DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108605

一种基于新灵敏度指标的五轴数控机床关键几何误差辨识方法*

陶浩浩[1],陈 丰[1],李同杰[1],范晋伟[2]
(1.安徽科技学院机械工程学院 滁州 233100; 2.北京工业大学材料与制造学部 北京 100124)

摘 要:精度设计是提升机床加工精度的有效途径,而准确辨识关键几何误差并为其合理分配权重是实现精度设计的前提条件,因此,提出了一种识别关键几何误差的灵敏度分析方法。首先基于多体系统理论建立了机床加工误差模型,并基于该模型构建了灵敏度分析模型,同时定义了一种新的灵敏度指标。然后,通过仿真分析明确了第 10、17、22、24 和 37 项几何误差为关键几何误差,同时实现了对各项几何误差分配权重。最后,通过补偿关键几何误差和全部几何误差的方式对"S"形检测试件进行加工并对比其轮廓度误差,对比结果显示通过两种补偿方式获得的平均轮廓度误差在 3 条检测线上的差值很小,分别为 0.005、0.004 和 0.006 mm,因此证明了提出的灵敏度分析方法的正确性。

关键词:关键几何误差;加工误差;五轴数控机床;灵敏度分析;"S"形检测试件
中图分类号:TH161 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:460.3599

A key geometric error identification method for five-axis NC machine tool based on new sensitivity index

Tao Haohao[1], Chen Feng[1], Li Tongjie[1], Fan Jinwei[2]
(*1. College of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China*;
2. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The accuracy design is an effective method to improve machining accuracy of machine tools. How to identify key geometric errors accurately and assign weights to each geometric error are the prerequisites for achieving accuracy design. Therefore, a sensitivity analysis method for identifying the key geometric errors is proposed. Firstly, the machining error model of machine tools based on the multi-body system theory is formulated. And the sensitivity analysis model based on the machining error model of machine tools is established. Meanwhile, a new sensitivity index is defined. Then, the 10th, 17th, 22nd, 24th and 37th geometric errors are determined as the key geometrical errors of the machine tool by simulation analysis. Meanwhile, the weight of each geometric error is allocated. Finally, the "S" shape test piece is selected as the research object for experiment verification. The "S" shaped test pieces are machined by compensating the identified key geometric errors and all geometric errors. And the form errors of the "S" shape test piece are compared. The comparison results show that the difference of the average profile error obtained by two compensation strategies on three detection lines is very small, which is 0.005, 0.004, and 0.006 mm, respectively. Therefore, the correctness of sensitivity analysis method is verified.

Keywords: key geometric errors; machining error; five-axis NC machine tool; sensitivity analysis; "S" shape test piece

0 引 言

数控机床整机加工精度是衡量其加工性能的重要指标,是整个国家机械制造能力和发展水平的重要体现,精度优化设计是提升机床加工精度行之有效的途径[1-7]。由于不同的几何误差对整机加工精度的影响程度存在差异,如果凭借以往的设计经验对数控机床进行优化设计,精度优化分配结果很容易受到主观因素的影响,导致机床的加工精度过高或过低。因此,需要对各项几何误差

收稿日期:2021-09-19 Received Date: 2021-09-19
*基金项目:国家自然科学基金(51775010)、安徽省自然科学基金(2108085MEI167)项目资助

进行灵敏度分析,确定其对整机加工精度的影响权重,从而可以正确地指导机床精度优化设计。近年来,在数控机床几何误差的灵敏度分析方面,国内外学者已经进行了大量的研究工作。

程强等[8]以矩阵微分法为基础,完成了机床几何误差灵敏度分析模型的建立,通过对比各项几何误差的灵敏度系数,成功辨识出关键几何误差参数项,实现了误差溯源,同时为数控机床的精度优化设计奠定基础。Chen 等[9]选择机床工作行程的 3 个位置点作为样本点进行灵敏度分析,并假设所有的线性误差和角度误差均为定值,即分别为 0.1 μm 和 0.1 μrad,最终辨识出了机床的关键几何误差。Cheng 等[10]提出了一种基于改进的 Morris 方法的全局灵敏度分析方法,根据分析结果,提出调整和修改机床关键零部件参数的建议和指南,从而经济合理地提高机床的加工精度。Yao 等[11]利用对单项几何误差直接求导的方法辨识关键几何误差参数项,同时为了方便计算各个误差参数项的灵敏度系数,假设所有线性误差参数为 10 μm 以及角度误差参数为 5″,最终借助 Isight 软件和多元线性回归方法得到了关键几何误差项。Luo 等[12]提出了一组灵敏度指标和一种简便的灵敏度分析方法。在此基础上,在指定的工作空间内辨识出了 10 项关键几何误差,最后通过仿真分析验证了该灵敏度分析方法的正确性。Guo 等[13]利用乘法降维法简化了误差分析模型,将概率分布的高维积分转化为一维积分,降低了全局灵敏度分析模型的复杂度,最后辨识出了影响机床加工精度的关键误差项,为机床的精度优化设计和误差补偿提供了重要依据。夏长久等[14]利用 Morris 全局灵敏性分析法,计算了各项几何误差的灵敏度系数,进而得到了关键几何误差项。

纵观现有的研究文献,学者们在数控机床几何误差灵敏度分析方面开展了大量的研究工作。在这些研究工作中使用的方法主要包括直接求导法、有限差分法、摄动法、蒙特卡罗方法、Sobol 法和 Morris 方法等,这些方法计算量大、计算过程复杂且可行性和实用性较低。为了方便计算各项几何误差的灵敏度系数,有些学者假设所有几何误差均为定值,这样造成了灵敏度分析结果无法反映出数控机床几何误差随机床加工位置变化而变化这个关键因素,并且角度误差参数与线性误差参数的单位不同,还需要分别求取其灵敏度。因此,探索一种较为简单、准确、有效的几何误差灵敏度分析方法,实现关键几何误差的准确辨识并获得各项几何误差对机床加工精度的影响权重具有非常重要的实际应用意义。

