DOI: 10.3901/JME.2019.09.144

基于径向基函数法的五轴数控机床空间 动态性能研究*

杨闪闪¹ 王 玲² 廖启豪² 梁斐然³ 殷国富²

(1. 四川大学空天科学与工程学院 成都 610065;

2. 四川大学制造科学与工程学院 成都 610065;

3. 成都普瑞斯数控机床有限公司 成都 611730)

摘要: 在对数控机床进行动态性能分析时, 局限于某一固定位姿获取的动态特性信息不足以描述整个加工空间内的机床动态特性。针对这一问题, 提出一种基于径向基函数理论的五轴数控机床空间动态特性分析方法, 利用机床实测试验数据和径向基函数法来构建五轴联动数控机床的空间动态特性函数模型。该方法以机床固有频率这一关键动力学性能指标为例, 建立机床整机动态特性与机床位姿之间的数学关系。以一五轴数控机床为研究对象, 将试验设计方案确定的各联动轴的坐标作为试验样本点, 采用德国 M+P 振动试验设备提取样本点的试验数据, 构建反映机床空间位姿与机床前 6 阶固有频率关系的函数表达式, 并通过计算模型质量评价指标验证该模型的有效性。结果表明, 该方法能有效预测在加工空间内固有频率的分布规律及其各轴向位移变化的灵敏度, 为合理规划工艺路线提高加工精度提供技术支持。

关键词: 径向基函数法; 加工空间; 动态特性; 固有频率; 试验设计

中图分类号: TG502

Study on the Spatial Dynamic Performance of Five-axis NC Machine Tool Based on Radial Basis Function Method

YANG Shanshan¹ WANG Ling² LIAO Qihao² LIANG Feiran³ YIN Guofu²

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu 610065;

2. School of Manufacture Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065;

3. Chengdu Precise CNC Machine Tool Co., LTD., Chengdu 611730)

Abstract: Dynamic performance analysis of NC machine tools is limited to the dynamic characteristics of a fixed position. Thus, a method to research five-axis linkage machine tool's dynamic characteristics in the generalized machining space is proposed based on the machine tools measured test data and the radial basis function method. In this method, the natural frequency is taken as the critical index to describe the whole machine tool dynamic characteristics, with which the mathematic relationship between dynamic characteristics and spatial poses are analyzed. The proposed method is applied in a five-axis machining center to verify its feasibility. The various pose combinations of the moving parts are arranged as the samples by the Hierarchical Latin hypercube experiment design, and the first six orders natural frequencies are acquired by machine tool test with the M+P system, a mathematic function model is established to describe the connections between the pose features and the natural frequencies. And the accuracy of the established model is validated after calculating the valuating indexes. Results show that the method could effectively predict the machining space distribution law of the natural frequency and the axial displacement change sensitivity, providing a theoretical support for the process planning and dynamic optimization of the machine tool.

Key words: radial basis function method; machining space; dynamic characteristics; natural frequency; experiment design

* 国家科技重大专项(2017ZX04020001-005)和四川省科技支撑计划(2017GZ0071)资助项目。20180522 收到初稿, 20181127 收到修改稿

0 前言

五轴数控机床在三轴数控机床的基础上增加了2个旋转轴,在加工灵活性、加工效率和加工质量等方面具有许多普通机床无法企及的优点,因此被广泛的应用于航空航天、工程机械及模具等领域。针对复杂型面的零件加工,数控机床的振动会严重影响机床的加工精度^[1-2],尤其是比传统数控机床多出2个旋转轴的五轴数控机床,其刀具点空间位姿的变化,将导致数控机床振动增强。而提高机床的抗振性和稳定性则需要通过研究机床动态特性得以实现,但传统机床动态特性的分析多局限于机床某一固定位姿^[3-6],无法描述数控机床在整个工作空间内的动态特性变化规律。所以,研究五轴数控机床空间动态特性在提高多轴联动机床的加工精度和抗振性能方面有着一定的学术价值。

