

# 基于多维度控制的数控加工变形控制方法研究

吴艳芳,高鹏

(淄博市技师学院,山东 淄博 255000)

**摘要:**数控机床加工状态数据具有多样化、时序性的特征,导致数控加工变形精度较差等问题。基于此,提出基于多维度控制的数控加工变形控制方法。采用自回归平均模型以及多维时间序列状态模型,对数控机床加工变形参数进行采集,判断数控机床加工状况间整体差异性。在获取的数控加工变形参数基础上,使用直线运动补偿以及圆弧运动补偿,实现三维空间内多方向运动补偿,在插补点坐标基础上原坐标不变的情况下,获得加工变形后数控机床应补偿量,实现多维度控制的数控加工变形控制。实验结果表明:采用该方法可实现高精度、全方位的数控加工变形控制,鲁棒性较好。

**关键词:**数控加工;多维时间序列;多维度控制;变形参数;变形控制;误差补偿

中图分类号:TH164 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2021)03-0149-04

## Research on Deformation Control Method of NC Machining Based on Multi-dimensional Control

WU Yanfang, GAO Peng

(Zibo Technical College, Zibo 255000, China)

**Abstract:** To improve the poor accuracy of NC machining deformation caused by diversity and timing of machining state data of NC machine tools, a method of NC machining deformation control based on multi-dimensional control was proposed. By auto-regressive average and multi-dimensional time series state models, the machining deformation parameters of CNC machine tools were collected to judge the overall difference between the machining conditions of CNC machine tools. Based on the acquired deformation parameters of NC machining, linear motion and arc-motion compensations were used to achieve multi-directional motion compensation in three-dimensional space. On the basis of interpolation point coordinates, when the original coordinates remain unchanged, the compensation amount of NC machine after machining deformation was obtained to realize multi-dimensional control of NC machining deformation. The results show that the proposed method can achieve high precision and omni-directional NC machining deformation control with good robustness.

**Keywords:** CNC machining; multi-dimensional time series; multi-dimensional control; deformation parameters; deformation control; error compensation

## 0 引言

随着科学技术的不断发展,机械制造业也随之不断进步。数控机床属于机械制造领域的核心设备。数控机床在加工过程中,其动态特性直接影响工件的形态以及生产效率。加工企业为了能够得到更多的利益,需要通过工件生产的较高效率实现。因此,数控机床加工效率的提高越来越得到重视。数控加工变形的研究受到相关学者的广泛关注,并对其进行深入研究<sup>[1-2]</sup>。

文献[3]提出将精确预拉伸技术引入到数控机床中,提高数控机床的精度稳定性。该方法优化丝杠传动结构,分析新的丝杠精确预拉伸方法,解决不能精确控制丝杠预拉伸量导致丝杠滚道变形的问题。该方法通过拉伸量控制,实现了数控机床加工工件时形变的控制,但该方法仅仅考虑了最大的丝杠传动结构,较为片面,控制的精度不佳。文献[4]提出基于扰动观测器的机床加工误差迭代学习控制方法。该方法分析了数控机床运行轨迹,创建了

机床进给系统误差平面简图,建立驱动系统动力方程式,在经典比例微分(PD)控制方法的基础上,采用李雅普诺夫函数对改进后的控制方法进行证明。该方法采用PD控制方法,缩小了数控机床双轴加工时产生的误差,但该方法操作过程较为复杂,导致数控机床加工时间较长。基于上述问题的存在,本文提出基于多维度控制的数控加工变形控制方法。

## 1 基于多维度控制的数控加工变形控制方法

### 1.1 多维时间序列的数控机床加工变形参数采集

进行基于多维度控制的数控加工变形控制方法研究,需要对数控机床加工变形参数进行采集,采用自回归平均

模型以及多维时间序列状态模型对数控机床加工变形参数进行采集。

### 1) 自回归移动平均模型

自回归移动平均模型是用于分析时间序列的核心技术。其针对非指定的数控加工数据时间序列  $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_h\}$ , 在时刻  $h$  的取值为  $y_h$ , 其不但和前  $m$  个时间段的数控加工参数值  $y_{h-1}, y_{h-2}, y_{h-3}, \dots, y_{h-m}$  存在较大关联性, 还和  $n$  个非指定白噪声干扰项  $b_{h-1}, b_{h-2}, \dots, b_{h-n}$  也存在较大关联性, 那么  $(m, n)$  阶的 ARMA 模型  $y_h$  为

$$y_h = \delta_1 y_{h-1} + \delta_2 y_{h-2} + \dots + \delta_m y_{h-m} + b_h - \beta_1 b_{h-1} - \beta_2 b_{h-2} - \dots - \beta_n b_{h-n} \quad (1)$$

