

基于注意力机制和位置误差的数控机床 加减速智能控制方法

马海国[†]

(西安航空职业技术学院工程技术研究院, 陕西 西安 710089)

摘要:由于机床加工速度和路径控制智能性较差,加工精度和工件质量受到影响。为此,研究了基于注意力机制和位置误差的数控机床加减速智能控制方法。构建数控机床运动学模型,计算数控机床内圈结构与外圈结构的运动频率理论值;以注意力机制跟踪机床运动轨迹,对数控机床的加减速尺度系数加以确定;将尺度系数作为控制参数,参考内圈与外圈结构的运动位置节点,基于位置误差获取加减速过程中的时间插补周期;按照模糊向量转换规则确定控制变量,结合插补周期反演推理数控机床加减速控制量,智能控制数控机床加减速过程。实验结果表明:选择步进电机作为数控机床的驱动电力系统,分别对电机供给的三相运动曲线进行控制,新方法能够实现较为理想状态的控制效果,可以保证该类型数控电机的加工精度,具有应用价值。

关键词:注意力机制;位置误差;数控机床;加减速;智能控制

中图分类号:TG547

文献标识码:A

Intelligent Control Method for Acceleration and Deceleration of CNC Machine Tools Based on Attention Mechanism and Position Error

MA Haiguo[†]

(Engineering Technology Research Institute of Xi'an Aviation Vocational and Technical College, Xi'an, Shaanxi 710089, China)

Abstract: Due to poor intelligence in machine tool processing speed and path control, processing accuracy and workpiece quality are affected. Therefore, an intelligent control method for acceleration and deceleration of CNC machine tools based on attention mechanism and position error is studied. Construct the kinematic model of CNC machine tool, and calculate the theoretical values of the motion frequency of the inner and outer ring structures of CNC machine tools; Using attention mechanism to track the motion trajectory of machine tools and determine the acceleration and deceleration scale coefficients of CNC machine tools; Using the scale coefficient as the control parameter and referring to the motion position nodes of the inner and outer ring structures, the time interpolation period during the acceleration and deceleration process is obtained based on the position error; Determine the control variables according to the fuzzy vector transformation rules, and use interpolation period inversion to infer the acceleration and deceleration control amount of CNC machine tools, intelligently controlling the acceleration and deceleration process of CNC machine tools. The experimental results show that selecting a stepper motor as the driving power system of a CNC machine tool and controlling the three-phase motion curve supplied by the motor separately can achieve ideal control effects and ensure the machining accuracy of this type of CNC motor, which has practical value.

Key words: attention mechanism; position error; CNC machine tools; acceleration and deceleration; intelligent control

收稿日期:2024-01-12

基金项目:陕西省高校工程研究中心立项建设项目(11610000741297059L/2021-191)

作者简介:马海国(1982—),男,陕西汉中,人,本科,副教授,研究方向:智能制造,自动控制,职业教育管理与研究。

[†]通信联系人, E-mail: xin69906819@163.com

数控机床的加工技术不断向精密化和智能化以及高效化的方向发展,部分发达国家研究出了多种新型的数控加工机床。例如,最新的数控加工机床的加工精度,在加工尺寸要求上已经可以达到 $\pm 2.5 \mu\text{m}$,加工的表面粗糙度最佳可以低于 $0.3 \mu\text{m}$,加工的拐角值可小于 0.03 mm 。现代化智能技术和控制技术的发展不断推动着数控机床加工技术的发展,但由于数控机床加工本身的原理和加工特征,在整个加工过程中还是会存在一些原因影响加工的精度以及工件的质量。其中,当数控机床的机械性能发生变化时会产生振动,从而影响数控机床各轴的加速和减速运动,若不能对数控机床在加工过程中的加减速进行有效控制,会造成难以挽回的严重后果。在文献[1]中,在机理驱动作用下建立了数控机床驱动模型,在该模型中能够预测出数控机床在任意运动中的轴向坐标,并且在补偿器的作用下进行 IP 协议,以此实现对数控机床的轴向运动预测和补偿。通过机理驱动作用能够对数控机床的时变运动误差进行预测,在一定程度上使得机床运动的精度及稳定性有所提高。文献[2]中,同样针对数控机床的轴向运动误差进行控制,提出了以 PID 控制技术为基础的运动误差补偿方法,在其整个运动轨迹中进行多轴的联合计算,以此保证数控机床能够在既定的运动轨迹中进行运动。在 PID 控制下能够完成数控机床的多轴联合,有效控制数控机床在不同轨迹中的运动参数,使其不受机床运动速度的影响。以上两个方法均可以提升数控机床的运动控制精度,主要是通过运动误差补偿进行轨迹控制,以此减少运动速度对机床技工精度的影响,但具体对数控机床的加减速控制仍无法得到具体保证。基于此,本文通过注意力机制和位置误差两种技术进行研究,设计一个全新的数控机床加减速智能控制方法,为全面提高数控机床的加工质量提供理论支持。