目前,针对数控机床动态特性与加工位姿变化关系的研究尚少。多数研究从广义刚度和传统响应面法方面进行。其中,刘海涛等^[7]提出广义模态和广义刚度场概念,基于机床在加工空间的离散位置分析了机床的固有频率与动刚度在加工过程中的变化关系;孙明楠等^[8]将典型结合部刚度引入有限元模型,通过改变装配位置的方法进行动力学分析获取机床固有频率,构建了响应面法的广义动态信息模型,提出了机床结合部动刚度参与因子辨识方法,辨识各运动方向上影响机床整机动态特性的关键结合部;邓聪颖等^[9]在文献[8]的基础上,采用响应面法构建各运动轴联动的广义动态信息模型,辨识了各运动方向上对整机动态特性的影响力,以此作为规划加工工艺路线的理论依据;WU等^[10]基于数值计算和试验相融合的方式研究了5自由度混联机床的刚度在工作空间中的分布情况,并尝试针对刚度最低的部件刚度进行改进来优化系统刚度。还有一些其它研究方法,如李天箭等^[11]采用空间统计学方法,建立机床动态特性与机床空间位姿的数学关系,准确预测机床1阶固有频率在加工空间内的变化规律。

在分析国内外相关研究成果的基础上,本文进行了基于径向基函数法的数控机床空间动态特性分析的研究工作。以成都某公司研制开发的五轴联动数控加工中心PX-500为对象,通过对PX-500的试验分析,利用机床实测试验数据和径向基函数法来构建五轴数控机床的多轴联动空间动态特性函数模型,以此研究机床动态特性在整个加工空间的变化规律。并在该函数模型的基础上,研究空间内

固有频率的最大与最小值的分布规律及动态特性对各联动轴轴向位移变化的灵敏度,为机床切削工艺路线规划和后续数控机床动态特性分析提供方法与技术支持。

1 机床空间动态特性概念

机床动力学方程为

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (1)$$

式中, M 为机床结构质量矩阵; K 为机床结构刚度矩阵; C 为机床结构阻尼矩阵。 $F(t)$ 为总外力矩阵。

文献[12]研究表明,机床处于某一位置时,其结构材料、几何尺寸和装配位置是确定的,那么机床动态特性中的一项重要评价指标—模态固有频率 ω 与机床的质量矩阵 M 、阻尼矩阵 C 、刚度矩阵 K 是一一对应的映射关系,关系如下

$$\omega = f(K, M, C) \quad (2)$$

而文献[7-9]研究表明,机床加工过程中,刀具点空间位姿的改变,迫使机床整体装配结构发生改变,导致机床的质量矩阵 M 、阻尼矩阵 C 、刚度矩阵 K 随着机床刀具空间位姿的变化而变化,因此,机床空间动态特性可以描述为

$$M(x_1, x_2, \dots, x_n)\ddot{X}(t) + C(x_1, x_2, \dots, x_n)\dot{X}(t) + K(x_1, x_2, \dots, x_n)X(t) = F(t) \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知,机床动态特性中的模态固有频率是空间位姿 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的函数,机床广义固有频率随着加工位姿的变化而变化。本文提出更为全面地描述数控机床空间动态特性的广义模态固有频率函数,函数表达式如式(4)所示

$$\omega = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4)$$

式中, ω 为模态固有频率矢量; $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 分别为各运动轴对应的线位移或角位移。加工过程为避免机床的振颤和保证切削稳定性应首先避开其固有频率,因此应着重分析固有频率在加工空间的变化规律。

2 径向基函数法的机床空间动态特性

式(4)中机床模态固有频率与加工位姿的关系是隐性的,为解决该问题,本文提出了径向基函数法将二者关系显式化,通过拟合其空间响应面函数实现预测模态固有频率在整个加工空间的变化规律。

2.1 径向基函数法理论

径向基函数法是一种插值方法, 而插值问题是解决如何在高维空间中构造通过所有给定样本点的合适曲面^[13]。其本质是采用试验设计理论对指定的样本点集合进行试验, 通过构造显示的全局近似表达式来代替被研究对象所隐含的响应值与设计变量间的关联关系, 从而预测非样本点的响应值的方法, 而文献[14]中提出的最佳一致逼近理论, 验证了径向基函数是未知函数唯一的最佳逼近形式。

径向基函数是一种径向对称函数, 对任意插值样本点 $\mathbf{x}^{(j)}$, 可以描述为 $\varphi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(j)}\|)$, 其中 $\|\cdot\|$ 是 Euclidean 范数, $\mathbf{x}^{(j)}$ 是径向基函数的中心。对于指定的样本点集合 $\{\mathbf{x}^{(j)} \in E^n | j=1, 2, \dots, m\}$, 径向基函数模型可表示为

$$s(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m \lambda_j \varphi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(j)}\|) \quad (5)$$

式中, m 为插值样本点数; $\mathbf{x}^{(j)}$ 为第 j 个样本点向量; λ_j 为待定系数; $\varphi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(j)}\|)$ 为径向基函数; $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(j)}\|$ 为插值函数上任一点到第 j 个插值点的距离, 对 n 空间或 n 个设计变量而言, 其表达式为

