

# 精密机床紧固结合面误差建模 及其精度变动特性研究\*

孙椰望<sup>1,2</sup>, 杨秋娟<sup>3</sup>, 曹也<sup>1</sup>, 刘玉柱<sup>1</sup>, 宋于鹏<sup>1</sup>, 马西超<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学, 北京 100081;

2. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190;

3. 北京北特圣迪科技发展有限公司, 北京 100029)

**[摘要]** 为深入研究精密机床结合部对机床精度稳定性的影响特性, 针对精密立式加工中心的立柱紧固结合面固有加工误差特征, 进行紧固结合面特征误差点采样, 并采用 NURBS 数学模型方法进行曲面建模, 构建包含几何面特征误差的 3D 装配模型。基于结合面特征误差模型, 设置 500~8500N 渐变载荷的边界约束条件, 分析研究包含特征误差的非均匀接触结合面的应力场非均匀变动特性, 获取了具有几何误差特征的结合面形变与预紧力变动关系。该变动关系体现为大斜率线性变化阶段—曲线变化阶段—小斜率线性变化阶段的 3 阶段特性, 揭示了这一变动特性根源于结合面特征误差高点非均匀接触的形变非线性变动的机理, 验证了结合面特征误差对机床微米级精度运动系统稳定性的显著影响。

**关键词:** 精密机床; 结合面; 特征误差建模; 非均匀变动; 非线性

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.05.028



孙椰望

博士, 高级工程师, 研究方向为精密智能制造技术。

随着精密加工技术要求的日益增强, 精密机床近年来得到了快速发展。影响机械系统精度的主要因素包括加工过程中形成的零件尺寸误差、形位误差等加工误差, 装配过程中由于装配方法、定位对准方法、装配结合力、重力挠性力矩等引起装配零部件位置、尺寸及形状变化而形成的装配误差等<sup>[1-3]</sup>。但是, 精密机械系统精度的准确性和稳定性的分析预测与传统机械精度设备不同, 特别是微米级精度变动量已经与加工部件的几何公差相近, 甚至装备的系统精度指标已经高于传统机械加工部件的几何误差

量<sup>[4-7]</sup>。因此, 关键部件结合部几何误差特征的实体建模已经成为精度预测和评价的关键共性技术。特别是传统的接触部位特征近似等效建模很难真实反映精密部件的非均匀误差分布和非线性形位变动的真实特性<sup>[8-10]</sup>。

为反映真实的误差特征, 针对精密立式加工中心, 提出基于误差点采样、NURBS 拟合和 CAD 曲面建模耦合的曲面几何误差特征建模方法, 建立机床关键部件的结合面误差特征模型, 深入分析几何面误差特征对机床精度变动的影响。

\* 基金项目: 国家自然科学基金(518050535); 山东省重点研发计划(2017CXGC0801); 中国博士后科学基金项目(2017M620634); 装发预研(41423020201); 国防 973(3030020321403); “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2012ZX04010-061)。

## 结合面特征误差建模机理

精密机械系统的零部件由于加工精度的原因必然存在结构几何特征误差。因此,如何高效地实现精密机械系统的精度评价必须基于误差特征的可靠建模方法,特别是基于原始特征误差的直接离散化误差点建模必将会更加有效地评价固有误差特征机械系统的真实精度变动特性。精密机械系统的结合面特征误差建模方法机理的合理性、准确性和可行性成为精密机械系统精度稳定性研究的重点。

机床部件关键结合面主要体现在运动副部件的误差特征和紧固部件结合面加工误差特征,如图1所示(HV为运动副部件结合面的误差量;

He为紧固部件结合面的误差量)。这些误差一般是微米级尺度,但是对于精密机械系统的精度影响不能忽视,特别对机械系统的精度稳定性影响突出,结合面误差特征已经成为高精度机床精度稳定性的关键共性技术问题<sup>[1,6,8]</sup>。