式中:  $b_h$  代表误差干扰项;  $\delta$  代表自回归系数;  $\beta_1$  为移动平均系数; 如果  $\beta_1 = 0$ , 那么自回归模型为  $AR(m)$ ; 如果  $\delta_1 = 0$ , 那么移动平均模型为  $MA(n)$ 。

考虑到数控机床加工参数真实属性, 基于序列  $y$  构建自回归方程。

如果数控加工序为  $y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_m, \dots, y_{2m}\}$ , 那么数控加工序列元素符合方程:

$$\begin{cases} y_{m+1} = \delta_1 y_m + \delta_2 y_{m+1} + \dots + \delta_{m-1} y_2 + \delta_m y_1 \\ y_{m+2} = \delta_1 y_m + \delta_2 y_m + \dots + \delta_{m-1} y_3 + \delta_m y_2 \\ y_{2m} = \delta_1 y_{2m-1} + \delta_2 y_{2m-1} + \dots + \delta_{m-1} y_{m+1} + \delta_n \end{cases} \quad (2)$$

### 2) 多维时间序列状态模型和判断模型

多维时间序列可理解为检测数控加工变形参数的一组指标, 在差异时段中得到一组检测结果, 同时根据数控加工时间顺序排列而建立的数字集<sup>[5]</sup>。如果数控机床加工参数共有  $n$  种类型, 同时按照固定采样频率得到  $m$  个数值点, 那么将  $H_{n \times m}$  设成数控机床加工过程数据的  $n$  行  $m$  列的多维时间序列矩阵。

按照对应分类标准, 将数控加工参数设成非多维时间序列向量  $y_1$  与多维时间序列矩阵  $y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_n]$ , 伴随时间  $h$  的改变而发生变化。

在机床参数时间序列矩阵  $H_{n \times m}$  中, 设定数控机床加工的状况模型为采样时间跨度为  $M$  的序列矩阵几何, 描述数控机床设备状况加工变动趋势。

将数控机床的历史状态设成时间窗口  $M$  中矩阵集合为  $H = \{H_1, H_2, H_3, \dots, H_{(m/M)+1}\}$ , 其中  $H_{(m/M)+1}$  代表需采集的数控机床加工变形数据。

围绕数控机床加工状况模型矩阵  $H_{n \times m}$ , 构建一致加工状态衡量标准与评估函数。通过特征向量、特征趋势距离标识状况模型, 使用差异性将数控加工状况实施进行判断<sup>[6]</sup>。

假设随机数控机床加工状况矩阵  $H_i \in H_{n \times m}$ , 变形特征向量  $G_i = \{g_{iy}, g_{ix}\}$ , 依次描述数控机床加工变形状况矩阵内某时间段向量和平均值向量最高、最低偏差量为:

$$G_i(H_{n \times m}) = (g_{iy}, g_{ix}) = \text{Max}_j^M = \left| \sqrt{\sum_{j=1}^n H_j(h_i)^2} - \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n H_j(h_i)^2}}{M} \right| \quad (3)$$

式中  $H_j$  为数控加工变形参数处于  $M$  时刻点  $h_i$  的参数值。

针对随机数控机床加工状况矩阵  $H_i \in H_{n \times m}$ , 数控机床加工变形特征趋势间距设为二范数  $E_i$ , 判断获取数控机床加工变形的变动规律与平稳性特征矩阵  $E_i(H_{n \times m})$  为

$$E_i(H_{n \times m}) = \sqrt{\sum_i^m \sum_{j=1}^n H_j(h_i)^2} \quad (4)$$

二元组  $F_i = (F_j, E_i)$  由变形特征向量与变形特征趋势间距构成, 那么随机两个变形状态  $H_j$  与  $H_i$  的差异水平  $\varepsilon_{ji}$  为

$$\varepsilon_{ji} = |F_j - F_i| = \sqrt{(G_j - G_i)^2 + (E_j + E_i)^2} = \sqrt{[(g_{iy})_i - (g_{ix})_i]^2 + [(g_{iy})_j - (g_{ix})_j]^2 + (E_j - E_i)^2} \quad (5)$$

数控机床加工状况的差异水平能够判断数控机床加工状况间整体差异, 差异水平较大表示加工状态矩阵吻合水平较差, 加工变形相似度较大, 否则加工变形相似度较高, 以此实现数据机床加工变形参数多维度采集。

