

文章编号:1674-2974(2016)04-0001-08

三轴数控平面磨床几何精度分析与稳健设计^{*}

刘江南,洪义海[†]

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室,湖南 长沙 410082)

摘要:为了经济合理地分配三轴数控平面磨床零部件几何精度,提出了一种几何精度分析设计的方法.针对磨床具体结构,基于多体系统理论和齐次坐标变换方法,建立了磨床几何误差传递模型,并通过试验验证了该模型具有理想的预测性能;根据误差传递模型,运用正交试验设计和参数试验的试验设计方法分析识别了影响磨床加工精度的11项关键几何误差因素;基于稳健设计理论,在成本分析和误差溯源基础上,建立了11项关键几何误差因素下的磨床成本-质量模型,并运用该模型对关键几何误差因素的公差进行了稳健设计.研究表明:上述方法能实现对磨床几何精度的经济合理的分配.

关键词:平面磨床;多体系统;几何误差;误差模型;稳健设计

中图分类号:TH161

文献标识码:A

Analysis and Robust Design of Geometric Accuracy of a Three-axis CNC Surface Grinding Machine

LIU Jiang-nan, HONG Yi-hai[†]

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: In order to distribute the geometric errors of parts economically and reasonably, a method for the analysis and design of geometric accuracy was proposed. According to the specific structure of a three-axis CNC surface grinding machine, a geometric error propagation model including 21 parameters was established on the basis of multi-body system theory and homogeneous coordinate transformation method. The model was verified and it had ideal prediction accuracy. Key geometric errors were analyzed by using orthogonal design and parameter test of DOE methods. After cost analysis and error tracing, a cost-quality model for key geometric error variables was established on the basis of robust design theory. At last, the tolerances of key geometric error variables were distributed according to this model. The results have shown that the methods mentioned above are effective in the distribution of the geometric accuracy of grinding machine.

Key words: surface grinding machine; multi-body system; geometric errors; error propagation model; robust design

^{*} 收稿日期:2014-11-05

基金项目:国家重大科技专项项目(2011ZX04016-041-HD05)

作者简介:刘江南(1965-),女,湖南浏阳人,湖南大学教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: hongyihaismile@163.com

影响机床加工精度的各类误差主要有机床零部件的几何误差、热误差、载荷误差和伺服误差等,其中几何误差所占比重达 25%~35%^[1],故对几何精度的分析与研究是精度设计的主要工作.传统精度设计主要是经验设计,依靠经验的方法分配机床各零部件的公差等级.由于各环节误差对机床整体加工精度的影响程度不同,而且其精度控制实现的难易程度也不一样,传统的经验设计方法已经难以满足日益提高的精度要求^[2],因此,为满足机床加工精度的要求,建立机床的误差传递模型,分析影响机床加工精度的关键误差因素,并合理分配机床零部件的精度显得尤为重要.

建立准确有效的几何误差传递模型则是对几何精度进行分析和研究的首要条件.目前,以多体系统理论结合齐次坐标变换为基础的误差建模与分析方法已被普遍采用^[3].基于该方法,国内外众多学者在误差建模、误差分析等方面取得了一系列的进展^[4-9].在分析及识别影响加工精度的关键几何误差因素方面,黄强等^[10]以滚齿机 YK3610 为对象,介绍基于多体系统理论和齐次坐标变换的机床误差建模方法,并依托该模型对机床敏感误差辨识方法、步骤和关键点进行阐述.程强等^[11]基于多体系统理论构建加工中心的精度模型,并利用矩阵微分法建立四轴数控机床误差敏感度分析的数学模型,通过计算与分析误差敏感度系数,最终识别出影响机床加工精度的关键性几何误差.在分配机床零部件的精度方面,王禹林等^[12]基于多体系统理论建立螺杆转子磨床的精度模型,并综合考虑磨床整体精度和制造成本,提出一种精度分配优化方法,通过调整精度权数实现了不同应用需求的目标优化.余治民^[13]等基于多体系统理论建立龙门导轨磨床精度模型,分析了不同工作位置加工精度可靠性,针对最小可靠度工作位置进行灵敏度分析,并遵循精度均衡原则逐步优化误差变量的分布,实现了磨床精度的优化分配.但上述研究都没有把关键几何误差因素分析与识别和精度分配结合起来应用到机床的精度设计之中.

