概率法对变异概率自适应选择。

$$P_b = P_{b_min} + \frac{(P_{b_max} - P_{b_min})(f_{i_max} - f_i)}{(f_{i_max} - f_{i_avg})}, f_i < f_{i_avg}$$

$$P_b = P_{b_min}, f_i > f_{i_avg}$$
(30)

式中, P_b 为变异概率; P_{b_max} 和 P_{b_min} 分别为变异概率的最大和最小值。以X轴进给伺服系统速度环为例,把辨识出的等效质量 m 和粘性阻尼系数 c 代入离散化速度环系统模型,输入阶跃信号,按AGA控制器参数自整定流程,得到的自整定控制参数见表2。

把表2中数据代入图9~11所示的模型中,施加阶跃信号与正弦信号作为输入,能得到优化后的时域和频域响应,结果如图12所示,相关动态性能指标见表3。

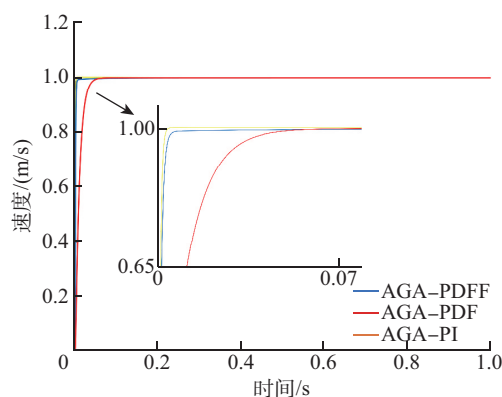
根据表3中的动态性能指标可知,在PI、PDF和PDFF 3种控制方式中,PI控制调节时间最短,仅0.0018 s。PDFF控制调节时间为0.003 s,响应速度仅次于PI控制,且无超调。另外,PDFF控制的相角裕度为90°,幅值裕度为无穷大,均处于合理且优异的范围,说明系统具有较高的稳定性。综合考虑,PDFF控制器是进给伺服系统速度

环控制器的优选方案。

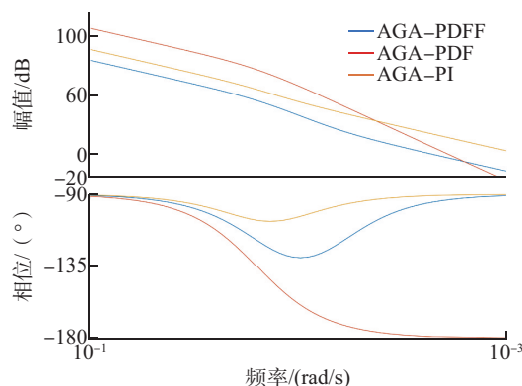
为深入评估其鲁棒性,当模型运行到0.4 s时,将辨识得出的摩擦力 $f=10.158$ N作为扰动因素,其时域响应如图13所示。

图13显示,在0.4 s施加摩擦扰动后,AGA-PDF控制策略的系统速度下降幅度最大,降至约0.95 m/s。AGA-PI控制策略速度下降速度比AGA-PDFF更快。恢复稳态能力方面,AGA-PDF优势明显,恢复时间仅为0.05 s,速度居首;AGA-PDFF次之,恢复时间为0.2 s;AGA-PI恢复耗时最长。

综合抗干扰与恢复稳态能力,AGA-PDFF控制策略



(a) 优化后的速度环时域响应结果



(b) 优化后的速度环频域响应结果

图12 优化后的速度环时域和频域响应

Fig.12 Time-domain and frequency-domain responses of optimized speed loop

表3 优化后的X轴速度环动态性能指标

Table 3 Dynamic performance indexes of optimized X-axis speed loop

表2 基于AGA控制参数自整定结果
Table 2 Self-tuning results of control parameters based on AGA

变量名称	PI	PDF	PDFF
速度环比例系数 $K_{vp}/((A \cdot s)/mm)$	3.942	2.36	2.076
速度环积分系数 K_{vi}/Hz	7.2	94.629	18.275
速度环前馈系数 K_{vf}/Hz	—	—	0.979