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(j)}\| = \sqrt{(x_1 - x_1^{(j)})^2 + \dots + (x_n - x_n^{(j)})^2} \quad (6)$$

为了进一步扩大径向基函数的近似范围, 采用了增广高斯型径向基函数(AG-RBM)^[15], 其函数模型在径向基函数模型基础上加入了多项式项, 可表示为

$$s(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m \lambda_j \varphi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(j)}\|) + \sum_{i=1}^l b_i P_i(\mathbf{x}) \quad (7)$$

对于 n 维空间或设计变量, 多项式项为 1, x_1 , x_n , x_n , x_1^2 , x_n^2 , $x_1 x_2$, $x_{n-1} x_n$, $x_{n-1} x_n$, I 的取值与所选多项式有关, 文中选择为完全二次多项式。

将上式改写成矩阵形式, 求得待定系数 λ 和 b 如下所示

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \varphi(r^{11}) & \dots & \varphi(r^{1m}) \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi(r^{m1}) & \dots & \varphi(r^{mm}) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} p_1(\mathbf{x}^{(1)}) & \dots & p_l(\mathbf{x}^{(1)}) \\ \vdots & & \vdots \\ p_1(\mathbf{x}^{(m)}) & \dots & p_l(\mathbf{x}^{(m)}) \end{pmatrix}$$

$$\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_m)^T \quad b = (b_1, \dots, b_l)^T \quad \mathbf{F} = (F^{(1)}, \dots, F^{(m)})^T$$

由式(8)可知

$$\begin{aligned} b &= (\mathbf{B}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F}) \\ \lambda &= \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{F} - \mathbf{B} b) \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)得到的 λ 和 b 代入式(8), 即可写出增广径向基函数对应的表达式, 文献[16]给出了这种增广径向基插值问题是唯一解的证明。

作为一种插值方法, 增广径向基函数在插值样本点处是没有误差的, 为了评价所建增广径向基函数模型的近似程度, 通常在设计空间中选取一系列非插值样本点采用误差平方和均方根(RMSE)进行评价, 其表达式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^Q (\bar{F}^{(i)} - F^{(i)})^2}{Q}} \quad (10)$$

式中, Q 为非插值样本点的个数; $\bar{F}^{(i)}$ 为第 i 个非插值样本点的 AG-RBM 近似模型所得的响应值; $F^{(i)}$ 为第 i 个非插值样本点的样本值。RMSE 值越小, 表明 AG-RBM 近似模型对实际模型拟合度越高。

2.2 分层拉丁超立方试验设计方法

构建 AG-RBM 模型时, n 维空间变量或设计变量每一个变量具有多个样本值, 很难针对所有设计变量的不同样本组合进行试验。而拉丁超立方试验设计是目前最有效的多因素多水平试验设计方法之一, 能科学合理地安排试验, 以部分试验代替全面试验, 从而进行分析优化的技术。它采用等概率随机正交分布的原则, 可以在极少试验点个数情况下得到较高精度的响应面方程^[17-18]。

拉丁超立方试验设计的关键在于试验因子和因子水平个数的安排, 对于试验因子数为 n 的设计变量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 要取得 m 个样本点, 可将每个设计变量采样区按照概率相等的原则分成 m 个不重叠的区间, 在每个区间内随机地选取一个 x 值, 得到组数据 $\hat{\mathbf{x}}_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^n)^T (i=1, 2, \dots, m)$ 。将这 n 个数据组中的元素不重复地随机组合, 即可得到 m 个样本点。而分层拉丁超立方试验设计的优点在于所选取随机变量的数值能均匀地分布在各个随机变量的取值区间中, 且考虑了这些随机变量的概率密度函数。

针对数控机床在各运动轴不同位姿组合进行分层拉丁超立方试验设计采样, 其采样流程如下。

(1) 分析被研究机床类型, 依据运动轴数目确定试验因子个数。

(2) 依据机床各运动轴的工作行程, 确定每个试验因子的水平数目和机床不同位姿的采样点个数。

(3) 依据确定的试验因子和水平个数选择合适的分层拉丁超立方试验采样组合, 并列出采样点和试验响应结果。

2.3 机床各轴向对机床动态特性的影响因子

采用径向基函数法构造的非线性曲面响应函数, 能较好的预测主轴端位置在整个加工空间时广义模态固有频率的变化。为了研究各轴向上的运动变化量对机床动态特性的影响程度, 提出由式(11)定义的机床空间动态特性影响因子概念, 计算某轴向设计变量单位变化导致的广义模态固有频率的变化, 并计算各轴引起该位姿点广义模态固有频率值变化的权重。为整机动态性能分析与机床加工工艺路线规划设计提供依据。

$$p_{x_i} = \frac{|\Delta\omega(x'_i)|}{\sum_i |\Delta\omega(x'_i)|} \quad (11)$$

$$\Delta\omega(x'_i) = \omega(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x, \dots, x_n) - \omega(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (12)$$

