# 基于加工指令的五轴机床轮廓误差离线预测 方法

#### 张云廷,陈光胜

上海理工大学机械工程学院,上海

收稿日期: 2025年4月30日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月30日

## 摘要

针对数控机床五轴联动轨迹误差影响加工精度的问题,文章提出了一种基于数控加工指令(G代码)计算 轨迹误差的离线预测方法。首先分析了五轴联动线性插补的RTCP算法和数控系统的插补过程,基于G代 码中所包含的数据得到程序段之间的位移当量、加工时间和实际速度等关键信息,结合RTCP算法与机床 运动学正逆变换获得了任意插补周期的插补数据;然后,分别对平动轴与旋转轴建立包含三环控制环节、 永磁同步电机、机械传动机构的伺服进给系统Simulink仿真模型,从而实现各轴实际位置的预测;之后 采用三次样条插值法计算轮廓误差,通过构建连续轨迹模型提升误差估算精度。实际加工验证在五轴数 控机床上完成,最终实验结果表明:该方法无需依赖机床硬件即可实现误差精准预测,各轴动态误差预 测精度控制在±3 μm以内,复杂加工轨迹轮廓误差预测精度达±2 μm,验证了该方法的有效性。

#### 关键词

轮廓误差,非线性误差,RTCP,五轴数控机床

## Offline Prediction Method of Contour Errors for Five-Axis Machine Tools Based on Processing Instructions

#### Yunting Zhang, Guangsheng Chen

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2025; published: May 30<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

To address the issue of trajectory errors affecting machining accuracy in five-axis CNC linkage systems,

this paper proposes an offline prediction method for trajectory errors based on CNC machining instructions (G-code). The approach first analyzes the RTCP algorithm for five-axis linear interpolation and the interpolation process of CNC systems. By extracting key information such as displacement equivalents, machining times, and actual speeds from G-code data, combined with RTCP algorithms and forward/inverse kinematic transformations of machine tools, interpolation data for arbitrary interpolation cycles are obtained. Subsequently, three-loop control structure models incorporating permanent magnet synchronous motors and mechanical transmission mechanisms are established for both translational and rotational axes using Simulink, enabling the prediction of actual axis positions. Cubic spline interpolation is then applied to calculate contour errors, constructing a continuous trajectory model to enhance estimation accuracy. Experimental validation was conducted on a five-axis CNC machine tool. Results demonstrate that the proposed method achieves precise error prediction without relying on machine tool hardware, with dynamic error prediction accuracy controlled within  $\pm 3 \mu m$  for individual axes and  $\pm 2 \mu m$  for complex trajectories, thereby validating its effectiveness.

## **Keywords**

Contour Error, Nonlinear Error, RTCP, Five-Axis CNC Machine Tool

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

## 1. 引言

随着航空航天、医疗设备、能源电力等领域的精密装备制造水平不断提升,对数控机床运动系统的 动态特性提出了更高要求。作为机床核心执行机构的进给系统,其精度与效率直接影响加工质量与产能, 因此优化进给系统性能已成为现代数控技术领域的重要研究方向。轮廓误差的产生根源在于多轴运动间 的动力学耦合失衡,解决这一问题需从误差建模与控制策略两方面入手[1]。轮廓误差的本质是刀具实际 切削轨迹与理论路径之间的最小空间距离偏差。

当前主流数控系统普遍集成旋转刀具中心点(RTCP)编程功能,允许用户基于工件几何形状与刀具姿态直接规划刀具中心轨迹,系统后台自动完成坐标变换补偿,确保刀具尖端严格沿预设轨迹运行[2]。此外,通过缩小数控系统插补周期,可提高轨迹逼近分辨率,有效抑制非线性误差累积。