动态性能指标	PI	PDF	PDFF
调节时间/s	0.0018	0.0293	0.003
超调量/%	0.1	0	0
相角裕度/(°)	90	3	90
幅值裕度/dB	∞	8	∞

上述参数优化在数控机床空载工况下完成。为验证优化后系统在负载条件下的性能,本研究采用了等效负载模型来模拟切削过程。该方法的依据:对于直线电机驱动的进给系统,其切削过程的主要负载表现为需要驱动的总质量变化。因此,在控制系统仿真模型中,通过在已辨识的空载等效质量 m 上直接叠加一个质量块 Δm 来模拟切削负载,即总质量为 $m + \Delta m$ 。此方法在试验上易于实现,且能有效复现负载惯性增大对系统动态响应的核心影响。

基于此模型,图16展示了系统在10 kg与30 kg等效负载下的时域响应曲线。

图16表明,负载为10 kg时,系统调节时间从0.028 s缩短至0.025 s且无超调;负载增加到30 kg,时域响有超调。因加工中心X轴主要在轻载环境工作,该方案工程适用性良好。

上述研究验证了所提方法对单轴伺服系统性能的优化成效,下文进一步将该方法拓展应用至多轴联动场景。

数控机床的核心加工精度主要由多轴联动的轮廓误差大小决定,轮廓误差越小,加工精度越高^[28-29]。工程上普遍采用分步控制策略来减小轮廓误差,首先通过伺服参数整定优化系统的动态响应,再利用轮廓误差补

偿功能对加工中的残留误差进行最终修正。以华中数控系统为例,其标准流程为先通过内置模块完成参数自整定,再利用其搭载的Cyber-Feeding软件实施轮廓误差补偿。在这一架构下,优质的底层参数整定能为上层误差补偿提供更优的初始条件,从而提升整体控制性能。

基于该工程实践情况,AGA参数自整定可运用于机床多轴联动的轮廓误差补偿过程。具体方式:使用所提方法分别对各联动轴进行参数自整定,获得高性能参数集,以此为基础启动轮廓误差补偿软件,即可实现对轨迹精度的优化。

4 自整定效果试验验证

4.1 试验平台设计

数控系统:直线轴(X/Y/Z轴)为Fanuc直线电机,旋转轴为华中数控旋转电机,数控系统为华中数控8型;驱动系统:直线轴为高创驱动器CDHD2,旋转轴为华中数控驱动器HSV150E010,支持EtherCAT通信,控制周期1 ms;辅助系统:加工系统配备最高转速24000 r/min的电主轴,选用 $\Phi 8$ mm金刚石涂层立铣刀,并搭载总线I/O模块实现高效数据传输与控制。

基于上述硬件配置,构建的四轴加工中心试验平台如图17所示。

4.2 单轴试验验证

为验证本文所提自整定方法的有效性,将自整定前后的实际速度情况进行对比。自整定前的初始参数由华中数控系统内置参数优化模块所得,并由现场工程师结合自身经验进行微调,该参数集能保证系统稳定运行,代表了该平台上的典型参数水平。自整定前后控制参数如表5所示。

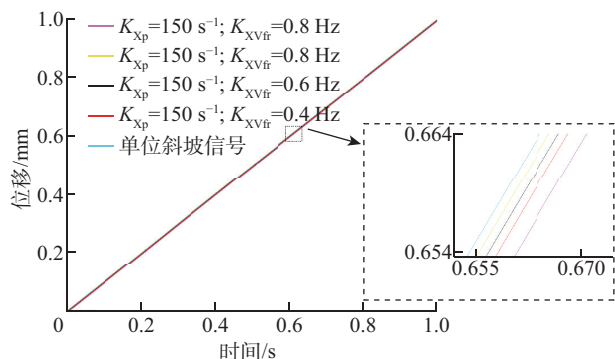


图15 位置前馈添加前后跟踪误差对比

Fig.15 Comparison of tracking errors before and after introducing position feedforward

