

引文格式: 樊嘉, 郑华林, 何勇, 等. 机床关键几何误差元素辨识及其公差设计方法[J]. 航空制造技术, 2021, 64(22): 56-64.

FAN Jia, ZHENG Hualin, HE Yong, et al. Methodology of identifications and tolerance design of machine tools crucial geometric error elements[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(22): 56-64.

机床关键几何误差元素辨识 及其公差设计方法*

樊嘉^{1,2}, 郑华林¹, 何勇³, 米良⁴, 胡腾¹

(1. 西南石油大学, 成都 610500;

2. 石油天然气装备技术四川省科技资源共享服务平台, 成都 610500;

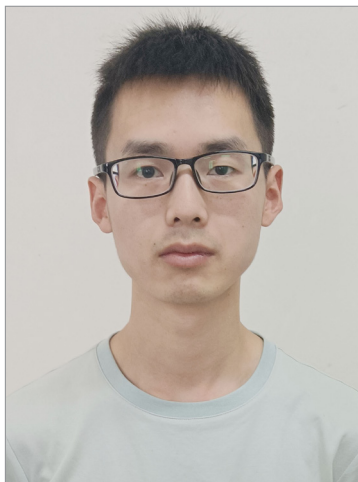
3. 中国石油集团川庆钻探培训中心, 成都 610213;

4. 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 绵阳 621900)

[摘要] 面向加工精度指标提出机床关键几何误差元素辨识及其公差设计方法。以某型立式加工中心为对象, 基于螺旋理论对机床空间误差进行建模; 结合所得机床空间误差模型及加工精度指标定义, 推导建立加工精度评估模型, 同时提出间接试验验证策略及实施技术; 通过正交实验、统计学对影响加工精度的关键几何误差元素进行辨识, 并利用数值试验对辨识结果进行验证, 并基于响应面法构建加工精度与关键几何误差元素的映射关系, 由此将后者的公差设计转换为一类优化问题; 利用遗传算法获取各关键几何误差元素最优公差, 在加工精度指标满足要求的同时, 机床产品成本达到最低, 表明所提方法有利于实现机床精度稳健设计。

关键词: 加工精度; 机床; 关键几何误差元素; 辨识; 公差设计

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.22.056



樊嘉

硕士研究生, 研究方向为数控机床精度设计与反演技术。

数控机床作为“工业母机”, 其加工精度已成为最重要的产品质量指标之一^[1]。已有研究表明^[2-3], 在几何误差、伺服误差、热误差和刀具磨损等众多因素中, 几何所致空间误差是影响加工精度最直接的因素之一。目前, 研究揭示加工精度与机床几何误差元素之间的复杂映射关系, 探索机床关键几何误差元素辨识及其公差设计方法已成为数控机床精度分析领域的热点问题, 其解决对于实现加工精度“硬补偿”具有较显著的理论及工程技术支撑作用。

现阶段, 国内外诸多学者针对关键几何误差元素辨识进行了较深入的研究。Cheng等^[4]提出了一种基于螺旋理论和Morris法的全局灵敏度分析方法, 最终识别出对空间误差影响较大的关键几何误差元素。张根保等^[5]利用多体系统理论建立了机床的空间误差模型, 通过计算并比较各几何误差元素的影响因子, 识别出影响机床空间误差的关键几何误差元素。唐宇航等^[6]提出了一种基于蒙特卡洛模拟的灵敏度分析方法, 在建立加工中心误差生成模型

* 基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(19ZDZX0055); 四川省重大科技专项(2020ZDZX0003)。

和 S 试件数学模型的基础上对其进行全局灵敏度分析,最终获得对 S 试件 z 向加工误差影响最大的 5 项误差元素。黄克^[7]在几何误差模型的基础上定性分析了几何误差元素对 NAS979 圆锥台试件和 S 试件加工精度的影响程度。在机床几何误差元素公差设计方面, Rao 等^[8]提出了一个成本-公差关系的非线性优化模型,是基于总制造成本最小的同时选择设计和制造公差的综合方法。Cai 等^[9]提出一种同时考虑可靠性和鲁棒性的零件几何精度分配方法,用来提高在一定设计要求下的加工精度保持性。胡西彪等^[10]在考虑了加工时间、夹具和刀具磨损等因素的情况下提出了一种新的多目标公差优化模型。

不难看出,现有研究还存在一定的局限性,一方面是对关键几何误差元素的辨识大多还停留在空间误差上,未能在此基础上进一步上升到对工件加工精度的关键几何误差元素辨识上;另一方面是现有研究在关键几何误差元素与公差设计两者相结合方面鲜有报道。故针对上述问题,本研究将对影响工件加工精度较大的几何误差元素,即关键几何误差元素进行辨识,并在此基础上对其进行公差设计。

为此,以某三轴立式加工中心为研究对象,提出机床关键几何误差元素辨识及其公差设计方法。以基于螺旋理论的机床运动学分析为基础,以 NAS 试件几何特征的平面度和圆度为典型加工精度指标,采用最小区域法推导构建考虑机床空间误差的加工精度评估模型;在此基础上,联合正交试验设计,计算不同几何误差元素组合下加工精度评估值,并应用统计学方法对机床关键几何误差元素进行辨识,最终将机床关键几何误差元素公差设计转化为以机床生产成本最小为目标的优化问题并求解,从而获取关键几何误差元素最

