DOI: 10.3901/JME.2019.05.130

数控机床精度保持性的定量评价 与误差敏感度分析*

王永青 吴嘉锐 刘 阔 刘海波 刘志松 廉 盟
(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

摘要: 针对数控机床精度保持性定量评价难题, 分析精度保持性基本内涵, 提出精度保持度的概念, 并给出精确数学描述; 在此基础上, 建立基于多体理论的机床空间位置精度保持性评价模型, 形成机床精度保持能力的刻画与表达。采用 SOBOL 全局敏感度分析法, 分析各误差项时变状态对机床空间位置精度保持度的影响, 实现误差溯源。以某三轴立式加工中心为实验对象, 对机床的 9 项关键精度指标进行了为期 400 天的长期跟踪检测, 计算分析各单项精度保持度与机床空间位置精度保持度随时间的变化规律, 完成机床精度保持性的误差敏感度定量评估, 验证了所提出方法及模型的有效性。

关键词: 数控机床; 精度; 保持性评价; 敏感度分析

中图分类号: TG502

Quantitative Evaluation and Error Sensitivity Analysis of Accuracy Retentivity of CNC Machine Tools

WANG Yongqing WU Jiakun LIU Kuo LIU Haibo LIU Zhisong LIAN Meng
(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Aiming at the problem of quantitative evaluation of accuracy retentivity of CNC machine tools. Basic connotation of accuracy retentivity is analyzed. The conception of accuracy retentivity degree is put forward and its accurate mathematical description is also given. On the basis of mathematical description, evaluation model of volumetric accuracy retentivity of machine tools is established based on multi-body theory whereby forming the characterization and expression of accuracy retentivity ability of machine tools. In order to realize error tracing, influence of time varying state of each error term on the volumetric accuracy retentivity degree of machine tools is analyzed by using SOBOL global sensitivity theory. Taking a three-axis vertical machining center as the experimental object, nine kinds of accuracy index were detected for a period of 400 days of long-term tracking test. The variation laws of individual accuracy retentivity degree and volumetric accuracy retentivity degree with time are calculated and analyzed. The sensitivity of error on the accuracy retentivity of machine tool is quantitative evaluated. The effectiveness of proposed method and model are verified.

Key words: CNC machine tools; accuracy; retentivity evaluation; sensitivity analysis

0 前言

精度保持性是高档数控机床的一项重要性能指标。然而, 与国外同类机床相比, 我国高档数控机床的精度保持能力仍存在较大差距。为此, 《中国制造 2025》明确提出, 以提升可靠性、精度保持性为重点, 发展高档数控机床。

数控机床精度不仅种类多样(直线度、垂直度、平行度、定位精度等), 而且不同精度指标对机床加工性能的影响程度不尽相同。数控机床在服役过程中, 由于受复杂、多因素动态作用, 各精度指标在时间维度内的衰变情况各异^[1]。一方面, 即使精度保持时间相同的机床, 若超出要求范围的精度指标不同时, 机床的加工性能可能也会有明显的差异; 另一方面, 在精度保持时间内机床加工性能也会因各精度指标衰减的程度不同差异显著。如果能够对数控机床精度保持性实施定量评价, 对于机床精度

* 国家重大科技专项资助项目(2014ZX04014021)。20180224 收到初稿, 20180728 收到修改稿

优化分配、精度保持与维护,至关重要。

目前,国内外学者对机床误差敏感度分析展开了深入研究^[2-3],其基本思路为:基于多体理论,将机床各项误差传递至刀具成形点,建立机床空间位置误差模型^[4-5];并结合灵敏度分析理论,以空间位置误差为评价指标,分析各误差项对空间位置误差的影响^[6-8]。以直接求导法、有限差分法为代表的局部敏感度法^[9-10],常被用于分析特定误差项在其测量值局部(某点)对空间某一特定位置误差的影响,局限性较大。而SOBOL法^[11]、EFAST法^[12]、Morris法^[13]等全局敏感度分析方法可用于一定区间内分布的多误差项对机床精度指标的综合影响分析,其所指范围为机床精度指标的测量不确定性区间。而将其应用于机床精度保持性分析时,首要考虑精度随时间变化的区间。另外,空间位置精度是机床几何精度和定位精度的运动学综合,其空间位置精度对误差项的敏感度具有空间分布、多维特征。