2.4 机床空间加工位置变动的动态特性研究步骤

基于第 2.1~2.3 节阐述的原理及方法可知, 通过构建广义模态固有频率 AG-RBM 函数, 分析机床动态特性在加工空间中的变化趋势及其对各轴向运动变量的灵敏度时, 需要在分层拉丁超立方试验方案指定的采样点对机床动态特性进行试验。首先, 根据试验结果提取试验数据。其次, 结合径向基函数法拟合空间动态特性曲面响应函数, 并分析空间动态特性在整个加工空间内的变化规律。最后, 实现数控机床空间动态特性影响因子的计算。其动态特性研究的技术路线如下。

(1) 分析研究对象各运动轴的运动类型(移动或转动)、运动轴数目和各运动轴的行程, 确定合适的试验方案、试验因子和水平数。

(2) 基于分层拉丁超立方试验方案对机床加工空间分布位置进行采样, 按照试验数目制定出相应的采样表。

(3) 基于试验方案中的采样点坐标, 将每组采样坐标通过编程的形式输入至机床控制面板, 检查每组采样点机床各轴联动情况, 如果出现干涉行为, 则需要剔除或修改相应的采样点。

(4) 基于模态试验理论, 在机床主轴端布置传感器。通过移动力锤法分别获取每组采样点位置的

x 、 y 、 z 三个方向的动力学信息。

(5) 提取机床主轴端的模态试验结果, 基于每组试验的试验条件和试验结果构建径向基函数法的响应面近似函数模型, 检验模型拟合度。

(6) 基于建立的径向基函数拟合模型分析机床动态特性在加工空间的变化趋势, 并计算各轴向位移对机床空间动态特性影响因子。

3 基于径向基函数法的五轴数控机床空间动态特性分析实例研究

为验证所提方法的可行性, 本文对 1 台 5 轴联动的叶片专用加工中心进行空间动态特性分析, 并阐述该方法的具体应用。

3.1 基于分层拉丁超立方试验设计的空间试验点采样

如图 1 所示的机床为本文研究对象, 机床分别通过滑鞍板与床身、 B 轴滑座与床身、转台座与滑鞍板、主轴箱与 B 轴滑座实现 x 、 y 、 z 方向的移动和 β 方向的转动。经分析机床的工作台夹持工件的 A 轴保持 360° 旋转, 并不参与加工空间位姿的改变, 因此只需要考虑其余 4 轴的联动。4 个轴的行程区间分别为: x 方向 500 mm, y 方向 300 mm, z 方向 310 mm, β 方向为 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 。

图 1 PX500 五轴联动叶片加工中心结构运动简图

基于分层拉丁超立方试验设计方案对加工空间位置进行采样, 将 4 个轴的位移或转角作为试验因子, 根据 x 、 y 、 z 、 β 的行程区间, 基于试验数目分析采样点均匀分布的合理性, 确定各因子对应水平值为 5, 建立如表 1 所示的分层拉丁超立方试验因素水平表。

表 1 分层拉丁超立方试验设计因子水平表

因子	水平				
	1	2	3	4	5
x/m	0	0.125	0.25	0.375	0.5
y/m	0	0.075	0.15	0.225	0.3
z/m	0	0.075	0.15	0.225	0.3
$\beta(^{\circ})$	-20	-10	0	10	20

基于因子与水平数目,选择试验采集个数。建立如表 2 所示的分层拉丁超立方试验采样表,共规划 25 组试验。

表 2 分层拉丁超立方试验采样表

序号	x	y	z	β	序号	x	y	z	β
1	1	2	1	1	14	3	3	3	4
2	1	2	5	1	15	3	4	3	3
3	1	3	2	2	16	4	1	1	5
4	1	4	4	2	17	4	1	3	3
5	1	5	2	5	18	4	2	2	5
6	2	1	3	2	19	4	3	4	4
7	2	3	5	5	20	4	4	3	4
8	2	4	2	5	21	5	2	4	4
9	2	5	1	1	22	5	3	4	3
10	2	5	5	4	23	5	4	1	3
11	3	1	1	1	24	5	5	4	3
12	3	1	5	2	25	5	5	5	1
13	3	2	2	2					