优公差。

基于螺旋理论的机床空间误差建模

典型三轴立式加工中心结构示意如图 1 所示。由文献[11]可知,该机床作三轴联动时将产生如表 1 所示的 21 项几何误差元素,各元素定义与文献[11]一致。

从多体系统理论的视角出发,图

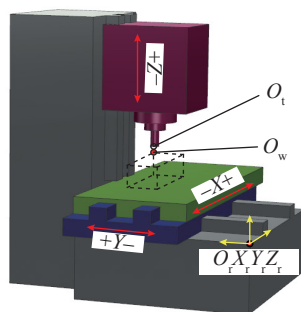


图1 三轴立式加工中心结构示意图
Fig.1 Structure diagram of a vertical machining center

1 所示机床的运动链拓扑可划分为工件运动链和刀具运动链。其中,工件运动链由床身、Y 轴、X 轴和工件组成;刀具运动链则由床身、Z 轴和刀具构成。如图 2 所示, g_{rw} 、 g_{rt} 分别为工件和刀具运动链末端运动特征, g_{wt} 表示以工件坐标系为基准的耦合运动链末端运动特征。依据空间误差定义^[12]则有:

$$E = g_{wt}^a - g_{wt}^i \quad (1)$$

式中, E 表示机床的空间误差, g_{wt}^a 、 g_{wt}^i 分别表示刀尖点相对于工件坐标系在实际和理想情况下的运动特征。

基于螺旋理论^[13]推导构建机床空间误差矩阵,并通过提取其第 3~4 列求得刀尖点相对于工件坐标系的空间姿态误差 E_o 与空间位置误差 E_p ,即

$$E_o = (g_{wt}^a - g_{wt}^i) \cdot [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T = [E_{ox} \ E_{oy} \ E_{oz} \ 0]^T \quad (2)$$

表1 三轴机床几何误差元素

Table 1 Geometric error elements of three-axis machine tools

运动轴	位置相关	位置无关
X 轴	$\delta_{xx} \delta_{yx} \delta_{zx} \ \varepsilon_{yx} \ \varepsilon_{zx}$	—
Y 轴	$\delta_{xy} \delta_{yy} \delta_{zy} \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{zy}$	S_{yy}
Z 轴	$\delta_{xz} \delta_{yz} \delta_{zz} \ \varepsilon_{xz} \ \varepsilon_{zz}$	$S_{xz} \ S_{yz}$

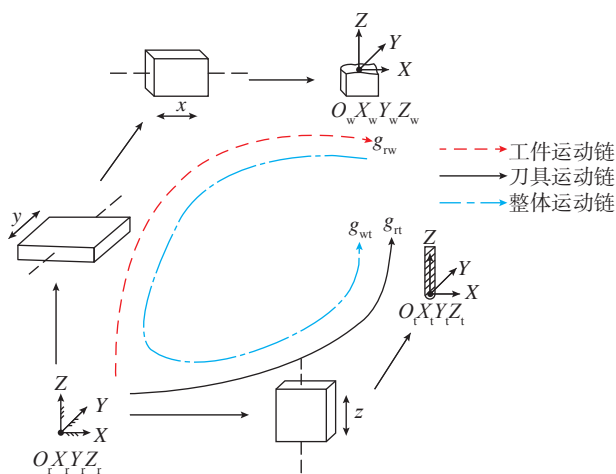


图2 机床运动链拓扑

Fig.2 Topological diagram of machine tool kinematic chains

$$E_p = (g_{wt}^a - g_{wt}^i) \cdot [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T = [E_{px} \ E_{py} \ E_{pz} \ 0]^T \quad (3)$$

根据三轴机床姿态空间误差的不可补偿性^[14], E_o 对加工精度的影响可暂不考虑。式(2)和(3)中下角标 x, y, z 分别表示空间误差 X, Y, Z 向分量,且:

$$E_{px} = \delta_{xz} - \delta_{xy} - \delta_{xx} - y_i \cdot (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + S_{xy}) - z_i \cdot (\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy}) + y_i \cdot (\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz} + S_{xy}) + z_i \cdot (\varepsilon_{yz} - \varepsilon_{yx} - \varepsilon_{yy} + S_{xz}) \quad (4)$$

$$E_{py} = \delta_{yz} - \delta_{xy} - \delta_{yx} + x_i \cdot \varepsilon_{zx} + z_i \cdot (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy}) - x_i \cdot (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz} + S_{xy}) + z_i \cdot (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz} - S_{yz}) \quad (5)$$

$$E_{pz} = \delta_{zz} - \delta_{zy} - \delta_{zx} - x_i \cdot \varepsilon_{yx} + y_i \cdot (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy}) + x_i \cdot (\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yz} - S_{xz}) - y_i \cdot (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz} - S_{yz}) \quad (6)$$

式中,等号右边变量 x, y, z 分别表示刀尖点在工件坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 下的名义坐标;变量 x_i, y_i, z_i 分别为刀具坐标系原点 O_i 在机床基准坐标系 $O_r X_r Y_r Z_r$ 下的坐标。

利用构建所得机床空间误差即可开展加工精度预估及其关键影响元素的辨识研究,并在此基础上对辨识结果进行公差设计,进而绘制图3所示的机床关键几何误差元素辨识及公差设计技术路线。

考虑空间误差的机床加工精度评估与验证

1 加工精度评估建模

如图4所示, NAS979 标准试件常被用于三轴机床的精度检验^[15], 现选取表2^[15]中平面度和圆度两个加工精度指标为对象,系统评估机床在空间误差作用下的加工精度。

以平面度为例,首先在商业CAM环境下对切削平面A进行加工仿真,可得其评价点位,如图5所示,进而采用最小区域法进行定量评估。

由于机床空间误差的存在,切削成形点理想位置 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 与其实际位置 $P_a(x_a, y_a, z_a)$ 并不重合,且有^[13]:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & E_{px} \\ 0 & 1 & 0 & E_{py} \\ 0 & 0 & 1 & E_{pz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

一般地,三维空间直角坐标系中任一平面方程可表征为:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (8)$$

式中, A, B, C, D 为空间平面的方程系数,故实际加工空间中任意一点 $P_j(x_j, y_j, z_j)$ 到该平面的距离为:

$$d_j = \frac{Ax_j + By_j + Cz_j + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (9)$$