为了准确辨识关键几何误差并简化计算过程,定义了一种简单且能真实反映各项几何误差对机床加工精度影响程度的灵敏度指标。本文首先基于多体系统理论,建立机床整机加工精度预测模型;然后基于该模型,建立各项几何误差的灵敏度分析模型,同时定义一种新的灵敏度指标,确定各项几何误差对整机加工精度的影响权重,从而可以正确地指导机床精度设计。

1　建立整机加工误差预测模型

在现有的建模方法中,以多体系统理论为基础的误差建模方法得到了广泛地应用,多体系统理论通过对机床的抽象化处理,可以大大简化数控机床结构分析的复杂性,是一种合理有效的建模方法[15]。本文基于该理论对龙门式五轴数控铣床的结构进行了简化分析,该机床的结构如图 1 所示,将该机床抽象为一个由刀具分支和工件分支组成的多体系统,拓扑结构如图 2 所示,然后基于齐次坐标变换原理,建立机床各相邻体间静止及运动变换矩阵。

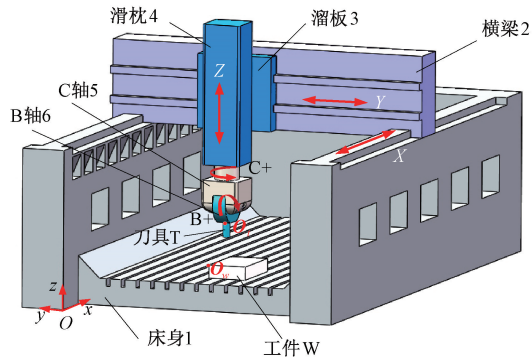


图 1　龙门式五轴数控铣床结构示意图

Fig. 1　The structure diagram of the gantry type five-axis NC milling machine

因此,基于多体系统理论,得到工件坐标系内待加工点在机床坐标系内的位置矢量为:

$$\boldsymbol{p}_w = {}^{1}_{w}\boldsymbol{T}_{p\,w}^{\,1}\boldsymbol{T}_{pe\,w}^{\,1}\boldsymbol{T}_{s\,w}^{\,1}\boldsymbol{T}_{se}\boldsymbol{r}_w \tag{1}$$

刀具中心点在机床坐标系内的位置矢量为:

$$\boldsymbol{p}_t = \prod_{t=n,L^n(7)=1}^{t=1}\left({}^{L^t(j)}_{L^{t-1}(j)}\boldsymbol{T}_{p}^{\,L^t(j)}\boldsymbol{T}_{pe\,L^{t-1}(j)}^{\,L^t(j)}\boldsymbol{T}_{s\,L^{t-1}(j)}^{\,L^t(j)}\boldsymbol{T}_{se}\right)\boldsymbol{r}_t =$$

$$\begin{aligned}&{}^{1}_{2}\boldsymbol{T}_{p\,2}^{\,1}\boldsymbol{T}_{pe\,2}^{\,1}\boldsymbol{T}_{s\,2}^{\,1}\boldsymbol{T}_{se\,3}^{\,2}\boldsymbol{T}_{p\,3}^{\,2}\boldsymbol{T}_{pe\,3}^{\,2}\boldsymbol{T}_{s\,3}^{\,2}\boldsymbol{T}_{se\,4}^{\,3}\boldsymbol{T}_{p\,4}^{\,3}\boldsymbol{T}_{pe}\\&{}^{3}_{4}\boldsymbol{T}_{s\,4}^{\,3}\boldsymbol{T}_{se\,5}^{\,4}\boldsymbol{T}_{p\,5}^{\,4}\boldsymbol{T}_{pe\,5}^{\,4}\boldsymbol{T}_{s\,5}^{\,4}\boldsymbol{T}_{se\,6}^{\,5}\boldsymbol{T}_{p\,6}^{\,5}\boldsymbol{T}_{pe\,6}^{\,5}\boldsymbol{T}_{s\,6}^{\,5}\boldsymbol{T}_{se}\\&{}^{6}_{t}\boldsymbol{T}_{p\,t}^{\,6}\boldsymbol{T}_{pe\,t}^{\,6}\boldsymbol{T}_{s\,t}^{\,6}\boldsymbol{T}_{se}\boldsymbol{r}_t\end{aligned} \tag{2}$$

式中:${}^{L^t(j)}_{L^{t-1}(j)}\boldsymbol{T}_{p}$、${}^{L^t(j)}_{L^{t-1}(j)}\boldsymbol{T}_{pe}$、${}^{L^t(j)}_{L^{t-1}(j)}\boldsymbol{T}_{s}$、${}^{L^t(j)}_{L^{t-1}(j)}\boldsymbol{T}_{se}$ 分别表示 J 体相对 I 体的体间理想静止齐次变换矩阵;J 体相对 I 体的体间实际静止齐次变换矩阵;J 体相对 I 体的体间理想运动齐次变换矩阵;J 体相对 I 体的体间实际运动齐次变换矩阵;$\boldsymbol{r}_t$ 表示刀具中心点在刀具坐标系中的位置矢量。