在工业应用场景中,单纯依赖指令参数修改难以满足复杂工况需求。部分学者尝试从运动学逆解层 面优化控制效果:为了完善在工业现场中的大规模应用[3],国内外学者对修改数控加工指令数据做了大 量研究,常用的包括加工轨迹、进给速度和伺服系统参数等,然而数控系统的底层控制器往往缺少插补 数据的反馈[4]。Zhou等人针对进给速度影响机床误差的现象,研究了数控机床在误差补偿下进给速度对 补偿效果的影响[5]。You等人通过调整刀具路径的几何参数对五轴加工轮廓误差实施补偿,用实验证明 该方法在抑制路径偏差方面显著优于传统反馈式跟踪误差控制策略[6]。Xu 和 Li 将开发的 G 代码解释器 和深度学习模型集成在一起,以实现 UPM 的实时跟踪误差补偿[7]。Lu 和 Huo 通过五轴切点的速度直接 计算出机床各关节的速度,然后通过对相应的速度进行积分得到关节速度[8]。Liao 等人提出了修改 i 代 码去补偿通过模型预测的轮廓误差,以此达到离线预测轮廓误差的方式,并生成补偿值[9]。He 等人提出 了一种能够定量分析伺服进给系统动态误差的新方法——延时连续法[10]。因此,在实际加工中,加工的 参考指令是轮廓误差的重要组成部分,加工参考指令的研究对轮廓误差控制至关重要。 针对轮廓误差的高精度预测问题,当前主要采用数控系统等效模型构建方法,其技术路径可分为机 理建模与数据驱动建模两类。在机理建模领域,研究者通常通过系统参数辨识与运动学模型融合开展误 差预测。以五轴数控系统为例,吕盾团队通过轴系传递函数辨识构建了动态误差预测模型,实验数据显 示该模型对"S"形试件加工时的轮廓误差预测精度可达±0.04 mm 范围[11]。值得注意的是,王天伟研究 组创新性地引入模糊控制算法对机理模型预测值进行实时补偿,经两轴系统验证,成功将最大轮廓偏差 从 0.07 mm 优化至 0.035 mm [12]。相较而言,数据驱动建模虽能有效提取机床历史加工特征,但在非线 性系统参数辨识方面存在固有局限,导致预测精度难以突破。近年研究表明,结合深度学习的加工特性 复现技术可显著提升动态误差的预测准确性。

在高速精密加工领域,复杂曲面轮廓加工对多轴协同控制提出更高要求。为兼顾加工效率与轮廓精度,除需确保机床定位精度外,更需实现多轴系统的动态响应一致性[13]。

#### 2. 五轴数控机床线性插补算法

#### 2.1. RTCP 算法概述

五坐标机床类型丰富多样,RTCP (Rotational Tool Center Point,刀尖跟随功能)是一项重要技术,如 图 1 所示,其核心作用在于为工程师编写数控程序提供便利。在编程过程中,工程师可借助 UG (Unigraphics NX,综合性工业软件),从 CAM (Computer Aided Manufacturing,计算机辅助制造)模型出发,刀具路径的 规划直接基于工件几何模型而非机床坐标系。系统通过实时解算刀心轨迹点坐标及刀轴矢量,将编程指 令转化为机床各轴的协同运动指令。具体而言,旋转轴的微小角度调整会触发 XYZ 进给轴的线性补偿运 动,通过多轴位移的矢量合成实现插补点与编程轨迹的精确匹配。这种机制允许在不修改加工程序的前 提下调整刀具长度,同时确保刀尖始终沿理论路径运动,显著提升加工重复性和效率。此外,由于编程 速度定义在刀具中心而非刀尖,可更精准控制切削层厚度,改善表面质量。值得注意的是,不同机床的 旋转轴配置(如双摆头、转台结构)会导致 RTCP 算法的数学模型差异,需针对具体机械结构建立差异化补



**Figure 1.** Interpolation diagram of CNC system 图 1. 数控系统插补示意图

为了实现 RTCP 功能,后置处理也要作相应调整。后置处理的主要工作为将从 CAM 出来的 CN 文

件进行变换,主要是为了进行旋转轴的坐标变换,机床机械坐标系转换到机床的工件坐标系。最终目的 在于将 CN 文件转换为数控系统能够识别的 CNC 数控加工程序,从而实现对数控设备的有效指令输入 [14]。在启动 RTCP 功能时, CNC 系统要求输入并非经过坐标转换的控制轴位置坐标,而是刀具中心点 坐标和刀轴方向矢量,因此应在后置处理时将刀具偏移量设为0,从而得到控制轴运动位置坐标。