本文结合关键几何误差因素分析与识别方法和基于稳健设计理论的精度分配方法,对三轴数控平面磨床几何精度进行分析和设计.为有效识别影响磨床加工精度的关键几何误差因素,首先基于多体系统理论,建立三轴数控平面磨床的几何误差传递模型;然后采用正交试验设计和参数试验的试验设计方法分析识别关键几何误差因素;最后,建立关键几何误差因素的公差稳健设计的成本-质量模型,从而对其公差进行稳健设计.

1 三轴数控平面磨床结构拓扑分析和几何误差分析

1.1 磨床结构及其拓扑分析

三轴数控平面磨床主要包括以下功能部件:前后床身、工作台、立柱、主轴箱、主轴和砂轮,具体结构如图 1 所示.其中工作台沿床身 x 向导轨作横向运动,立柱沿床身 y 向导轨作纵向运动,主轴箱沿立柱 z 向导轨作垂向运动,主轴及砂轮固定在主轴箱上.拓扑结构描述多体系统各体之间的连接关系,磨床即是一个典型的多体系统,为便于误差建模,对其进行拓扑分析,磨床拓扑结构及低序体阵列分别如图 2 及表 1 所示.其中 $L^0(K)$ 等为低序体算子.

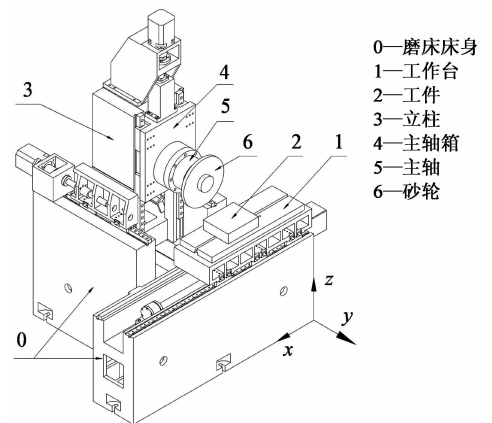


图 1 三轴数控平面磨床

Fig. 1 Three-axis CNC surface grinding machine

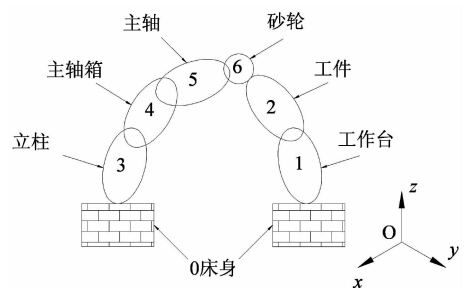


图 2 磨床拓扑结构

Fig. 2 Topology of grinding machine

表 1 三轴数控平面磨床低序体阵列
Tab. 1 Low body-array of grinding machine

K	1	2	3	4	5	6
$L^0(K)$	1	2	3	4	5	6
$L^1(K)$	0	1	0	3	4	5
$L^2(K)$	0	0	0	0	3	4
$L^3(K)$	0	0	0	0	0	3
$L^4(K)$	0	0	0	0	0	0

1.2 三轴数控平面磨床几何误差分析

机床几何误差是指由组成机床各零部件的几何形状、表面质量及相互之间的位置误差等制造和装配因素所导致的机床误差^[7]. 对于三轴数控平面磨床,当三平动进给轴 X, Y, Z 运动时,将分别产生 6 项几何误差. 以 X 进给轴为例,当工作台沿 x 向导轨运动时,将产生 3 项线性误差:定位误差 δ_{xx} , 两直线度误差 δ_{yx} 与 δ_{zx} , 以及 3 项角误差:滚转角误差 ϵ_{xx} , 俯仰角误差 ϵ_{yx} 与偏摆角误差 ϵ_{zx} , 如图 3(a) 所示. 另外, Y 进给轴相对于 X 进给轴存在垂直度误差 S_{xy} , Z 进给轴相对于 X 和 Y 进给轴分别存在垂直度误差 S_{xz} 和 S_{yz} , 如图 3(b) 所示.