## 1.2 基于多维度控制的误差补偿方法

基于多维度控制的误差补偿方法主要通过直线运动补偿方法、圆弧运动补偿方法完成多维度变形控制<sup>[7-9]</sup>。在获取的数控加工变形参数基础上, 使用直线运动补偿, 对其实现三维空间内随机直线方向补偿<sup>[10]</sup>, 然后使用圆弧运动补偿, 实现三维空间内圆弧方向补偿<sup>[11]</sup>, 最终实现多维度控制的误差补偿。

### 1) 直线运动补偿

将获取的数控加工变形参数加工变形直线  $k$  的起点与终点坐标设为  $(P_1, Q_1, R_1)$ 、 $(P_2, Q_2, R_2)$ , 第  $j$  个插补点坐标设成  $(P_j, Q_j, R_j)$ , 直线  $k$  在  $PQ$  平面中的投影依次和  $P$  轴、 $Q$  轴夹角设为  $v, u$ , 直线  $k$  和  $PQ$  平面内投影的夹角为  $o$ 。

通过起点、终点坐标获取直线长度  $Z$ 、 $\sin v$ 、 $\sin u$ 、 $\sin o$ 、 $\cos o$ ; 若插补精度是  $\vec{z}$ , 通过  $Z$  与  $\vec{z}$  能够获取分段数  $F$ , 那么插补点坐标为

$$(P_j, Q_j, R_j) = \begin{cases} P_j = P_1 + j \times z \times \cos o \times \sin u \\ Q_j = Q_1 + j \times z \times \cos o \times \sin u \\ R_j = R_1 + j \times z \times \cos o \times \sin u \\ j \leq F \end{cases} \quad (6)$$

式中将插补点设为  $j$ , 按照插补点坐标实现数控加工变形的直线运动补偿<sup>[12]</sup>。

### 2) 圆弧运动补偿

将圆心角设为  $\tau$ , 起点、终点向量和  $P$  轴正向夹角依次设成  $\tau_1, \tau_2$ , 圆弧起点、终点和圆心坐标依次设成  $(P_1, P_1)$ 、 $(P_2, Q_2)$ 、 $(P_0, Q_0)$ , 第  $j$  个插补点坐标设成  $(P_j, Q_j)$ 。

通过起点、终点和圆心坐标能够获取  $\tau_1, \tau_2$ , 那么圆心角  $\tau$  与半径  $\mu$  能够获取圆弧长度  $Z$ ; 若插补精度是  $\vec{z}$ , 按照  $Z, \vec{z}$  和半径  $\mu$ , 能够获取插补分段数  $M$  与分段圆心角  $\vec{\tau}$ , 那么插补点坐标为

$$(P_j, Q_j) = \begin{cases} P_j = P_0 + \mu \times \cos(\tau_1 \pm j \times \vec{\tau}) \\ Q_j = Q_0 + \mu \times \sin(\tau_1 \pm j \times \vec{\tau}) \end{cases} \quad j \leq \text{分段值 } M \quad (7)$$

按照插补点坐标实现数控加工变形的圆弧运动补偿<sup>[13]</sup>。

在数控机床进行加工时, 加工的工件出现变形时, 误差补偿的目的是通过改变数控机床运行路径, 使加工工件的误差实际位置回到理论位置上, 从而保证加工的精度。在上述坐标获取基础上, 给出插补点坐标, 对同一坐标点,

原坐标不变的情况下,可得到加工变形后数控机床应补偿的量为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ ,即:

$$\begin{cases} \Delta x = \delta_x \cos \varphi_A \cos \varphi_C - \delta_y \sin \varphi_C \cos \varphi_A + \delta_z \sin \varphi_A \\ \Delta y = \delta_x \sin \varphi_C + \delta_y \cos \varphi_C \\ \Delta z = -\delta_x \sin \varphi_A \cos \varphi_C + \delta_y \cos \varphi_A \sin \varphi_C + \delta_z \cos \varphi_A \end{cases} \quad (8)$$

## 2 实验分析

### 2.1 实验环境

为了验证所提方法的有效性,进行仿真实验分析。该实验选择某轴承厂生产的西门子 840D/810D 数控系统进行操控,实验操作系统选择 Windows XP 系统,CPU 为 Inter Pentium,8G 内存,检测软件为 Matlab 2019a。具体实验所用工件如图 1 所示。