目前,曲面建模研究主要采用非均匀有理B样条(Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS)数学模型对结合面误差特征进行精确表达,该模型能够为标准解析曲面与空间自由曲面的精确表达提供统一的数学模型。NURBS曲面数学模型,理论上只要使用足够多的曲面节点就能够精确地描述任何空间复杂曲面,广泛应用于CAD/CAM/CAE领域曲面建模研究中<sup>[8]</sup>。另外,

NURBS曲面具有精确的数学表达式,理论上能够精确地描述任何空间复杂曲面。

## 立柱结合面的误差建模

以精密立式加工中心为对象,重点以立柱与底座紧固结合部为对象,研究悬臂式结构机床系列的结合部误差特征对精度的影响。图2为立柱与底座结合面结合区特征,立柱底座结合面的刮研精度是25mm×25mm。利用常用的三坐标测量仪测量单位刮研面积的特征点,并结合测量数据利用MATLAB建立结合面误差特征数据散点分布图,如图3所示。

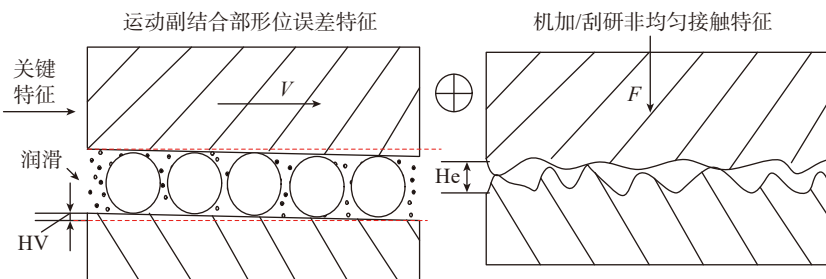


图1 机床关键结合面几何误差特征

Fig.1 Geometric error features of machine tools

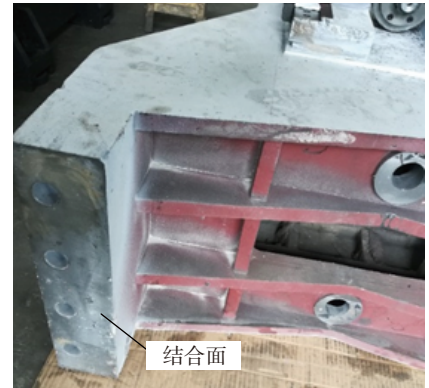


图2 立式加工中心立柱结合面特征

Fig.2 Contact geometric feature of CNC vertical machine tool

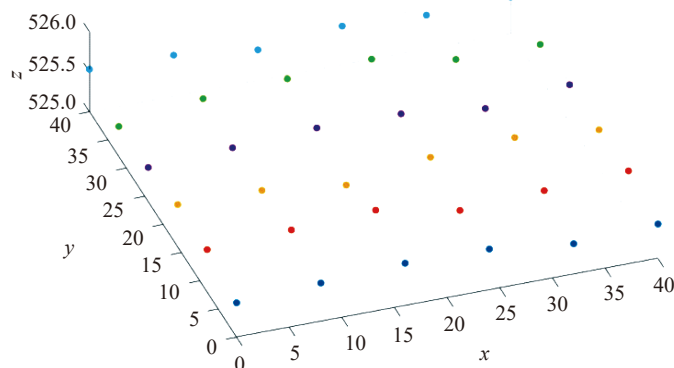


图3 结合面误差特征散点图

Fig.3 Feature photo of geometric points

基于图 3,通过 NURBS 曲面建模方法进行曲面拟合建模,并将拟合曲面导入 CAD 软件,采用曲面实体耦合方式,实现 3D 几何面误差特征的实体建模,如图 4~7 所示。