综合可知,三轴数控平面磨床共有 21 项几何误差,表 2 详细列出了磨床各项几何误差的几何意义及其表达式. 为便于区分,对于除三项垂直度误差以外的 18 项误差,其误差符号下标定义如下:第一个下标表示误差方向,第二个下标表示运动方向.

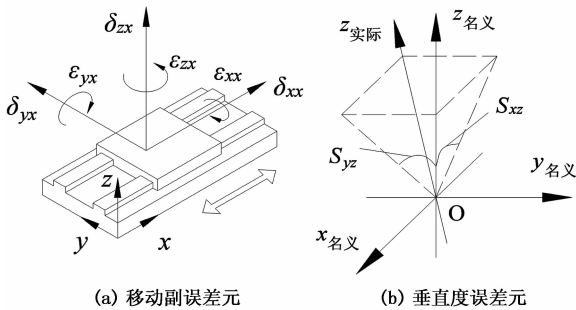


图 3 相邻典型体间误差元

Fig. 3 Errors of adjacent typical bodies

表 2 三轴数控平面磨床的几何误差及其表示
Tab. 2 Geometric errors of grinding machine

几何意义	表达式	几何意义	表达式		
X 进给轴平动	定位误差	δ_{xx}	定位误差	δ_{zz}	
	y 方向直线度误差	δ_{yx}	x 方向直线度误差	δ_{zx}	
	z 方向直线度误差	δ_{zx}	y 方向直线度误差	δ_{yz}	
	滚转误差	δ_{zx}	滚转误差	ϵ_{zz}	
	俯仰误差	ϵ_{yx}	俯仰误差	ϵ_{xz}	
	偏摆误差	ϵ_{zx}	偏摆误差	ϵ_{yz}	
	Y 进给轴平动	定位误差	δ_{yy}	X, Y 垂直度误差	S_{xy}
x 方向直线度误差		δ_{xy}	各平动进给轴间	Y, Z 垂直度误差	S_{yz}
z 方向直线度误差		δ_{zy}		X, Z 垂直度误差	S_{xz}
滚转误差		ϵ_{yy}			
俯仰误差		ϵ_{xy}			
偏摆误差		ϵ_{zy}			

2 三轴数控平面磨床几何误差传递模型及其试验验证

2.1 三轴数控平面磨床坐标系的建立

为便于磨床的误差建模,应建立磨床床身上的基坐标系和各部件上的局部坐标系. 具体设置如下:
1) 在磨床床身上建立基坐标系 $O_0x_0y_0z_0$, 其 x, y, z 轴方向分别与 X, Y, Z 三进给轴理想运动方向一致.

2) 分别在工件链部件和刀具链部件上建立局部坐标系 $O_i x_i y_i z_i (i=1 \sim 6)$, 各坐标系方向对应平行. 并设坐标系 $O_i x_i y_i z_i (i=1 \sim 6)$ 与基坐标系 $O_0 x_0 y_0 z_0$ 重合, 以便于建模.

2.2 三轴数控平面磨床运动分析及描述

将做相对运动的两相邻典型体状态分为运动初始时的相对静止和其后的相对运动两种状况, 则两相邻典型体之间的位姿变换可以由相对静止时的理想位姿矩阵、相对静止时的位姿误差矩阵、理想运动位姿矩阵和运动位姿误差矩阵相乘得到^[6], 如式(1)所示:

$$T_{ij} = T_{ijp} T_{ijpe} T_{ijs} T_{ijse} \quad (1)$$

根据磨床的结构和各部件之间的运动关系, 结合多体系统理论和齐次变换矩阵的方法, 可以建立磨床各部件之间的位姿变换矩阵.