图 1 实验用工件

### 2.2 实验参数设置

为了验证所提方法的可靠性,实验参数设置如表 1 所示。

表 1 实验参数

参数	取值
伺服电机功率/kW	5.5
线速度/(m/min)	200
最大回转直径/mm	650
x 轴行程/mm	305
z 轴行程/mm	805
主轴转速/(r/min)	25~2 500
总电源功率/kW	46
最大工件长度/mm	2 000
工件尺寸/mm	50×25×6

在上述参数基础上,加工一个大小为 50 mm×25 mm×6 mm 的齿轮工件,比较所提方法、精确预拉伸方法以及扰动观测器的加工误差控制方法,实验指标为工件变形控制的误差率、误差补偿后的变形率以及控制的时间。为了保证实验的可靠性进行了多次验证。

### 2.3 实验结果分析

#### 1) 不同方法工件变形控制的误差率分析

为验证所提方法的可靠性,实验分析了所提方法、精

确预拉伸方法以及扰动观测器的加工误差控制方法在进行工件加工时工件变形控制的误差率。其中,变形误差率越低效果越好。实验结果如图 2 所示。

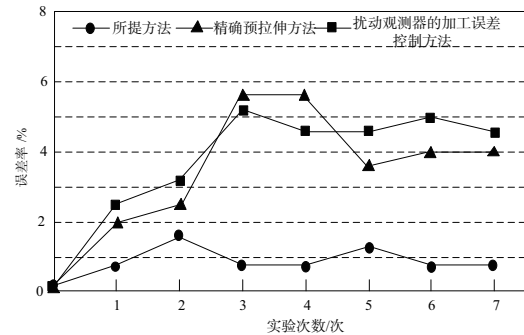


图 2 不同方法工件变形控制的误差率分析

分析图 2 可以看出,在相同情况下,采用三种方法控制数控加工变形的误差率存在一定差距。其中,采用所提方法进行控制的误差最低,始终低于 2% 以下,而其他两种方法的误差较高,相比之下,采用所提方法进行控制的误差率最低。这是由于所提方法采用多维度控制的方法,将数控机床进行加工时的运行轨迹进行多维度补偿,提高了控制的稳定性,验证了所提方法的有效性。

#### 2) 不同方法控制工件变形效果分析

为了验证所提方法的可行性,采用三种控制方法对实验用的工件变形进行控制。其中,与实验用工件吻合度越高,说明控制得越好。实验结果如图 3 所示。

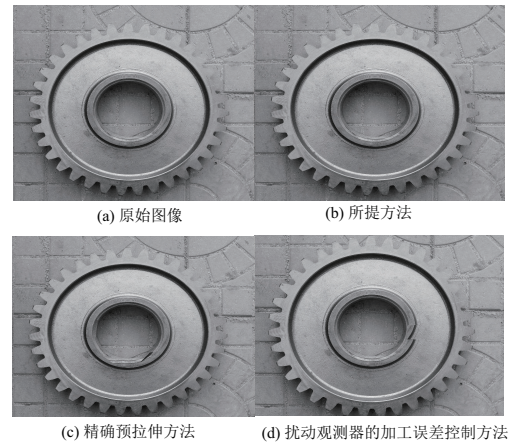


图 3 不同方法控制工件变形效果对比

分析图 3 可以看出,采用三种方法控制数控机床加工工件的变形效果存在一定差异。其中,采用所提方法生产的工件与原始元件最为吻合,而其他两种方法控制加工工件变形程度较严重,均出现了不同程度的变形,相比之下,采用所提方法进行控制后的效果更佳,验证了所提方法的可行性。

#### 3) 不同方法误差补偿后的变形率分析

为了进一步验证所提方法的有效性,实验分析五种数控加工变形数据,通过三种方法进行加工控制,从直线运动补偿、圆弧运动补偿两个维度实现变形控制,实验结果如图 4 所示。

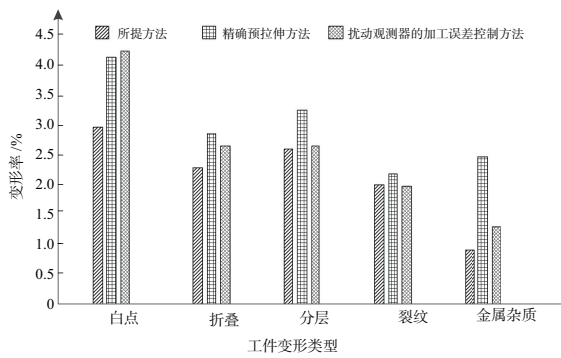


图4 不同方法运动补偿效果对比

分析图4可知,三种不同方法对五种数控加工变形运行补偿后,与两种传统方法相比,所提方法应用后工件变形率更低。其中,当工件变形类型为折叠时,所提方法变形率低于2%,而其他两种方法均高于2%,验证了所提方法的有效性。这是由于所提方法针对工件加工进行直线和圆弧运动补偿,弥补了加工时工件变形的可能。