为此,首先提出了虑及动态演化特性的机床精度保持度,表征机床精度保持能力;然后,将各误差项运动学传递至刀具成形点,建立机床空间位置精度保持度模型;最后,采用SOBOL全局敏感度分析法分析各误差项变化对机床空间位置精度的影响,进而对关键误差进行辨识。

1 机床精度保持性基本内涵

机床精度保持性指在正常使用条件下,机床各精度指标能够长时间保持在要求范围内的能力^[14]。正常使用条件一般包括加工尺寸、切削用量、切削功率、使用环境条件、加工材料等设计规定的条件;精度要求范围的上限指满足机床检验标准(国际或国家标准)的出厂精度;下限指失效精度,即机床不能满足零件加工精度要求时的各项精度值。

根据数控机床精度保持性定义,可以通过机床各项精度指标保持在要求范围内的时间长短来评价机床精度保持性,即精度保持时间。时间长、保持性好,反之差。然而,数控机床各项精度指标随着时间连续变化,即使不同机床的精度超出规定范围内的时间相同,其精度变化情况也不尽相同。例如,两台机床的某精度项变化情况如图1所示。即使机床1与机床2的精度保持时间相同,但是机床1的精度显然比机床2的精度性能高,即机床1的精度能更好的维持在出厂精度。因此,不能仅采用精度

保持时间评价数控机床精度保持性,还须考虑其随时间的动态演化过程。

图1 两台机床的某精度项变化情况

2 精度保持性评价方法

根据精度保持性内涵,对机床任意精度指标的保持能力实施评价的具体思路为:首先将动态变化的精度(直线度、垂直度等)映射到时间维,转化为与时间无关的静态指标;然后,采用传统的静态指标评价方法对映射后的精度指标进行评价。

为量化评价机床精度保持性,引入精度保持度的概念,即机床正常使用条件下,精度在要求范围内能够维持在初始状态的程度。精度保持度表征了精度保持能力,是精度保持性的一个特征量。精度保持度的误差表征如图2所示。数控机床某精度指标 δ_i 对应的误差量为 φ_i 。假设精度指标 δ_i 的误差在两次检测时间段内均匀变动,得到其随时间的变化 $\varphi_i(t)$ 。精度指标 δ_i 的检验标准对应误差为 φ_i^I ,其失效精度对应误差为 φ_i^F 。

图2 精度保持度的误差表征

机床实际使用过程中,采用精度检测仪器对精度指标 δ_i 进行定期检测,以获得不同时间节点的离散误差数据。将精度指标 δ_i 的误差映射到时间维度,对其进行离散化建模,则精度指标 δ_i 在时间 t_n 内的对应误差变化均值为

$$\bar{\varphi}_{iK}(t_n) = \frac{1}{t_n} \sum_{i=1}^{n-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} [\varphi(t_i) + (t - t_i) \times (\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)) / (t_{i+1} - t_i)] dt \quad (1)$$

其中, 机床出厂精度往往略高于精度检验标准, 其对应误差 $\varphi_i(t_1) \leq \varphi_i^f$ 。

为表示精度指标 δ_i 维持在初始状态的程度, 同时虑及精度指标 δ_i 的保证范围区间, 基于统计学距离判别理论^[15], 机床精度指标 δ_i 在 t_n 时刻的精度保持度为

$$\delta_{i,w}(t_n) = \rho_i \frac{\varphi_i^F - \bar{\varphi}_{i,\kappa}(t_n)}{\varphi_i^F - \varphi_i^f} \quad (2)$$

$$\rho_i = \begin{cases} 1 & \bar{\varphi}_{i,\kappa}(t_n) < \varphi_i^f \\ 0 & \bar{\varphi}_{i,\kappa}(t_n) \geq \varphi_i^f \end{cases}$$