由平面度误差定义可知,其最小区域是指包容实际表面且法向距离最短的两平行平面之间的区域。据此,可将平面度的评估求解问题转化为无约束优化问题^[16]:

$$\begin{cases} \text{Obj. min } f(F) = F_{\text{err}} = [d_j]_{\text{max}} - [d_j]_{\text{min}} \\ \text{Var. } F = \{A, B, C, D\} \end{cases} \quad (10)$$

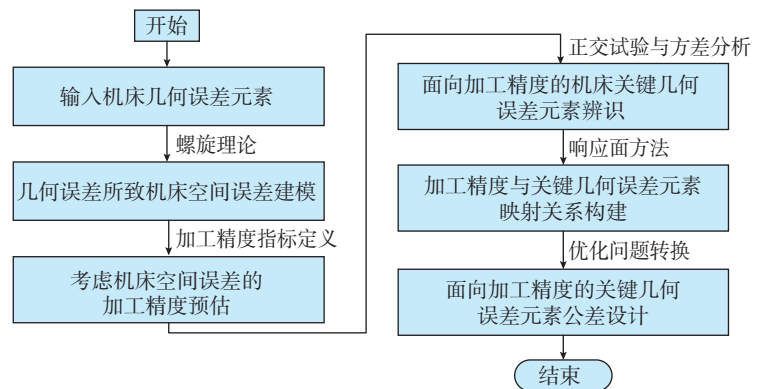


图3 总体技术路线
Fig.3 Flow chart of overall techniques

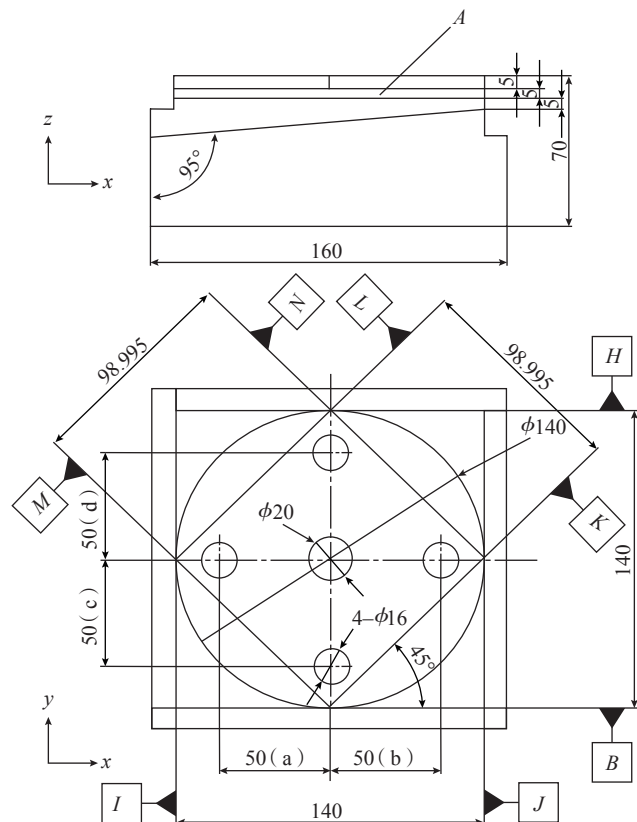


图4 NAS979 试件
Fig.4 NAS979 specimen

式中, F 为设计变量; d_j 为点到平面的距离, 经优化求解得到一组最优设计变量, 其对应 F_{err} 即为平面度误差。圆度的评估也可遵循上述方法。

2 试验验证

为实现独立、有效验证几何因素所致机床空间误差对加工精度的影响, 提出基于激光干涉仪的加工精度间接验证策略及实施技术, 以消减切削热、切削力等因素对测试结果的干扰。以平面度为例, 详细步骤如下。

Step1: 在恒温环境下 ($20 \pm 0.5^\circ\text{C}$), 利用与图 2 所示运动链拓扑相同的 J1VMC400B 型立式加工中心, 构建如图 6 所示的试验平台。

Step2: 借助 Renishaw XL-80 激光干涉仪在空载条件下测量机床各进给轴运动偏差 E_{pk_exp} ($k=x, y, z$), 且各进给轴运动偏差数据采样点与图 5 所示平面 A 上选取的评价点空间坐标重合。

Step3: 利用测量所得运动偏差可推导评价点实际空间坐标, 并通过式 (10) 计算得平面度 F_{err_exp} 。

Step4: 基于“九线法”^[17] 辨识机床几何误差元素, 并代入式 (4)~(6) 计算机床空间误差各向分量 E_{pk_cal} , 进而再通过式 (7)~(10) 预估平面度 F_{err_cal} 。

Step5: 对比 F_{err_exp} 与 F_{err_cal} , 即可验证所提基于空间误差的机床加工精度预估方法。

图 7 为 E_{pk_exp} 与 E_{pk_cal} 对比, 不难看出, 各评价点运动偏差测量值与预估值之间的平均误差不超过 $2.5\mu\text{m}$, 表明第 1 节空间误差建模的正确性。

进一步可得平面度误差测量值 F_{err_exp} 与预估值 F_{err_cal} 分别为 0.0040mm , 0.0037mm , 二者相对误差为 7.5%, 说明所建加工精度预估模型精度较高, 为下一步开展关键几何误差元素辨识奠定了较坚实的理