表4 进给伺服系统优化后的控制参数

Table 4 Optimized control parameters of feed servo system

指标类型	值
位置环的比例系数 K_{xp}/s^{-1}	76.71
位置环的速度前馈 K_{xvf}/Hz	0.435
位置环的加速度前馈 K_{xavf}/s	0.0008
速度环的前馈系数 K_{vf}/Hz	0.989
速度环的积分系数 K_{vi}/Hz	86.42
速度环的比例系数 $K_{vp}/((A \cdot s)/mm)$	1.28

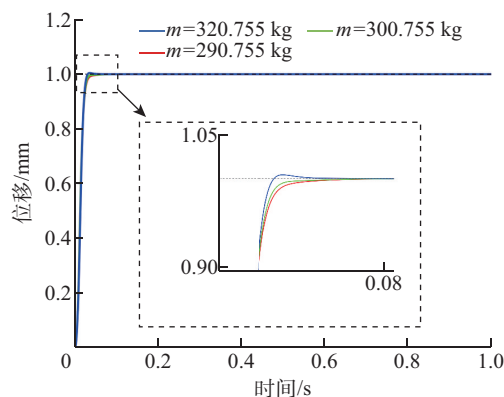


图16 优化参数在等效负载模型下的切削过程时域响应

Fig.16 Time-domain response of cutting process with optimized parameters under equivalent load model



(a) 四轴加工中心硬件连接架构



(b) 四轴加工中心

图17 四轴加工中心试验平台

Fig.17 Four-axis machining center test platform

分别将优化前后的参数输入四轴加工中心,设定X轴进行往复运动,采集其实际运动速度,并与指定速度对比,得到进给伺服系统自整定前后的实际速度情况,具体如图18和表6所示。

图18显示,优化后的实际速度曲线与指定速度曲线高度吻合,系统跟踪精度明显提升;从表6中可以看出,自整定后在保证稳态误差为0的情况下实现了系统的零超调,同时调节时间缩短了5.5%,实现了响应速度与稳定性的协同优化。

4.3 多轴联动轮廓精度验证

圆轨迹的轮廓误差是评价双轴联动性能的核心指标,测量并对比优化前后执行圆轨迹的轮廓误差,能够直接且有效地反映不同参数整定方法对多轴系统整体加工精度的实际影响。为验证多轴整定策略的实际效果,本试验采用“先整定参数,后补偿轮廓”的工业控制流程,在华中数控系统轮廓误差补偿功能开启的条件下进行对比。试验采用表5所示的两种伺服参数集:一组为系统自带整定模块生成的参数,另一组为经本文方法分别对X轴与Y轴独立整定后获得的参数。在相同轨迹与工艺条件下,通过直接测量并对比两者的轮廓误差,以评估不同底层参数整定方法对最终加工精度的优化效果,从而验证本文方法的工程应用价值。

轮廓误差 $\varepsilon(t)$ 定义为实际位置点到理论圆轨迹的法向距离。对于圆形轨迹,可简化为径向误差进行计算。

$$\varepsilon_1(t) = \sqrt{(x_a(t) - x_0)^2 + (y_a(t) - y_0)^2} - R \quad (35)$$

式中, (x_0, y_0) 为圆心坐标; (x_a, y_a) 为X、Y轴实际位置; R 为指令半径。根据离散采样数据,可进一步计算均方根轮廓误差 $\varepsilon_2(t)$ 与平均轮廓误差 $\varepsilon_3(t)$,其计算公式

表5 自整定前后控制参数

Table 5 Control parameters before and after self-tuning

状态	轴系	K_{xp}/s^{-1}	K_{xv}/Hz	K_{xa}/s	K_{va}/Hz	K_{vi}/Hz	$K_{vp}/((A \cdot s)/mm)$
自整定前	X轴	45.00	0.26	0.0003	0.75	50	0.87
	Y轴	42.00	0.22	0.0002	0.70	48	0.82
自整定后	X轴	76.71	0.435	0.0008	0.989	86.42	1.28
	Y轴	99.67	0.514	0.001	0.87	82.11	1.29