式中 ρ_i ——条件函数。

由图 2 所示, 精度保持度本质是误差变化 $\varphi_i(t)$ 、失效精度对应误差 φ_i^F 围成的面积与出厂标准精度对应误差 φ_i^f 、失效精度对应误差 φ_i^F 围成的面积比。当精度指标 δ_i 在要求范围内时, 其精度保持度落在 0~1 之间。精度指标 δ_i 维持在初始精度的能力越好, 精度保持度越接近 1, 反之接近 0。此外, 由于条件函数 ρ_i , 当精度指标 δ_i 的精度低于失效精度时, 该精度指标的精度保持度等于 0。此时必须对机床的该精度指标进行调整或补偿。

3 数控机床空间位置精度保持度建模

基于精度保持度表达式, 结合多体理论建立了机床空间位置精度保持度模型, 其基本思路为: 通过式(1)将各精度指标的误差映射到时间维, 即计算各精度指标 δ_i 在时间 t_n 内的误差变化均值 $\bar{\varphi}_{i,\kappa}(t_n)$, 要求 $\bar{\varphi}_{i,\kappa}(t_n) < \varphi_i^F$ 。然后, 基于多体理论, 将各误差变化均值 $\bar{\varphi}_{i,\kappa}(t_n)$ 综合于刀具成形点。

在某一加工时刻, 刀具成形点在刀具坐标系的坐标为 T_l , 工件上实际成形点在工件坐标系中坐标为 T_w 。当坐标系本身及坐标系间的各项误差均为零时, 则工件上刀具成形点与刀尖位置重合

$$\left(\prod_{j=n, L^j(l)=0}^{j=1} T_{Llp} T_{Lls} \right) T_l = \left(\prod_{u=n, L^u(w)=0}^{u=1} T_{Lwp} T_{Lws} \right) T_w \quad (3)$$

式中 Ll ——机床中典型体 l 的低序体算子;

$$Ll = L^j(l) L^{j-1}(l);$$

Lw ——机床中典型体 w 的低序体算子;

$$Lw = L^u(w) L^{u-1}(w);$$

$L^j(l)$ ——机床中典型体 l 的 j 阶低序体算子;

T_{Llp} , T_{Lwp} ——静止特征矩阵;

T_{Lls} , T_{Lws} ——运动特征矩阵。

其中, 特征矩阵包含各精度指标的误差变化均

值 $\bar{\varphi}_{i,\kappa}(t_n)$ 。此时, 由于各项误差假设为零, 误差变化均值也均为零。当各项误差不为零时, 空间位置误差变化均值为

$$\kappa = \left(\prod_{u=n, L^u(w)=0}^{u=1} T_{Lw} \right) T_w - \left(\prod_{j=n, L^j(l)=0}^{j=1} T_{Ll} \right) T_l \quad (4)$$

空间位置误差变化均值随刀尖位置不同而变化, 且 $\bar{\varphi}_{i,\kappa}(t_n)$ 为时间函数, 即式(4)等价于

$$\kappa = (\kappa_x(x, y, z, t_n), \kappa_y(x, y, z, t_n), \kappa_z(x, y, z, t_n)) \quad (5)$$

式中, κ_x 、 κ_y 、 κ_z 为时间 t_n 内机床在 x 、 y 、 z 三个坐标方向的空间位置误差变化均值。

在时间 t_n 内, 机床在 x 、 y 、 z 三个坐标方向综合空间位置误差变化均值为

$$\begin{cases} \bar{\kappa}_x(t_n) = \frac{\iiint \kappa_x(x, y, z, t_n) dx dy dz}{V} \\ \bar{\kappa}_y(t_n) = \frac{\iiint \kappa_y(x, y, z, t_n) dx dy dz}{V} \\ \bar{\kappa}_z(t_n) = \frac{\iiint \kappa_z(x, y, z, t_n) dx dy dz}{V} \end{cases} \quad (6)$$