3.2 整机锤击模态试验

试验设备采用德国 M+P 噪音振动检测平台,通过力锤激励的方式测试每组试验采样位置的机床主轴轴端某点的加速度频率响应。试验现场与测点布置如图 2 和图 3 所示。

试验配置及测点分布如图 2 所示。

图 2 模态试验配置示意图

现场测试图如图 3 所示。

图 3 模态试验测试现场图

按照分层拉丁超立方试验方案依次进行 25 个位姿采样点力锤激励试验。图 4 为机床处于某试验位姿点 M+P 试验设备所采集的主轴端 x 、 y 、 z 向加速度传递函数曲线。

(a) 主轴端 x 向加速度频响函数曲线 (b) 主轴端 y 向加速度频响函数曲线

图 4 序号 1 点机床位姿的主轴端频响函数曲线

3.3 广义模态固有频率径向基函数法的响应面函数的构建

为检验构建的径向基函数法响应函数的拟合度, 预留 5 组试验数据作为计算均方根误差相对值 (RMSE)、最大相对误差、最小相对误差和平均相对误差。剩余 20 组的试验数据分别提取前 6 阶固有频率, 基于径向基函数法在 Matlab 软件中建立机床 3 个轴向方向 (x 、 y 、 z 方向) 和 1 个转动方向 (β 转角) 的广义模态固有频率响应函数。其函数关系式由式 (13) 给出

$$\omega = (\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4 \quad \omega_5 \quad \omega_6) = A\lambda + Bb \quad (13)$$

$$B = [1, x, y, z, \beta, x^2, y^2, z^2, \beta^2, xy, xz, x\beta, yz, y\beta, z\beta]$$

求出式 (13) 的系数

$$\lambda = \begin{pmatrix} -0.142 & 0.171 & 0.350 & -0.549 & -0.162 & -0.842 \\ 0.196 & 0.429 & -0.199 & -0.512 & -0.534 & 0.454 \\ -0.097 & 0.410 & 0.442 & -0.036 & -0.396 & 0.936 \\ -0.159 & -0.518 & 0.006 & 0.851 & 0.972 & 0.143 \\ 0.154 & 0.297 & -0.276 & 0.304 & 0.604 & 0.569 \\ -1.215 & -1.376 & 0.584 & 0.680 & 0.909 & -0.664 \\ 0.277 & 0.253 & -0.495 & 0.821 & 1.168 & 0.023 \\ 0.364 & 0.687 & 0.027 & -0.448 & -0.770 & -0.045 \\ 0.477 & 1.059 & -0.225 & -0.967 & -1.432 & 1.538 \\ 0.020 & -0.029 & -0.196 & 0.267 & 0.083 & 0.489 \\ -0.629 & -0.606 & 0.433 & 0.445 & 0.470 & -0.540 \\ 0.365 & 0.766 & 0.090 & -0.964 & -1.372 & 1.012 \\ 1.370 & 1.467 & -0.702 & -1.197 & -1.276 & 0.611 \\ -0.420 & -0.821 & 0.052 & 1.467 & 2.079 & -0.587 \\ 0.071 & -0.331 & -0.210 & 0.883 & 0.641 & 0.381 \end{pmatrix}$$

$$b = \begin{pmatrix} 0.334 & -0.306 & -0.175 & -0.007 & 0.050 & -0.094 & -0.047 & 0.277 \\ 0.438 & -0.698 & 0.087 & -0.126 & -0.040 & 0.295 & -0.029 & 0.151 \\ 0.111 & -0.332 & 0.150 & -0.131 & -0.084 & 0.275 & 0.109 & 0.121 \\ -0.383 & -0.108 & 0.600 & -0.150 & -0.231 & 0.760 & 0.186 & -0.402 \\ 0.099 & -0.791 & 0.778 & 0.188 & -0.263 & 0.145 & 0.078 & -0.671 \\ 0.084 & -0.679 & 0.691 & -0.043 & -0.212 & 0.145 & 0.016 & -0.615 \\ -0.345 & 0.346 & 0.152 & 0.219 & -0.178 & 0.277 & -0.876 & 0.093 \\ -0.367 & 0.553 & 0.225 & 0.251 & -0.139 & 0.147 & -0.827 & -0.440 \\ -0.379 & 0.986 & 0.334 & -0.995 & 0.085 & -0.347 & -0.537 & 0.450 \\ 0.052 & 0.943 & -0.572 & -1.114 & 0.267 & -0.449 & 1.481 & -0.689 \\ 0.224 & 0.030 & 0.637 & -0.402 & 0.374 & -0.688 & 1.228 & -0.855 \\ 0.412 & -0.519 & 0.578 & 0.259 & 0.287 & -0.606 & 0.777 & -1.083 \end{pmatrix}$$

