

机械加工制造行业数控机床误差补偿方法研究

孙晓晓

(山东泰山技师学院 山东 泰安 271600)

摘要：常规的数控机床误差补偿方法多数采用闭环反馈控制原理，对机床加工的位姿误差进行补偿，局限性较强，且误差补偿效果较差。针对这一问题，本文在传统补偿方法的基础上进行了优化设计，以机械加工制造行业数控机床为例，开展了全新的误差补偿方法研究。首先，构建数控机床综合误差模型，描述工件误差元素的运动学关系，得出工件坐标系中的矢量误差。然后设计数控机床综合误差补偿方法，分别采用半闭环前馈控制原理与原点偏移补偿原理，对机床位姿误差以及热误差进行补偿。试验分析可知，通过本文提出的方法补偿数控机床误差，能够显著减小其加工误差，具有较高的误差补偿精度与效率。

关键词：机械加工；误差；制造；数控机床；补偿；行业

0 引言

数控机床作为机械加工制造行业高效、可持续发展的重要组成部分，对加工精度与加工误差的要求较高，科学合理的数控机床误差补偿方法至关重要^[1]。从广义角度分析，根据数控机床加工需求的不同，数控机床包括四种结构形式：卧式加工机床、立式加工机床、大型卧式镗床与大型龙门机床^[2]。数控机床的结构种类繁多，但是均由多个运动部件通过相互连接的方式，形成封闭的运动链^[3]。四种不同形式的数控机床在切削加工过程中，受到切削加工环境、加工条件等影响，刀具的实际运动轨迹可能与预计轨迹之间存在一定的偏差^[4]。除了刀具运动轨迹误差以外，数控机床加工中，还存在角偏误差、平动轴定位误差、垂直度误差等，以上各类误差之间存在相互耦合影响，具有不同程度的相互作用机理^[5]。受到误差因素的影响，数控机床加工的效率与精度可能出现不同程度的下降，降低机床的精密性。当前，传统的数控机床误差补偿方法在实际应用过程中仍然存在一定的缺陷，主要体现在适用范围有限、误差补偿难度与复杂度较高、涉及的仪器设备较多、无法有效地提高数控机床关键零部件的精度与性能^[6]。

基于此，本文在传统数控机床误差补偿方法的基础上进行了优化设计，选取机械加工制造行业的数控机床作为本次研究的对象，提出了一种全新的误差补偿方法。

1 数控机床误差补偿方法设计

1.1 构建数控机床综合误差模型

首先，对数控机床的结构类型与运行特征进行全方位分析，获取数控机床的相关参数信息。在此基础上，构建数控机床综合误差模型，实时描述数控机床刀具切削点相对于工件各项误差元素之间的运动学关系。

从广义角度分析，数控机床综合误差模型作为误差补偿的基础保障，能够在较短时间内反映数控机床的多体拓扑结构与运动链发生的复杂性变化，进而得出各个运动轴的误差补偿量。本文构建的数控机床综合误差模型如图 1 所示。

该模型在某种程度上为一条完整的多体系统拓扑链结构，拓扑链中的任何一部分均会导致数控机床加工过程中出现误差。本文建立的综合误差模型具有较

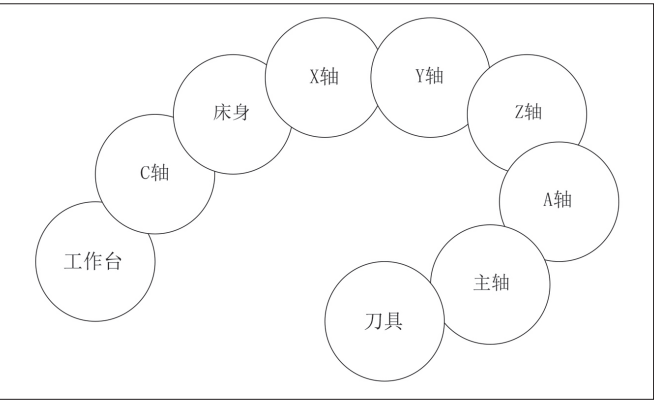


图 1 数控机床综合误差模型结构图

强的通用性，能够对所有类型的数控机床进行综合误差分析。在此基础上，建立数控机床各部分之间的局部坐标系，获取不同自由度方向误差元素的动态变化与工件坐标系的各项矢量^[7]。综合考虑数控机床加工过程中各项误差元素的影响，得出数控机床工件坐标系中对应的位姿矢量误差，表达式为：