式中 V ——刀尖的空间行程围成的体积。

进一步, 机床在 x 、 y 、 z 三个坐标方向的空间位置精度保持度为

$$\bar{w}_j(t_n) = \rho_j \frac{\kappa_j^F - \bar{\kappa}_j(t_n)}{\kappa_j^F - \kappa_j^f} \quad (j = x, y, z) \quad (7)$$

$$\rho_j = \begin{cases} 1 & \bar{\kappa}_j(t_n) < \kappa_j^f \\ 0 & \bar{\kappa}_j(t_n) \geq \kappa_j^f \end{cases} \quad (j = x, y, z)$$

式中 ρ_j ——条件函数。

κ_j^f 为理想状态下, 机床各项精度维持出厂检验标准不变计算得到 j 方向空间位置精度保持度; κ_j^F 为各项精度维持失效精度不变计算得到 j 方向空间位置精度保持度。

4 关键误差源识别

结合机床各项精度指标随时间长期变化的特点, 利用 SOBOL 全局敏感度分析法分析各精度指标的误差变化均值对机床空间位置精度保持度的影响, 识别影响机床整机精度保持性的关键性误差源, 从而为合理经济的提高机床的精度保持性提供重要的理论依据。

将机床空间位置精度保持度模型作为敏感度分析对象。将影响机床的 n 项精度的误差变化均值作

为输入量,组成 n 维空间 Ω ;机床沿 x 、 y 、 z 坐标方向的空间位置精度保持度作为输出量。因此,根据式(7),其方程可表示为

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}(\mathbf{G}) = (\bar{w}_x(\mathbf{G}), \bar{w}_y(\mathbf{G}), \bar{w}_z(\mathbf{G}))^T \quad (8)$$

式中 $\mathbf{G}$ ——包含 n 项精度的误差变化均值矢量。

以机床沿 x 坐标方向空间位置精度保持度对各项误差的敏感性分析为例, x 坐标方向的空间位置精度保持度可表示为

$$\begin{aligned} \bar{w}_x &= \bar{w}_x(g_1, g_2, \dots, g_n) = \\ & \bar{w}_{x0} + \sum_{i=1}^n \bar{w}_{xi}(g_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq n} \bar{w}_{xi,j}(g_i, g_j) + \dots + \\ & \bar{w}_{x1,2,\dots,n}(g_1, g_2, \dots, g_n) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\bar{w}_{x0}$ 为常量。各子项对其包含的任一因素的积分为0,即

$$\int_0^1 \bar{w}_{x1,2,\dots,s}(g_1, g_2, \dots, g_s) dg_k = 0 \quad (10)$$

式中, $k=1, 2, \dots, s$ 。

式(10)分解形式唯一,各阶子项可由多重积分求得

$$\bar{w}_{x0} = \int_{\Omega} \bar{w}_x(\mathbf{G}) d\mathbf{G} \quad (11)$$

$$\bar{w}_{xi}(g_i) = \int_0^1 \dots \int_0^1 \bar{w}_x(\mathbf{G}) \prod_{k \neq i} dg_k - \bar{w}_{x0} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \bar{w}_{xi,j}(g_i, g_j) &= \int_0^1 \dots \int_0^1 \bar{w}_x(\mathbf{G}) \prod_{k \neq i, j} dg_k - \\ & \bar{w}_{x0} - \bar{w}_{xi}(g_i) - \bar{w}_{xj}(g_j) \end{aligned} \quad (13)$$

类似可以求出其余高阶子项。

根据数理统计原理,模型输出总方差为

$$D_x = \text{Var}[\bar{w}_x(\mathbf{G})] = \int \bar{w}_x^2(\mathbf{G}) d\mathbf{G} - \bar{w}_{x0}^2 \quad (14)$$

偏方差为

$$D_{x1,\dots,s} = \int \dots \int \bar{w}_{x1,\dots,s}^2(g_1, g_2, \dots, g_s) dg_1 dg_2 \dots dg_s \quad (15)$$

式中, $1 \leq s \leq n$ 。

对式(10)积分,并代入式(11),总方差分解为

$$D_x = \sum_{i=1}^n D_{xi} + \sum_{1 \leq i < j \leq n} D_{xi,j} + \dots + D_{x1,2,\dots,n} \quad (16)$$