基于图 6,建立图 7 所示的机床特征误差有限元模型,分析结果如图 8 所示。

### 结合面非均匀应力场特性分析

基于图 7 的 FEM 模型,设置结合面非均匀应力场分析模型的边界参数(图 8),包含 FEM 模型的底面固定约束、系统的重力加载和结合面约束预紧力,结合面非均匀应力场变动特性分析结果见图 9。

#### 1 非均匀应力场分析

图 9 的分析结果表明,悬臂立柱主轴的机床结构必然会造成结合部区域的应力集中,特别是结合部误差特征的应力集中现象更加突出。另外,螺栓紧固区存在应力分布不均匀的现象,立柱的结合部位移量在 0.015mm 左右。因此,结合部误差特征对于微米级精度的技术要求具有重要的影响。

#### 2 结合面非均匀接触的精度非线性变动特性

为进一步分析结合部的非均匀变动特性,进行图 8 所示包含误差特征和预紧力约束变化(500~8500N)的结构应力非均匀变动特性分析,分析结果如图 10 所示,可见结合面区域呈现非均匀变动特性,并且形变在微米级。

另外,图 10 表明,具有几何误差特征的结合面形变与预紧力关系分为 3 个阶段的变动特性。

(1)第 1 阶段和第 3 阶段为线性变化阶段,并且第 1 阶段的斜率比第 3 阶段的斜率大,表明初始增加预紧力阶段的误差高点主要承载了预紧力的作用,呈现显著的线性变化特性。但是第 3 阶段的线性斜