$$\vec{P}_w^c = \vec{P}_w^i - \vec{P}_w \quad (1)$$

$$\vec{V}_w^c = \vec{V}_w^i - \vec{V}_w \quad (2)$$

式中： $\vec{P}_w$ —数控机床工件坐标系中刀尖点的初始位置矢量；

$\vec{V}_w$ —数控机床工件坐标系中刀轴初始姿态矢量；

$\vec{P}_w^i$ —数控机床工件坐标系中刀尖点的实际位置矢量；

$\vec{V}_w^i$ —数控机床工件坐标系中刀轴实际姿态矢量；

$\vec{P}_w^c$ —数控机床工件坐标系中对应的刀尖点位姿误差；

$\vec{V}_w^c$ —数控机床工件坐标系中对应的刀轴位姿误差。

通过模型的迭代学习与训练，获取数控机床工件坐标系中对应的位姿矢量误差，为后续的误差补偿提供基础保障^[8]。

1.2 设计数控机床综合误差补偿方法

上述数控机床综合误差模型建立完毕后，获取数控机床刀具切削点相对于工件的各项误差元素之间的运动学关系，进而得出工件坐标系中机床对应的位姿矢量误差。接下来依据误差实时补偿原理，设计数控机床位姿误差补偿算法。数控机床综合误差包括两部分：位姿几何误差与热误差^[9]。针对数控机床位姿几何误差，首先利用数控系统，控制工件各个运动轴执行的空间误差，保证其执行方向与数控机床检测误差方向相反；然后利用误差补偿控制系统，对数控机床位姿误差进行半闭环前馈控制。半闭环前馈控制如图 2 所示。

首先，检测数控机床在工件加工过程中产生的状态变化，将加工过程中工件的理论值与实际值进行实时反馈比较。然后，根据反馈比较结果，

补偿理论值与实际值之间的差值，实时更新前馈控制的误差值，进而提升机床加工的精度与效率。

针对数控机床热误差，本文采用原点偏移误差补偿方法，其原理如图 3 所示。

首先，在数控机床适当位置安装温度传感器，实时获取机床加工过程中的温升数据。通过计算机，与数控机床控制系统建立通信连接，实时接收机床加工过程中各运动轴的位置信息。然后通过综合误差模型的运行，得出数控机床热误差元素值，基于 CNC 控制器的解耦作用，得出综合误差补偿量^[10]。最后，利用传动装置与编码器，对数控机床运动轴的执行动作进行全方位、多维度的补偿控制，实现机械加工制造行业数控机床误差补偿的目标。

2 试验分析

综合上述内容，本文针对机械加工制造行业数控机床，设计了误差补偿方法的整体流程，有效地改善了传统数控机床误差补偿方法在实际应用中的不足。在此基础上，为了进一步验证本文提出的误差补偿方法的可行性，进行了如下文所示的试验分析。在试验过程中，设置了两组对照组，一组试验组，