1 数控机床运动学模型构建

在对数控机床的加减速智能控制过程中,需要通过构建数控机床运动学模型,分析机床各个运动结构的传动特性^[3]。并在不同传动特性下,基于运动学模型,采用量化方式进行运动频率理论值的计算。为了便于后续的数控机床加减速控制,将数控机床传动特性划分为驱动端的加减速、基座运转的加减速、时间序列下的加减速。为统一多个类型下

的数控机床加减速控制理论值,直接以机床运动过程中的运动频率参数为控制基础,构建数控机床运动学模型:

$$\begin{cases} p_o = \frac{1}{2}t\left(1 + \frac{r}{e}\cos\delta\right)p_q \\ p_i = \frac{1}{2}t\left(1 - \frac{r}{e}\cos\delta\right)p_w \end{cases} \quad (1)$$

式中, p_o 为通过内圈某一个点的运动频率; p_i 为通过外圈某一个点的运动频率^[4]; t 为机床运动结构中包含的内圈与外圈个数; r 为机床运动结构内圈直径; e 为机床运动结构外圈直径; δ 为机床运动接触角; p_q 为数控机床加工过程中的内圈相对运动频率; p_w 为外圈的相对运动频率^[5]。通过内圈与外圈的相对运动频率,对数控机床整体的运动频率控制理论值进行计算:

$$p_u = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{r}{e}\cos\delta\right)p_w \cdot p_q \quad (2)$$

$$p_y = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{r}{e}\cos\delta\right)p_w \cdot p_q \quad (3)$$

式中, p_u 为机床在运动过程中内外圈所需保持的相对频率。 p_y 为数控机床整体的运动频率理论值。本文数控机床加减速智能控制解决的关键即缩减机床实际加减速过程中数控机床整体的运动频率与上式获得的需要保持的理论频率之间的差距。而该频率差与机床加减速尺度系数存在较大关联,因此需要通过注意力机制建立对应函数,确定数控机床加减速尺度系数。

2 融合注意力机制确定机床加减速尺度系数

根据上节中运动学模型计算出运动频率控制目标,将注意力机制应用在数控机床的加减速控制过程中,主要是利用注意力机制中的思维方式。注意力机制是一种模仿人类视觉或听觉系统中的注意力机制而设计的一种机器学习技术。其原理类似于生物学中人类大脑对信息处理时的注意力分配机制,可以使模型控制输入数据中最相关的部分,并进行分类控制。在数控机床的运动筛查中,引入注意力机制灵活地根据运动加减速特征,将数控机床的任务变化进行区域划分,从而对其运动情况进行定位,以此对其运动加减速相关的尺度系数进行确定^[6]。基于上节获取的内外圈运动频率和相对频率以及理论值,按照注意力机制建立控制函数,确定数控机床运动过程中加减速的尺度系数如下:

$$a_{oi} = \frac{\exp(f_{p_u} \cdot f_{p_y})}{\sum_{s=1}^s \sum_{d=1}^d (f_{p_u} \cdot f_{p_y})} \quad (4)$$

式中, o 表示数控机床运动过程中内圈的变化位置; i 运动过程中外圈的变化位置; a_{oi} 为位置 o 相对于位置 i 的控制函数, 能够表示注意力机制中位置 o 相对于位置 i 的变化响应; s 为内圈的所有位置节点数量; d 为外圈的所有位置节点数量, 两者取值范围分布为 $o = 1, 2, \dots, s, i = 1, 2, \dots, d$; f_{p_u} 为内外圈相对频率的尺度系数^[7]; f_{p_y} 为整体运动过程的理论尺度系数。