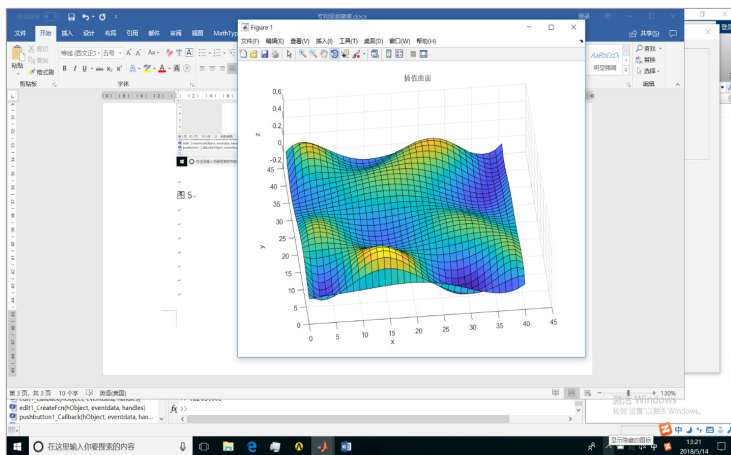


图4 NURBS几何误差曲面建模

Fig.4 Geometric error model based on NURBS method

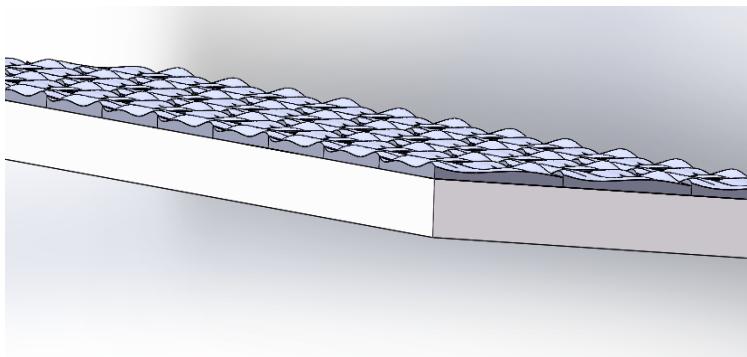


图5 几何误差曲面CAD建模

Fig.5 CAD model with geometric error

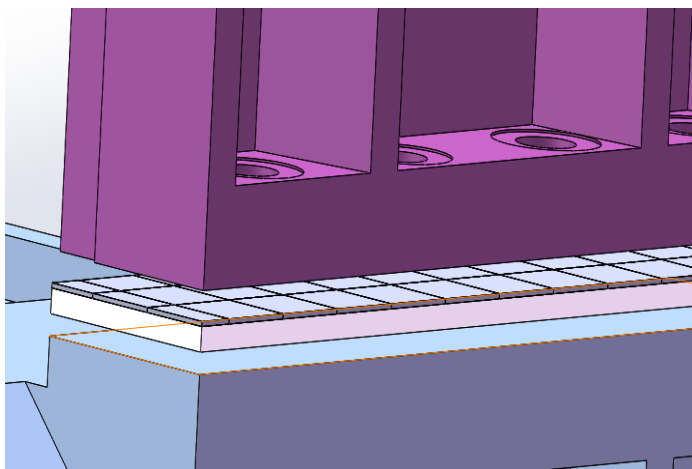


图6 立柱与底座的几何误差特征装配

Fig.6 Assembly model with geometric error

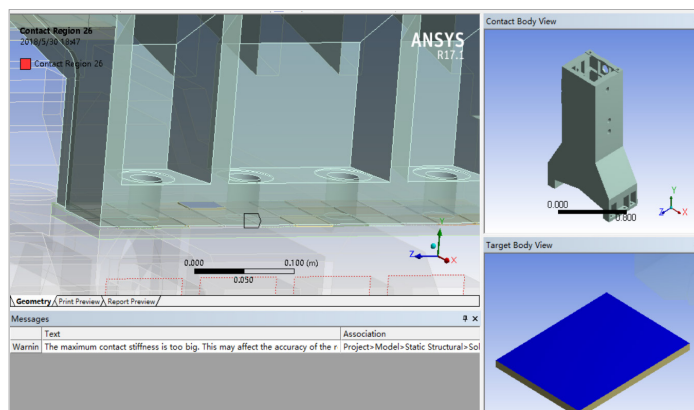


图7 机床结合面几何误差有限元模型  
Fig.7 FEM model with geometric error

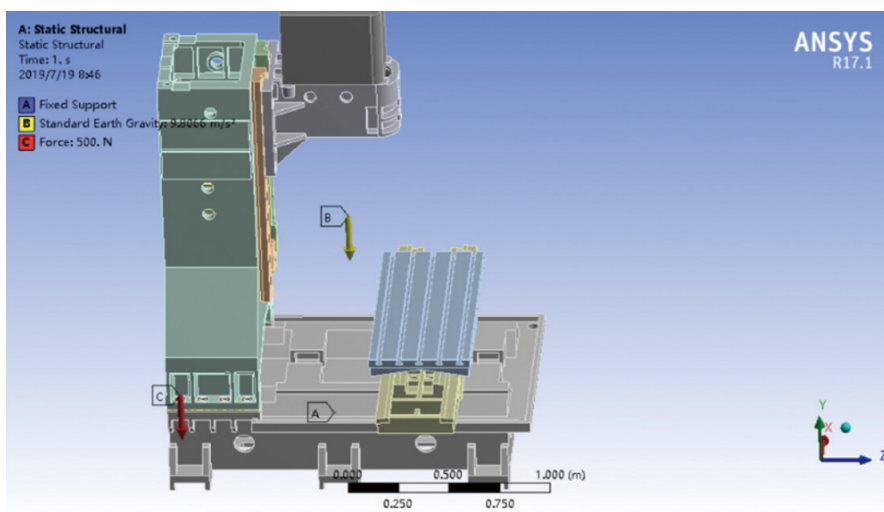
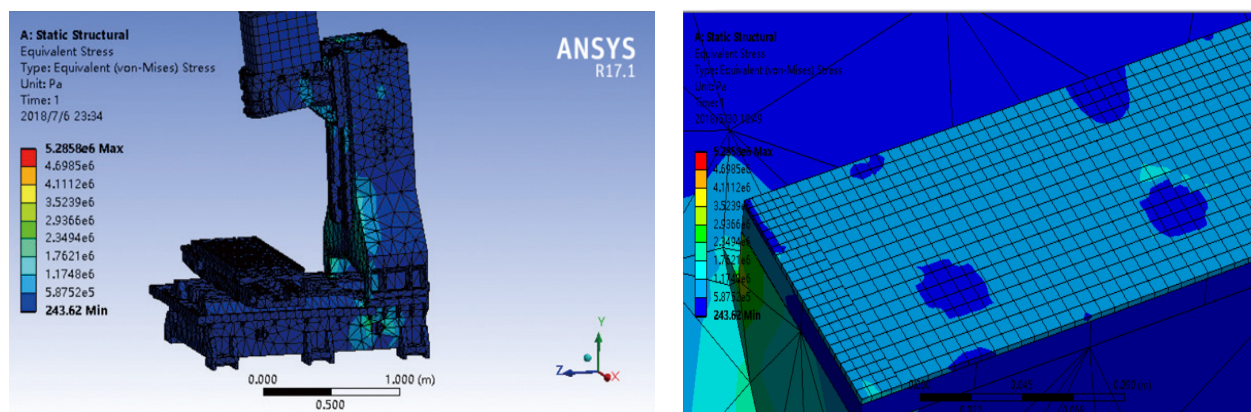