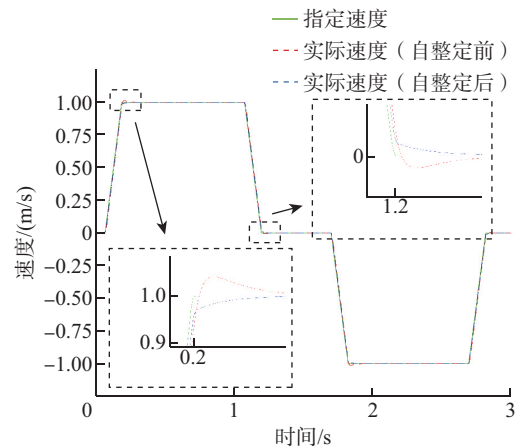


图18 自整定前后实际速度变化

Fig.18 Variation of actual speed before and after self-tuning

表6 进给伺服系统自整定前后性能指标对比

Table 6 Comparison of performance indexes of feed servo system before and after self-tuning

性能指标	自整定前	自整定后
调节时间/s	0.1944	0.1838
超调量/%	4.1	0
稳态误差/mm	0	0

如下。

$$\begin{aligned}\varepsilon_2 &= \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \varepsilon_i^2(t_i)} \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |\varepsilon_i(t_i)|\end{aligned}\quad (36)$$

式中, M 为总采样点数, $\varepsilon_2(t)$ 反映了轮廓误差的整体波动水平, 而 $\varepsilon_3(t)$ 则表征了误差的平均偏离程度。

试验中, 在华中数控系统中设置半径为 $R=15\text{ mm}$ 的整圆指令轨迹作为输入, 其运动指令由以下参数方程描述。

$$\begin{aligned}x_{\text{cmd}}(t) &= R \cdot \cos 4t \\ y_{\text{cmd}}(t) &= R \cdot \sin 4t\end{aligned}\quad (37)$$

将表5中自整定前后的控制参数分别输入系统, 执行上述圆轨迹加工, 得到的自整定前后轨迹圆如图19所示。

使用式(35)对自整定前后的轮廓误差进行计算, 获得轮廓误差图如图20所示。

对图19与图20进行分析可得, 在自整定前, 轮廓误差波动较大, 最大轮廓误差达到 $9.6\text{ }\mu\text{m}$, 而经本文方法整定后, 轮廓误差曲线幅值显著减小, 且波动更为平缓。根据式(36)计算得出自整定前后轮廓误差情况如表7所示。

由表7可知, 自整定后系统双轴最大轮廓误差降低 68.75% , 均方根轮廓误差降低 76.19% , 平均轮廓误差降低 77.42% 。试验结果表明, 在相同条件下, 采用本文所提自整定方法获得的伺服参数能显著提升多轴联动的轮廓精度。

5 结论

(1) 在理论方法层面, 本研究提出的“分阶段混合辨识”框架通过序列化衔接频域最小二乘与 AEKF 算法, 有效解决了参数辨识中的初始值敏感问题, 将模型拟合优度从 0.97 提升至 0.99 , 为控制器设计提供了更可靠的模型基础。同时, 基于 AGA 的参数自整定策略通过归一化多目标优化, 系统性地解决了伺服系统快速性与平