在实际加工过程中,若要实现精密加工需要满足工件坐标系内待加工点与刀具中心点重合,即:

$$\boldsymbol{p}_w = \boldsymbol{p}_t \tag{3}$$

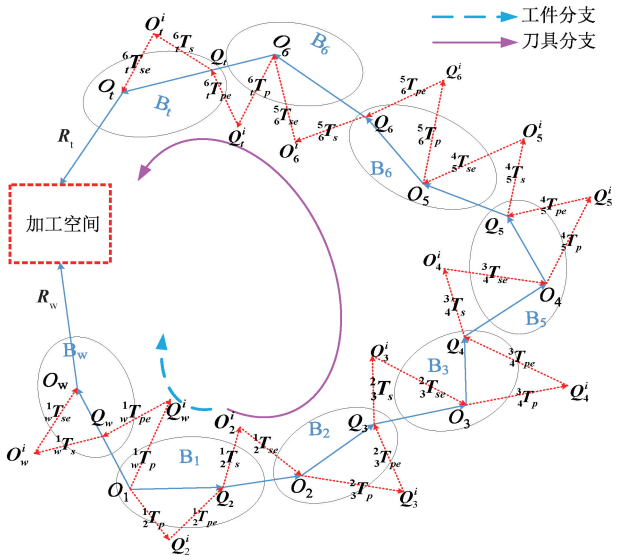


图 2 龙门式五轴数控铣床拓扑结构

Fig. 2 The topology structure map of the gantry type five-axis NC milling machine

综合式(1)~(3)可得,实际加工过程中刀具中心点在工件坐标系中的位置矢量为:

$$\boldsymbol{r}_w = ({}_w^1\boldsymbol{T}_{pw}{}_w^1\boldsymbol{T}_{pe}{}_w^1\boldsymbol{T}_{sw}{}_w^1\boldsymbol{T}_{se})^{-1}{}_2^1\boldsymbol{T}_{p2}{}_{pe}^1\boldsymbol{T}_{s2}^1\boldsymbol{T}_{se}{}_3^2\boldsymbol{T}_p$$
$${}_3^2\boldsymbol{T}_{pe}{}_3^2\boldsymbol{T}_{s3}^2\boldsymbol{T}_{se}{}_4^3\boldsymbol{T}_{p4}^3\boldsymbol{T}_{pe}{}_4^3\boldsymbol{T}_{s4}^3\boldsymbol{T}_{se}{}_5^4\boldsymbol{T}_{p5}^4\boldsymbol{T}_{pe}{}_5^4\boldsymbol{T}_s$$
$${}_5^4\boldsymbol{T}_{se}{}_6^5\boldsymbol{T}_{p6}^5\boldsymbol{T}_{pe}{}_6^5\boldsymbol{T}_{s6}^5\boldsymbol{T}_{set}{}_t^6\boldsymbol{T}_{pt}^6\boldsymbol{T}_{pet}{}_t^6\boldsymbol{T}_{st}^6\boldsymbol{T}_{se}\boldsymbol{r}_t \tag{4}$$

假设上式中各个误差参数均为 0,可得理想条件下刀具中心点到工件坐标系中的位置矢量为:

$$\boldsymbol{r}_w^i = ({}_w^1\boldsymbol{T}_{pw}{}_w^1\boldsymbol{T}_s)^{-1}{}_2^1\boldsymbol{T}_{p2}{}_{s3}^1\boldsymbol{T}_{p3}^2\boldsymbol{T}_{s4}^3\boldsymbol{T}_p$$
$${}_4^3\boldsymbol{T}_{s5}^4\boldsymbol{T}_{p5}^4\boldsymbol{T}_{s6}^5\boldsymbol{T}_{p6}^5\boldsymbol{T}_{st}^6\boldsymbol{T}_{pt}^6\boldsymbol{T}_s\boldsymbol{r}_t \tag{5}$$

因此,将式(4)减去式(5)可得机床加工误差模型,如式(6)所示:

$$\boldsymbol{e} = (e_x, e_y, e_z, 0)^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中:e_x 为加工误差在 X 方向的分量,如式(7)所示;e_y 为加工误差在 Y 方向的分量,如式(8)所示;e_z 为加工误差在 Z 方向的分量,如式(9)所示。

$$e_x = (\delta_x(x) + \delta_x(y) - l_k\cos(b)(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(z) + \varepsilon_{xc} + \varepsilon_{xz}) - (\varepsilon_y(b) + \delta_y(c))\sin(c) - \varepsilon_z(x)h_{3y} - h_{4y}(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) + \varepsilon_{xy}) + h_{4z}(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)) + h_{5z}(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(z) + \varepsilon_{xz}) + \delta_x(c)\cos(c) + h_{6z}(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(z) + \varepsilon_{xc} + \varepsilon_{xz} + \varepsilon_y(c)\cos(c) + \varepsilon_x(c)\sin(c)) + \varepsilon_{xz}z - h_{5y}(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(z) + \varepsilon_{xy}) + \varepsilon_y(x)h_{3z} + \delta_x(z) + \delta_x(b)\cos(b)\cos(c) + (\delta_z(b) - l_k)\cos(c)\sin(b) - \varepsilon_z(x)y + \varepsilon_y(y)z - \varepsilon_{xy}y - \varepsilon_{bz}l_k\cos(b)\sin(c) + \varepsilon_y(x)z - (\varepsilon_z(c) + \varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(z) + \varepsilon_{xy})(h_{6y}\cos(c) + h_{6x}\sin(c)) - \delta_x(b)\varepsilon_y(x)\sin(b) - \varepsilon_x(b)l_k\sin(c) - l_k\cos(b)\cos(c)(\varepsilon_y(b) + \varepsilon_y(c) + \varepsilon_x(c)) + (\varepsilon_z(c) + \varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(z) + \varepsilon_{xb} + \varepsilon_{xy})l_k\sin(b)\sin(c)) \tag{7}$$