因此,敏感度表为

$$S_{x1,\dots,s} = D_{x1,\dots,s} / D_x \quad (17)$$

式中, $1 \leq s \leq n$ 。

根据式(17)有

$$\sum_{i=1}^n S_{xi} + \sum_{1 \leq i < j \leq n} S_{xi,j} + \dots + S_{x1,2,\dots,n} = 1 \quad (18)$$

式中 S_{xi} ——机床沿 x 坐标方向空间位置精度保持度对单项误差 g_i 的敏感度;

$S_{xi,j}$ ——机床沿 x 坐标方向空间位置精度保持度对2项误差 g_i 、 g_j 的敏感度。

采用蒙特卡洛法对参数进行预估

$$\hat{\bar{w}}_{x0} \approx \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k \bar{w}_x(\mathbf{G}_m) \quad (19)$$

$$\hat{D}_x \approx \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k \bar{w}_x^2(\mathbf{G}_m) - \bar{w}_{x0}^2 \quad (20)$$

$$\hat{D}_{xi} \approx \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k \bar{w}_x(\mathbf{G}_{(\sim i)m}^a, g_{im}^a) \bar{w}_x(\mathbf{G}_{(\sim i)m}^b, g_{im}^b) - \bar{w}_{x0}^2 \quad (21)$$

$$\hat{D}_{x,\sim i} \approx \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k \bar{w}_x(\mathbf{G}_{(\sim i)m}^a, g_{im}^a) \bar{w}_x(\mathbf{G}_{(\sim i)m}^b, g_{im}^b) - \bar{w}_{x0}^2 \quad (22)$$

式中 $\mathbf{G}_m$ ——空间 Ω 取出的第 m 个采样集;

$\mathbf{G}_{(\sim i)m} = (g_{1m}, g_{2m}, \dots, g_{(i-1)m}, g_{(i+1)m}, \dots, g_{nm})$;

g_{im}^a ——第一个采样数组中误差项 g_i 的 m 采样点值;

a 、 b ——误差项的 $k \times n$ 维采样数组;

k ——蒙特卡洛法的采样个数。

由式(19)~(22)机床沿 x 坐标方向空间位置精度保持度对单项误差 g_i 的敏感度为

$$S_{xi} \approx \hat{D}_{xi} / \hat{D}_x \quad (23)$$

5 典型实例分析

5.1 数控机床精度长期监测

测试机床为三轴立式加工中心,结构简图如图3所示,由床身,直线运动部件、主轴箱、工作台等组成。采用雷尼绍ML10激光干涉仪对立式加工中心的9项精度的误差项进行了10次检测,时间跨度400天,各误差项如表1所示。机床误差现场检测如图4所示。各项精度的部分检测结果如表2所示,直线度和定位精度分别按照GB/T17421.1、GB/T17421.2-2000进行计算。

图3 立式加工中心结构简图

1. 工件 2. 主轴部件 3. 刀具
4. x轴部件 5. y轴部件 6. 床身

表 1 立式加工中心测量误差项

部件	误差项
x 轴平动	定位误差 $\delta_x(x)$
	y 方向直线度误差 $\delta_y(x)$
	z 方向直线度误差 $\delta_z(x)$
y 轴平动	定位误差 $\delta_y(y)$
	x 方向直线度误差 $\delta_x(y)$
	z 方向直线度误差 $\delta_z(y)$
z 轴平动	定位误差 $\delta_z(z)$
	x 方向直线度误差 $\delta_x(z)$
	y 方向直线度误差 $\delta_y(z)$

图 4 机床误差现场检测

表 2 立式加工中心的误差值(部分检测结果)

测量时间节点	x 轴定位误差 $\delta_x(x)/\mu\text{m}$	x 轴 y 方向 直线度 $\delta_y(x)/\mu\text{m}$	x 轴 z 方向 直线度 $\delta_z(x)/\mu\text{m}$
出厂精度	10.0	1.0	1.0
2015.07.02	10.0	1.0	1.0
失效精度	80.0	20.0	20.0
2015.10.28	11.5	3.3	1.2
2015.12.12	59.7	5.2	4.4
2016.01.19	13.4	6.8	7.0
2016.03.02	42.3	4.3	14.0
2016.04.07	13.0	7.0	11.0
2016.05.11	10.7	12.6	8.4
2016.07.05	13.7	6.2	12.2
2016.09.13	25.4	6.5	11.0
2016.11.01	11.5	1.5	2.3
2016.12.01	32.2	6.1	10.1