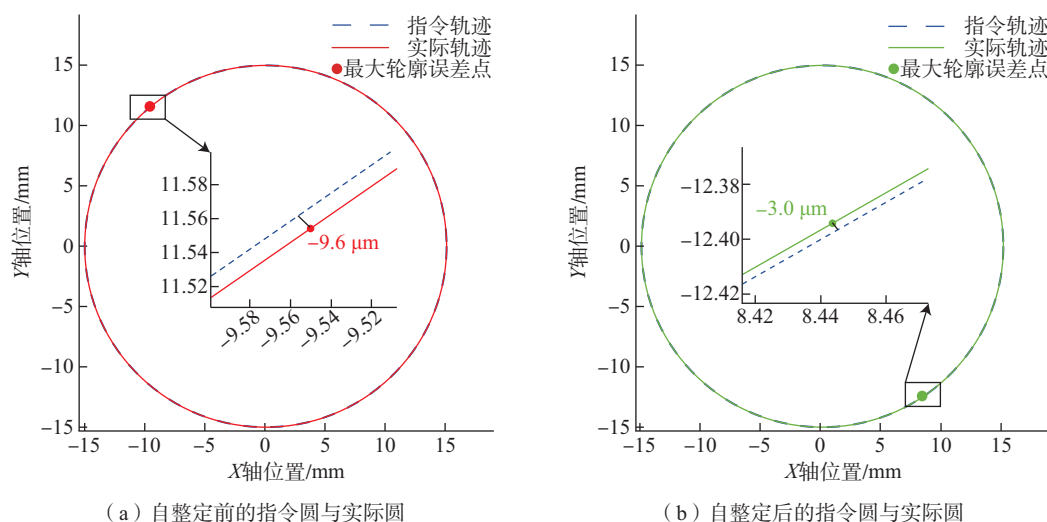


图19 自整定前后指令圆轨迹与实际圆轨迹
Fig.19 Command and actual circular trajectories before and after self-tuning

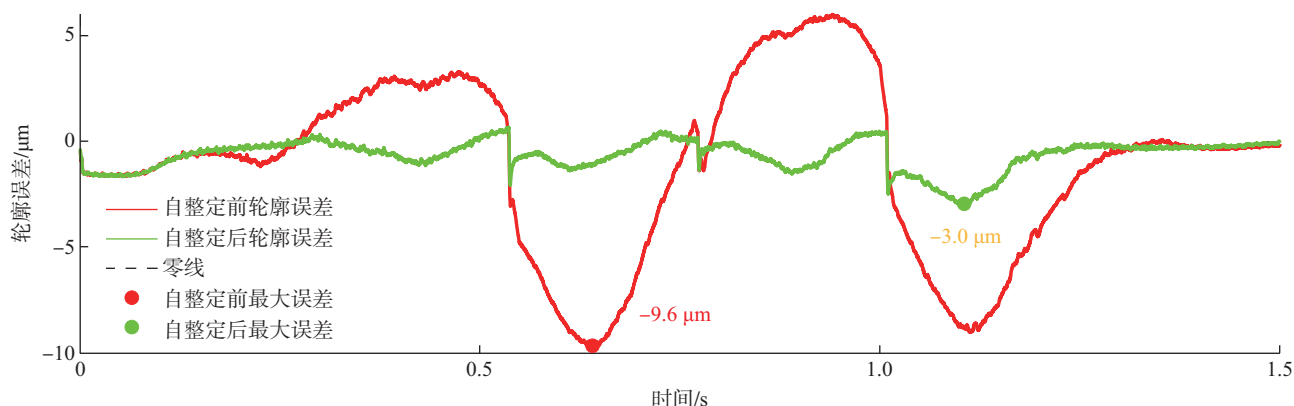


图20 自整定前后轮廓误差图
Fig.20 Contour errors before and after self-tuning

表7 自整定前后各项轮廓误差

Table 7 Various contour errors before and after self-tuning

状态	最大轮廓误差	均方根轮廓误差	平均轮廓误差
自整定前	9.6	4.2	3.1
自整定后	3.0	1.0	0.7

μm

稳性之间的矛盾。

(2)在工程应用层面,将所提方法用于机床单轴进给系统,实现了动态性能协同提升:完全消除了4.1%的超调,同时将调节时间缩短5.5%。进一步将该策略推广至X-Y双轴系统,经整定后,系统在圆形轨迹上的最大轮廓误差、均方根误差与平均误差分别降低了68.75%、76.19%与77.42%。这证明该方法能有效提升单轴伺服性能与多轴联动精度,为解决高端数控装备控制参数整定问题提供了可复现、自动化程度高的解决方案。