如果刀具长度发生变化,使用 RTCP 功能,则可以通过对刀仪重新对刀,修改数控面板中刀补长度 即可,无需对工件重新对刀[15]。使用 RTCP 功能工件坐标系原点可以根据需要设置在特殊位置,编程时 与其一致即可,便于装夹,提高加工前的准备效率。RTCP 后置处理时只将刀位文件中刀具姿态(i,j,k)通 过逆运动学变换转化为旋转轴的坐标(*A*,*C*),平动轴坐标与刀位文件中的信息一致。通过 G 代码指令开 启机床 RTCP 功能,其余部分计算由数控系统处理,根据刀补长度和各轴位置关系将刀位信息中的(*x*,*y*,*z*) 通过逆运动学变换转化为机床平动轴的坐标(*X*,*Y*,*Z*)。

由于在启动 RTCP 功能时, CNC 系统要求输入的并非机床的真实机械坐标,而是刀尖点和刀轴在工件坐标系中的空间坐标和方向矢量,因此应在后置处理时将刀具偏移量设为 0。这样得到的各轴机械坐标 $(X,Y,Z,\theta_A,\theta_B)$ 中, X,Y,Z与刀具中心点坐标 P 相对应,而刀轴方向矢量 u 可由计算得出,如式所示。

$$\begin{cases} u_x = \cos \theta_A \sin \theta_C \\ u_y = -\sin \theta_A \sin \theta_C \\ u_z = \cos \theta_C \end{cases}$$
(1)

## 2.2. 数控系统插补算法

配备 RTCP 功能的五轴数控系统,其核心任务是将编程人员在工件坐标系中定义的刀具路径(包含刀 尖位置和轴线方向)转换为机床各轴的协同运动指令[16]。由于旋转轴的介入,机床在工件坐标系内执行 的线性插补轨迹,经过坐标变换后映射到机床物理轴时,实际形成的空间曲线与理论直线存在偏差,这 种偏差即为非线性误差。为解决传统线性插补难以抑制的非线性误差问题,现代高端机床普遍采用具备 RTCP 功能的五轴控制技术[17]。

在闭环控制架构下,系统通过数据采样插补算法实现高精度轨迹控制。该算法将连续的轮廓曲线离散为若干微小线段,根据插补周期和进给速度计算每段轨迹对应的各轴位移增量,再将这些离散指令转换为伺服电机的脉冲信号。通过实时调节各轴运动参数,确保刀具实际运动轨迹与理论设计曲线的拟合度达到微米级精度。已知刀位轨迹段起点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ,终点为 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ ,可得待插补合成轨迹段位移为:

$$L_{i} = \sqrt{\left(x_{i+1} - x_{i}\right)^{2} + \left(y_{i+1} - y_{i}\right)^{2} + \left(z_{i+1} - z_{i}\right)^{2}}$$
(2)

式中 $\Delta A$ 、 $\Delta C$ 为 AC 两旋转轴的位移变化量,在 RTCP 功能开启时,其实际为 AC 旋转轴对刀尖点在工件坐标系的位移当量,具体如下:

$$\begin{cases} \Delta A_{i} = \frac{\pi}{180} (a_{i+1} - a_{i}) \\ \Delta C_{i} = \frac{\pi}{180} (c_{i+1} - c_{i}) \end{cases}$$
(3)

不同的五轴数控系统对于进给速度分配的方式主要包括扩展线位移的分配方式、直线轴为主的分配 方式、大行程轴为主的分配方式[18]。本文不对 G93 和 G95 进行讨论,在五轴机床加工程序段中,最后 的功能字 F 代表的是加工时所指定的进给速度,其与加工中的实际进给速度并非完全相同,G94 指令有 效时数控系统执行各程序段所需要的时间 T,单位为 min。

$$\begin{cases} \Delta T = \frac{\Delta L}{F} \\ \Delta T = \frac{L_i}{f} \end{cases}$$
(4)