表2 NAS979 试件检验项目及允差

Table 2 Inspection items and tolerance of NAS979 specimen

序号	加工精度指标	检验项目允差
1	圆台 $\phi 140$	圆度 0.01mm
2	圆台 $\phi 140$ 与孔 $\phi 20$	同轴度 0.01mm
3	端面 H 与端面 B	平行度 0.01mm
4	端面 I 与端面 B	垂直度 0.01mm
5	端面 J 与端面 B	垂直度 0.01mm
6	45° 斜面 L 与斜面 K	平行度 0.01mm
7	45° 斜面 M 与斜面 K	垂直度 0.01mm
8	45° 斜面 N 与斜面 K	垂直度 0.01mm
9	孔距 $50 a $	尺寸公差 $\pm 0.005\text{mm}$
10	孔距 $50 b $	尺寸公差 $\pm 0.005\text{mm}$
11	孔距 $50 c $	尺寸公差 $\pm 0.005\text{mm}$
12	孔距 $50 d $	尺寸公差 $\pm 0.005\text{mm}$
13	ZX 平面度 95°	角度公差 $\pm 20''$
14	YZ 平面度 95°	角度公差 $\pm 20''$
15	切削平面 A	粗糙度 $R_a 0.8\mu\text{m}$
16	切削平面 A	平面度 0.01mm

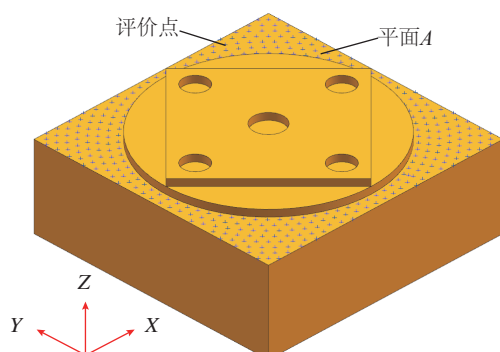


图5 平面A评价点位

Fig.5 Evaluation points of plane A

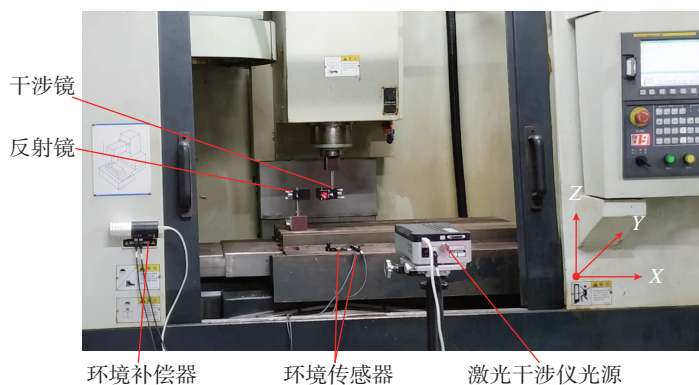


图6 试验平台

Fig.6 Experimental platform

论基础。

机床关键几何误差元素辨识

1 正交试验设计

将机床 21 项几何误差均视作影响加工精度指标的因素,以平面度误差为例,选择正交表 $L_{54}(3^{25})$,并根据上述试验机床的几何误差元素值确定各水平取值,如表 3 所示。对于 18 项位置相关和 3 项位置无关的几何误差元素而言,给定水平值分别代表误差元素的变动范围(即公差)和取值大小。进而通过正交表科学安排各因素各水平,根据式(7)~(10)计算不同几何误差元素组合下的平

面度误差,结果如表 4 所示。

2 机床关键几何误差元素辨识

机床加工精度指标与其几何误差元素之间存在复杂且差异显著的映射关系,对任一加工精度指标而言,各几何误差元素对其影响权重相异。为此,利用方差分析^[18]等统计学方法,分析各试验因素对试验结果的影响程度,从而辨识影响加工精度的关键几何误差元素。值得说明的是,为判断各因素的影响程度,常选取 $F_{0.05}$ 来判断^[19],即若该因素 $F \geq F_{0.05}$,则认为该因素显著,反之则不显著。

以平面度为例,21 项几何误差

因素方差分析如表 5 所示。由文献[19]可知, $F_{0.05}=3.98$,故 δ_{zx} 、 ϵ_{xx} 、 δ_{zy} 、 ϵ_{xy} 、 δ_{zz} 、 S_{xz} 是影响平面度的关键几何误差元素。

3 关键几何误差元素数值验证

为验证上述辨识结果,基于前文所建加工精度评估模型制定如下数值验证策略。

Step1: 将机床 21 项几何误差元素取表 3 中的水平 2 的值,计算出该误差下的平面度值。

Step2: 将上面识别出的 6 项关键几何误差元素取值为 0,其余几何误差元素取值为表 3 中的水平 2 的值,计算出该误差下的平面度值。

根据上述验证策略可计算出 21 项几何误差元素共同作用所致平面度误差值为 0.00397mm; 除辨

表3 几何误差元素水平表

Table 3 Geometric error elements level table

几何误差	水平1	水平2	水平3
$\delta_{xx}/\mu\text{m}$	12.30	24.60	36.90
$\delta_{yx}/\mu\text{m}$	8.53	17.05	25.58
$\delta_{zx}/\mu\text{m}$	12.21	24.41	36.62
$\epsilon_{xx}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	4.64	9.28	13.92
$\epsilon_{yx}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	9.74	19.48	29.22
$\epsilon_{zx}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	11.85	23.70	35.55
$\delta_{xy}/\mu\text{m}$	11.03	22.06	33.09
$\delta_{yy}/\mu\text{m}$	12.82	25.64	38.46
$\delta_{zy}/\mu\text{m}$	13.84	27.67	41.51
$\epsilon_{xy}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	11.75	23.49	35.24
$\epsilon_{yy}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	7.68	15.35	23.03
$\epsilon_{zy}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	2.79	5.58	8.37
$\delta_{xz}/\mu\text{m}$	8.45	16.89	25.34
$\delta_{yz}/\mu\text{m}$	5.06	10.11	15.17
$\delta_{zz}/\mu\text{m}$	13.09	26.17	39.26
$\epsilon_{xz}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	11.55	23.10	34.65
$\epsilon_{yz}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	8.56	17.11	25.67
$\epsilon_{zz}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	10.71	21.41	32.12
$S_{xy}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	7.11	14.22	21.33
$S_{xz}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	8.79	17.57	26.36
$S_{yz}/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	4.32	8.64	12.96