图8 立柱底座非均匀结合面预紧模型  
Fig.8 Non-uniform contact preload constraint model



(a) 结构应力分析

(b) 结合面应力分布特性

图9 机床结合面几何误差特征有限元分析  
Fig.9 FEM analysis of contact surface error model

率显著降低,说明误差高点与结合面共同承载预紧力,形变呈现整体线性变动特性。

(2)第2阶段属于高点显著线性变化之后的曲线变动特性,结合面承载区已经扩展到非均匀接触的大面积区,但是非均匀接触高点区仍起到主要承载的作用,随着预紧力的增加,高点接触区形变量逐渐与结合面其他区域具备同一平面度,从而实现了第3阶段的整体结合面形变的线性变动特性。

(3)具有几何误差特征的非均匀接触部件的预紧力与精度稳定性密切相关,主要体现为结合面的形变非线性变动特性,特别是微米级精度运动系统需要优化结合面的几何误差特性和预紧力约束工艺,从而更好地控制结合面的均匀变动。

### 结合面优化与系统精度校验

机床立柱底座结合面非均匀形变直接影响到机床立柱装配的垂直运动直线度和平面度,并导致立柱垂直定位精度的降低及非均匀变化。因此,针对机床立柱结合面进行机床结构优化,分析立柱垂直方向的精度变化,结果如图11~13所示。全面接触难以实现大面积均匀接触的良好性能,因此进行结合部的局部接触优化设计,如图11所示;具体采用主要螺栓紧固区局部接触,实现螺栓紧固三区段的平面优化接触。

针对图11的模型进行分析,结果如图12所示。结果表明,采用连接螺栓区的非连续局部区域接触紧固,形变的数值将达到0.002mm左右,显著提升立柱结合面及其装配系统的结构精度,从而实现结合部特征误差对精度补偿的优化设计。

为进一步验证分析结果和优化方案的正确性,根据图8所示的螺栓紧固区结合面非均匀变动特性,

利用图11的模型进行机床结合部非连续接触结构优化制造和试验验证,结果如图13所示。

图13表明,立式加工中心基于结合面几何误差精度补偿优化的技术方案,能够获取显著的精度提高,竖直方向运动的双向定位精度从0.022mm改善到0.003mm,达到精密级加工中心的水平,其精度数值能够满足提升精度等级的要求。

