

# 深度强化学习的数控机床几何误差标定与补偿研究

李宁

(广东石油化工学院,广东 茂名 525000)

**摘要:**为了提高数控机床的加工精度,需要进行数控机床的几何误差标定与补偿。采用自由来流与圆柱中心连线的准线性标定方法构建数控机床控制约束参数测量模型,进行数控机床的输出载荷计算和结构力学参数评估,通过特征值屈曲分析的方法进行数控机床的几何误差测量,采用深度强化学习的方法进行数控机床几何误差测量和误差补偿控制。仿真结果表明,该方法提高了标定精度,误差补偿能力较强。

**关键词:**深度强化学习;数控机床;几何误差;误差标定;参数测量;结构力学

**中图分类号:**TH161+.21 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)03-0068-04

## Evaluation Model of Man-machine Interface of CNC Machine Tools Based on Analytic Hierarchy Process and Neural Network

LI Ning

(Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

**Abstract:** To improve the machining accuracy of CNC machine tools, it is necessary to calibrate and compensate the geometric errors of CNC machine tools. A quasi linear calibration method of free flow and cylinder center line was used to construct the control constraint parameter measurement model of CNC machine tools. The output load of CNC machine tools and the evaluation of structural mechanical parameters were carried out. The geometric error of CNC machine tools was measured by eigenvalue buckling analysis, and the geometric error measurement and error compensation of CNC machine tools were implemented by deep reinforcement learning method compensation. The simulation results show that the method has higher precision and better ability of error compensation.

**Keywords:** deep reinforcement learning; CNC machine tool; geometric error; error calibration; parameter measurement; structural mechanics

## 0 引言

随着机械加工技术的发展,采用数控机床进行机械零部件加工的精度越来越高。在进行复杂零部件加工过程中,可能会受到数控机床几何误差和机械构件差异性因素的影响,导致数控机床加工的可靠性不高,稳定性不好,需要构建数控机床几何误差标定与补偿模型。结合数控机床几何误差的优化测量和机床的优化控制研究,实现数控机床几何误差标定与补偿,以提高数控机床加工的稳定性和可靠性<sup>[1]</sup>。

对数控机床几何误差标定与补偿是建立在对数控机床几何误差测量和标量控制基础上,进行数控机床几何误差参数分析,通过模糊度检测和识别的方法,进行数控机床几何误差标定和反馈跟踪融合补偿,实现数控机床的优化控制<sup>[2]</sup>。传统方法中,对数控机床几何误差标定与补偿方法主要有基于模糊PID的数控机床几何误差标定控制方法、基于反馈融合参数测量的数控机床几何误差标定方法等,构建参数测量和自适应误差补偿模型,进行数控机床几何误差标定补偿<sup>[3-4]</sup>。但传统方法进行数控

机床几何误差标定与补偿的自适应性不好,稳定性不高。针对上述问题,本文提出一种基于深度强化学习的数控机床几何误差标定与补偿方法。首先采用自由来流与圆柱中心连线的准线性标定方法构建数控机床控制约束参数测量模型,进行最大的侧向变形修正,采用深度强化学习的方法,进行数控机床几何误差测量和误差补偿控制,提高数控机床的加工精度。最后进行仿真测试分析,展示了本文方法在提高数控机床几何误差标定和补偿能力方面的优越性能。

## 1 数控机床几何误差标定的参数测量模型

### 1.1 参数采样分析

为了实现深度强化学习的数控机床几何误差标定与补偿,首先采用自由来流与圆柱中心连线的准线性标定方法构建数控机床控制约束参数测量模型,分析数控机床几何标定点的误差参数,通过边缘的应力水平参数分析,建立数控机床控制约束模型,在  $K_i = k_1, k_2, \dots, k_i$  个时刻进

行数控机床控制的误差参数测量和线性跟踪识别。分析数控机床控制的稳态特征量,通过等效离心载荷特征分析的方法,进行数控机床的稳态测量<sup>[5]</sup>,得到  $J$  个过程变量,并在高温、高转速和高频振动下,得到数控机床几何误差标定的参量分布集合表示为  $X_i(J \times K_i)$ ,其中  $i=1, \dots, I$ ,在不同的加工轨迹长度  $K_i$  下,进行数控机床几何误差标定,如图 1 所示。