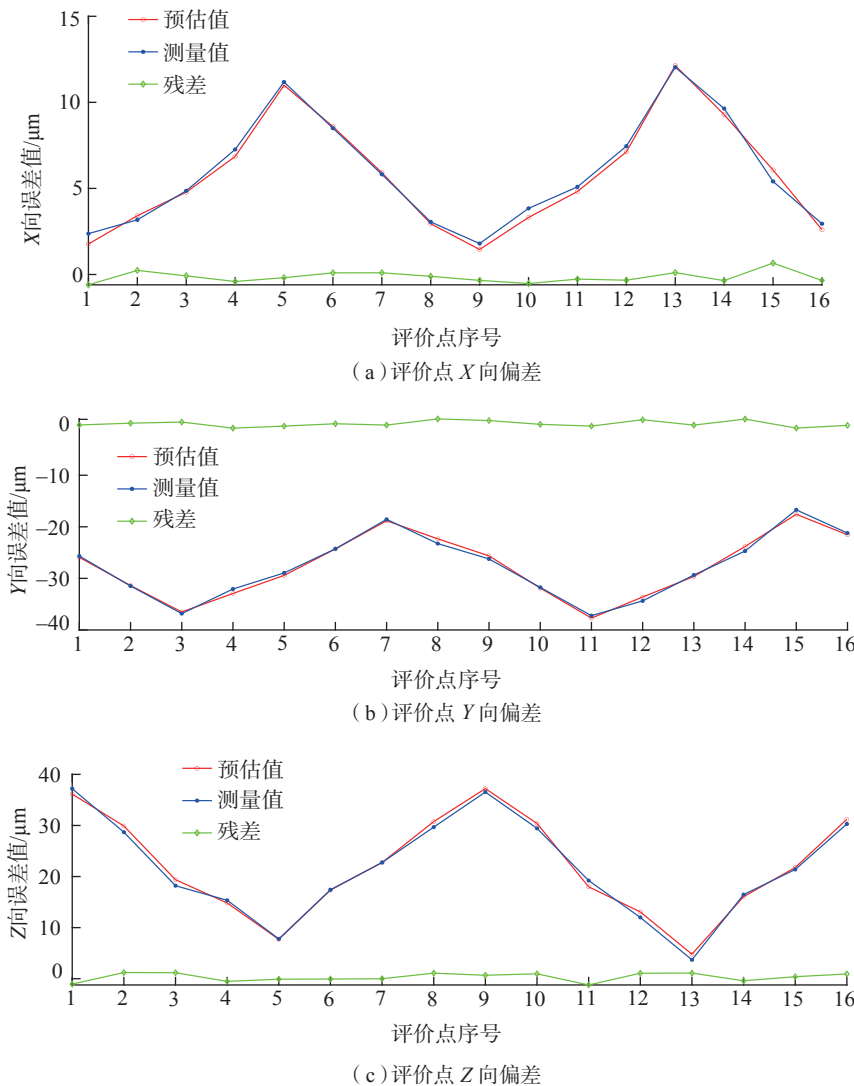


图7 评价点各向运动偏差

Fig.7 Deviation of evaluation points in each direction

表4 正交试验结果
Table 4 Results of orthogonal experiments

几何误差	1	2	3	4	5	6	7	8	...	53	54
$\delta_{xx}/\mu\text{m}$	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	...	36.9	36.9
$\delta_{yy}/\mu\text{m}$	8.53	8.53	8.53	17.05	17.05	17.05	25.58	25.58	...	25.58	25.58
$\delta_{zx}/\mu\text{m}$	12.21	12.21	12.21	24.41	24.41	24.41	36.62	36.62	...	24.41	24.41
$\varepsilon_{xx}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	4.64	4.64	4.64	9.28	9.28	9.28	13.92	13.92	...	4.64	4.64
$\varepsilon_{yy}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	9.74	9.74	9.74	19.48	19.48	19.48	29.22	29.22	...	19.48	19.48
$\varepsilon_{zx}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	11.85	11.85	11.85	23.7	23.7	23.7	35.55	35.55	...	35.55	35.55
$\delta_{xy}/\mu\text{m}$	11.03	11.03	11.03	22.06	22.06	22.06	33.09	33.09	...	11.03	11.03
$\delta_{yz}/\mu\text{m}$	12.82	25.64	38.46	12.82	25.64	38.46	12.82	25.64	...	25.64	38.46
$\delta_{zy}/\mu\text{m}$	13.84	27.67	41.51	13.84	27.67	41.51	13.84	27.67	...	13.84	27.67
$\varepsilon_{xy}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	11.75	23.49	35.24	11.75	23.49	35.24	11.75	23.49	...	35.24	11.75
$\varepsilon_{yz}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	7.68	15.35	23.03	7.68	15.35	23.03	7.68	15.35	...	7.68	15.35
$\varepsilon_{zy}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	2.79	5.58	8.37	2.79	5.58	8.37	2.79	5.58	...	5.58	8.37
$\delta_{xz}/\mu\text{m}$	8.45	16.89	25.34	8.45	16.89	25.34	8.45	16.89	...	25.34	8.45
$\delta_{yz}/\mu\text{m}$	5.06	10.11	15.17	10.11	15.17	5.06	15.17	5.06	...	5.06	10.11
$\delta_{zz}/\mu\text{m}$	13.09	26.17	39.26	39.26	13.09	26.17	26.17	39.26	...	39.26	13.09
$\varepsilon_{xz}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	11.55	23.1	34.65	23.1	34.65	11.55	34.65	11.55	...	34.65	11.55
$\varepsilon_{yz}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	8.56	17.11	25.67	25.67	8.56	17.11	17.11	25.67	...	8.56	17.11
$\varepsilon_{zz}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	10.71	21.41	32.12	21.41	32.12	10.71	32.12	10.71	...	21.41	32.12
$S_{xy}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	7.11	14.22	21.33	21.33	7.11	14.22	14.22	21.33	...	14.22	21.33
$S_{xz}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	8.79	17.57	26.36	17.57	26.36	8.79	26.36	8.79	...	26.36	8.79
$S_{yz}/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	4.32	8.64	12.96	12.96	4.32	8.64	8.64	12.96	...	4.32	8.64
平面度 F_{em}/mm	0.00199	0.00370	0.00544	0.00254	0.00397	0.00567	0.00351	0.00434	...	0.00300	0.00334