$$e_y = (\delta_y(x) + \delta_y(y) + \delta_y(z) + h_{5x}(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) + \varepsilon_{xy} + \varepsilon_z(z)) + \delta_z(b)\sin(b)\sin(c) + \varepsilon_z(x)h_{3x} - \varepsilon_x(y)z - h_{5z}(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(z) + \varepsilon_{yz}) - \varepsilon_x(x)z + h_{4x}(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) + \varepsilon_{xy}) + (\varepsilon_{bz} - \varepsilon_x(c))l_k\cos(b)\cos(c) - h_{6z}(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(z) + \varepsilon_{yc} + \varepsilon_{yz} + \varepsilon_x(c)\cos(c) - \varepsilon_y(c)\sin(c)) + \cos(b)\sin(c)(\delta_x(b) + \varepsilon_y(c) - \varepsilon_y(b)) - l_k\cos(b)(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(z) + \varepsilon_{yc} + \varepsilon_{yz}) - \varepsilon_{yz}z + h_{6x}\cos(c)(\varepsilon_z(c) + \varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(z) + \varepsilon_{xy}) + \delta_y(b)\cos(c) - h_{6y}\sin(c)(\varepsilon_z(c) + \varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(z) + \varepsilon_{xy}) + \delta_y(c)\cos(c) + \delta_x(c)\sin(c) - \varepsilon_x(x)h_{3z} + l_k\varepsilon_x(b)\cos(c) - h_{4z}(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) - l_k\cos(c)\sin(b)(\varepsilon_z(c) + \varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(z) + \varepsilon_{xb} + \varepsilon_{xy})) \tag{8}$$

$$e_z = (\delta_z(c) + \delta_z(x) + \delta_z(y) + \delta_z(z) - h_{4x}(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)) - h_{5x}(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(z) + \varepsilon_{xz}) + h_{4y}(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) + \varepsilon_x(x)h_{3y} + \sin(b)\begin{pmatrix}(\varepsilon_y(b)l_k + \varepsilon_y(c)l_k - \delta_x(b)) - l_k\sin(c)\\(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(z) + \varepsilon_{yc} + \varepsilon_{yz})\end{pmatrix} + \varepsilon_x(x)y + h_{5y}(\varepsilon_{yz} + \varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(z) + \varepsilon_x(x)) + h_{6y}(\varepsilon_x(c) + \varepsilon_{yc}\cos(c) + \sin(c)(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(z) + \varepsilon_{xc} + \varepsilon_{xz})) + l_k\cos(c)\sin(b)(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(z) + \varepsilon_{xc} + \varepsilon_{xz}) + h_{6x}\begin{pmatrix}\sin(c)(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(z) + \varepsilon_{yc} + \varepsilon_{yz}) - \cos(c)\\(\varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(z) + \varepsilon_{xc} + \varepsilon_{xz} + \varepsilon_y(x)) - \varepsilon_y(c)\end{pmatrix} + \varepsilon_x(b)\varepsilon_y(z)\varepsilon_{xb}l_k\cos(c) - \varepsilon_y(x)h_{3x} + \delta_z(b)\cos(b)) \tag{9}$$

式中:$\delta_*(\#)$、$\varepsilon_*(\#)$ 分别表示线位移误差和角位移误差,均为数控机床的几何误差;l_k 表示刀具长度;$(h_{jx}, h_{jy}, h_{jz}, 1)^{\mathrm{T}}$ 表示数控机床各体参考坐标系原点的位置矢量。

2 建立几何误差灵敏度分析模型

根据多体系统理论,数控机床的加工误差是由各项几何误差经刀具分支和工件分支传递的结果,建立的加工误差模型是关于各项几何误差的函数,不同的几何误差导致数控机床加工误差值的差异程度不同。而几何误差灵敏度分析反映的是在数控机床加工空间中各项几何误差对

加工误差的影响程度,为了对该影响程度进行量化分析和比较,以及简化计算过程,需要定义一种简单且能真实反映该影响程度的灵敏度指标,因此,本文将各项几何误差单独作用时引起的加工误差的峰值作为各项几何误差对应的灵敏度。加工误差的峰值越大说明该项几何误差对加工误差的影响程度越大,峰值越小则说明影响程度越小。

根据式(6)~(9),可以建立五轴数控机床加工误差计算模型的一般形式,该模型可以表示为:

$$\boldsymbol{e}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{G},\boldsymbol{D},\boldsymbol{H},L)=(e_x,e_y,e_z,0)^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{G}$ 表示 n 项数控机床几何误差组成的误差矢量,$\boldsymbol{G}=(g_1,g_2,\cdots,g_n)^{\mathrm{T}}$,$g_i$ 表示数控机床的第 i 项几何误差,$i=1,2,\cdots,n$;$\boldsymbol{D}$ 表示机床各运动轴的位置矢量,$\boldsymbol{D}=(x,y,z,b,c)^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{H}$ 表示数控机床各体参考坐标系原点的位置矢量,$\boldsymbol{H}=(h_{jx},h_{jy},h_{jz},1)^{\mathrm{T}}$,$j$ 表示数控机床第 j 个运动体;L 表示刀具长度。

根据式(10)可以得到各项几何误差单独作用时产生的加工误差:

$$\boldsymbol{e}_i=\boldsymbol{f}(g_i,\boldsymbol{D},\boldsymbol{H},L)=(e_{ix},e_{iy},e_{iz},0)^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

式中:$\boldsymbol{e}_i$ 为第 i 项几何误差单独作用时产生的加工误差,$i=1,2,3,\cdots,37$。

本文将各项几何误差单独作用时引起的加工误差的峰值作为各项几何误差对应的灵敏度,因此,根据式(11)可以得到各项几何误差的灵敏度表达式:

