DOI:10.11918/201907147

研磨机床几何误差对金刚石刀面粗糙度的影响

龚维纬^{1,2}.王 伟¹. 雷大江². 关利超². 崔海龙²

(1.电子科技大学 机械与电气工程学院,成都 611731;2.中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所,四川 绵阳 621000)

摘 要:为探究研磨机床几何误差对金刚石刀具后刀面粗糙度的影响规律,建立研磨机床精度与刀具后刀面表面轮廓的数学 模型. 借助多体系统理论对研磨机床的误差传递进行建模:基于样条滤波算法建立机床误差与刀具后刀面粗糙度之间的定量 关系:分析主轴、摆轴的端面和径向跳动误差以及往复轴的直线度误差对刀具后刀面粗糙度的影响规律.结果表明:主轴、摆 轴和往复轴几何运动误差对刀具后刀面粗糙度的影响占比分别为 98.18%、1.59%和 0.23%;主轴的端面和径向跳动误差是影 响后刀面粗糙度的主要因素,研究结果为研磨机床的设计制造与金刚石刀具研磨工艺的优化提供理论指导. 关键词:研磨机床;几何误差;金刚石刀具;超精密加工;粗糙度

中图分类号: TG729

文章编号: 0367-6234(2020)07-0029-06 文献标志码:A

Effects of lapping machine geometric errors on surface roughness of diamond cutting tools

GONG Weiwei^{1,2}, WANG Wei¹, LEI Dajiang², GUAN Lichao², CUI Hailong²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: To investigate the effect of lapping machine geometric errors on flank face roughness of diamond cutting tools, a mathematic model of lapping machine geometric errors and surface profile of tool flank face is built. The error propagation of lapping machine is modeled based on the theory of multi-body system. And a quantified relationship between machine errors and roughness is established using the algorithm of spline filter. The influence principle of end face and radial errors of spindle and sway, and the straightness error of reciprocates on roughness are analyzed. The result shows that the influence proportion of spindle, sway and reciprocating geometric moving errors on roughness are 98.18%, 1.59% and 0.23% respectively, hence roughness of flank face is mainly affected by spindle end face and radial errors which offers a guidance to the design and manufacturing of lapping machine and optimization of lapping technics for diamond cutting tools.

Keywords: lapping machine; geometric error; diamond cutting tool; ultra-precision machining; roughness

金刚石刀具在超精密加工领域具有重要应用. 金刚石刀具的微观几何形貌误差是影响加工质量的 关键因素之一[1-2]. 目前,亟需高精度的金刚石刀具 制造设备与技术. 机械研磨法因具有较高精度、高 研磨效率和低成本等优点,是目前主流的金刚石刀 具研磨方法. Zong 等^[3-4]对圆弧刃金刚石刀具的机 械研磨工艺做了大量研究,针对金刚石晶体的各项 异性,分析了不同参数下以不同晶面作为刀具前、后 刀面的研磨结果,给出了不同制造需求下的晶面选 用原则.同时,借助化学氧化法^[5]处理机械研磨后 的金刚石刀具,其表面粗糙度算术均值 R。可达 10 nm以下. Jirigalantu 等^[6]研究了一种用于金刚石

- 基金项目:国家自然科学基金 NSAF 基金(U1830110); 中央高校基本业务费(ZYGX2019J032) 作者简介: 龚维纬(1995—), 男, 硕士研究生; Ŧ 伟(1980—),男,博士生导师
- 通信作者: 王 伟, wangwhit@ 163.com

刀具的刚性研磨技术,可将 R。优化至 1.51 nm,但 是,上述研究多关注研磨工艺参数的选取,缺乏包含 研磨机床误差在内的综合研究.为研究机床误差对 研磨精度的影响,需建立机床误差模型.常用的机 床建模方法有误差矩阵法、二次关系法、变分法、机 构学法和刚体运动学法,以上建模方法过程比较复 杂,必须满足较严格的假设条件. 刘又午[7] 提出的 基于多体系统理论的数控机床建模方法,可将几何 误差和热误差统一在一个完整的模型中,该方法非 常适合研磨机床的精度建模分析.朱春来^[8]基于多 体系统理论建立了某金刚石车刀研磨机误差模型, 得到了11项对空间精度影响较大的误差源(如竖 直方向的刀具进给误差),但并未建立误差与刀具 粗糙度的定量关系. 总之,依靠研磨工艺优化的机 械研磨法较为成熟,但已进入精度提升的瓶颈期;因 此,本文从多体系统理论入手研究研磨机床几何误 差对金刚石刀具后刀面粗糙度(简称"粗糙度")的

收稿日期: 2019-07-18

影响规律.