识所得 6 项关键几何误差元素外,其余几何误差元素所致平面度误差为 0.00037mm,后者比前者减少了 90.68%,故 δ_{zx} 、 ε_{xx} 、 δ_{zy} 、 ε_{xy} 、 δ_{zz} 、 S_{xz} 是影响该平面度的关键几何误差元素。

同样地,应用上述辨识方法,可得到影响圆度指标的关键几何误差元素,如表 6 所示。若综合考虑以上两个加工精度指标,则该机床关键几何误差元素总个数为 12。

值得注意的是,当带入上述机床的几何误差元素值进行计算时,可得到其平面度和圆度分别为 0.00397mm 和 0.009731mm。而几何误差占影响机床加工精度的各类误差约 25%~35%^[18],取其中间值 30%,可以发现上述两个加工精度指标均未小于表

2 中所要求允差的 30%,不满足要求,故有必要对几何误差元素进行公差设计。

关键几何误差元素公差设计

对所得关键几何误差元素进行公差设计,其目的在于使零件加工不仅能满足精度指标,同时具备较好的经济性^[20]。因此,从加工精度指标达成、机床产品经济性高两个维度出发,可将机床关键几何误差元素公差设计转化为一类以机床生产成本最小为目标、关键几何误差元素为设计变量、加工精度允差及关键几何误差元素取值范围为约束条件的优化问题,通过搜索最优设计变量值,达到生产出的机床在满足加工精度的

条件下其生产成本尽可能少的目标。根据我国中型机械类企业中等批量加工的成本公差模型^[21],建立如下目标函数:

$$W(T) = \sum_{i=1}^3 \left(13.3114T_i e^{\frac{0.0438}{T_i}} + 7.6593e^{-25.1731T_i} \right) + \sum_{i=4}^{12} \left(5.0261e^{-15.8903T_i} + \frac{T_i}{0.3927T_i + 0.1176} \right) \quad (11)$$

式中, W 为生产成本; T 为设计变量; T_i 为第 i 项关键几何误差元素公差值,为了方便说明, δ_{xx} 、 δ_{yy} 、 δ_{zz} 、 δ_{yx} 、 δ_{zx} 、 ε_{xx} 、 δ_{xy} 、 δ_{zy} 、 ε_{xy} 、 ε_{yz} 、 S_{xy} 、 S_{xz} 分别表示为 $T_1 \sim T_{12}$ 。

由于还需要确保机床满足加工精度,故可借助响应面方法构建关键几何误差元素与加工精度之间关系,

最终可将平面度误差显式表达为机床关键几何误差元素的函数,即

$$F_{\text{err}} = (-23.97 + 1.8556\delta_{xx} + 5.5601\epsilon_{xx} + 8.6227\delta_{zy} + 3.3703\epsilon_{zy} + 0.34654\delta_{zz} + 0.52471S_{xz}) \times 10^{-5} \quad (12)$$

类似的,圆度 R_{err} 的显式表达式为,

$$R_{\text{err}} = (15.816 + 4.5135\delta_{xx} + 19.386\delta_{yx} + 9.2439\epsilon_{xx} + 3.5249\delta_{xy} + 15.552\delta_{yy} + 4.695\epsilon_{xy} - 11.598\epsilon_{zy} - 3.9362S_{xy}) \times 10^{-5} \quad (13)$$

结合式(11)~(13)可以建立本次公差设计的优化模型为,

$$\begin{cases} \text{Obj. min } W(T) \\ \text{Var. } T = \{T_1, T_2, \dots, T_{12}\} \\ \text{s.t. } T_i^L \leq T_i \leq T_i^U \\ F_{\text{err}} \leq E_{c1} \times P \\ R_{\text{err}} \leq E_{c2} \times P \end{cases} \quad (14)$$

式中, E_{c1} 与 E_{c2} 分别为平面度与圆度

在表2中的允差值; P 为几何误差占机床总误差的比例,取 $P=30\%$; 由于实际工艺水平的限制,各几何误差元素公差值存在约束范围,所以 T_i^L 、 T_i^U 为第 i 项关键几何误差元素上下边界。

利用遗传算法^[20]对上述优化模型进行求解,最终可得满足平面度和圆度指标的各关键几何误差元素最优公差值。将最优公差与初始公差进行对比,如图8所示,可以看出,关键几何误差元素最优公差在原始公差的基础上进行了一定的调整,其中 δ_{zz} 、 δ_{xx} 、 ϵ_{zy} 、 S_{xy} 、 S_{xz} 5项公差还得到了放宽。

根据几何误差元素与机床零部件精度参数之间的关系^[22],并结合

表6 加工精度辨识结果

Table 6 Machining accuracy identification results

加工精度	关键几何误差元素
平面度 F_{err}	δ_{xx} 、 ϵ_{xx} 、 δ_{zy} 、 ϵ_{zy} 、 δ_{zz} 、 S_{xz}
圆度 R_{err}	δ_{xx} 、 δ_{yx} 、 ϵ_{xx} 、 δ_{xy} 、 δ_{yy} 、 ϵ_{xy} 、 ϵ_{zy} 、 S_{xy}