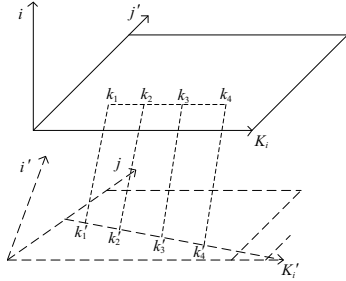


图 1 数控机床几何误差标定模型

在图 1 所示的数控机床几何误差标定模型中,通过高维特征空间重构的方法<sup>[6]</sup>,得到最大动态响应与静态响应的相空间重构轨迹矩阵为

$$X_n = \begin{pmatrix} x_1 k_1 & \cdots & x_1 k_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n k_1 & \cdots & x_n k_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中:  $n$  为数控机床几何误差测量的变量个数;  $k$  为数控机床几何误差采样时刻。

在临界约束条件下,通过数控机床几何误差测量,得到数控机床时间误差分布的欧式距离  $d_{i,j}$  为

$$d_{i,j} = \frac{k'_i - k_i}{2w} \quad (2)$$

式中  $k'_i$  为理论时间。

对不同刀具直径加工条件下的几何误差进行偏度测量,  $w$  为数控机床几何特征量标定的理论距离,得到偏度  $r_i$  和峭度  $v_i$  分别为:

$$r_i = \frac{k_i(1-k_i'^2)a}{4(w^2-d_{i,j}^2)b} \quad (3)$$

$$v_i = \left( \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \frac{x_n k_i}{2w} \right) \theta \quad (4)$$

数控机床优化控制约束的其他约束参数如下:

$$\begin{aligned} a &= x_i w \\ b &= k_i x_i / a^2 \\ \theta &= \frac{k_i^2}{d_i} \end{aligned} \quad (5)$$

由此可见,构建数控机床控制约束参数测量模型,可以对数控机床加工板件的结构刚度和钢板屈曲响应进行分析<sup>[7-9]</sup>。

## 1.2 数控机床优化控制约束模型

通过特征值屈曲分析,进行数控机床的输出载荷计算和结构力学参数评估,得到数控机床控制约束分布特征向量  $N$ 。多轴数控加工中,如果只取前  $i$  个主元,得到走刀方向垂直的临界平面的主元模型:

$$F = \frac{\beta_i p_i}{\sigma^2} - \frac{1}{N} (\sum ab)^2 \quad (6)$$

其中:  $\beta_i$  为数控机床可行刀轴摆动向量;  $p_i$  为载荷 (loading) 向量。

采用应力分布特征重组的方法,得到数控机床几何误差全桥测量的均值  $\mu$  和方差  $\sigma^2$  分别为:

$$\mu_i = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \frac{x_n k_i}{2wN} \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum (\mu k_i - x_n k_i)^2}{N} \quad (8)$$

数控机床几何误差测量的统计特征用  $F = [\mu_i, \sigma^2, d_{i,j}, r_i, v_i]$  表示,根据零件的加工效率进行误差反馈调节,得到统计特征组合表达式:

$$\delta = (x_0 + x_1 r_1 k_1 + x_2 r_2 k_2 + \cdots + x_n r_n k_n) I_{xx} \quad (9)$$

其中  $I_{xx}$  表示一维特征向量。

通过对数控机床加工板件的结构刚度分析和钢板屈曲响应分析,得到 SPE 控制限按下式计算:

$$Q = \sum \delta^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{\sum \beta_i^2}{z_\alpha} \right)^2 \quad (10)$$