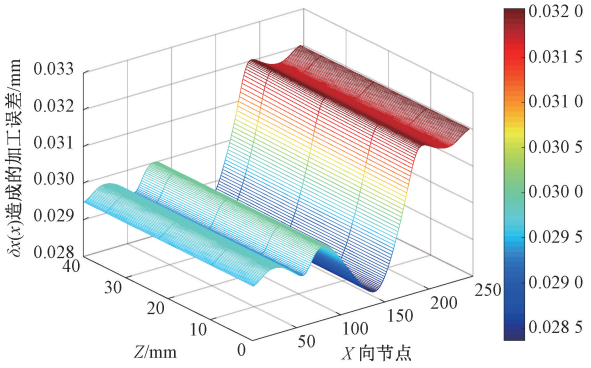
$$S_i=\max|\boldsymbol{e}_i|=\max\left(\sqrt{(e_{ix})^2+(e_{iy})^2+(e_{iz})^2}\right) \tag{12}$$

为了更加直观地辨识出关键几何误差并对各项几何误差分配权重,对各项几何误差的灵敏度进行归一化处理,可以得到各项几何误差的灵敏度系数:

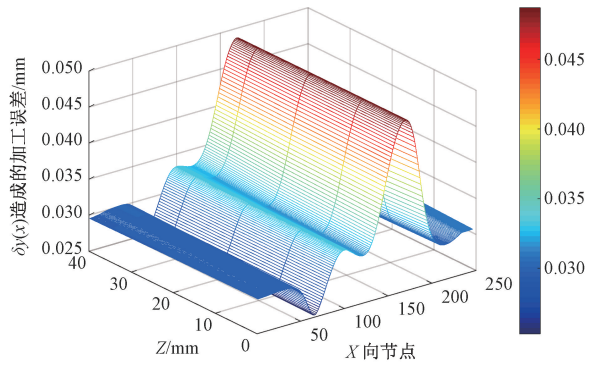
$$SN_i=\frac{|S_i|}{\Sigma|S_i|} \tag{13}$$

3　仿真分析

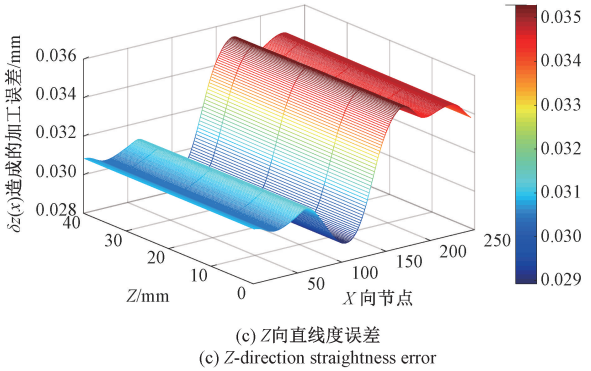
为了更加直观地表征各项几何误差单独作用时对机床加工误差产生的影响,本文选择适用于五轴数控机床加工精度检验与验收的“S”形检测试件作为研究对象,根据式(11),利用 MATLAB R2016b 对“S”形检测试件的表面轮廓度误差进行仿真分析,本文仅以 X 轴的各项几何误差为例进行分析,通过仿真分析得到了 X 轴的各项几何误差对加工误差产生的影响,结果如图 3 所示,其余各项几何误差的对加工误差的影响程度仅展示了最终结果,如表 1 所示。



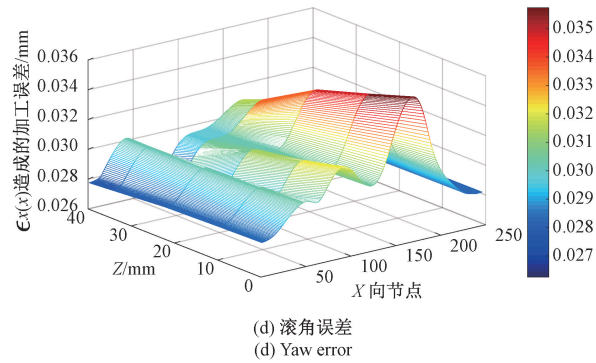
(a) X轴定位误差
(a) Position error of X axis



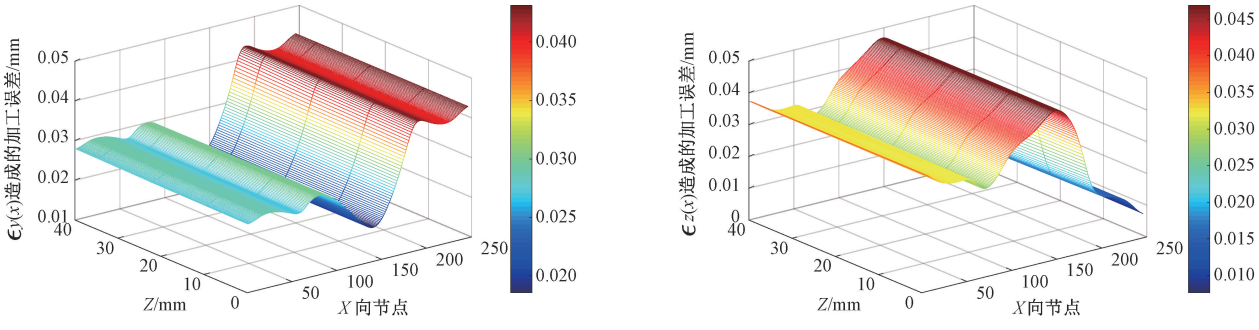
(b) Y向直线度误差
(b) Y-direction straightness error