1 研磨机床模型

多体系统理论已被广泛应用于多轴数控机床、 机器人和多关节机械臂等的建模^[9-11].研磨机床结 构及运动示意图见图1.其各体之间为刚性连接,每 个刚体的运动学坐标关系都可以用一个4×4的矩 阵表示^[12-13].



0-床身;1-恒压力轴;2-刀具摆轴;3-刀架;4-刀具;5-往复轴; 6-俯仰轴;7-主轴;8-研磨盘





图1 研磨机床结构及运动

Fig.1 Structure and movement of lapping machine

运动学原理表明,一个物体在空间共有6个自 由度(3个平移自由度和3个旋转自由度)^[14].

当物体 A 从空间一点移动 x, y 和 z 的距离且旋转 α, β 和 γ 的角度到另一点时,该运动变换矩阵为

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{x}} \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{\gamma}} \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{z}} \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{\alpha}} \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{\beta}} \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{\gamma}}.$$
 (1)

其中,

$$\boldsymbol{T}_{x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{T}_{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{T}_{z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$
$$\boldsymbol{T}_{\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{T}_{\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{T}_{\gamma} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

实际上, 空间运动物体在 6 个自由度方向都会 有误差. 以沿 X 轴平动为例,其存在定位误差为 Δx , 直线度误差为 $\Delta y \ \Delta z$,滚转角误差为 $\Delta \alpha$,偏摆角误 差为 $\Delta \beta \ \Delta \gamma$,将各项误差代入式(1) 可得运动误差 矩阵. 由于角度误差较小,故可认为

 $\cos \Delta \alpha = \cos \Delta \beta = \cos \Delta \gamma = 1,$

in
$$\Delta \alpha = \Delta \alpha$$
, sin $\Delta \beta = \Delta \beta$, sin $\Delta \gamma = \Delta \gamma$

略去各项二阶误差及以上的高阶小量,可得简 化的运动误差矩阵为

$$\Delta T = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma & \Delta\beta & \Delta x \\ \Delta\gamma & 1 & -\Delta\alpha & \Delta y \\ -\Delta\beta & \Delta\alpha & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. (2)$$

以 p,s 分别代表静止和运动. 静止时,研磨机床的 恒压力轴与床身之间有一初始位置差距,在 X、Y、Z 向 的分量为 x_{01p}、y_{01p}、z_{01p}. 假设两者之间无其他静止误差, 则静止坐标变换矩阵与静止误差变换矩阵分别为

$$\boldsymbol{T}_{01p} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{01p} \\ 0 & 1 & 0 & y_{01p} \\ 0 & 0 & 1 & z_{01p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \ \Delta \boldsymbol{T}_{01p} = \boldsymbol{I}_{4\times 4}.$$

运动时,恒压力轴相对于床身有 Z 向的移动 z_{01s} ,且存在 6 项运动误差: Δx_{01s} 、 Δy_{01s} 、 Δz_{01s} 、 $\Delta \alpha_{01s}$ 、 $\Delta \beta_{01s}$ 、 $\Delta \gamma_{01s}$,分别代入式(1)与式(2),可得运动变 换矩阵与运动误差变换矩阵分别为:

$$\begin{split} \boldsymbol{T}_{01s} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_{01s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{\Delta T}_{01s} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta \gamma_{01s} & \Delta \beta_{01s} & \Delta x_{01s} \\ \Delta \gamma_{01s} & 1 & -\Delta \alpha_{01s} & \Delta y_{01s} \\ -\Delta \beta_{01s} & \Delta \alpha_{01} & 1 & \Delta z_{01s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \\ \text{INDER INFERTION FOR THE SET OF THE$$