其中  $z_\alpha$  为数控机床加工板件约束参量标准正态分布基点。

基于统计特征分析和约束参量模型构建的方法,计算待加工曲面曲率,进行数控机床几何误差标定与补偿模型优化设计<sup>[10]</sup>。

## 2 深度强化学习的数控机床几何误差标定与补偿优化

### 2.1 数控机床几何误差标定的深度强化学习

通过特征值屈曲分析的方法进行数控机床的几何误差测量,结合参数融合和机构部件的可靠性分析方法<sup>[11]</sup>,得到数控机床几何误差标定的临界点约束方程:

$$F_\tau(X, \tau) = \sum f_\tau(X, \tau) - \frac{F}{\sigma^2} \quad (11)$$

$$F_\theta(X, \theta) = \sum f_\theta(X, \theta) - \frac{F}{\sigma^2} \quad (12)$$

同时满足  $|\Delta f_\tau(X, \tau)| \leq F_\tau(X, \tau)$ ,  $|\Delta f_\theta(X, \theta)| \leq F_\theta(X, \theta)$ 。

在刀轴的摆动误差参考量  $f_\tau(X, \tau)$  的约束下,得到  $f_\theta(X, \theta)$  为数控机床几何误差的约束进化参数,采用深度强化学习<sup>[12]</sup>得到数控机床几何误差标定的强化学习模型为

$$F_0 = aw \left/ \left( \frac{L_q}{F} - U_j \right) \right. \quad (13)$$

其中:  $L_q$  为数控机床几何误差测量的惯性运动参量;  $U_j$  为允许摆动范围离散特征分量。

对当前摆刀平面相交曲线上临界点进行相关约束参数变量分析<sup>[13]</sup>,得到几何误差标定的参数辨识微分方程描述:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial X^2} = \frac{\partial^2 F}{\partial \theta \partial \tau} \quad (14)$$

误差收敛控制的深度强化学习的过程函数为

$$\Delta T = \frac{\Delta \tau}{\omega} + s'(ab_{i,j} + p_i \cdot k_i) \quad (15)$$

其中:  $s'$  是数控机床几何误差标定的输出状态特征量;  $\omega$  是刀轴边缘特征量;  $b_{i,j}$  是沿外法向量方向的偏置距离。

根据上述分析,进行数控机床几何误差标定的深度强化学习收敛性控制。

## 2.2 误差补偿控制优化

结合参数融合和机构部件的可靠性分析方法,进行最大的侧向变形修正,得到临界刀轴的约束泛函式为

$$D = \sqrt{f_\tau(X, t) - d_\tau(t)} - \sqrt{f_\theta(X, \tau) - d_\theta(t)} \quad (16)$$

其中:  $d_\tau(t)$  表示数控机床几何误差补偿的约束分量;  $d_\theta(t)$  是潜在干涉曲面上的刀轴控制参数。沿着摆刀平面与潜在干涉曲面之间相交曲线进行渐进收敛控制,以  $d_\tau(t)$ 、 $d_\theta(t)$  为外部有界干扰,得到数控机床几何误差补偿的 Lyapunov 函数为

$$L = \frac{a^2}{2d_\theta(x)f_\theta(X, \theta)} \quad (17)$$

根据约束平面、回转曲面的正交特性,在深度强化学习控制下,得到整个待加工曲面的曲率优化矩阵:

$$\dot{V} = \begin{bmatrix} f_\tau(X, \tau) & 0 \\ [1-d_\theta(X, \theta)] [1-d_\tau(X, \tau)] & f_\theta(X, \theta) \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据给定处刀具直径分布特性,得到数控机床几何误差补偿的优化控制的响应函数为

$$U_x = \frac{a^2 | [1-d_\theta(X, \theta)] [1-d_\tau(X, \tau)] |}{2f_\tau(X, \tau) f_\theta(X, \theta)} \quad (19)$$

根据上述分析,计算每个特征点处刀具优化参数的推荐值,即满足  $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \delta(X\tau) = c_{onst}$  ( $c_{onst}$  为常数),根据收敛性判断,进行数控机床几何误差标定与补偿设计。