(c) Z向直线度误差
(c) Z-direction straightness error



(d) 滚角误差
(d) Yaw error



(e) 颠摆角误差
(e) Pitch error

(f) 偏摆角误差
(f) Roll error

图 3 X 轴各项几何误差对加工误差产生的影响

Fig. 3 The influence of each geometric error of X axis on machining error

表 1 各项几何误差对应的编号及其灵敏度

Table 1 Number and sensitivity corresponding to each geometric error

编号	几何误差	灵敏度数值/mm	编号	几何误差	灵敏度数值/mm	编号	几何误差	灵敏度数值/mm
1	$\delta_x(x)$	0.003 7	14	$\delta_y(z)$	0.001 3	27	$\delta_z(c)$	0.001 1
2	$\delta_y(x)$	0.023 4	15	$\delta_z(z)$	0.000 1	28	$\varepsilon_x(c)$	0.032 1
3	$\delta_z(x)$	0.006 4	16	$\varepsilon_x(z)$	0.011 7	29	$\varepsilon_y(c)$	0.026 4
4	$\varepsilon_x(x)$	0.009 5	17	$\varepsilon_y(z)$	0.152 7	30	$\varepsilon_z(c)$	0.008 5
5	$\varepsilon_y(x)$	0.024 6	18	$\varepsilon_z(z)$	0.000 3	31	ε_{xz}	0.011 4
6	$\varepsilon_z(x)$	0.039 3	19	$\delta_x(b)$	0.004 5	32	ε_{xy}	0.004 8
7	$\delta_x(y)$	0.003 8	20	$\delta_y(b)$	0.005 4	33	ε_{yz}	0.002 7
8	$\delta_y(y)$	0.002 3	21	$\delta_z(b)$	0.038 4	34	ε_{xb}	0.009 2
9	$\delta_z(y)$	0.008 9	22	$\varepsilon_x(b)$	0.140 8	35	ε_{bz}	0.002 6
10	$\varepsilon_x(y)$	0.154 4	23	$\varepsilon_y(b)$	0.010 7	36	ε_{xc}	0.025 8
11	$\varepsilon_y(y)$	0.001 0	24	$\varepsilon_z(b)$	0.131 5	37	ε_{yc}	0.050 4
12	$\varepsilon_z(y)$	0.001 2	25	$\delta_x(c)$	0.029 7	–	–	–
13	$\delta_x(z)$	0.006 0	26	ε_{yc}	0.024 8	–	–	–

为了更好地说明各项几何误差,对其进行编号处理,如表 1 所示。根据“S”形检测试件表面轮廓度误差的仿真分析结果,可以得到各项几何误差的灵敏度数值,基于式(13)以及各项几何误差的灵敏度数值,可以得到各项几何误差的灵敏度系数,并对其进行排序,结果如图 4 所示,将灵敏度系数大于 0.05 定义为关键几何误差[9],从图 4 中可以直观地看出第 10、17、22、24 和 37 项几何误差为该机床的关键几何误差。同时根据图 4 可以得到各项几何误差的权重因子,根据权重因子对各项几何误差分配权重,为接下来机床精度优化分配的研究工作奠定基础。

4 实验验证

为了验证所提出的公差参数灵敏度分析方法的准确性,利用龙门式五轴数控铣床对“S”形检测试件进行铣削加工,铣削加工采用 ϕ20 棒铣刀,补偿策略 1 是采用文献[16]中迭代补偿方法补偿辨识的关键几何误差并获取补偿后的 NC 指令代码,补偿策略 2 是采用文献[16]中迭代补偿方法补偿所有的几何误差并获取补偿后的 NC 指令代码,加工现场如图 5 所示。