2.2.1 磨床各部件典型体间相对静止时的位姿矩阵

工件与工作台之间, 主轴与主轴箱之间, 砂轮与主轴之间固定, 且相对静止时位姿误差只考虑垂直度误差, 根据前述坐标系的设定, 相对静止时的位姿误差矩阵如下所示, 其余各部件间矩阵均为单位矩阵:

$$T_{03pe} = \begin{pmatrix} 1 & -S_{xy} & 0 & 0 \\ S_{xy} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$T_{34pe} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & S_{xz} & 0 \\ 0 & 1 & -S_{yz} & 0 \\ -S_{xz} & S_{yz} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

2.2.2 磨床各部件典型体间相对运动时的位姿矩阵

工件与工作台之间, 主轴与主轴箱之间, 砂轮与主轴之间固定, 故相对运动时的位姿变换矩阵均为单位矩阵.

工作台相对于床身运动 a 时的理想与误差位姿变换矩阵分别为:

$$T_{01s} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$T_{01sw} = \begin{pmatrix} 1 & -\epsilon_{zx} & \epsilon_{yx} & \delta_{xx} \\ \epsilon_{zx} & 1 & -\epsilon_{xy} & \delta_{yx} \\ -\epsilon_{yx} & \epsilon_{xx} & 1 & \delta_{xy} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

同理,可求得立柱相对于床身运动 b , 主轴及主轴箱相对于立柱运动 c 时的理想与误差齐次变换矩阵.

2.3 三轴数控平面磨床几何误差传递模型

设砂轮成形点在砂轮坐标系 $O_6x_6y_6z_6$ 中的齐次坐标为: $P_t = (P_{tx} \ P_{ty} \ P_{tz} \ 1)^T$, 则砂轮成形点在磨床基坐标系中的齐次坐标为:

$$P_{0t} = \left(\prod_{m=r, L^r(c_t)}^{m=1} T_{L^m(c_t)L^{m-1}(c_t)} \right) P_t. \quad (2)$$

式中: $L^m(t)$, $L^{m-1}(t)$, 均为低序体算子, 见表 1.

工件上成形点在工件坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 中的齐次坐标为: $P_w = (P_{wx} \ P_{wy} \ P_{wz} \ 1)^T$, 则工件成形点在磨床基坐标系中的齐次坐标为:

$$P_{0w} = \left(\prod_{n=r, L^r(c_w)}^{n=1} T_{L^n(c_w)L^{n-1}(c_w)} \right) P_w.$$

由成形原理可知, 在理想情况下, P_{0t} 与 P_{0w} 在磨床工作空间应是重合的, 但在实际加工过程中, P_{0t} 与 P_{0w} 不可避免会发生偏离, 从而产生空间位置误差. 它们之间的偏差即为磨床空间位置误差, 则有:

$$E = (E_x \ E_y \ E_z \ 1)^T = P_{0t} - P_{0w}. \quad (3)$$

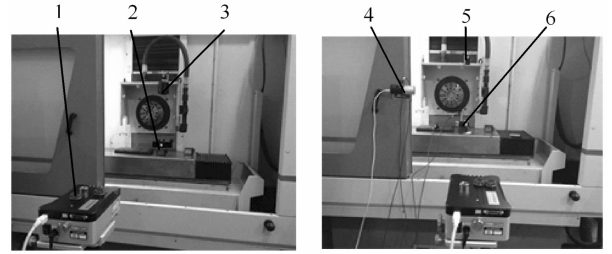
式中: E_x, E_y, E_z 为空间位置误差在 x, y, z 三向分量. 式(3)即为三轴数控平面磨床的误差传递模型, 它由磨床各部件的几何误差组成.

2.4 几何误差传递模型的试验验证

几何误差检测方法主要有 9 线法、14 线法、22 线法等, 其中 9 线法测量线路少, 测量时机床不需要多进给轴进行联动, 操作相对简单, 效率高, 因此, 本文采用 9 线法测量辨识磨床 21 项几何误差.