## 3 仿真测试分析

### 3.1 测试环境

为了验证本文方法在实现数控机床几何误差标定与补偿的应用性能,进行试验分析,利用 UG 软件进行数控机床加工模拟,参数设定见表 1。

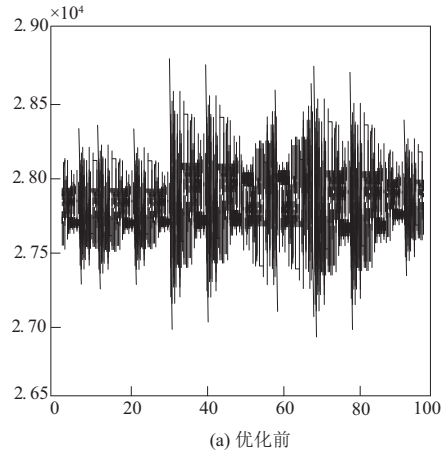
表 1 参数设定

参数	取值
曲面偏置参数	0.47
刀具半径/ $\mu\text{m}$	53~56
刀轴临界约束系数	0.88
离心载荷/kN	25
最大位移响应/mm	40

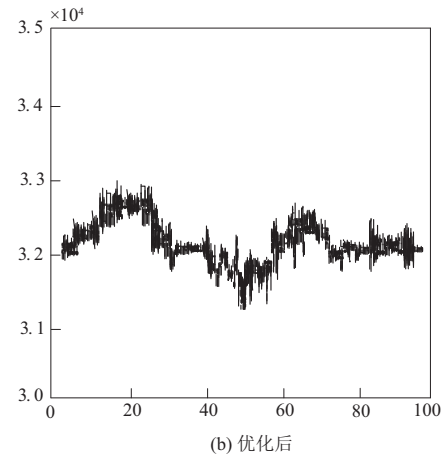
### 3.2 结果与分析

根据上述参数设定,进行数控机床几何误差标定与补偿试验,得到误差补偿前后的进刀轨迹如图 2 所示。分析

图 2 得知,采用本文方法进行数控机床几何误差标定和补偿,进刀轨迹的毛刺较小,说明几何误差标定补偿能力较强。



(a) 优化前



(b) 优化后

图 2 误差补偿前后的进刀轨迹

测试数控机床的控制性能,得到对比结果如图 3 所示。分析图 3 得知,按本文方法进行数控机床几何误差标定,提高了数控基础的控制性能,降低了故障发生率和标定误差,参数优化结果见表 2。

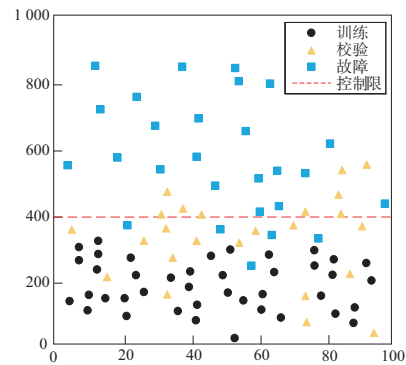


图 3 数控机床控制性能测试

分析表 2 结果得知,按本文方法进行数控机床几何误差标定和误差补偿后的参数优化结果较好,提高了加工精度。为进一步验证本文方法的标定精度,通过对比文献

[9]基于一维测头与标准球的数控机床几何误差机载测量系统和文献[11]微波叶尖间隙传感器信号校准方法,测试同一数控机床的标定精度,得到的对比结果如图4所示。由图4可知,本文方法相较于其他方法标定精度更高,有一定的应用价值。

表2 参数优化结果

参数	实验值	比较值
直径/mm	12.24	13.36
加工效率	0.363	0.433
切削深度/mm	1.764	1.446
进刀参数/rad	0.445	0.457