根据文献[17]可知,为了便于检测“S”形检测试件的轮廓度误差,如图 6 所示,沿“S”形检测试件的缘条高

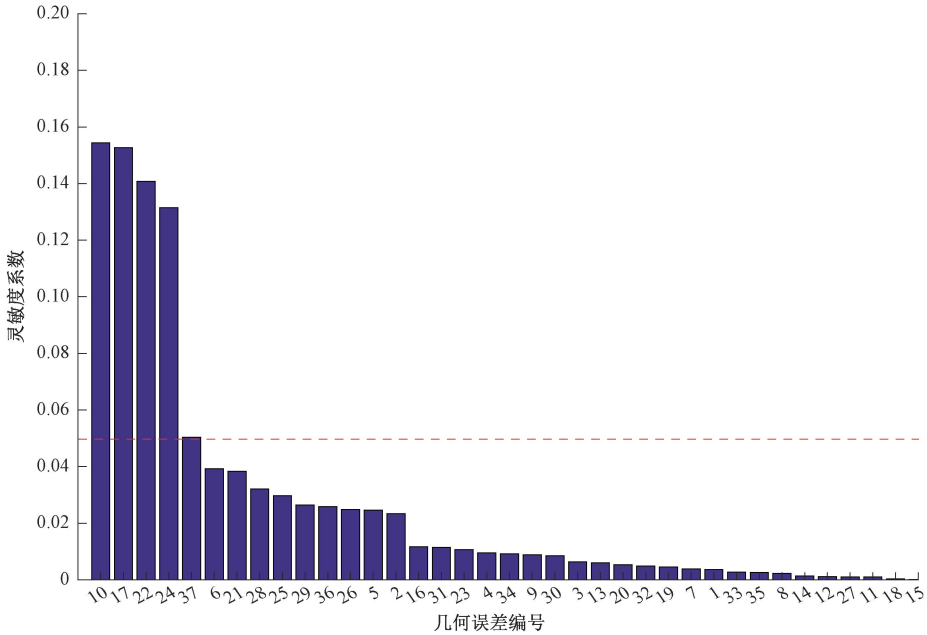


图 4　几何误差灵敏度系数排序

Fig. 4　The sensitivity ranking of geometric error

图 5　“S”形检测试件加工现场

Fig. 5　The machining scene of “S” shaped test piece

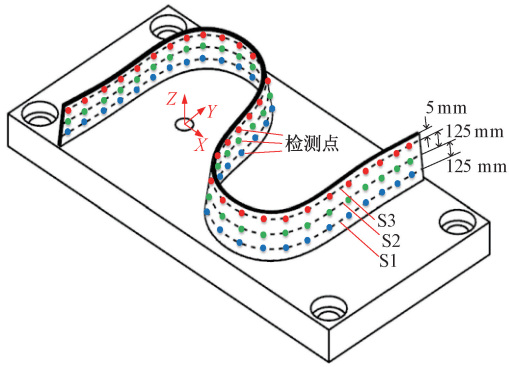


图 6　“S”形检测试件误差检测点位置

Fig. 6　The error detection points position of the “S” shaped test piece

度方向取 3 条检测线,即 S1、S2、S3,在缘条高度方向上,S3 距离 S 形缘条顶部 5 mm,S2 和 S3、S1 和 S2 的间距均为 12. 5 mm。在 3 条检测线上分别等距选择 25 个检测点,共计 75 个检测点的分布情况如图 6 所示。

“S”形检测试件的轮廓度误差测量实验在 PRISMO navigator 三坐标测量机上展开,如图 7 所示为测量现场。此外为了提高测量结果的稳定性,先后进行 5 次测量,最终的误差值取 5 次测量结果的平均值。

测量结果如图 8 所示,为了更加直观地反映所提出的关键几何误差辨识方法的有效性,对比了基于两种补偿策略获得的“S”形检测试件的平均轮廓度误差,如表 2 所示。由表 2 可以看出在 S1、S2 和 S3 上的平均轮廓度误差分别从 0. 041 mm 减小到 0. 036 mm,从 0. 036 mm 减

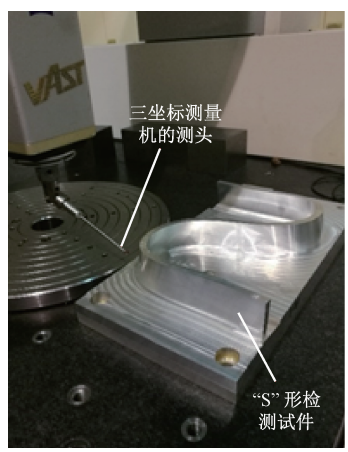
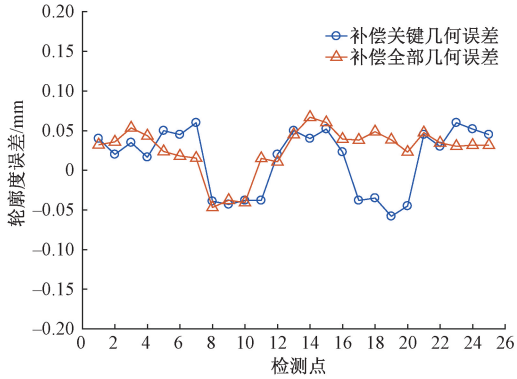
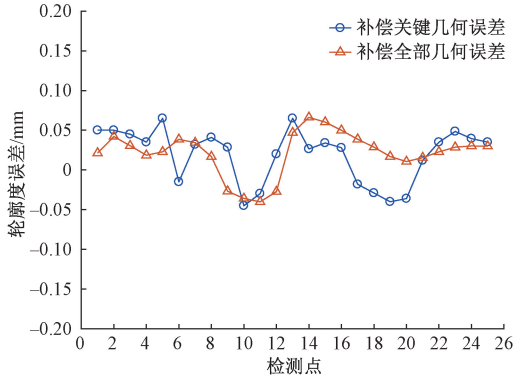


图 7　“S”形检测试件测量现场

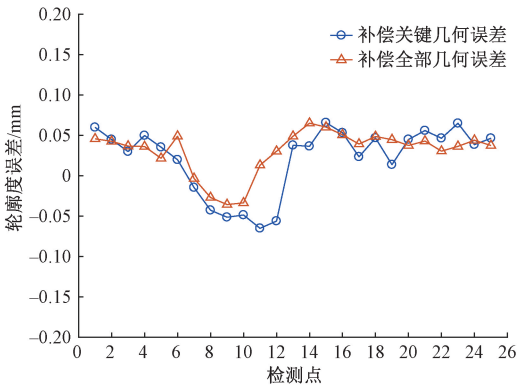
Fig. 7　The detecting scene of the “S” shaped test piece



(a) 在检测线S1处
(a) At detection line S1



(b) 在检测线S2处
(b) At detection line S2



(c) 在检测线S3处
(c) At detection line S3

图 8 基于不同补偿策略的“S”形试件轮廓度误差

Fig. 8 The form errors of the “S” shaped test piece based on different compensation strategies

小到 0.032 mm,从 0.044 mm 减小到 0.038 mm,即基于补偿策略 2 获得的“S”形检测试件的平均轮廓度误差在 S1、S2 和 S3 上分别降低了 0.005、0.004 和 0.006 mm,对比结果说明了通过补偿辨识出的关键几何误差和所有几何误差最终得到的轮廓度误差相差不大。因此,本文提出的关键几何误差辨识方法可以有效地辨识出机床关键几何误差并为各项几何误差合理分配权重,从而可以正确地指导五轴数控机床精度优化设计。

表 2 “S”形检测试件平均轮廓度误差对比

Table 2 The comparison of average form errors for the “S” shaped test piece mm

检测线	平均轮廓度误差		降低的轮廓度误差
	补偿策略 1	补偿策略 2	
S1	0.041	0.036	0.005
S2	0.036	0.032	0.004
S3	0.044	0.038	0.006