由 GB/T 17587.3—2017 以及 JB/T 7175.4—2006 得到的丝杠和导轨的精度等级参数,可得机床零部件优化前后的精度等级变化,其对比结果如表7所示。可以看出,有7项零部件的精度等级被提高,还有2项零部件的精度等级被降低,从而使机床在满足加工精度的条件下尽可能减少其生产成本。

结论

(1) 提出了一种机床关键几何误差元素辨识方法,对影响加工精度指标显著的几何误差元素进行了甄别。结果表明,影响平面度误差的关键几何误差元素为: δ_{xx} 、 ϵ_{xx} 、 δ_{zy} 、 ϵ_{zy} 、 δ_{zz} 、 S_{xz} ; 影响圆度的关键几何误差元素为 δ_{xx} 、 δ_{yx} 、 ϵ_{xx} 、 δ_{xy} 、 δ_{yy} 、 ϵ_{xy} 、 ϵ_{zy} 、 S_{xy} 。

(2) 建立了一种关键几何误差元素公差设计方法,针对影响平面度和圆度两个加工精度指标的12项关键几何误差元素进行了公差设计。对比各误差元素初始给定公差与最优公差可以发现,后者相比前者进行了一定的调整,其中, δ_{zz} 、 δ_{xx} 、 ϵ_{zy} 、 S_{xy} 、 S_{xz} 5项公差还得到了放宽,所得关键几何误差元素公差设计结果不但可以保证加工精度指标满足要求,而且还能尽量缩减机床生产成本。

参考文献

[1] NIU P, CHENG Q, LIU Z F, et al. A machining accuracy improvement approach for a horizontal machining center based on analysis of geometric error characteristics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(9-10): 2873-2887.

[2] LI J, MEI B, SHUAI C L, et al. A volumetric positioning error compensation

表5 方差分析表

Table 5 Analyses of variance table

误差元素	偏差平方和/10 ⁻⁶	自由度/(°)	方差/10 ⁻⁶	F值
δ_{xx}	0.0475	2	0.0238	1.06
δ_{yx}	0.0037	2	0.0019	0.08
δ_{xx}	1.8597	2	0.9299	41.46
ϵ_{xx}	2.4050	2	1.2025	53.61
ϵ_{yx}	0.0472	2	0.0236	1.05
ϵ_{xx}	0.0010	2	0.0005	0.02
δ_{xy}	0.0064	2	0.0032	0.14
δ_{yy}	0.0045	2	0.0022	0.10
δ_{zy}	51.5291	2	25.7645	1148.65
ϵ_{xy}	5.6410	2	2.8205	125.74
ϵ_{yy}	0.1676	2	0.0084	3.74
ϵ_{zy}	0.0049	2	0.0025	0.11
δ_{zz}	0.0096	2	0.0048	0.21
δ_{yz}	0.0244	2	0.0122	0.54
δ_{zz}	0.3568	2	0.1784	7.95
ϵ_{zz}	0.0015	2	0.0007	0.03
ϵ_{yz}	0.0305	2	0.0152	0.68
ϵ_{zz}	0.0110	2	0.0550	2.45
S_{xy}	0.0028	2	0.0014	0.06
S_{xz}	0.1904	2	0.0952	4.24
S_{yz}	0.0241	2	0.0121	0.54
误差	0.2467	11	0.0224	—
总和	62.7144	53	—	—

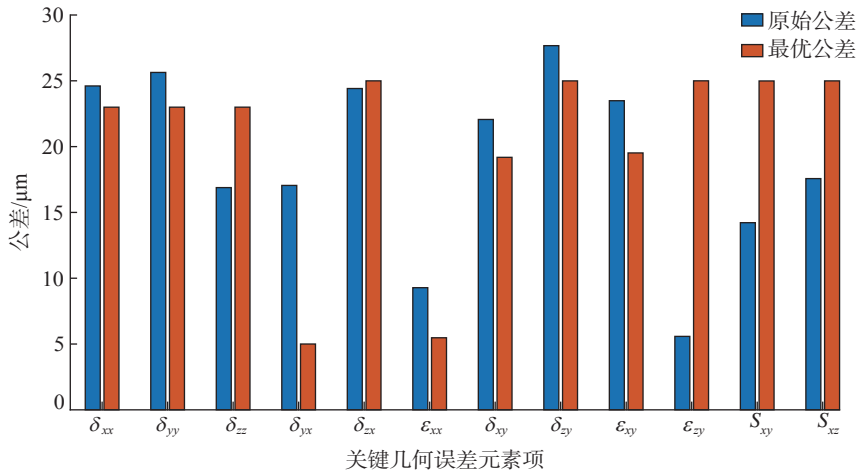


图8 原始公差与最优公差对比

Fig.8 Comparison of original tolerances and optimal tolerances

表7 部件关键精度等级对比

Table 7 Grades comparisons of key precisions of components

部件及其精度指标		精度等级	
		优化前	优化后
X向导轨	Y-直线度	5	4 [↓]
	Z-直线度	4	1 [↓]
	平行度	3	1 [↓]
Y向导轨	X-直线度	1	3 [↓]
	Z-直线度	4	2 [↓]
Z向导轨	X-直线度	4	5 [↓]
X向丝杠螺距		5	4 [↓]
Y向丝杠螺距		5	4 [↓]
Z向丝杠螺距		5	4 [↓]
加工精度满足		否	是

method for five-axis machine tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019,103(9-12): 3979-3989.

[3] 刘奕颖, 郭俊康, 李宝童, 等. 精密机床加工误差灵敏度分析与公差设计[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 145-152.