将预留的 5 组非插值采样试验点引入所建函数模型计算响应预测值, 对比函数预测值与试验值, 结果如下图 5 所示。其中图中竖直标记点由下至上分别为对应点的 1~6 阶的固有频率值。

图 5 函数预测值与试验实测值前 6 阶固频数据对比图

通过计算试验值与函数预测值二者间的均方根误差相对值 (RMSE)、最大相对误差、最小相对误差和平均相对误差, 来评价径向基函数法响应函数对试验数据的拟合度, 计算结果如表 3 所示。图 5 和表 3 的数据对比验证了模型的精度。

表 3 模型精度检验标准

	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6
RMSE	6.613 4	6.722 0	2.289 2	7.095 4	12.408	9.978 3
最大误差	0.159 3	0.140 5	0.033 2	0.088 6	0.138 9	0.064 3
最小误差	0.040 0	0.014 4	0.010 7	0.004 8	0.036 7	0.034 2
平均误差	0.080 6	0.059 5	0.018 4	0.040 3	0.065 9	0.052 7

图 6 为机床前 6 阶固有频率在加工空间的变化规律, 从图中可知, 随着机床 4 轴联动, 主轴端空间位置发生改变, 固有频率也随之产生变化。

图 6 加工空间的主轴端前 6 阶固有频率变化

结合径向基函数法构建的函数模型, 为了实现前 6 阶固有频率的最大值、最小值及其对应的主轴端位姿坐标值辨识, 在 Matlab 环境下建立了遗传算法多目标优化任务, 寻优结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 固有频率的最大值及对应位姿坐标

阶数	最大固频/Hz	x/m	y/m	z/m	$\beta(^{\circ})$
1	112.37	0	53.84	61.54	-5.64
2	140.13	256.4	0	300	-20
3	121.4	0	300	161.54	6.667
4	167.32	0	0	238.46	20
5	245.42	0	0	284.61	20
6	243.5	487.2	300	0	20

表 5 固有频率的最小值及对应位姿坐标

阶数	最小固频/Hz	x/m	y/m	z/m	$\beta(^{\circ})$
1	52.94	500	0	53.846 2	-20
2	55.64	0	0	176.92	20
3	99.49	179.48	0	300	20
4	110.15	410.25	0	300	-20
5	96.354	358.97	0	300	-20
6	138.7	0	0	100	20

从表 4 和表 5 可知, 当机床除了旋转轴 A 轴的其余 4 轴联动时, 整个加工空间内的机床动态特性变化较大。其中: 第 1 阶固有频率最低为 52.9 Hz, 最高为 112.4 Hz, 变化达到 59.5 Hz; 第 2 阶固有频率最低为 55.6 Hz, 最高为 140.1 Hz, 变化达到 84.5 Hz; 第 3 阶固有频率最低为 99.5 Hz, 最高为 121.4

Hz, 变化达到 21.9 Hz; 第 4 阶固有频率最低为 110.1 Hz, 最高为 167.32 Hz, 变化达到 57.2 Hz; 第 5 阶固有频率最低为 96.3 Hz, 最高为 245.4 Hz, 变化达到 149.1 Hz; 第 6 阶固有频率最低为 138.7 Hz, 最高为 243.5 Hz, 变化达到 104.8 Hz。

综合分析表 4 和表 5 发现: ① 最大固有频率和最小固有频率多分布于各轴行程的两端点处和中间部位。以第 1 阶固有频率为例进行验证, 分别将 4 轴中的任意 2 轴处于行程中点, 剩余 2 轴联动以预测机床空间动态特性, 预测变化规律如图 7 所示, 而图 7 中的 6 张图显示 1 阶固有频率的最大和最小值几乎均分布于行程起点、中点和终点; ② x 、 β 较 y 、 z 轴行程位移量对机床空间动态特性影响较大。为了验证此结论, 将 y 轴和 z 轴居中而 x - β 联动时, 对机床空间动态特性变化趋势进行预测, 预测结果如图 8 所示, 前 6 阶固有频率的变化随 x 轴和 β 轴行程变化较大; x 轴和 β 变化居中而 y - z 联动时, 对机床空间动态特性变化趋势进行预测, 预测结果如图 9 所示, 前 6 阶固有频率的变化随 y 轴和 z 轴的行程变化较小。