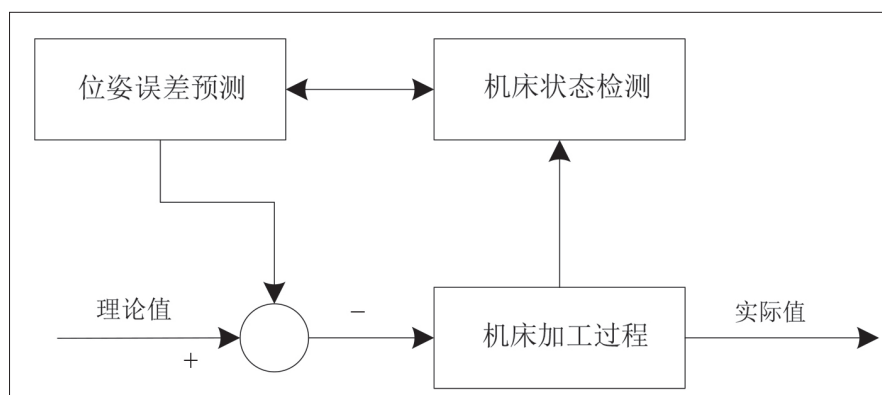


图 2 数控机床位姿误差半闭环前馈控制

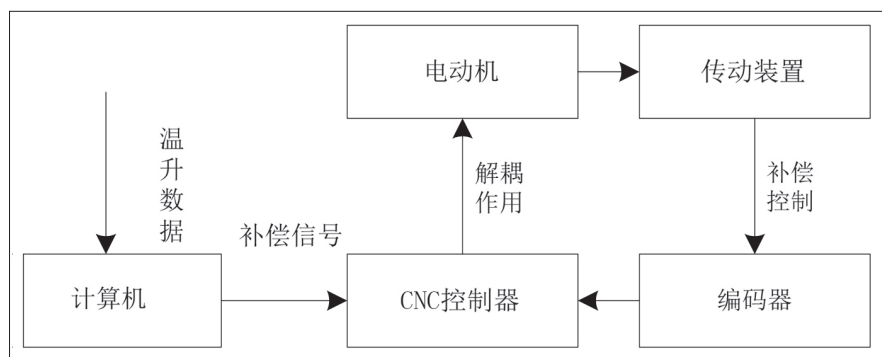


图 3 数控机床热误差原点偏移补偿方法原理示意图

引入对比分析的试验方法，能够更加直观清晰地展示试验结果以及所提方法的应用优势。设置刘阔等^[2]提出的基于机理驱动的误差补偿方法、杨秀芝等^[3]提出的基于线性回归理论的误差补偿方法作为试验的对照组，本文提出的误差补偿方法作为试验组，开展试验分析。

2.1 试验准备

选取山东美力达数控机械有限公司生产的型号为 SKX3-CNC-3000 的机械加工制造行业重型数控机床作为本次研究的对象。该重型数控机床的相关技术参数如下：工作台尺寸为 3000mm×300mm；主轴转速范围为 0～18000r/min；主电动机功率为 3.5kW；电源为 380V、50Hz；电主轴功率为 3.0kW；工作压力在 0.5～0.8MPa 范围内；最高转速为 18000r/min；X、Y、Z 轴行程分别为 3000mm、500mm、350mm，对应的速度分别为 35000mm/min、8000mm/min、8000mm/min；定位精度为 ±0.1mm；重复定位精度为 ±0.02mm。该重型数控机床适用于工业铝合金型材和幕墙铝合金型材的圆孔、槽孔、

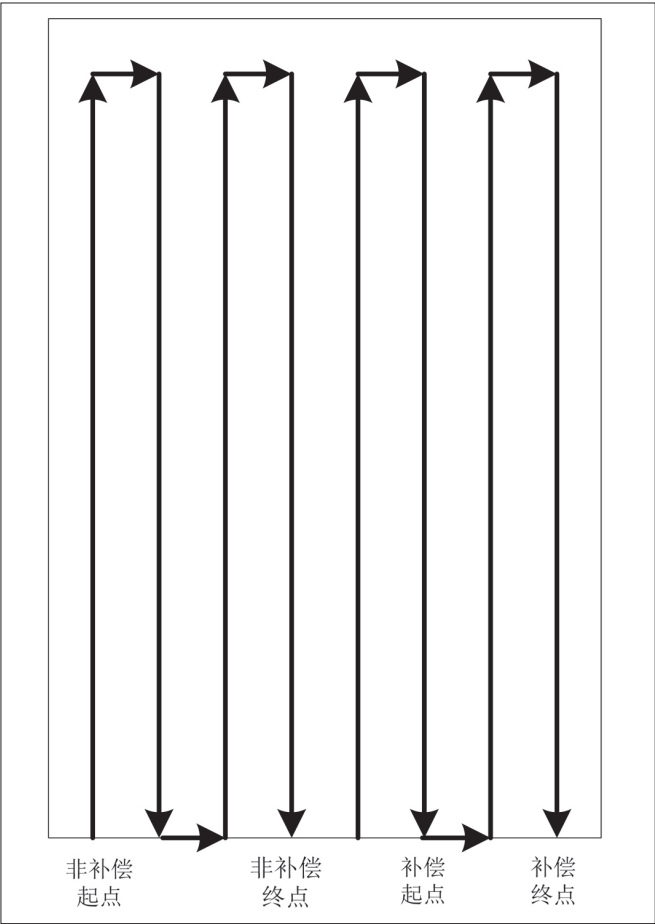


图 4 重型数控机床加工走刀路径示意图

锁孔、异形孔等以及铝合金型材的铣削、倒角、平面雕刻等工序的加工。在掌握重型数控机床相关信息与技术参数后，按照本文提出的误差补偿方法，对该重型数控机床进行误差补偿。首先，将激光位移传感器探头安装在该数控机床的主轴底部。沿着数控机床平面，对其切削加工的相同走刀路径进行扫描与分析，获取其对应的走刀路径，即本次试验中数控机床的加工误差，走刀路径如图 4 所示。