(3)与传统方法相比,本文提出的分阶段混合辨识与AGA优化协同策略,不仅在辨识精度与单轴控制性能上展现出显著优势,更通过完整的“单轴优化-多轴验证”试验闭环,证实了其对于提升数控机床整体加工精度的实用价值,为伺服系统参数的自整定与性能优化提供了一套系统、可靠且工程实用的技术路径。

参考文献

- [1] 刘旭东. 数控机床在航空零部件精密加工中的应用[J]. 模具制造, 2024, 24(12): 257-259.
- [2] LIU Xudong. The application of CNC machine tools in precision machining of aviation components[J]. Die & Mould Manufacture, 2024, 24(12): 257-259.
- [3] WANG X Z, CHEN F X, ZHU R F, et al. A review on disturbance analysis and suppression for permanent magnet linear synchronous motor[J]. Actuators, 2021, 10(4): 77.
- [4] 杨依林. 基于模型预测控制的永磁同步直线电机驱动控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [5] YANG Yilin. Research on drive control of permanent magnet linear synchronous motor based on MPC[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [6] 姚延风, 刘强, 吴文镜. 基于刚柔-机电耦合的机床直线电机进给系统动态性能仿真研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 191-196.
- [7] YAO Yanfeng, LIU Qiang, WU Wenjing. Dynamic simulation of a linear motor feed drive system based on rigid-flexible & electrical-mechanical coupling[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 191-196.
- [8] 李加进. 基于模态缩减法的进给系统机电耦合建模及性能分析[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [9] LI Jiajin. Electromechanical coupling modeling and performance

research of the drive system based on model order reduction[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.

[6] 雷中舵. 基于机电仿真的超精密机床主轴与进给系统耦合特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

LEI Zhongduo. Research on the coupling characteristics between the spindle and the feed system of ultra-precision machine tool based on electromechanical simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[7] YANG Z Q, CUI W, ZHANG W B, et al. A new performance optimization method for linear motor feeding system[J]. Actuators, 2023, 12(6): 233.

[8] BUI M X, MINH PHAM V. A new neural network based method for online parameters identification of the interior permanent magnet synchronous machines[C]//IECON 2022 - 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. October 17-20, 2022, Brussels, Belgium. Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 1-6.

[9] 李忠群, 欧阳芷楠, 刘鸿, 等. 数控机床直线电机进给伺服系统的动态特性分析与研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(22): 78-85.

LI Zhongqun, OUYANG Zhinan, LIU Hong, et al. Analysis and study on the dynamic characteristics of CNC machine tool linear motor feed servo system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(22): 78-85.

[10] 冯立文, 陈春桦, 伍广. 垂直变速变负载直线电机控制系统研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(1): 199-203.

FENG Liwen, CHEN Chunhua, WU Guang. Research on control system of vertical variable speed and variable load linear motor[J]. Machine Building & Automation, 2023, 52(1): 199-203.

[11] VESOVIĆ M, JOVANOVIĆ R, TRIŠOVIĆ N. Control of a DC motor using feedback linearization and gray wolf optimization algorithm[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(3): 16878132221085324.

[12] YANG C G, HU G Y, SONG Q C, et al. Fixed-time sliding mode control for linear motor traction systems with prescribed performance[J]. Energies, 2024, 17(4): 952.

[13] 周伟, 赵俭, 金世康. 永磁同步直线电机的复合控制及前馈参数智能整定[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(11): 116-121.

ZHOU Wei, ZHAO Jian, JIN Shikang. Compound control of permanent magnet synchronous linear motor and intelligent setting of feedforward parameters[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(11): 116-121.

[14] 盛贤君, 路赛利, 刘宁. 多轴伺服系统的非线性PID交叉耦合轮廓控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(12): 67-70.

SHENG Xianjun, LU Saili, LIU Ning. Nonlinear PID cross-coupling contour control of multi-axis servo system[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(12): 67-70.