5.2 精度保持性评价

将机床各测量精度指标的检验标准(出厂精度)对应误差作为误差的首次测量值。将测量时间节点各精度指标的误差数据及其历史测量数据代入公式(1)、(2), 得到机床各精度指标在该测量时间节点的精度保持。

以 x 轴定位精度于 2015 年 10 月 28 日的精度保持度计算为例, 首先通过式(1)计算 x 轴定位精度从 2015 年 7 月 2 日至 2015 年 10 月 28 日共 118 天的

误差变化均值为

$$\overline{\delta_x(x)} = \frac{1}{118} \int_0^{118} \left(\frac{(11.5-10.0)}{118} t + 10 \right) dt = 10.7$$

然后, 代入式(2)计算 x 轴定位精度保持度为

$$\delta_x(x)_{,w} = 1 \times \frac{80.0-10.7}{80.0-10.0} = 0.99$$

同理, 计算所有测量时间节点下各项测量精度保持度, 如表 3、表 4 所示。其中未测精度指标的误差假设恒为零。被测精度指标于各测量节点的精度保持度均大于零, 被测精度均保持在要求范围内。各精度指标的精度保持度随时间逐渐减小。首次测量时, 各精度指标的误差均为出厂标准, 因此精度保持度均为 1; 最终测量时, x 轴沿 z 向直线度的精度保持度最低, 仅为 0.69; y 轴沿 z 向直线度的精度保持度最高, 为 0.90。

表 3 各项测量精度保持度

测量时间节点	x 轴 y 方向 直线度 精度保持 度 $\delta_y(x)_{,w}$	x 轴 z 方向 直线度 精度保持 度 $\delta_z(x)_{,w}$	y 轴 x 方向 直线度 精度保持 度 $\delta_x(y)_{,w}$	y 轴 z 方向 直线度 精度保持 度 $\delta_z(y)_{,w}$
2015.07.02	1	1	1	1
2015.10.28	0.94	0.99	0.91	0.95
2015.12.12	0.91	0.97	0.90	0.94
2016.01.19	0.88	0.93	0.89	0.94
2016.03.02	0.86	0.85	0.88	0.94
2016.04.07	0.84	0.80	0.87	0.94
2016.05.11	0.81	0.77	0.88	0.93
2016.07.05	0.77	0.73	0.86	0.92
2016.09.13	0.76	0.68	0.84	0.91
2016.11.01	0.77	0.69	0.85	0.90
2016.12.01	0.78	0.69	0.85	0.90

表 4 各项测量精度保持度

测量时间节点	z 轴 x 方向 直线度 精度保持 度 $\delta_x(z)_{,w}$	z 轴 y 方向 直线度 精度保持 度 $\delta_y(z)_{,w}$	x 轴定位 精度 精度保持 度 $\delta_x(x)_{,w}$	y 轴定位 精度 精度保持 度 $\delta_y(y)_{,w}$	z 轴定位 精度 精度保持 度 $\delta_z(z)_{,w}$
2015.07.02	1	1	1	1	1
2015.10.28	0.87	0.96	0.99	0.99	0.90
2015.12.12	0.84	0.93	0.89	0.92	0.88
2016.01.19	0.81	0.88	0.84	0.89	0.88
2016.03.02	0.76	0.85	0.83	0.90	0.88
2016.04.07	0.72	0.86	0.82	0.91	0.87
2016.05.11	0.72	0.86	0.83	0.91	0.86
2016.07.05	0.72	0.85	0.85	0.90	0.83
2016.09.13	0.74	0.85	0.85	0.89	0.80
2016.11.01	0.75	0.86	0.86	0.89	0.80
2016.12.01	0.76	0.86	0.86	0.89	0.80