5 结 论

基于多体系统理论建立了数控机床加工误差预测模型,并基于该模型构建了几何误差灵敏度分析模型,同时定义了一种简单且能真实反映各项几何误差对机床加工误差影响程度的灵敏度指标,即各项几何误差单独作用时引起的加工误差的峰值作为灵敏度指标。通过仿真分析得到了各项几何误差单独作用时引起的加工误差的变化规律,求出了各项几何误差对整机加工误差的灵敏度系数,明确了第 10、17、22、24 和 37 项几何误差为该机床的关键几何误差,实现了对各项几何误差分配权重,从而可以正确地指导机床精度优化设计。为了验证所提出的灵敏度分析方法的正确性,选择“S”形检测试件作为研究对象,通过补偿所辨识的关键几何误差和全部几何误差的方式对“S”形检测试件进行加工并对比其轮廓度误差,对比结果显示两者之间的差值很小,因此,证明了本文提出的灵敏度分析方法的正确性。

参考文献

[1] CUI G W, LU Y, LI J G, et al. Geometric error compensation software system for CNC machine tools based on NC program reconstructing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(1-4): 169-180.

[2] CHENG K M, TSAI J C. Optimal statistical tolerance allocation for reciprocal exponential cost-tolerance function [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(5): 650-656.

[3] CHENG Q, ZHANG Z L, ZHANG G J, 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.

[4] SARINA, ZHANG SH Y, XU J H. Transmission system accuracy optimum allocation for multi axis machine tools' scheme design [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2013, 227(12): 2762-2779.

[5] 吴石,樊正东,刘献礼, 等. 考虑热误差的双转台机床工艺误差谱预测方法[J]. 仪器仪表学报,2021, 42(5):66-78.
WU SH, FAN ZH D, LIU X L, et al. A prediction method of process error spectrum for double turntable machine tool considering thermal error [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 66-78.

[6] 魏新园, 钱牧云, 冯旭刚, 等. 基于偏最小二乘的数控机床热误差稳健建模算法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 34-41.
WEI X Y, QIAN M Y, FENG X G, et al. Robust modeling method for thermal error of CNC machine tools based on partial least squares algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 34-41.

[7] 刘冰, 陈诚, 王勇, 等. 某型复合加工机床床身动态特性分析与结构优化 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(3): 72-77.
LIU B, CHEN CH, WANG Y, et al. Dynamic characteristic analysis and structure optimization of compound machine tool bed [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(3): 72-77.

[8] 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(4): 92-100.
CHENG Q, LIU G B, LIU ZH F, et al. An identification approach for key geometric error sources of machine tool based on sensitivity analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 92-100.

[9] CHEN G D, LIANG Y CH, SUN Y ZH, 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(9-12): 2525-2534.

[10] CHENG Q, FENG Q N, LIU ZH F, 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(9-12): 2301-2318.

[11] YAO H H, LI Z Q, ZHAO X S, et al. Modeling of kinematics errors and alignment method of a swing arm ultra-precision diamond turning machine [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1): 165-176.

[12] LUO X, XIE F G, LIU X J, et al. Error modeling and sensitivity analysis of a novel 5-degree-of-freedom parallel kinematic machine tool [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2018, 233(2): 1637-1652.

[13] GUO H CH, YANG X J, WANG SH L, et al. Research on the application of multiplication dimension reduction method in global sensitivity analysis of CNC machine tools [J]. AIP Advances, 2020, 10(1): 1-5.

[14] 夏长久, 王时龙, 孙守利, 等. 五轴数控成形磨齿机几何误差—齿面误差模型及关键误差识别 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26 (5): 1191-1201.
XIA CH J, WANG SH L, SUN SH L, et al. Geometric error to tooth surface error model and identification of crucial errors in five-axis CNC gear profile grinding machines [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26 (5): 1191-1201.

[15] WU CH J, WANG Q H, FAN J W, et al. A novel prediction method of machining accuracy for machine tools based on tolerance [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(3): 629-653.

[16] WU CH J, FAN J W, WANG Q H, et al. Machining accuracy improvement of non-orthogonal five-axis machine tools by a new iterative compensation methodology based on the relative motion constraint equation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 124: 80-98.

[17] SONG ZH Y, CUI Y W. S-shape detection test piece and

a detection method for detection the precision of the numerical control milling machine: US8061052B2 [P]. United States, Invention Patent, 2011. 11. 22.

作者简介

陶浩浩,2015 年于安徽科技学院获得学士学位,2021 年于北京工业大学获得博士学位,现为安徽科技学院讲师,主要研究方向为数控机床全数字化精度优化设计、精密及超精密加工。

E-mail: Taohao_hao@ 163. com

Tao Haohao received his B. Sc. degree from Anhui Science and Technology University in 2015, and received his Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2021. He is currently a lecturer at Anhui Science and Technology University. His main research interests include full digital precision optimization design of NC machine tools, precision and ultra-precision NC machining.

李同杰(通信作者),分别在 2004 年和 2007 年于兰州交通大学获得学士和硕士学位,2014 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为安徽科技学院教授、硕士生导师,主要研究方向为数控机床精度提升,齿轮传动动力学优化设计。

E-mail: litongjie2000@ 163. com

Li Tongjie (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Lanzhou Jiaotong University in 2004 and 2007, and received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2014. He is currently a professor at Anhui Science and Technology University. His main research interests include precision improvement of NC machine tools, and dynamic optimization design of gear transmission.

范晋伟,1987 年于太原工业学院获得学士学位,分别在 1993 年和 1996 年于天津大学获得硕士和博士学位,现为北京工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为数控机床精密及超精密加工,自动化装备。

E-mail: jwfan@ bjut. edu. cn

Fan Jinwei received his B. Sc. degree from Taiyuan Institute of Technology in 1987, and received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 1993 and 1996, respectively. He is currently a professor at Beijing University of Technology. His main research interest is precision and ultra-precision machining of NC machine tools, and automation equipment.