多轴数控加工中,刀具沿线性路径插补运动,导致加工表面与理论曲面间存在逼近误差,主要包括 直线段逼近误差和刀具姿态调整引起的摆动误差[19]。为此,工艺规划阶段通过减小进给步长降低误差, 后处理阶段结合插补算法计算编程进给速度与实际进给速度的对应关系。据此确定各程序段加工时间 *T* 和实际切削速度 *f*,进一步通过时间序列分析与插补参数优化,生成适用于任意插补周期的加工数据[20]。 最终得到的关系如下式所示:

$$f = \frac{\Delta L}{L_i} F = \frac{\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2 + (\Delta A)^2 + (\Delta C)^2}}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}} F$$
(5)

由此可以求出 G 代码中各个程序段之间的时间 T 及实际加工速度 f,在此基础上继续对 G 代码进行时间序列的求解及变换,就可以得到任意插补时间间隔的插补数据。

通过线性插补原理可知,数控机床在加工过程中各轴的插补周期相等,如下所示:

$$T = \frac{\Delta X}{F_x} = \frac{\Delta Y}{F_y} = \frac{\Delta Z}{F_z} = \frac{\Delta A}{F_a} = \frac{\Delta C}{F_c}$$
(6)

由上式可知,该插补路径下的运行时间相同,通过合成速度F,可以求出机床各轴的分速度如下:

$$F_x = \frac{\Delta X}{\Delta L} F_s \tag{7}$$

通过单轴进给速度以及插补周期即可求得每个插补周期单轴的位置。

## 3. 五轴数控机床进给系统模型

#### 3.1. 数控伺服系统

伺服进给控制系统一般采用全闭环的三环控制系统,即电流环、速度环、位置环,这三个环节都通 过检测反馈部分得到实时的位置信息,并不断进行调整和控制,以保证工件移动和定位的准确性和稳定 性。对于五轴联动数控机床,如图 2 所示,每个轴都具有独立的伺服控制器,这样可以控制每个轴的移 动和定位,实现五轴联动加工[21]。加工时通过控制每个轴的伺服进给系统,可以实现工件在不同方向上 的运动和定位,从而实现复杂零件的高精度加工。





## 3.2. 机械传动系统模型

机械传动系统可简化为二阶振动模型进行分析,其中直线轴与旋转轴的定位精度与动态特性主要取 决于传动系统特性、伺服系统采样频率、反馈控制性能、机床结构刚度稳定性等因素。建模时假设传动 系统内部连接为刚性,各部件刚度在工作台运动范围内保持恒定。摩擦效应统一建模为电动机轴和刀具 路径上的等效摩擦力,以简化分析复杂度。



Figure 3. Axis dynamics model 图 3. 轴动力学模型

如图 3 所示,模型中各部分符号代表的含义分别如下, $J_m$ 表示电机轴上等效转动惯量,l表示丝杠导程, $\theta_m$ 表示电机输出转角, $T_m$ 表示电机输出转矩, $T_f$ 表示导轨摩擦力, $B_m$ 、 $B_s$ 和 $B_t$ 分别表示电机阻尼系数、轴承与丝杠副的粘性阻尼系数和导轨粘性阻尼系数, $K_j$ 、 $K_s$ 表示工作台到丝杠螺母之间的平移刚度、丝杠的扭转刚度, $M_t$ 表示工作台质量,x表示工作台位移。

基于动力学原理建立机械传动系统微分方程:

$$\begin{cases} T_m = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + Fl / 2\pi \\ F = M_t \ddot{x} + B_t \dot{x} + T_f \\ F = K(x_m - x) \end{cases}$$
(8)

式中: F 为工作台驱动力; xm 为电机转角对应丝杠行程, K 为机械进给系统等效刚度。 等效刚度 K 可通过下式计算:

$$K = 1 / \left( 1 / K_i + L^2 / \left( 4\pi^2 K_s \right) \right)$$
(9)

在不计摩擦条件下,直线轴传递函数为:

$$G(s) = x(s) / (x_m(s)) = K / (M_t s^2 + B_t s + K)$$
(10)

平动轴动力学模型参数包含等效转动惯量、电机输出转角等 12 项核心参数。 电机输出转矩 T<sub>m</sub>到工作台位移 x 之间的传递函数框图,如图 4 所示。