### 结论

(1)采用NURBS曲面误差特征建模方法能够有效地表达机床关键部件机械加工表面的误差特征,

FEM计算与试验分析表明装配结合部螺栓连接区的刮研精度更容易获取误差模型的均匀接触,有利于结合面部件精度的提高。

(2)结合部的几何误差特征精度补偿量一般处于微米级,对于精度等级要求较高的机床类型,需要根据技术要求适当优化结构结合部的设计制造方案。

(3)具有几何误差特征的结合面形变与预紧力关系总体分为3个阶段的变动特性:大斜率线性变化阶段-曲线变化阶段-小斜率线性变化阶段,特性根源于特征误差的变动过程和结合面的整体承载线性变

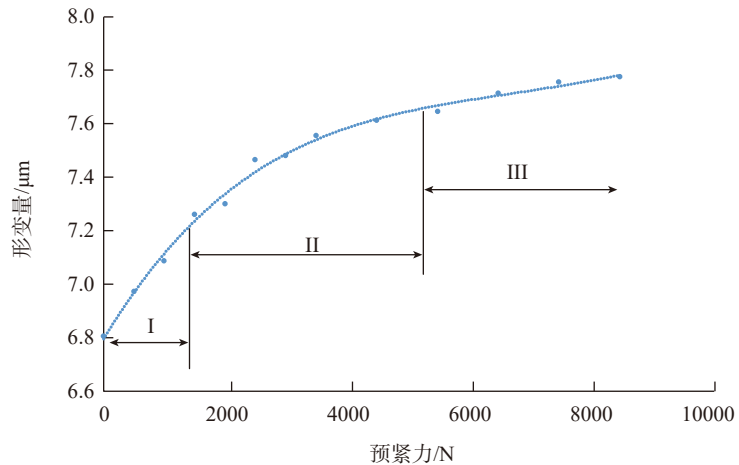


图10 非均匀结合面的变动特性

Fig.10 Change characteristic of non-uniform contact surface

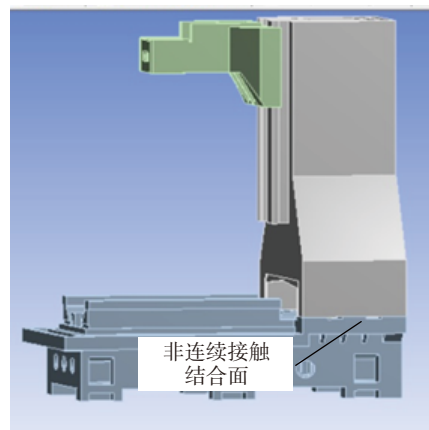
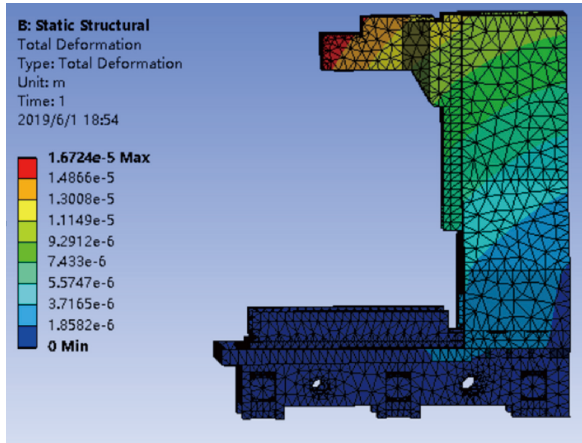
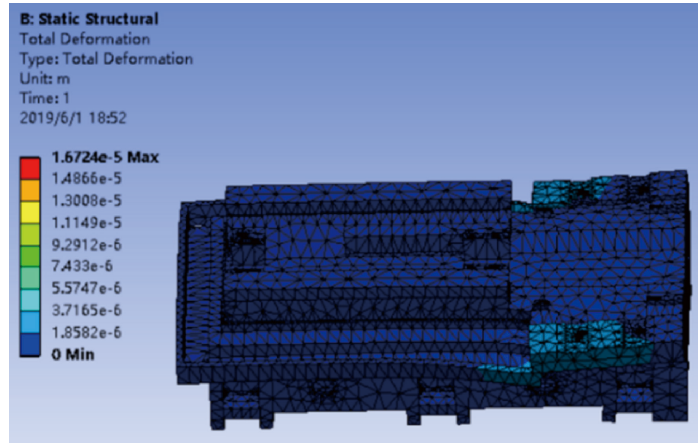