将测量时间节点各精度指标的误差数据及其历史测量数据分别代入式(1)，得到机床各精度指标在该测量时间节点内的误差变化均值，将计算结果代入式(3)~(9)，计算机床沿 x 、 y 、 z 三个坐标方向的空间位置精度保持度，如表 5 所示。机床沿 x 、 y 、 z 坐标方向的空间位置精度保持度首先快速下降，后期逐渐趋于平稳。最终测量时，机床沿 x 坐标方向的空间位置精度保持度最高，为 0.88；机床沿 z 坐标方向的空间位置精度保持度最低，为 0.81。

表 5 机床沿 x 、 y 、 z 三个坐标方向的空间位置精度保持度

测量时间节点	x 向空间位置 精度保持度 $\bar{w}_x$	y 向空间位置 精度保持度 $\bar{w}_y$	z 向空间位置 精度保持度 $\bar{w}_z$
2015.07.02	1.00	1.00	1.00
2015.10.28	1.00	0.98	0.81
2015.12.12	0.91	0.92	0.80
2016.01.19	0.86	0.89	0.82
2016.03.02	0.86	0.90	0.85
2016.04.07	0.86	0.91	0.87
2016.05.11	0.88	0.90	0.87
2016.07.05	0.89	0.88	0.83
2016.09.13	0.88	0.87	0.80
2016.11.01	0.88	0.87	0.81
2016.12.01	0.88	0.87	0.81

5.3 敏感度分析

以计算的 400 天内被测 9 项精度于各检测时间节点内的误差变化均值为依据，得到各项精度的误差变化均值的最大、最小值。假设机床各精度指标在检测期间的误差变化均值在其最大、最小值间均匀分布，并对各精度指标的误差变化均值进行随机采样，抽样个数为 2 000。采用上述敏感度分析法，各项精度的误差变化均值为输入量，机床沿 x 、 y 、 z 三个坐标方向的空间位置精度保持度为输出量，各坐标方向空间位置精度保持度对各误差项的敏感度 S_{xi} 、 S_{yi} 和 S_{zi} 。

由图 5 可知，影响 x 、 y 、 z 坐标方向空间位置精度保持度的因素仅为沿该方向直线轴的定位精度以及其余轴沿该方向的直线度。其中，影响各坐标方向空间位置精度保持度的各因素敏感度值差异较大且最大影响因素为该方向的定位精度。此外，结合各精度指标的精度保持度变化分析其误差对空间位置精度保持度的影响分析。精度指标 $\delta_y(z)$ 比精度指标 $\delta_y(x)$ 的精度保持度高且变化范围小。然而，精度指标 $\delta_y(z)$ 的误差对空间位置精度保持度的影响比精度指标 $\delta_y(x)$ 的误差大，如图 5b 所示。因此，必须合理控制精度指标 $\delta_y(z)$ 的误差，提高该机床整机精度保持性。

(a) 敏感度 S_{xi}

(b) 敏感度 S_{yi}

(c) 敏感度 S_{zi}

图 5 各坐标方向空间位置精度保持度对各误差项的敏感度

通过对立式加工中心进行误差敏感度分析，可以得到以下几点。

(1) 在不考虑转角误差与垂直度误差时，机床在单方向的精度保持能力仅与在沿着该方向单项精度（直线度、定位精度）随时间的变化情况有关。与其余精度指标无关。

(2) 空间位置精度保持度对机床各项误差的敏感度不仅与精度指标的误差大小有关，也与机床结构有关。

6 结论

(1) 在综合分析数控机床精度保持性内涵的基础上，提出了一种精度保持度新概念，以刻画机床精度保持能力，并在此基础上建立了数控机床精度保持性评价模型。

(2) 基于 SOBOL 全局敏感度分析方法, 分析了各项误差对机床空间位置精度保持性的影响, 为关键性误差源识别提供了理论依据。

(3) 为验证所提出方法的有效性, 以某三轴立式加工中心为实验对象, 对其 9 个关键精度指标进行了 10 次、为期 400 天的定期检测, 并进行了敏感度分析, 得到各轴定位精度对该坐标轴方向的精度保持度的影响较关键, 最终识别出了影响机床加工精度的关键性误差, 实现了误差溯源。