**Figure 4.** Linear axis dynamic model and transfer function diagram **图 4.** 直线轴动力学模型和传递函数图

针对五轴数控机床伺服系统的动态特性建模,需建立旋转运动与直线运动间的能量转换关系。图 4 所示为典型机电传动系统的数学模型,其核心在于构建电机输出转矩与工作台直线位移之间的传递函数, 该函数定量表征了旋转部件微小角位移转化为直线运动部件平动距离的动态响应特性。基于运动学链分 析,可进一步推导旋转轴系传动机构的动态传递函数,进而形成多轴联动的机械传动系统综合传递矩阵。

通过建立数学模型,将电机转矩与工作台位移的动态关系纳入分析框架,重点研究电机转角微小变 化与工作台平动位移的传递特性。采用类似方法推导转动轴的机械传动传递函数。基于实测数据,利用 Simulink 仿真平台构建五轴数控系统的伺服驱动模型,重点研究多轴联动轮廓误差的形成机制及其关键 影响因素。

模型通过解析后置处理生成的指令,获取各轴理论运动位置,并将插补指令输入至伺服进给系统仿 真模型,最终输出各轴的实际运动位置。

## 4. 轮廓误差计算和预测

## 4.1. 轮廓误差定义



轮廓误差估计中会用到实际轨迹与理想轨迹,如图 5 所示,其本质为理想加工轮廓轨迹与实际加工 轮廓轨迹之间的偏差,在估算的过程中涉及到其轨迹所组成的点一般来源于采集软件所得的等间隔时序 点,通常情况下在 2 ms 到 15 ms 之间。但由于 G 代码多种多样,极具变换性,其每段程序之间的时间间 隔差异极大,可能会出现大于采样频率或者小于采样频率的情况,一般也会有两者同时出现的状况。

#### 4.2. 轮廓误差计算

轮廓误差指实际加工位置与理论轮廓之间的最短空间距离。该误差可通过分析跟踪误差间接获得, 具体表现为:跟踪误差是机床各轴实际运动位置与指令位置的偏差,通过测量各轴跟踪误差并结合运动 学模型,可反推出刀具实际路径点,进而计算其与理论轮廓的轮廓误差值。其与跟踪误差的关系如图 6 所 示,其中 $P_i$ 为理想位置, $e_x$ 为x轴跟踪误差, $e_y$ 为y轴跟踪误差,通过跟踪误差计算得到实际位置 $Q_i$ , 从而可以进一步估算轮廓误差 $\varepsilon_i$ 。



Figure 6. Contour error calculation 图 6. 轮廓误差计算

针对低采样率条件下轮廓误差计算难题,本研究采用三次样条插值算法构建连续轨迹模型。该方法 通过生成高阶连续的插值曲线,在保证原始轨迹空间拓扑关系的前提下,显著提升低采样率条件下的误 差计算分辨率。具体实现过程如下:首先针对每个理论轮廓点,确定其误差计算窗口。窗口范围由相邻 实际采样点的跟踪误差动态调整,在界定窗口内,采用动态规划算法筛选与理论位置欧氏距离最小的实 际插值点。通过构建代价函数,为窗口内实际采样点,通过梯度下降法求解全局最小值点作为最优匹配 点。该模型通过误差传播逆向补偿机制,有效抑制了插值过程引入的二次误差。

如图 5 所示,对于每一个理想位置  $P_i$ ,首先确定其轮廓误差求解区间  $\{Q_i, \dots, Q_{i+k}\}$ ,其中 k 的大小由 公式确定,并向上取整,  $e_i$ 为 x 轴与 y 轴跟随误差的平方根,通过公式进行计算。

依据采集得到的实际数据,通过计算每采集数据点与理想数据点的距离,选择结果中的最小值作为 该轨迹的真实轮廓误差值,得到计算公式为:

$$\varepsilon_i = \min\left\{ \left\| \overline{P_i R_i} \right\| \right\}, i \subseteq [1, 10] \cap i \subseteq Z^*$$
(11)