上述研究表明, 针对数控机床进行动态特性分析时, 局限于某一固定位姿获取的动态特性信息不足以描述整个加工空间内的机床动态特性。基于径向基函数法构建数控机床空间动态特性函数, 对研究机床动态特性的演化规律, 指导机床的动态优化和设计具有重要意义。

图 7 1 阶固有频率随任意两轴联动变化规律

图 8 x - β 轴向联动机床空间动态特性变化规律

图 9 y - z 轴向联动机床空间动态特性变化规律

3.4 机床各轴向空间移动对机床动态特性的影响因子

为了研究各轴向位移变化量或转动量对机床空间动态特性灵敏度的影响,基于本文所构建的径向基函数的数学表达式,在 Matlab 环境下编写 predictor 子程序构建评价模型,可以用于计算空间内任意一个未经试验的机床位姿点的固有频率值及各轴向对响应的梯度变化值。其中,梯度计算公式如式(14)所示

$$\omega'(x_i) = \frac{\Delta\omega(x_i)}{\Delta x} = \left(\frac{\partial P}{\partial x_i}(x) \right)^T b + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}(x) \right)^T \lambda \quad (14)$$

以空间位置点(250, 150, 150, 0°)为例,求解该位姿下的 $\Delta\omega(x_i)/\Delta x$, 结果如表 6 所示。

表 6 指定位姿的动态特性在各轴向的梯度变化

阶数	$\omega'(x) /$ (Hz/mm)	$\omega'(y) /$ (Hz/mm)	$\omega'(z) /$ (Hz/mm)	$\omega'(\beta) /$ (Hz/(°))
1	0.006 8	-0.003 8	0.036 4	0.044 2
2	0.016 8	0.013 3	0.021 3	0.072 1
3	-0.001 5	0.014 8	-0.011 8	0.008 4
4	-0.012 1	-7.925 0	0.003 0	0.052 5
5	-0.026 6	-0.013 8	0.009 0	0.712 6
6	0.014 6	0.038 2	0.039 0	0.349 4

由表 6 可知, x 、 y 、 z 轴的行程为直线位移变量,单位一致均为 mm,而 β 轴的行程为转动位移变量,单位为(°)与前 3 轴不同。为了便于分析和对比,本文仅对单位一致的 x 、 y 、 z 3 个方向上的影响因子进行计算,计算结果如表 7 所示。

表 7 3 个轴向方向上的影响因子

阶数	P_x	P_y	P_z	最小影响因子
1	0.144 681	0.080 851	0.774 468	P_y
2	0.326 848	0.258 755	0.414 397	P_y
3	0.053 381	0.526 690	0.419 929	P_x
4	0.001 524	0.998 098	0.000 378	P_x
5	0.538 462	0.279 352	0.182 186	P_z
6	0.159 041	0.416 122	0.424 837	P_x

对比表 7 中数据发现,其中: y 向移动量对机

床 1 阶和 2 阶的空间动态特性影响较小,影响因子分别为 8.0%和 25.88%; x 向移动量对机床 3 阶、4 阶和 6 阶空间动态特性影响较小,影响因子分别为 5.34%、0.15%和 15.9%; z 向移动量对机床第 5 阶空间动态特性影响较小,影响因子为 18.22%;在机床工作时,应优先使用频率变化小的运动方式以保障机床具有更平稳的动态特性。如机床转速在第 1 阶固有频率附近,刀位点在(250, 150, 150, 0°)附近区域规划工艺路线时,应优先选择 y 方向的移动,其次选择 x 方向的移动,因 z 向影响因子已超过 50%高达 77.45%,规划路线时尽量使 z 轴保持不动。

4 结论

(1) 依据分层拉丁超立方试验方案,对 PX-500 机床的 25 个加工空间位姿做振动试验,经过 M+P 试验中的 impact 模块对数据进行后处理,依次提取出机床主轴端前 6 阶的固有频率。

(2) 基于提取出的试验数据,采用径向基函数法构建整机空间动态特性响应面函数,研究了加工空间中机床固有频率随机床运动部件位姿的随机组合变化的趋势,用于在完整工作空间中准确预测机床动态特性。在此基础上,分析了整机模态固有频率的最大值和最小值常出现的位姿,以及不同轴(其中 2 轴固定)联动时对空间动态特性的影响。

(3) 在 Matlab 环境下构建的 predictor 评价模型,有效对位姿点各轴向参与因子进行辨识,依据辨识结果找出各方向上对机床动态特性的影响力,为规划加工工艺路线提供参考依据。