参 考 文 献

- [1] 赵万华, 张星, 吕盾, 等. 国产数控机床的技术现状与对策[J]. 航空制造技术, 2016, 59(9): 16-22.
ZHAO Wanhua, ZHANG Xing, LÜ Dun, et al. Present situation and countermeasure of domestic CNC machine tool technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(9): 16-22.
- [2] CHENG Qiang, ZHANG Ziling, ZHANG Guojun, et al. Geometric accuracy allocation for multi-axis CNC machine tools based on sensitivity analysis and reliability theory[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(6): 1134-1149.
- [3] TIAN Wenjie, GAO Weiguo, CHANG Wenfen, et al. Error modeling and sensitivity analysis of a five-axis machine tool[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014(8).
- [4] 赵强强, 洪军, 刘志刚, 等. 任意拓扑结构机床运动轴误差传递链建模方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(21): 130-137.
ZHAO Qiangqiang, HONG Jun, LIU Zhigang, et al. Modeling method on motive axes error transfer chain for machine tool of arbitrary topological structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(21): 130-137.
- [5] 韩飞飞, 赵继, 张雷, 等. 数控机床几何精度综合解析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21): 141-148.
HAN Feifei, ZHAO Ji, ZHANG Lei, et al. Synthetical analysis and experimental study of the geometric accuracy of CNC machine tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(21): 141-148.
- [6] 褚宁, 张为民. 基于模式搜索法的数控机床空间误差溯源[J]. 中国工程机械学报, 2015, 13(3): 202-205.
CHU Ning, ZHANG Weimin. Spatial error tracing on NC machines based on pattern searching [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2015, 13(3): 202-205.
- [7] 程强, 刘广博, 刘志峰, 等. 基于敏感度分析的机床关键性几何误差源识别方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7): 171-179.
CHENG Qiang, LIU Guangbo, LIU Zhifeng, et al. An identification approach for key geometric error sources of machine tool based on sensitivity analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(7): 171-179.
- [8] 黄强, 张根保, 张新玉. 机床位姿误差的敏感性分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 141-146.
HUANG Qiang, ZHANG Genbao, ZHANG Xinyu. Sensitivity analysis of the pose error of machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 141-146.
- [9] HUANG Qiang, ZHANG Genbao. Precision design for machine tool based on error prediction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(1): 151-157.
- [10] CHEN Guoda, LIANG Yingchun, SUN Yazhou, et al. Volumetric error modeling and sensitivity analysis for designing a five-axis ultra-precision machine tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9): 2525-2534.
- [11] CHENG Qiang, ZHAO Hongwei, ZHANG Guojun, et al. An analytical approach for crucial geometric errors identification of multi-axis machine tool based on global sensitivity analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1-4): 107-121.
- [12] GUO Shijie, ZHANG Dongsheng, XI Yang. Global quantitative sensitivity analysis and compensation of geometric errors of CNC machine tool[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016(1): 1-10.
- [13] CHENG Qiang, FENG Qiunan, LIU Zhifeng, et al. Sensitivity analysis of machining accuracy of multi-axis machine tool based on POE screw theory and morris method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(9): 2301-2318.
- [14] 马军旭, 赵万华, 张根保. 国产数控机床精度保持性分析及研究现状[J]. 中国机械工程, 2015, 26(22): 3108-3115.
MA Junxu, ZHAO Wanhua, ZHANG Genbao. Research status and analyses on accuracy retentivity of domestic CNC machine tools[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(22): 3108-3115.
- [15] 李春林, 陈旭红. 应用多元统计分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
LI Chunlin, CHEN Xudong. Applied multivariate statistical analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.

作者简介: 王永青, 男, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数控及数字化制造系统, 数控机床精度保持性技术等。
刘海波(通信作者), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为精密测量与加工、数控技术等。
E-mail: hbliu@dlut.edu.cn