#### 4.3. 基于 Simulink 的轮廓误差估计

基于各轴 Simulink 仿真模型与轮廓误差计算方法,构建了轮廓误差预测模型。首先将各轴理论位置 指令与对应时间序列作为输入,通过仿真模型解算各轴实际运动轨迹。结合插补算法生成的离散指令, 将理论位置与实际位置进行时空对齐,利用最小二乘法拟合误差分布曲线。

#### 5. 实验验证

实验采用标准S形试件的精加工G代码及对应刀位文件作为输入数据,仿真环境基于Matlab Simulink 平台搭建五轴数控系统数字孪生模型。实际加工验证在 AC 双转台结构的五轴数控机床上完成,通过对 比仿真轨迹与机床实际运动数据,分析轮廓误差分布规律。



Figure 7. Test equipment 图 7. 试验设备

图 7 为验证预测轮廓误差实验的平台,利用搭建好的 Simulink 模型与误差计算方法进行轮廓误差的 预测。

通过机床实际加工标准 S 形试件,利用数据采集系统记录机床运动数据并导入 Matlab 平台处理。基于采集的理想轨迹点与实际加工轨迹点,将 G 代码指令代入模型计算实际加工耗时,同时对机床原始数据进行滤波去噪和归一化处理,最终将预处理后的数据输入模型进行误差分析。从而得到所需要的加工周期时间和主轴的实际进给速度,两次的预测值与实际值如图 8 所示,加工时间预测值与实际值基本一致。



Figure 10. Position prediction of linear axis and rotation 图 10. 直线轴与旋转轴位置预测

由图 9 可知刀尖点的实际进给速度误差均在 0.7 m/min 左右,误差曲线呈现与加工进给速度相反的 趋势,且幅值与加工进给速度呈正比例关系。

由加工时间、加工实际进给速度和 G 代码中各轴的理想位置,就可以得到加工代码在经过插补系统 后的各轴的理想位置。

为验证模型对复杂加工轨迹的预测精度,研究采用标准"S"试件进行实验验证。实验选取试件 A 面 单层二维"S"轮廓作为测试对象,通过数控系统内置数据采集软件,利用网关接口实时采集机床运动数 据。软件设置 15 毫秒固定采样周期,同步获取编码器反馈的插补理论位置信号与光栅尺测量的实际加工 位置信号。选取时间基准一致的插补点数据,经 MATLAB 预处理后导入 Simulink 仿真模型,完成轨迹 误差计算与分析。

由图 10 与图 11 的试验数据显示,X 轴实际位置预测误差控制在±3 μm 以内,C 轴预测误差范围为 2~10 μm。实测轨迹与理论预测轨迹的整体吻合度达到较高水平,尤其在复杂曲率变化区域仍能保持较高 的预测精度,验证了模型对非线性误差的表征能力。



 Figure 11. Position error between linear axis and rotation axis

 图 11. 直线轴与旋转轴位置误差



采用提出的轮廓误差估算方法计算误差后,为清晰呈现误差分布特征,将实际刀尖轨迹误差按一定

比例放大,绘制极坐标误差图进行可视化分析。结果显示,该方法能有效捕捉复杂轮廓的局部偏差特征。 通过轮廓误差模型计算实际与预测误差值,将误差分布可视化后显示(图 12):实际轮廓误差稳定控 制在 0~0.02 mm 范围内。进一步分析预测误差分布,其波动范围为-1.5~2 μm,验证了该方法对复杂加工 曲线具有良好的适应性和预测精度。

#### 6. 结论

本文提出了一种基于 Simulink 的离线预测模型,预测期间完全不依赖于机床实体,该方法通过搭建 伺服仿真模型对各轴实际位置进行预测,然后进行轮廓误差的计算。

一方面,分析了五轴联动线性插补的 RTCP 算法和数控系统的插补过程,实现了对机床加工特性的 精准预测。另一方面,采用设计的差值方法对轮廓误差进行了估计计算,一定程度提高了轮廓误差的计 算精度。