利用 Renishaw 公司的 XL-80 激光干涉仪系统, 采用 9 线法原理, 测量磨床 21 项几何误差. 试验时工作台和立柱静止不动, 主轴沿立柱上 z 向导轨运动, 在 z 向工作行程范围内取 19 个测量点, 通过试验测量得到主轴运动到 19 个测量点位置处砂轮工作点 x, y 和 z 三个方向上的位移误差以及分别与之对应的 21 项几何误差, 测量现场如图 4 所示.

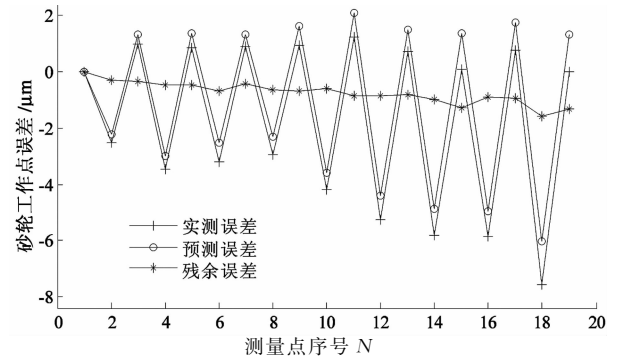
将相应测得的 21 项几何误差代入式(2)中, 即可求得砂轮工作点 x, y 和 z 三向误差. 将计算结果与试验测量结果进行比较, 检验模型的预测精度, 结



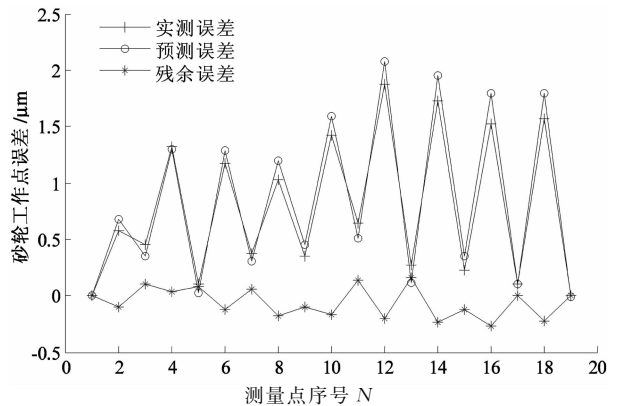
(a) 直线度误差测量 (b) 定位误差测量
1—XL-80 激光干涉仪; 2—直线度干涉镜; 3—直线度反射镜
4—XC-80 环境补偿器; 5—线性反射镜; 6—线性干涉镜

图 4 误差测量现场

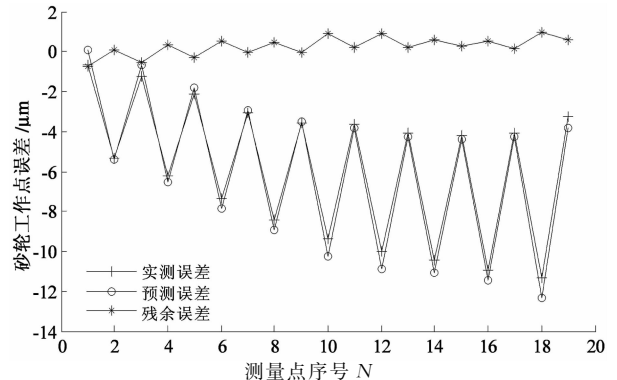
Fig. 4 Error measurement



(a) 砂轮工作点 x 向误差



(b) 砂轮工作点 y 向误差



(c) 砂轮工作点 z 向误差

图 5 实测误差与预测误差对比

Fig. 5 Measured error and prediction error comparison

果如图 5 及表 3 所示. 其中: 残余误差 = 实测误差 - 预测误差.