对数控机床运动过程中的相对频率以及整体频率理论值的尺度系数计算, 可以约束数控机床在加减速运动中的变化范围, 因此, 尺度系数也可以称作运动参数^[8]。分别以尺度系数对应数控机床内圈与外圈的运动过程, 在每一个运动变化过程中, 对位置节点处的运动频率进行辨识:

$$[g]_{oi} = \frac{1}{\chi \sum_{s=1}^s \sum_{d=1}^d \exp(f_{p_u}'' \cdot f_{p_y}'')} \quad (5)$$

$$[g] = \begin{bmatrix} f_{p_1}'' \cdot f_{p_1}' & f_{p_1}'' \cdot f_{p_2}' & \cdots & f_{p_1}'' \cdot f_{p_y}' \\ f_{p_2}'' \cdot f_{p_1}' & f_{p_2}'' \cdot f_{p_2}' & \cdots & f_{p_2}'' \cdot f_{p_y}' \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{p_u}'' \cdot f_{p_1}' & f_{p_u}'' \cdot f_{p_2}' & \cdots & f_{p_u}'' \cdot f_{p_y}' \end{bmatrix}_{oi} \quad (6)$$

式中, χ 为尺度因子; f_{p_u}'' 、 f_{p_y}'' 分别为尺度系数的转置参数^[9]; $[g]_{oi}$ 为注意力机制下对任意位置变化的频率辨识矩阵, 能够表示数控机床内圈与外圈运动中位置 o 、 i 的变化过程。一般情况下, 数控机床的尺度参数能够直接控制加减速运动, 但受到机床运动点任意位置变化的影响, 只利用该尺度系数直接控制加减速运动会出现控制误差。因此需要对不同位置节点处的误差进行矫正, 并利用位置误差进行后续的控制插补。

3 基于位置误差的加减速时间插补周期确认

上节按照内圈与外圈的运动形式, 获取数控机床在运动过程中的加减速控制尺度系数, 但由于数控机床在加工过程中还会受到伺服系统控制, 系统的实际响应位置和指令位置会产生偏差, 包括位置误差和速度前馈^[10]。因此需要确定伺服系统指令发出过程中所需的位置误差, 针对位置误差的速度前馈进行周期补偿计算。具体如下:

$$\Delta h^+ = \frac{j}{\min_k(l \cdot z)} \cdot (1 - f_{p_u}'' \cdot f_{p_y}'') \quad (7)$$

$$\Delta h^- = \frac{j^2}{2 \cdot \min_k(l \cdot z)^2} \cdot (1 + f_{p_u}'' \cdot f_{p_y}'') \quad (8)$$

式中, Δh^+ 为加速过程中的位置误差^[11]; Δh^- 为减速过程中的位置误差; j 表示速度前馈反应中的进给速度, 单位为 mm/s; $\min_k$ 为最小检测系数; l 为位置增益; z 为补偿系数。通过加减速的位置误差 Δh^+ 、 Δh^- 可知, 其周期补偿为反向调整, 即加速过程以“—”方式进行补偿, 减速过程以“+”方式进行补偿^[12]。

在对数控机床的加减速控制中, 以位置误差进行伺服系数的滞后补偿, 可以直接根据速度的前馈反应进行变化。对于数控机床的加减速控制, 需要保证在反馈变化中伺服系统的运行平滑度, 以此减少控制过程中的波动性^[13]。为此, 参考时间常数获取加减速时间周期, 将其作为插补周期进行平滑控制处理, 指数型、直线型、钟型插补进行如下划分:

$$c_1 = \frac{1}{2} x^2 \frac{j_0}{\Delta h^\pm} \quad (9)$$

$$c_2 = \frac{1}{24} x^2 \frac{j_0}{\Delta h^\pm} \quad (10)$$

$$c_3 = \frac{1}{48} x^2 \frac{j_0}{\Delta h^\pm} \quad (11)$$

式中, c_1 为指数插补周期, 其对机械性的加减速平滑处理较好, 但响应时间较长; c_2 为直线插补周期, 该类型插补的响应时间较快, 但对数控机床的机械冲击较大; c_3 为钟型插补周期, 其具有较快的响应时间, 且响应冲击较小; j_0 为数控机床的初始运行速度; x 为数控机床加工设定的运行时间; $\Delta h^\pm$ 为加减速的整体位置误差。三种插补类型可以对应不同的加减速控制模式, 在插补应用过程中可以根据实际情况进行选用, 以此结合插补周期推理数控机床的加速与减速控制量。