试验结果表明,各轴实际位置预测误差控制在测量范围内,轮廓误差预测偏差范围为±1.5~2μm,验 证了该方法的有效性和适应性。

未来研究将重点推进该技术的工程化应用,探索其在五轴数控机床中的集成方案,通过构建多轴联 动加工动态误差预测模型,实现对加工精度的实时调控,并将采用典型零件加工轨迹开展实证测试,进 一步检验方法的可靠性。

## 参考文献

- [1] 刘贺强, 张胤, 肖博, 等. 五轴立式精密机床 RTCP 跟随误差检测优化及补偿[J]. 制造技术与机床, 2022(12): 134-138.
- [2] 魏双羽, 刘凯, 蔡捷. 五轴加工中心 RTCP 误差检测及补偿方法[J]. 机床与液压, 2022, 50(14): 61-64.
- [3] 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.
- [4] 魏敏, 张绍兴, 肖斌, 等. 五轴机床加工零件轮廓误差预测方法[J]. 内燃机与配件, 2021(16): 109-110.
- [5] 周群龙, 刘焕牢, 张传景, 等. 不同进给速度对机床误差补偿效果影响的研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(5): 107-113.
- [6] 游志阳. 基于迭代学习的五轴轮廓误差控制研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [7] Xu, Z., Zhang, B., Li, D., Sze Yip, W. and To, S. (2024) Digital-Twin-Driven Intelligent Tracking Error Compensation of Ultra-Precision Machining. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 219, Article ID: 111630. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111630
- [8] Lu, Z., Huo, G. and Jiang, X. (2023) A Novel Method to Minimize the Five-Axis CNC Machining Error around Singular Points Based on Closed-Loop Inverse Kinematics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128, 2237-2249. <u>https://doi.org/10.1007/s00170-023-11991-0</u>
- [9] 廖宇豪. 数控机床轮廓误差的 i 代码补偿技术研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [10] 赫巍巍, 王立平, 关立文, 等. 一种分析伺服进给系统动态误差的新方法[J]. 机械设计与制造, 2021, 368(10): 159-164, 168.
- [11] 吕盾, 刘青, 刘沛, 等. 五轴机床加工零件轮廓误差预测方法[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(2): 9-15.
- [12] 王天伟, 闫舒洋, 孙玉文. 一种基于模糊控制的轮廓误差预补偿方法[J]. 机械工程师, 2019(9): 90-93, 96.
- [13] 杨泽青, 刘奇, 薄敬东, 等. 直线电机进给系统轮廓误差预测控制方法及仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(3): 415-425.
- [14] 罗豪, 余杭卓, 江磊, 等. 侧铣表面点位轮廓误差预测方法[J]. 机械设计与制造, 2021(1): 80-83.
- [15] Wang, Y.L., Liu, Y. and Che, S.B. (2011) Research on Pattern Recognition Based on BP Neural Network. Advanced Materials Research, 282, 161-164. <u>https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.282-283.161</u>
- [16] Xing, Y. and Li, F. (2020) Research on the Influence of Hidden Layers on the Prediction Accuracy of GA-BP Neural Network. *Journal of Physics: Conference Series*, 1486, Article ID: 022010.

https://doi.org/10.1088/1742-6596/1486/2/022010

- [17] Li, J., Wang, Y., Li, Y. and Luo, W. (2020) Reference Trajectory Modification Based on Spatial Iterative Learning for Contour Control of Two-Axis NC Systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25, 1266-1275. https://doi.org/10.1109/tmech.2020.2973085
- [18] Hu, C., Ou, T., Chang, H., Yu, Z. and Zhu, L. (2020) Deep GRU Neural-Network Prediction and Feedforward Compensation for Precision Multi-Axis Motion Control Systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25, 1377-1388. <u>https://doi.org/10.1109/tmech.2020.2975343</u>
- [19] 徐世昌,杨文安,鄢雪峰. 五轴机床后处理非线性误差精确插补算法[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(6): 47-52.
- [20] 黄东. 五轴联动数控机床的 RTCP 功能开发与实际应用研究[J]. 中国设备工程, 2024(16): 126-128.
- [21] 刘文闯. 五轴机床主轴位置线性误差补偿及效果监测[J]. 工程机械文摘, 2023(4): 4-6.