LIU Yiyang, GUO Junkang, LI Baotong, et al. Sensitivity analysis and tolerance design for precision machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 145-152.

[4] CHENG Q, FENG Q N, LIU Z 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.

[5] 张根保, 范秀君. 机床关键几何误差辨识方法研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(7): 853-856.

ZHANG Genbao, FAN Xiujun. Research on identification approach for key geometric errors of machine tools[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(7): 853-856.

[6] 唐宇航, 范晋伟, 陈东菊, 等. 基于蒙特卡洛模拟的机床关键几何误差溯源方法[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(11): 1619-1628.

TANG Yuhang, FAN Jinwei, CHEN Dongju, et al. Tracing method for key geometric errors of a machine tool based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43 (11): 1619-1628.

[7] 黄克. 基于检验试件的五轴机床几何误差分析与精度预测研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

HUANG Ke. Research on geometric error analysis and precision prediction of VMC25100U five-axis CNC machine tools based on test specimen[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

[8] RAO R V, MORE K C. Simultaneous optimal selection of design and manufacturing tolerances with different stackup conditions using TLBO algorithm[C]//Proceedings of International Conference on Innovations in Engineering and Technology. Bangkok, 2013.

[9] CAI L G, ZHANG Z L, CHENG Q, 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: 370-386.

[10] 胡西彪, 张卫, 陆宝春, 等. 基于离散化成本—公差模型的多目标公差优化设计[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 182-189.

HU Xibiao, ZHANG Wei, LU Baochun, et al. Multi-objective optimization design of tolerance based on discretized cost-tolerance model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 182-189.

[11] WU H R, ZHENG H L, LI X X, et al. A geometric accuracy analysis and tolerance robust design approach for a vertical machining center based on the reliability theory[J]. Measurement, 2020, 161: 107809.

[12] 杨建国, 范开国, 杜正春. 数控机床误差实时补偿技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

YANG Jianguo, FAN Kaigu, DU Zhengchun. Volumetric error compensation technology for NC machine tool[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.

[13] MURRAY R, LI Z, SASSTRY S. A mathematical introduction to robotics manipulation[M]. Florida: CRC Press, 1994.

[14] 田文杰. 精密卧式加工中心几何精度设计及误差补偿方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

TIAN Wenjie. Investigation into accuracy design and error compensation of high-precision horizontal machining centers[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[15] 仇健. 数控机床切削性能测试典型试件综述[J]. 制造技术与机床, 2014(9): 193-203.

QIU Jian. Review of typical part for cutting test of NC machine centre[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014(9):193-203.

[16] 黄强, 黄棋, 孙军伟. 面向加工精度的机床系统误差建模与分析方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(8): 64-71.

HUANG Qiang, HUANG Qi, SUN Junwei. Error modeling and analyzing method on the machine tool system aimed at machining precision[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2018, 32(8): 64-71.

[17] 刘又午, 刘丽冰, 赵小松, 等. 数控

机床误差补偿技术研究[J]. 中国机械工程, 1998(12):48-51.

LIU Youwu, LIU libing, ZHAO Xiaosong, et al. Research on error compensation technology of NC machine tools[J]. China Mechanical Engineering, 1998 (12): 48-51.

[18] 刘江南, 洪义海. 三轴数控平面磨床几何精度分析与稳健设计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(4): 1-8.

LIU Jiangnan, HONG Yihai. Analysis and robust design of geometric accuracy of a three-axis CNC surface grinding machine[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(4): 1-8.

[19] 张德丰. MATLAB概率与数理统计分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

ZHANG Defeng. MATLAB probability and mathematical statistics analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.

[20] 刘鹏, 洪军, 刘志刚, 等. 采用自适应遗传算法的机床公差分配研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 115-123.

LIU Peng, HONG Jun, LIU Zhigang, et al. Research on the tolerance allocation of machine tools based on adaptive genetic algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50 (1): 115-123.

[21] 李柱, 徐振高, 蒋向前. 互换性与测

量技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

LI Zhu, XU Zhengao, JIANG Xiangqian. Interchangeability and measurement technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.

[22] 刘兴兴. 精密卧式加工中心几何精度优化分配方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.

LIU Xingxing. Investigation into geometrical accuracy optimal distribution of high-precision horizontal machining centers[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

通讯作者: 胡腾, 博士, 研究方向为精密机床空间误差预报与补偿技术。

Methodology of Identifications and Tolerance Design of Machine Tools Crucial Geometric Error Elements

FAN Jia^{1,2}, ZHENG Hualin¹, HE Yong³, MI Liang⁴, HU Teng¹

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Sichuan Science and Technology Resource Sharing Service Platform of Oil and Gas Equipment Technology, Chengdu 610500, China;

3. China National Petroleum Corporation Chuanqing Drilling Training Center, Chengdu 610213, China;

4. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

[ABSTRACT] Facing the machining accuracies, a methodology of identifications and tolerance design of machine tools crucial geometric error elements (CGEE) is proposed. Taking a vertical machining center as the object, the volumetric error of machine tools is modeled based on screw theory. Combined with the volumetric error model and the definitions of machining accuracies, the machining accuracies evaluation models are established, and the indirect experimental verification strategies and implementation technologies are proposed. The CGEE can be identified by orthogonal experiment and statistical analysis, and the identification results are verified by numerical experiment. Then, the mapping relationship between machining accuracies and CGEE is constructed based on response surface method, and the tolerance design of the latter is transformed into an optimization problem. Genetic algorithm is used to obtain the optimal tolerance of CGEE. While the machining accuracies meet the requirements, the product cost of machine tool is the lowest, which shows that the proposed method is conducive to the robust design of machine tools accuracies.

Keywords: Machining accuracies; Machine tools; Crucial geometric error elements (CGEE); Identification; Tolerance design

(责编 古京)