#### 4) 不同方法数控加工变形控制用时

为了测试所提方法在控制数控加工变形时的鲁棒性,实验分析了三种方法在数控机床进行加工时形变的控制用时,实验结果如表2所示。

表2 不同方法数控加工变形控制用时 单位:min

迭代次数/次	所提方法	精确预拉伸方法	扰动观测器的加工误差控制方法
1	2.2	4.1	3.6
2	2.2	4.3	3.7
3	2.3	4.7	3.7
4	2.2	4.8	4.0
5	2.2	4.3	3.9

分析表2中数据可以看出,采用三种方法进行控制的用时存在一定差异。当迭代次数为3时,所提方法的控制用时为2.3 min,精确预拉伸方法的控制用时为4.7 min,扰动观测器的加工误差控制方法控制用时为3.7 min。相比可知,采用所提方法的控制用时最短,与另外两种传统方法相比,分别节省了2.4 min和1.4 min,有效缩短了数控加工的工作用时。这是由于所提方法在多个维度上对数控加工形变进行处理,故有效缩短了控制用时。

### 3 结语

针对数控机床加工变形控制效果不佳的问题,提出

基于多维度控制的数控加工变形控制方法。引入多维度控制方法,从不同角度对数控加工变形进行运行补偿,实现了数控加工变形控制。通过与传统方法相比,得到以下结论:

1) 采用所提方法对工件变形控制的误差率低于2%,验证了所提方法的有效性。

2) 采用所提方法控制工件变形效果更佳,生产的工作与理想工件更为吻合。

3) 采用所提方法进行数控加工的运动补偿,工件变形类型为折叠情况下,所提方法变形率低于2%。

4) 采用所提方法进行数控加工变形控制的用时最短,最高为2.3 min。

综上所述,所提方法对数控加工变形控制的综合性能较好,是一种可行的数控加工变形控制方法。

#### 参考文献:

- [1] 王庆霞,胡晓伟,庞静珠,等. 基于切削力实时测量的弱刚性件加工变形控制[J]. 仪器仪表学报,2019,40(2):223-232.
- [2] 江晖,曾飞,黄舟.一种基于误差控制的曲线逼近数控加工策略研究[J]. 机床与液压,2019,47(10):31-34.
- [3] 胥云,李冰兴,刘康,等. 精确预拉伸技术在高精度数控机床设计中的应用[J]. 机床与液压,2019,47(10):38-40.
- [4] 姜魏梁,招瑞丰.基于扰动观测器的机床加工误差迭代学习控制[J]. 中国工程机械学报,2019,17(5):427-431.
- [5] 刘建康,郝尚华,王树华,等. 数据驱动的数控加工生产线实时监控与优化控制技术框架[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(8):1875-1884.
- [6] 闫雯,黄玉美,林文周,等. 一种被动柔顺控制的平面研磨力/位控制方法[J]. 机械科学与技术,2019,38(6):892-896.
- [7] 路来骁,孙杰,韩雄,等. 基于能量理论的航空整体结构件滚压变形校正载荷预测方法[J]. 航空学报,2017,38(12):310-318.
- [8] 李海,李迎光,程英豪,等. 基于机床几何误差模型的数控加工形位误差预测[J]. 工具技术,2019,53(6):74-79.
- [9] 王静,谭元标,向嵩,等. 热变形参数对47Zr-45Ti-5Al-3V合金 $\beta \rightarrow \alpha$ 相转变的影响[J]. 热加工工艺,2019,48(10):51-55.
- [10] 吕树杰,李郝林. 数控型腔铣削加工稳定性预测[J]. 中国机械工程,2019,30(18):2236-2241.
- [11] 陆玲梅,黄瑶,石凤健.基于预变形的汽车扰流板内板翘曲变形研究[J]. 现代塑料加工应用,2018,30(3):54-56.
- [12] 来旭辉,魏正英. 面向数控加工系统的3D打印切片算法与分区扫描策略[J]. 农业工程学报,2019,35(12):58-64.
- [13] 钱昊,杨银辉,曹建春,等. Fe-18Cr-9Mn-1.1Ni-1.1Mo-0.2N节Ni型双相不锈钢高温热变形行为[J]. 材料导报,2019,33(12):2040-2046.

收稿日期:2020-05-14