则床身与恒压力轴间的实际变换矩阵为

$$T_{01} = T_{01p} \Delta T_{01p} T_{01s} \Delta T_{01s}.$$

同理,可推得其他部件间的实际变换矩阵: T_{12} 、

$$T_{23}$$
, T_{34} , T_{05} , T_{56} , T_{67} , T_{75}

理想情况下,刀具与研磨盘间为线接触,该线段 在研磨盘坐标系下的矢量形式为

880

 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{w}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{\mathrm{w}} & \boldsymbol{y}_{\mathrm{w}} & \boldsymbol{z}_{\mathrm{w}} & \boldsymbol{1} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}.$

将矢量由研磨盘坐标系映射到刀具坐标下,可 得此刻的研磨曲面形貌(矢量线段)

$$\boldsymbol{S} = (\boldsymbol{T}_{01} \boldsymbol{T}_{12} \boldsymbol{T}_{23} \boldsymbol{T}_{34})^{-1} \boldsymbol{T}_{05} \boldsymbol{T}_{56} \boldsymbol{T}_{67} \boldsymbol{T}_{78} \boldsymbol{V}_{w}.$$
 (3)

2 仿真分析

朱春来^[8]指出旋转轴轴向窜动、径跳和导轨直线 度误差等是影响研磨精度主要因素,文献[15]认为刀 具摆轴的定位误差和颠转误差及主轴的定位误差和 颠转误差都会对研磨刀具的刀尖圆弧产生影响.研磨 盘固结于主轴且对刀具表面起均化作用,故暂不考虑 磨盘及磨粒的影响.对本文的卧式研磨机床,往复导 轨定位误差影响刀具与研磨盘在圆弧切线方向的接 触位置,在不考虑研磨盘及磨粒的情况下,导轨定位



误差对研磨精度影响可忽略不计.故本文忽略了几何 误差中的偏摆等角位移误差和导轨的定位误差,将旋 转轴轴向定位误差转化为端面跳动,将其水平和竖直 方向的直线度误差转化为径向跳动,研究主要运动部 件中高速主轴和摆轴的端跳、径跳误差以及往复轴直 线度误差对粗糙度的影响,如表1所示.

表1 主要运动部件误差

Tab.1	Errors	of	main	moving	parts

			0.	
部件	定位误差	直线度误差	端面跳动	径向跳动
主轴	Δz_{67}	Δx_{67} , Δy_{67}	Δz_{67}	$\sqrt{\Delta x_{67}^2 + \Delta y_{67}^2}$
摆轴	Δy_{12}	Δz_{12} , Δx_{12}	Δy_{12}	$\sqrt{\Delta z_{12}^2 + \Delta x_{12}^2}$
往复轴	Δx_{05}	$\Delta y_{05}, \Delta z_{05}$		

图 2(a)为使用反向法并分离标准球圆度误差 后测得的研磨机床 A 主轴和摆轴的端跳、径跳数 据:图 2(b)为往复导轨的直线度误差测试数据.



图 2 研磨机床几何误差



2.1 主轴端面和径向跳动误差对粗糙度的影响

主轴端面和径向跳动误差对粗糙度的影响见图 3.



Fig.3 Effects of spindle end face and radial errors on flank face roughness

取主轴转速 3 000 r/min (*T* = 20 ms),图 3(a) 为按主轴实测数据频率和峰谷值特征构建的幅值 50 nm的端面跳动和径向跳动误差.将误差代入式 (3)可得主轴误差影响下的刀具后刀面表面形貌, 如图 3(b)所示,其轮廓大致为圆柱面,减去公称形 状可得到刀具后刀面局部区域(取样点数 50×20)原 始轮廓误差.