[15] 张靖, 丁杰雄, 李晴朝, 等. 基于最小区域原则的五轴机床轮廓误差估计算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(11): 5-9.

ZHANG Jing, DING Jiexiong, LI Qingzhao, et al. An estimation algorithm of contouring errors for five-axis machine tool based on the principle of the minimum conditions[J]. Modular Machine Tool &

Automatic Manufacturing Technique, 2021(11): 5–9.

[16] 原浩, 赵希梅. 基于全局任务坐标系的直驱XY平台学习互补滑模轮廓控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(10): 2141–2148.

YUAN Hao, ZHAO Ximei. Learning complementary sliding mode contouring control based on global task coordinate frame for direct drive XY table[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(10): 2141–2148.

[17] 原浩, 赵希梅, 杜畅. 基于双边层滑模观测器的双轴直驱平台迭代学习轮廓控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(4): 81–87.

YUAN Hao, ZHAO Ximei, DU Chang. Iterative learning contouring control for dual axis direct drive platform servo system with dual boundary layer sliding mode observer[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(4): 81–87.

[18] 王春阳, 张来, 王大森, 等. 基于迭代学习交叉耦合的轮廓误差控制方法研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(8): 48–55.

WANG Chunyang, ZHANG Lai, WANG Dasen, et al. Research on contour error control method based on iterative learning cross-coupling[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(8): 48–55.

[19] 李争, 肖宇, 孙鹤旭, 等. 基于速度前瞻的双轴直线电机交叉耦合控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 973–983.

LI Zheng, XIAO Yu, SUN Hexu, et al. Speed prospective based cross-coupling control strategy for dual-axis linear motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 973–983.

[20] 黄华, 赵秋舸, 何再兴, 等. 基于LSTM与牛顿迭代的两轴系统轮廓误差控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(1): 10–20.

HUANG Hua, ZHAO Qiuge, HE Zaixing, et al. Contour error control of two-axis system based on LSTM and Newton iteration[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(1): 10–20.

[21] 陈逸山, 张剑. 基于磁场定向控制的直线电机控制系统研究[J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(11): 83–86.

CHEN Yishan, ZHANG Jian. Study on control system of linear motor based on field-oriented control[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2023, 59(11): 83–86.

[22] 徐永明, 曹向东, 李旭, 等. 直线电机运动系统输入到状态稳

定性分析[J]. 制造技术与机床, 2023(11): 34–38.

XU Yongming, CAO Xiangdong, LI Xu, et al. Input-to-state stability analysis of linear motor motion systems[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(11): 34–38.

[23] BORASE R P, MAGHADE D K, SONDKAR S Y, et al. A review of PID control, tuning methods and applications[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2021, 9(2): 818–827.

[24] CHEN M, WANG Z Y. Parameter identification of permanent magnet synchronous motors based on NARX neural network[C]//2024 13th International Conference of Information and Communication Technology (ICTech). Xiamen, 2024.

[25] 侯新国, 涂萱, 赵镜红, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的直线感应电机速度观测[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 226–233.

HOU Xinguo, TU Xuan, ZHAO Jinghong, et al. Speed observation of linear induction motor based on extended Kalman filter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 226–233.

[26] MORELLI E A. Real-time parameter estimation in the frequency domain[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2000, 23(5): 812–818.

[27] 刘成颖, 刘龙飞, 孟凡伟, 等. 基于遗传算法的永磁直线同步电机伺服系统参数设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(12): 1751–1757.

LIU Chengying, LIU Longfei, MENG Fanwei, et al. Genetic algorithm based parameter selection of permanent magnet linear synchronous motor servo system design[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(12): 1751–1757.

[28] JIA Z Y, MA J W, SONG D N, et al. A review of contouring-error reduction method in multi-axis CNC machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 125: 34–54.

[29] JIANG Y K, CHEN J H, ZHOU H C, et al. Contour error modeling and compensation of CNC machining based on deep learning and reinforcement learning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(1–2): 551–570.

(责编 七七)