对工件表面左侧切削加工不进行误差补偿，对其右侧进行热误差补偿，工件左侧与右侧切削加工除了起点与终点存在差异外，其他相关参数均相同。此种补偿方式能够全方位获取充足的试验数据，为提高试验结果的精度提供基础保障。

2.2 结果分析

本次试验中，机械加工制造行业数控机床的切削加工时间为 20min，采用激光干涉仪检测数控机床在切削状态下，未进行误差补偿时 Z 轴方向对应的各项加工误差。其中，工件定位中心孔的孔心距误差为 12.42μm，矩形台阶面的直线度误差为 5.08μm，中心圆柱台阶的圆度误差为 12.49μm，整体加工误差最大值为 168.21μm，误差平均值为 106.87μm，均方差为 13.25μm。采用 MATLAB 分析软件与有限元分析软件，分别统计分析三种误差补偿方法应用后，数控机床切削状态下 Z 轴方向对应的加工误差，并进行对比，如表 1 所示。

表 1 三种补偿方法应用后误差对比结果 单位：μm

	本文误差补偿方法应用后	基于机理驱动的误差补偿方法应用后	基于线性回归理论的误差补偿方法应用后
孔心距误差	4.21	8.49	7.08
直线度误差	2.05	4.17	3.84
圆度误差	4.16	9.02	6.77
误差最大值	13.48	31.25	24.86
误差平均值	9.83	16.49	15.06
误差均方差	0.24	0.48	0.59

根据表 1 的误差补偿对比结果能够看出，在三种方法应用后，数控机床切削状态下，Z 轴方向各项加工误差均发生较大的变化。其中，应用本文提出的误差补偿方法后，Z 轴方向各项误差明显减小，补偿后的误差值远远小于未经过补偿的误差值。与另外两种方法相比，本文提出的误差补偿方法能够显著减小数控机床加工误差，提升数控机床整体的

稳定性与可靠性,具有较高的误差补偿精度与效率。在未来实际应用过程中,遇到该类型数控机床时,可以采用本文提出的误差补偿方法,提升数控机床的整体性能,促进机械加工制造行业的发展。

3 结语

综上所述,为了改善当前传统数控机床误差补偿方法在实际应用过程中存在的问题与不足,本文在传统误差补偿方法的基础上进行优化设计,针对机械加工制造行业的数控机床,提出了一种全新的误差补偿方法。本文提出的误差补偿方法,有效地提高了数控机床误差补偿加工的精度,能够显著减小切削状态下,数控机床各个方向存在的加工误差,进而实现提升数控机床稳定性与可靠性的目标。

参考文献:

- [1] 郑中鹏,金鑫,郭嘉靖,等.超精密微小型车铣复合加工机床的空间误差建模与灵敏度分析[J].制造技术与机床,2022(06):5-10.
- [2] 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(03):251-258.
- [3] 杨秀芝,蒋宇辉,王兴东,等.基于线性回归理论的数控机床精度检测及误差补偿分析[J].制造技术与机床,2022(01):171-176.
- [4] 姚立权,张萌,李刚,等.五轴联动数控机床空间综合误差解耦技术研究[J].机床与液压,2021,49(05):102-106.
- [5] 郭世杰,武建新,乔冠,等.数控机床几何误差正弦低次多项式参数化建模与应用研究[J].仪器仪表学报,2020,41(10):136-146.
- [6] 付国强,饶勇建,谢云鹏,等.几何误差贡献值影响下五轴数控机床运动轴误差灵敏度分析方法[J].中国机械工程,2020,31(13):1518-1528.
- [7] 罗勇,邵珠峰,王立平,等.NL201HA数控卧式车床X轴热误差建模及补偿[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(01):28-35.
- [8] 杨赞,朱梦瑞,李慧敏,等.基于灵敏度分析的立式加工中心批量空间误差建模和补偿[J].机械工程学报,2020,56(07):204-212.
- [9] 肖晓,张聘,魏亚飞,等.基于SIEMENS数控系统的机床综合误差实时补偿方法研究[J].航空制造技术,2020,63(05):35-40.
- [10] 方瑞,陈岳坪,谢梦敏,等.数控机床在线检测系统的定位误差补偿试验研究[J].机床与液压,2020,48(03):70-73.