如图 3(c)所示,针对高精度的金刚石刀具,按照相关文献及国家标准^[16-17],长波截止波长 λ_f 取 0.25~0.80 mm,短波截止波长 λ_e 则为 λ_f 的 1/10;本 文不涉及高频环境噪声,故 $\lambda_s = 0$.图 3(d)为使用 样条滤波算法,对靠近刀尖处圆弧(下同)滤波得到 的粗糙度轮廓中线(波纹度)和粗糙度轮廓误差(粗 糙度);在幅值 50 nm 的主轴端面和径向跳动误差 影响下,刀具后刀面粗糙度算术平均偏差值为 $R_a = 1.15$ nm.

2.2 摆轴端面和径向跳动误差对粗糙度的影响

按摆轴实测数据特征构建误差幅值 50 nm 的端 面跳动与径向跳动误差,代入式(3)并减去公称形 状后可得到由摆轴误差影响下的刀具后刀面局部轮 廓误差.图 4 为滤波后的粗糙度轮廓中线和粗糙 度;在幅值 50 nm 的摆轴端面和径向跳动误差影响 下,刀具后刀面 *R*_a = 0.001 14 nm.





Fig.4 Roughness influenced by sway end face and radial errors

2.3 往复轴直线度误差对粗糙度的影响

按往复轴实测数据特征构建直线度误差 100 nm/±40 mm 的随机直线度误差,将其分解到水 平(Z)和竖直(Y)方向可得往复轴的水平直线度 误差和垂直直线度误差,再代入式(3)可得到仅有 往复轴误差情况下的刀具后刀面轮廓.图5为使用 样条滤波算法得到的粗糙度轮廓中线和粗糙度轮廓 误差;在幅值100 nm 的往复轴直线度误差影响下, 刀具后刀面 $R_a = 0.001$ 71 nm.



图 5 往复轴直线度误差影响下的粗糙度



2.4 耦合误差对粗糙度的影响

为进一步探究各个轴的误差对粗糙度的影响程 度,下面分析耦合误差对刀具后刀面粗糙度的影响.

取主轴端面、径向跳动误差 50 nm,摆轴端面、 径向跳动误差 50 nm,往复轴直线度误差 100 nm.将 各个轴的误差代入式(3)得到耦合误差影响下的刀 具后刀面轮廓,减去公称形状后得原始轮廓误差,再 滤波得到粗糙度轮廓中线和粗糙度,如图 6 所示;耦 合误差影响下的刀具后刀面 R_a = 1.93 nm.



图 6 耦合误差影响下的粗糙度

Fig.6 Roughness influenced by coupled errors

- 2.5 各轴的误差对刀具后刀面粗糙度的影响占比
 - 该问题本质上是一个多元函数问题,即

$$R = f(x_1, x_2, x_3).$$

其中, *R* 为粗糙度, *x*₁、*x*₂ 和 *x*₃ 分别为主轴、摆轴和往 复轴的几何误差.

将粗糙度对各个变量的一阶偏导数定义为该误差的影响率 K_i,即

$$K_i = \partial R / \partial x_i$$
, $(i = 1, 2, 3)$.

各影响率的绝对值在该组中所占比例定义为该 误差对粗糙度的影响因子 *I*:

$$I_{i} = |K_{i}| / \sum_{j=1}^{3} |K_{j}|, \ (i = 1, 2, 3).$$
(4)

取主轴、摆轴端面和径向跳动误差分别为50、100、150、200、250 nm;往复直线度误差分别为100、150、200、250、300 nm. 实验包含3因素5水平,采用

控制变量法设计了如表 2 的各组实验.为减小每次 实验的随机性影响,将每个实验重复 100 次,以 100 次实验得到的粗糙度算术均值作为该组误差影响下 的粗糙度.

表 2 粗糙度计算值

	Tab.2 Ro	nm		
实验组	主轴误差	摆轴误差	往复轴误差	R _a
1	50	50	100	2.10
2	100	50	100	4.27
3	150	50	100	6.34
4	200	50	100	8.60
5	250	50	100	10.80
6	50	100	100	2.03
7	50	150	100	2.10
8	50	200	100	2.19
9	50	250	100	2.20
10	50	50	150	2.22
11	50	50	200	1.99
12	50	50	250	2.09
13	50	50	300	2.18

图 7 为粗糙度随各轴误差变化的离散点和使用 最小二乘法拟合得到的直线.