图11 立柱与底座结合面的非连续局部接触优化设计

Fig.11 Optimization model of partial contact surface



(a) 整体形变分析



(b) 结合面形变分析

图12 结合面的非连续局部接触分析  
Fig.12 FEM analysis of the optimized surface model



(a) 优化制造局部接触面结构

开始位置: [0.0,0] 终点位置: [0.0,550]  
总行程 = 550. 点数 = 12 测量次数 = 3  
压力: 741.29 湿度: 50.00 空气温度: 31.11 材料温度: 30.37 材料热膨胀 = .999875

位置, mm	平均值, mm	2_SIGMA, mm
0.0	0.002	0.004
50.0	-0.005	0.004
100.0	-0.008	0.004
150.0	-0.010	0.005
200.0	-0.014	0.005
250.0	-0.015	0.005
300.0	-0.016	0.004
350.0	-0.014	0.005
400.0	-0.008	0.005
450.0	-0.009	0.005
500.0	-0.006	0.005
550.0	-0.009	0.005
550.0	-0.007	0.005
500.0	-0.004	0.004
450.0	-0.007	0.004
400.0	-0.005	0.004
350.0	-0.013	0.004
300.0	-0.013	0.004
250.0	-0.013	0.004
200.0	-0.012	0.004
150.0	-0.007	0.005
100.0	-0.005	0.005
50.0	-0.001	0.005
0.0	0.006	0.004

反角值 B=-0.004 (在点=1)  
平均反角值 <B>=-0.003  
范围平均双向位置偏差, M=0.019  
定位系统偏差 E=  
0.018 [ 0.002, -0.016] (顺向),  
0.019 [ 0.006, -0.013] (反向),  
0.022 [ 0.006, -0.016] (双向).  
定位重复性 R=  
0.011 (在点=3) (顺向),  
0.010 (在点=1) (反向),  
0.014 (在点=1) (双向).  
准确度 A=  
0.025 [ 0.005, -0.020] (顺向),  
0.027 [ 0.010, -0.017] (反向),  
0.030 [ 0.010, -0.020] (双向).

(b) 优化前测量结果

开始位置: [0.0,0] 终点位置: [0.0,550]  
总行程 = 550. 点数 = 12 测量次数 = 3  
压力: 751.95 湿度: 50.00 空气温度: 24.73 材料温度: 24.46 材料热膨胀 = .999946

位置, mm	平均值, mm	2_SIGMA, mm
0.0	-0.001	0.001
50.0	0.000	0.001
100.0	0.000	0.001
150.0	0.000	0.001
200.0	0.000	0.000
250.0	0.000	0.000
300.0	-0.001	0.000
350.0	0.000	0.000
400.0	0.000	0.000
450.0	0.000	0.000
500.0	0.000	0.001
550.0	0.000	0.001
550.0	0.001	0.001
500.0	0.000	0.001
450.0	0.000	0.000
400.0	0.000	0.001
350.0	0.000	0.000
300.0	-0.001	0.001
250.0	-0.001	0.000
200.0	-0.001	0.000
150.0	-0.001	0.001
100.0	-0.001	0.001
50.0	-0.001	0.000
0.0	-0.001	0.000

反角值 B=-0.002 (在点=11)  
平均反角值 <B>= 0.000  
范围平均双向位置偏差, M=0.001  
定位系统偏差 E=  
0.001 [ 0.000, -0.001] (顺向),  
0.003 [ 0.001, -0.001] (反向),  
0.003 [ 0.001, -0.001] (双向).  
定位重复性 R=  
0.002 (在点=0) (顺向),  
0.002 (在点=6) (反向),  
0.003 (在点=11) (双向).  
准确度 A=  
0.003 [ 0.001, -0.002] (顺向),  
0.004 [ 0.002, -0.002] (反向),  
0.004 [ 0.002, -0.002] (双向).