4 数控机床加减速控制量周期推理

上节获取的不同类型插补周期中, 钟型插补周期的响应时间以及响应冲击均具有较大优势, 因此以该类型插补作为推理基础, 根据钟型插补周期进行控制量推理。整个推理以对应加减速速度位置误差中的反向补偿为基准, 再另外选择模糊控制理论反向推演速度控制变量。具体是利用模糊控制方法理论对钟型插补周期参数进行模糊离散, 并构建模糊变量规则, 根据模糊变量隶属度对离散后的参数控制量进行赋值, 获得加减速的控制量, 从而完成数控机床加减速智能控制。加减速控制变量的设定取值范围为:

$$v = \begin{cases} \frac{b - b_{\max}}{v - b_{\max}}, & b > b_{\max} \\ 0, & b \geq b_{\min} \text{ 或 } b \leq b_{\max} \\ \frac{b - b_{\min}}{b_{\min}}, & b > b_{\min} \end{cases} \quad (12)$$

式中, v 为加减速控制量^[14]; b 为设定阈值, $b_{\max}$ 、 $b_{\min}$ 分别表示最大值和最小值。根据设定的取值范围, 结合上文中的钟型插补周期进行模糊离散, 对此次离散后的精确度和向量进行关系附属赋予^[15]。通过模糊变量的规则建立相对应的赋值表, 见表 1。

表 1 模糊变量赋予关系规则表

变量	QW	QE	QR	0	TR	TE	TW
QW	0	0	0	0	0.4	0.8	0.3
QE	0	0	0	0	1.0	0.7	0.2
QR	0	0	0	0.3	0.1	0	0
0	0	0	0	1.0	0	0	0
TR	0	0	0.1	0.3	0	0	0
TE	0.2	0.7	1.0	0	0	0	0
TW	1.0	0.8	0.4	0	0	0	0

表 1 中, 分别以 QW 、 QE 、 QR 、 0 、 TR 、 TE 、 TW 表示模式控制向量, 其向量的变化范围为 $[0, 1]$ 。通过这 7 种模糊向量进行离散精确度的赋予, 以此获得加减速的控制量, 在不同的赋予值下计算加减速的控制量, 过程为:

$$n_{\Delta h^+} = -m \cdot \frac{v}{\beta} \cdot \left(\left| \frac{\Delta h^+}{2} \right| - 0.5 \right)$$

(13)

$$n_{\Delta h^-} = m \cdot \frac{v}{\beta} \cdot (|\Delta h^-| + 0.5)$$

(14)

式中, $n_{\Delta h^+}$ 为加速过程中的控制量; $n_{\Delta h^-}$ 为减速过程中的控制量; $[-m, m]$ 表示钟型插补周期的离散有限域; β 为模糊变量的隶属度; n 为离散后的误差控制量。

基于运动频率控制量实现数控机床加减速智能控制。

5 实验

数控机床的速度突变会进一步加重数控机床加工速度的变化, 严重影响数控机床对加工工件的制作质量。为实现数控机床的精准操作, 此次选择的步进电机数控系统主要通过三相电压进行机床运行动力供给, 运行原理为: 三相电压会通过三相全桥逆变器转化为直流电, 输出的三相直流电进行同步电机的动力供给, 且增加了参考项进行输出电压和电流的指令变化。见图 1。

如图 1 所示, 在该系统中, 三相电压电源为 700 V, 电流相位差为 125° , 以输入转速为 355 rad/s 为基础, 在额定转矩为 1.5 N/s 的标准下进行机床加工运动。按照系统时钟给定为 1 进行输出, 速度的下降时间点为 0.15 s, 速度上升的时间点为 0.05 s, 在上述设定下获取步进电机数控机床的曲线运动变化情况, 见图 2。