Fig.7 Variation of roughness with errors of axes
从图 7(a)可知,粗糙度随主轴端面和径向跳动
误差幅值的增大而增大,其拟合直线的斜率为 K₁ =

0.043 1;摆轴误差变化对粗糙度的影响较小,其拟 合直线斜率为 $K_2 = 0.000$ 7.由图 7(b)可得,往复轴 直线度误差对粗糙度影响亦较小,其拟合直线的斜 率为 $K_3 = 0.000$ 1.则任意误差下对应的后刀面粗糙 度算术平均值 R_a 可由式(5)近似得到

 $R_{a} = R_{a0} + K_{1}\Delta x_{1} + K_{2}\Delta x_{2} + K_{3}\Delta x_{3}.$ (5) 其中, R_{a0} 为表 2 中的某组 R_{a} 值, Δx_{1} , Δx_{2} 和 Δx_{3} 为 与该组误差对应的变化量.

由式(4)可得主轴、摆轴的端面和径向跳动误 差以及往复轴的直线度误差对粗糙度的影响占比分 别为98.18%、1.59%和0.23%.

3 研磨实例

为验证仿真分析的正确性,在 A 和 B 两台研磨 机床上分别对编号为 a_1 、 a_2 和 b_1 、 b_2 的4 把同材质金 刚石刀具进行同工艺参数的研磨实验.研磨机床 A 主轴端面和径向跳动为 49 nm,摆轴端面和径向跳 动为 43 nm,往复轴直线度为 150 nm;研磨机床 B 主 轴端面和径向跳动为 96 nm,摆轴端面和径向跳动 为 80 nm,往复轴直线度为 150 nm.由式(5)可得两 台机床对应的后刀面粗糙度理论值分别为 $R_{a,A} =$ 2.06 nm, $R_{a,B} = 4.11$ nm.图 8 为使用原子力显微镜 测得的 4 把刀具后刀面表面形貌,其表面均呈现出 与图 3(b)仿真计算类似的沟壑条纹, R_a 的测量结 果分别为 2.28、2.30、4.31 和 4.21 nm,相对误差分别 为 9.64%、10.40%、4.64%和 2.43%.



对比仿真与实验结果可知,计算值略小于实验 值,这是因为实际研磨过程还包括其他部件的几何 误差以及机床振动、环境噪声等因素的影响. 仿真 与实验结果间的最大相对误差为 10%左右,说明了 后刀面轮廓数学模型的有效性和仿真分析的正确 性.

4 结 论

1)本文针对某一研磨机床,借助多体系统理论和拓扑理论,建立了该研磨机床的精度传递模型,通过理论推导与仿真分析首次建立了机床主要部件几何误差与刀具后刀面粗糙度的定量关系.

2) 仿真计算结果略小于实验值, 这是因为实际 研磨过程还包括其他部件的等几何误差以及机床振动、环境噪声等因素的影响.

3)在不考虑其他非核心运动部件误差、振动及 环境因素影响的条件下,该型研磨机床的主轴、摆轴 端面和径向跳动误差以及往复轴的运动直线度误差 对粗糙度的影响占比分别为 98.18%、1.59% 和 0.23%,表明主轴的端面和径向跳动误差是影响粗 糙度的关键因素,该结论可为研磨机床的设计制造 和刀具研磨工艺的优化提供理论支撑.

参考文献

- [1] QIU Zhongjun, FANG Fengzhou, DING Liyu, et al. Investigation of diamond cutting tool lapping system based on on-machine image measurement[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56 (1): 79. DOI: 10.1007/s00170-011-3168-y
- [2] WYEN C F, KNAPP W G, WEGENER K. A new method for the characterisation of rounded cutting flanks [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59:899. DOI: 10.1007/s00170-011-3555-4
- [3] ZONG Wenjun, SUN Tao, LI Di, et al. Design criterion for crystal orientation of diamond cutting tool[J]. Diamond and Related Materials, 2009, 18(4): 642. DOI:10.1016/j.diamond.2008.11.003
- [4] ZONG Wenjun, LI Zengqiang, SUN Tao, et al. The basic issues in design and fabrication of diamond-cutting tools for ultra-precision and nanometric machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(4): 411. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.10.015
- [5] 宗文俊,李增强,胡振江,等.天然金刚石晶体的真空热化学腐蚀工艺[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(3):61
 ZONG Wenjun, LI Zengqiang, HU Zhenjiang, et al. Thermo-chemical erosion of natural diamond crystals under vacuum atmosphere
 [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(3):61.
 DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2013.03.011
- [6] JIRIGALANTU A, BAYANHESHIG, QI Xiaodong. The research of rigid lapping technique on diamond grating ruling tool[J]. Advanced Materials Research, 2011,179/180;641. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.179-180.641