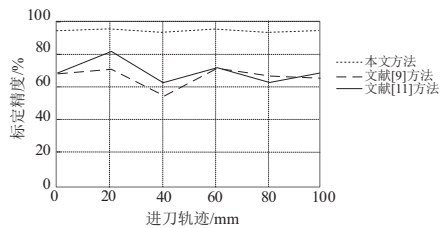


图4 标定精度对比结果

## 4 结语

本文通过数控机床几何误差的优化测量和机床的优化控制研究,构建数控机床几何误差标定与补偿模型,实现数控机床几何误差标定与补偿,提高数控机床加工的稳定性和可靠性。本文提出基于深度强化学习的数控机床几何误差标定与补偿方法,采用应力分布特征重组的方法,进行数控机床的输出载荷计算和结构力学参数评估。根据约束平面、回转曲面的正交特性,在深度强化学习控制下,得到整个待加工曲面的曲率优化参数解析矩阵,实现数控机床几何误差标定与补偿。研究得知,采用本文方法进行数控机床几何误差标定的精度较高,控制精度较好。

## 参考文献:

- [1] 田晶,王英杰,王志,等. 基于 EEMD 与空域相关降噪的滚动轴承故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 144-151.
- [2] 黄敏,马飞扬,刘广哲,等. 应用于飞机测试的 EtherCAT 测试系统实时性测试及分析[J]. 电子测量技术, 2018, 41(20): 93-97.
- [3] 张俊锋,苏健军,姬建荣,等. 热容式热流密度传感器的研制及应用[J]. 中国测试, 2018, 44(10): 125-129.
- [4] 范晋伟,王培桐. 五轴数控机床几何误差建模与分析[J]. 制造业自动化, 2020, 42(4): 43-46, 50.
- [5] 栗江,张慧,曾祥苹. 基于模糊控制的数控机床几何误差补偿控制研究[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 33-35.
- [6] 赵壮,姜志峰,张忠宁,等. 符合阿贝原则的数控机床几何误差建模[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 885-897.
- [7] 周恒飞,叶文华,郭云霞,等. 基于支持向量回归机的数控机床几何误差元素建模研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(17): 50-57.
- [8] 董泽园,李杰,刘辛军,等. 数控机床两种几何误差建模方法有效性试验研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 133-137.
- [9] 林志祥,陈剑雄. 基于一维测头与标准球的数控机床几何误差机载测量系统的研究[J]. 工具技术, 2018, 52(11): 133-137.
- [10] 任秉银,魏坤,吴卓琦. 机械臂视觉伺服路径规划研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(1): 1-10.
- [11] 杨季三,徐贵力,董文德,等. 微波叶尖间隙传感器信号校准研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 193-201.
- [12] 张笑笑,储昭碧,董学平. 基于滑动平均的并联 Buck 变换器均流控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10): 177-182.
- [13] 兰庆庆,肖本贤. 基于网格的密度峰值聚类算法的 RFID 定位[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10): 73-78.

收稿日期:2020-10-19

(上接第 61 页)

基于逐渐损伤分析方法的仿真能对复合材料安装边连接结构的损伤过程进行较好地模拟,对于复合材料安装边连接结构的工程设计与工程维护有一定的参考意义。仿真结果中损伤形式主要以基体开裂和分层损伤为主,这两种损伤形式主要与复合材料的层间性能有关,即与复合材料树脂基体的性能相关。树脂基体的性能受环境温度影响较大,这也解释了安装边连接结构在 200℃ 下强度衰减程度大的原因。

## 参考文献:

- [1] KUMAR H S P, MAYURAM M M, RAGHAVAN K S. Improved analytical model for bolted joint evaluation in gas turbines[C]// [S.I.]: Asme Gas Turbine India Conference, 2012.

- [2] GALAI H, BOUZID A H. Analytical modeling of flat face flanges with metal-to-metal contact beyond the bolt circle[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010, 132(6): 061207.
- [3] 郑权,陈佳,韩涵,吕榕新. L型复合材料机械连接接头承载能力与失效行为研究[J]. 上海航天, 2018, 35(5): 137-142.
- [4] 陈佳,郑权,王志瑾,等. 复合材料 L型端框的失效行为[J]. 复合材料学报, 2017, 34(8): 1772-1779.
- [5] 朱元林,崔海涛,温卫东. 复合材料单排多钉连接三维累积损伤强度分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(4): 497-502.
- [6] 王新新. 湿热条件下复合材料螺栓连接接头强度与疲劳研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.

收稿日期:2020-05-20