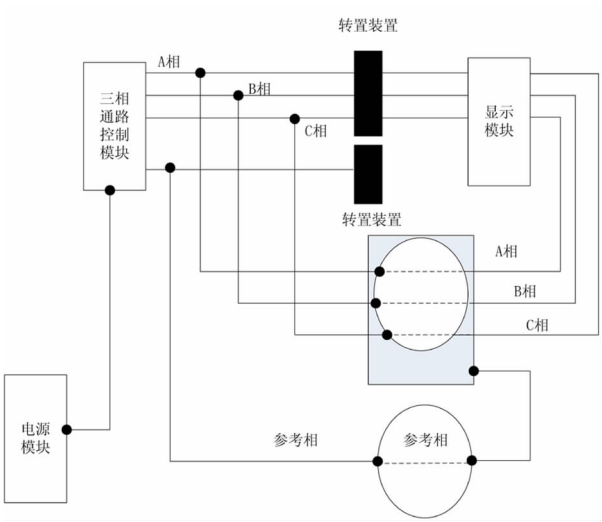


图 1 步进电机数控机床系统结构

根据图 2 中的测试结果, 在理想状态下各相的运动曲线基本为平滑状态, 即在初始时间段内速度逐渐攀升, 当时间点为 0.05 s 时完成加速过程, 在 0.05 s 到 0.15 s 这一时间段均以 355 rad/s 进行匀速运动, 并在 0.15 s 这个时间点速度开始下降, 且在 0.2 s 完成减速运动, 保证数控机床在这个时间段内保持标准运动, 无论是机床还是工件均不会造成损坏。

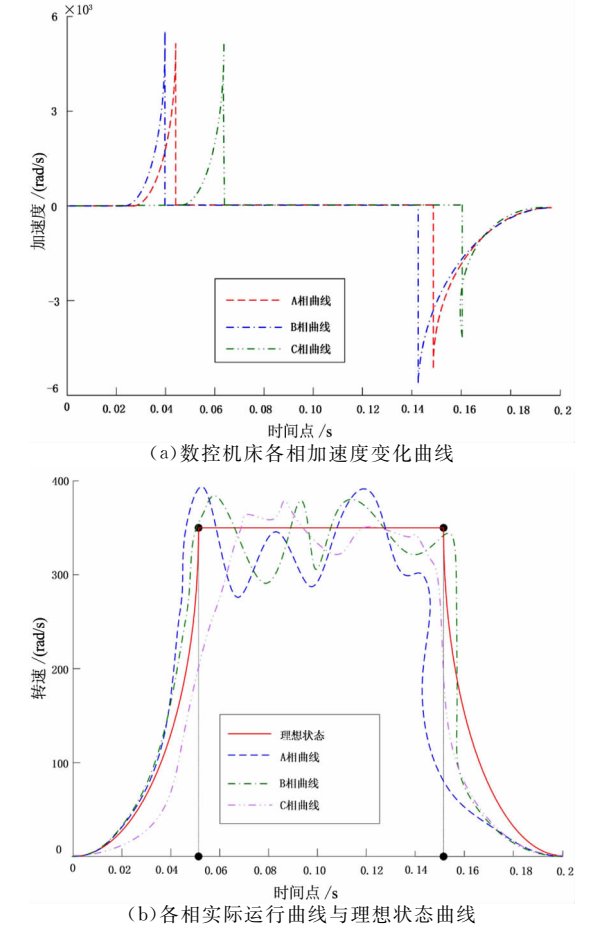


图 2 步进电机数控机床运动曲线

由于步进电机的运动特性,其位置变化会导致速度产生变化,在这种模式下,A 相、B 相、C 相所呈现的运动曲线均与理想状态具有差异性,且各相的实际运行情况差异性有所不同。对于控制方法的应用,其目的就是保证实际运动过程与理想状态保持一致,因此,以给定的理想状态作为参考指标,将新方法与传统方法进行比较。本次传统方法分别为基于机理驱动的控制方法和基于 PID 的控制方法,分别将三组方法连接到测试模型中,并通过模型中的输出模块获取控制结果,见图 3。

根据图 3 中的测试结果,并对应图 2 中的各相曲线变化情况,能够看出每组控制方法的均可以实现曲线的控制,各方法的性能指标测试结果如表 2 所示。

由表 2 和图 3 可知,新方法对各相的曲线控制更加贴近于理想状态,在 0.05 s 到 0.15 s 这一时间段的转速与理想值 355 rad/s 差距最小,且波动较小,能够达到精准控制的效果,而两组传统方法

虽然具有一定的控制效果,这两组方法主要对匀速过程中的速度控制具有较好的效果,但加速和减速控制中所产生的曲线与理想状态仍存在少许差距。综合上述结果可知,新方法能够在注意力机制的作用下进行位置跟踪,并通过位置误差进行同步补偿,以此实现了数控机床加工过程中加减速度的智能化控制,具有应用前景。