(c) 优化后测量结果

图13 立柱竖直方向的直线运动精度比较  
Fig.13 Vertical linear motion precision test data of different columns

动。

(4) 具有几何误差特征的非均匀接触部件预紧力与精度稳定性密切相关,特别是微米级精度运动系统需要优化结合面的结构特性。

### 参考文献

[1] CHENG K, SHORE P. Special issue on design of ultraprecision and micro machine tools and their key enabling technologies[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(4): 309-310.

[2] BRECHER C, UTSCH P, KLAR R, et al. Compact design for high precision machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(4): 328-334.

[3] 张之敬, 金鑫. 精密微小型车铣复合加工技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

ZHANG Zhijing, JIN Xin. Precision

compound machine tool[M]. Beijing: National Defense Press, 2014.

[4] LIANG Y C, SU H, LU L H, et al. Thermal optimization of an ultra-precision machine tool by thermal displacement decomposition and counteraction method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76: 635-645.

[5] FU M W, WANG J L, KORSUNSKY A M. A review of geometrical and microstructural size effects in micro-scale deformation processing of metallic alloy components[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2016, 109: 94-125.

[6] ARCHENTI A, NICOLESCU M. A top-down equivalent stiffness approach for prediction of deviation sources in machine tool joints[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 487-490.

[7] RAHMANI M, BLEICHER F. Experimental and numerical studies of the

influence of geometric deviations in the performance of machine tools linear guides[J]. Procedia CIRP, 2016, 41: 818-823.

[8] ZHANG Z Q, ZHANG Z J, JIN X, et al. A novel modelling method of geometric errors for precision assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(4): 1139-1160.

[9] LIU H, MIAO E M, ZHUANG X D, et al. Thermal error robust modeling method for CNC machine tools based on a split unbiased estimation algorithm[J]. Precision Engineering, 2017, 51(8): 169-175.

[10] LI Y, ZHAO W H, LAN S H, et al. A review on spindle thermal error compensation in machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 95: 20-38.

通讯作者: 孙椰望, E-mail: sun\_yewang@163.com.

## Study on Precision Stability of Precision Machine Tool Based on Joint Surface Error Model

SUN Yewang<sup>1,2</sup>, YANG Qiujuan<sup>3</sup>, CAO Ye<sup>1</sup>, LIU Yuzhu<sup>1</sup>, SONG Yupeng<sup>1</sup>, MA Xichao<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Beijing Bete Shengdi Science & Technology Development Co., Ltd., Beijing 100029, China)

**[ABSTRACT]** In order to study the influence of the joint part on precision stability of a machine tool, according to the characteristics of the column fastening joint surface of the precise vertical machine tool, the fastening joint surface feature with original error is measured. Then, the NURBS mathematical method is used to model the curve surface, and the 3D assembly model including the geometric surface feature error is created. Based on the joint characteristic error model, the boundary constraint load conditions from 500N to 8500N with gradual change is set. Based on the analysis of the non-uniform variation characteristics of stress field of non-uniform contact joint with characteristic error, the results show that there is a three-stage variation law in the joint region. It includes a large slope linear change stage, a curve change stage, and a small slope linear change stage. In particular, this variation characteristic is rooted in the nonlinear variation characteristic of the non-uniform contact of the high points, and it is verified that the geometric feature error of the geometric surface has a significant influence on the accuracy stability of the micron precision motion system.

**Keywords:** Precision machine tool; Joint surface; Geometric error modeling; Non-uniform variation; Nonlinear

(责编 思齐)