- [7] 刘又午. 多体动力学的休斯敦方法及其发展[J].中国机械工程,2000,11(6):601
 LIU Youwu. Development of Huston's method on multi-body dynamics[J]. Journal of China Mechanical Engineering, 2000,11(6):601. DOI:10.3321/j.issn:1004-132X.2000.06.001
- [8] 朱春来. 金刚石刀具机械研磨机床误差分析及研磨机理研究
 [D].天津:天津大学,2013
 ZHU Chunlai. Analysis on diamond tool machine error and study of grinding mechanism[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [9] CAI Ligang, ZHANG Ziling, CHENG Qiang, et al. An approach to optimize the machining accuracy retainability of multi-axis NC machine tool based on robust design[J]. Precision Engineering, 2016, 43:370. DOI:10.1016/j.precisioneng.2015.09.001
- [10] TIAN Wenjie, HE Baiyan, HUANG Tian. Universal geometric error modeling of the CNC machine tools based on the screw theory [J].
 Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 2011, 7997(2):357. DOI:10.1117/12.894925
- [11] FU Guoqiang, FU Jianzhong, XU Yuetong, et al. Accuracy enhancement of five-axis machine tool based on differential motion matrix: geometric error modeling, identification and compensation[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015(89): 170.DOI:10.1016/j.ijmachtools.2014.11.005
- [12]要小鹏,殷国富,方辉. 五轴机床误差建模与补偿解析新算法
 [J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(5):155
 YAO Xiaopeng, YIN Guofu, FANG Hui. A new synthesis error modeling and compensating algorithm of the five-axis machine tools
 [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013,45(5):155. DOI:10.15961/j.jsuese.2013.05.008
- [13] ZHANG Ziling, CAI Ligang, CHENG Qiang, et al. A geometric error budget method to improve machining accuracy reliability of multiaxis machine tools[J]. Journal of Intellectual Manufacturing, 2016, 30:495. DOI:10.1007/s10845-016-1260-8.
- [14]孙惠娟,殷国富,方辉,等. 五轴数控机床综合误差建模评价方法研究[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(6):197
 SUN Huijuan, YIN Guofu, FANG Hui, et al. Research on integrated error modeling and evaluation method of five-axis machine tools
 [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012,44(6):197. DOI: 10.15961/j.jsuese.2012.06.011
- [15]李增强.圆弧刃金刚石刀具刀尖圆弧的机械研磨及其检测技术
 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
 LI Zengqiang. Mechanical lapping and measurement techniques of nose arc of rounded diamond cutting tools[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008
- [16] 雷大江,岳晓斌,崔海龙,等.金刚石刀具刀尖圆弧波纹度的测量及评价[J].光学精密工程,2017,25(10):2697
 LEI Dajiang, YUE Xiaobin, CUI Hailong, et al. Measurement and evaluation of tool tip arc waviness of diamond tool [J]. Optics and Precision Engineering,2017,25(10):2697.DOI:10.3788/OPE.-20172510.2697
- [17]全国产品几何技术规范标准化技术委员会.产品几何技术规范
 (GPS)表面结构 轮廓法 表面波纹度词汇: GB/T 16747—2009.
 [S].北京:中国标准出版社,2009

Dimensionaland Geometrical Product Specifications. Geometrical product specification (GPS)-Surface texture: profile method surface waviness terms: GB/T 16747—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009

(编辑

杨

波)