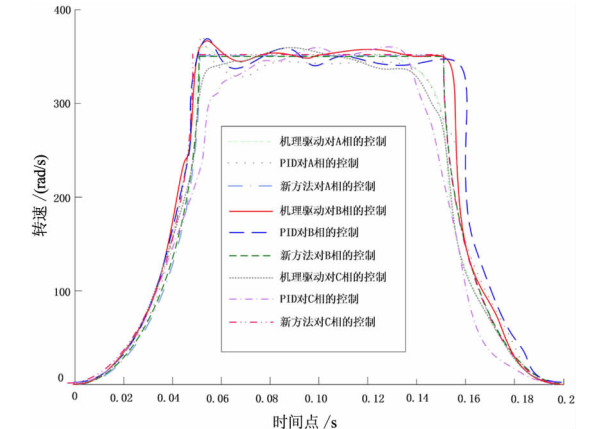


图 3 不同方法下的各相曲线控制效果

表 2 不同方法的性能指标测试结果

时间点/s	转速/(rad/s)								
	机理驱动 A 相控制	PID 的 A 相控制	新方法 A 相控制	机理驱动 B 相控制	PID 的 B 相控制	新方法 B 相控制	机理驱动 C 相控制	PID 的 C 相控制	新方法 C 相控制
0.02	37	35	34	38	36	33	39	38	34
0.04	121	125	128	122	129	128	124	126	127
0.06	348	351	356	344	349	355	349	366	355
0.08	358	360	357	373	357	357	362	371	357
0.10	361	365	355	362	360	355	371	377	356
0.12	366	352	356	369		356	369	359	355
0.14	347	350	357	348	354	357	368	345	357
0.16	366	357	355	362	356	356	364	351	355
0.18	36	41	21	33	39	22	32	45	22
0.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0

6 结 论

为实现对数控机床加减速的智能控制,通过注意力机制和位置误差设计新的控制方法,实现了数控机床的适应性,使其能够在复杂的环境中降低操作难度,以此保证数控加工加工的精度和质量。

但由于测试中只选择了步进电机作为测试对象,得到的研究成果仍然具有单一性,后续研究中会增加多类型的驱动系统,为实现全面的数控机床控制提供技术支持。

参考文献

[1] 刘阔,宋磊,陈虎,等. 机理驱动的数控机床进给轴时变误差建模和补偿方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(3):251-258.
[2] 史燕,吴璞. 基于 PID 控制的多轴联动数控机床运动误差补偿[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1):278-282.
[3] 陈发堂,戴东林,袁立. 基于双重注意力机制的大规模 MIMO 系统 CSI 反馈[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2022, 42(6): 10-18.

[4] 黄智,刘永超,廖荣杰,等. 基于 SSO 算法优化神经网络的数控机床热误差建模[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42 (11):1569-1578.
[5] 张俊男,付华,陆鹏,等. 基于 ASGSO 的数控机床进给伺服系统分数阶控制[J]. 机床与液压, 2023, 51(6):142-148.
[6] 许春,徐维,胡杰. 基于注意力机制的数控机床进给轴深度学习故障诊断[J]. 机床与液压, 2023, 51(7):214-219.
[7] 卢成伟,吴铨洋,钱博增,等. 数控机床机电-刚柔耦合特性分析下的进给系统动态运动误差溯源方法[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(10):1577-1584.
[8] 杜柳青,李仁杰,李宝钊. 基于注意力机制的数控机床热误差深度学习预测方法[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(6):194-203.
[9] 卢成伟,钱博增,王慧敏,等. 工件分特征下的五轴数控机床关键几何误差分析与补偿方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(14): 1646-1653.
[10] 杨秀芝,查吉利,徐绍勇,等. BF-850B 立式高速数控机床精度检测及误差补偿研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(22):80-83.
[11] 陈宇翔,栗强强. 强化学习算法在机器人轨迹优化控制与智能纠偏中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(11):111-114.
[12] 孙兆龙,钱翰宇,刘振田,等. 基于 ARM+FPGA 的永磁无刷直流电机控制智能方法[J]. 海军工程大学学报, 2023, 35(1):93-98.
[13] 曲乙澍,杨旭. 基于可变论域模糊控制的高精度数控机床控制仿真[J]. 机床与液压, 2022, 50(21):175-180.
[14] 张青山,吴正平. 基于粒子群优化的改进四次 S 型加减速控制算法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8):3338-3344.
[15] 赵军,齐东昱,卜庆奎,等. 基于变形控制的 A100 材料高效数控加工技术[J]. 工具技术, 2023, 57(2):119-122.