上述结果表明,基于径向基函数法构建的五轴联动数控机床空间动态性能的响应函数,能有效地预测机床轴向位移对机床固有频率的影响规律,确定机床加工的最优姿态;量化的各轴向位移量对机床动态特性的影响因子,可以为机床工艺路线规划使机床处于平稳加工状态提供保证;也为进一步研究机床其他动态特性评价指标在加工空间的分布规律提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] GAO X, ZHANG Y, ZHANG H, et al. Effects of machine tool configuration on its dynamics based on orthogonal experiment method[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(2): 285-291.
- [2] TOH C K. Vibration analysis in high speed rough and finish milling hardened steel[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 278(1-2): 101-115.
- [3] AITINTAS Y, BRECHER C, WECK M, et al. Virtual machine tool[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54(2): 115-138.
- [4] YIGIT A S, ULOSY A G. Dynamic stiffness evaluation for reconfigurable machine tools including weakly non-linear joint characteristics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2002, 206(1): 87-101.
- [5] ZAGHBAN I, SONGMENE V. Estimation of machine-tool dynamic parameters during machining operation through operational modal analysis[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(12): 947-957.
- [6] LAW M, ALTINTAS Y, SRIKANTHA P A. Rapid evaluation and optimization of machine tools with position dependent stability[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 68(3): 81-90.
- [7] 刘海涛, 赵万华. 基于广义加工空间概念的机床动态特性分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 54-60.
LIU Haitao, ZHAO Wanhua. Dynamic characteristic analysis for machine tools based on concept of generalized manufacturing space[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 54-60.
- [8] 孙明楠, 殷国富, 胡腾, 等. 基于广义动态信息模型的机床结合部动刚度参与因子辨识方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 61-69.
SUN Mingnan, YIN Guofu, HU Teng, et al. Method of dynamic stiffness participation factors identification of machine tool joints based on the generalized dynamic information model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11): 61-69.
- [9] 邓聪颖, 刘蕴, 殷国富, 等. 基于响应面方法的数控机床空间动态特性研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(4): 211-218.
DENG Congying, LIU Yun, YIN Guofu, et al. Research on machine tool spatial dynamic characteristics based on response surface method[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(4): 211-218.
- [10] WU Jun, WANG Jinsong, WANG Liping, et al. Study on the stiffness of a 5-DOF hybrid machine tool with actuation redundancy[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(2): 289-305.
- [11] 李天箭, 丁晓红, 程凯. 基于空间统计学的机床动力学特性[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 87-94.
LI Tianjian, DING Xiaohong, CHENG Kai. Machine tool dynamics based on spatial statistics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 87-94.
- [12] 董冠华, 殷勤, 殷国富, 等. 基于模态分析理论的结合部动刚度辨识[J]. 振动与冲击, 2017(36): 125-131.
DONG Guanhua, YIN Qin, YIN Guofu, et al. A study on the identification of joints dynamic stiffness based on modal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017(36): 125-131.
- [13] 隋云康, 宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
SUI Yunkang, YU Huiping. Modification of response surface method and its application on engineering optimization[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [14] 于志玲, 张阳. 最佳一致逼近理论中哈尔(Haar)条件的等价定义[J]. 南开大学学报, 2006, 39(3): 101-103.
YU Zhiling, ZHANG Yang. The equivalent definition of Haar in the theory of optimal consensus approximation[J]. Journal of Nankai University, 2006, 39(3): 101-103.
- [15] FANG H B, HORSTEMEYER M F. Global response approximation with radial basis functions[J]. Engineering Optimization, 2006, 38(4): 407-424.
- [16] WU Z M. Generalized bochner's theorem for radial function[J]. Approximation Theory and Its Application, 1997, 13: 47-57.
- [17] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
LI Yunyan, HU Chuanrong. Experimental design and data processing [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [18] 吴振君, 王水林, 葛修润. LHS 方法在边坡可靠度分析中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1047-1053.
WU Zhenjun, WANG Shuilin, GE Xiurun. Application of LHS method in slope reliability analysis [J]. Geotechnical Mechanics, 2010, 31(4): 1047-1053.

作者简介: 杨闪闪, 女, 1983 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机床动力学与数字化仿真与分析。

E-mail: 67579683@qq.com

殷国富(通信作者), 男, 1955 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为 CAD/CAPP/CAM、CIMS、机械产品数字化及网络化协同设计与制造等。

E-mail: gfyin@scu.edu.cn