表 3 为残余误差与实测误差在最大绝对误差及误差均值方面的数据对比,综合图 5 及表 3 数据分析发现:模型预测误差值最低能达到实测误差值的 80%,最高达到 95%,因此几何误差传递模型具有比较理想的预测性能。

表 3 几何误差传递模型性能指标
Tab. 3 Performance index of geometric error propagation model

方向	误差名称	最大绝对误差 / μm	误差均值 / μm
x 向	实测误差	7.575	-1.813 2
	残余误差	1.570	-0.747 0
y 向	实测误差	1.875	0.776 3
	残余误差	0.272	-0.059 5
z 向	实测误差	11.325	-5.747 4
	残余误差	0.975	0.255 2

3 三轴数控平面磨床关键几何误差识别

根据加工原理可知,在被加工表面的法线方向上,刀具与工件的相对位置误差将最大程度地反映为加工误差.对于三轴数控平面磨床,根据坐标系的设置可知,被加工平面的法线方向为 z 向,因此磨床空间位置误差 z 向分量 E_z 为重点关注对象.由此将对 E_z 影响较大的几何误差因素看做关键几何误差.本文采用正交试验设计和参数试验的试验设计方法分析识别磨床关键几何误差。

3.1 正交试验设计

正交试验设计 (Orthogonal Design) 是利用正交表科学地安排与分析多因素试验的方法,对试验结果进行方差分析可以解析各试验因素对试验结果影响的重要程度。

对于 21 项几何误差的正交试验设计,选取三水平的等水平正交表 $L_{54}(3^{25})$,根据误差测量试验数据确定水平值表,见表 4.根据误差模型,编写 MATLAB 程序,进行试验计算,并对结果进行方差分析^[14],如表 5 所示,其中“*”表示高度显著。

表 4 21 项几何误差因素水平值表
Tab. 4 Values of 21 geometric errors

水平	δ_{xx}	δ_{xy}	δ_{xz}	δ_{yx}	δ_{yy}	δ_{yz}	δ_{zx}
1	5	4	2	0.4	3	1	0.2
2	9	10	6	1.2	6	2	0.6
3	13	16	10	2	9	3	1
水平	δ_{zy}	δ_{zz}	δ_{xx}	δ_{xy}	δ_{xz}	δ_{yx}	δ_{yy}
1	0.4	5	1	3	3	2	1
2	1.2	9	2	5	6	5	2
3	2	13	3	7	9	8	3
水平	ϵ_{yz}	ϵ_{zx}	ϵ_{zy}	ϵ_{zz}	ϵ_{xy}	ϵ_{yz}	ϵ_{xz}
1	1	2	1	1	3	1	6
2	2	5	3	2	10	2	14
3	3	8	5	3	17	3	22

表 5 方差分析表
Tab. 5 ANOVA table

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	F_α	显著性
δ_{xx}	6.403 7e-09	2	3.201 9e-09	9.605 6e-01	3.354 1;5.488 1	
δ_{xy}	4.559 3e-09	2	2.279 6e-09	6.838 9e-01	3.354 1;5.488 1	
δ_{xz}	8.425 9e-09	2	4.213 0e-09	1.263 9e+00	3.354 1;5.488 1	
δ_{yx}	2.604 4e-05	2	1.302 2e-05	3.906 7e+03	3.354 1;5.488 1	*
δ_{yy}	2.487 5e-05	2	1.243 7e-05	3.731 2e+03	3.354 1;5.488 1	*
δ_{yz}	1.011 5e-08	2	5.057 4e-09	1.517 2e+00	3.354 1;5.488 1	
δ_{zx}	6.028 7e-06	2	3.014 4e-06	9.043 1e+02	3.354 1;5.488 1	*
δ_{zy}	2.341 5e-05	2	1.170 7e-05	3.512 2e+03	3.354 1;5.488 1	*
δ_{zz}	5.807 3e-04	2	2.903 7e-04	8.711 0e+04	3.354 1;5.488 1	*
ϵ_{xx}	9.633 7e-08	2	4.816 9e-08	1.445 1e+01	3.354 1;5.488 1	*
ϵ_{xy}	2.128 0e-07	2	1.064 0e-07	3.192 1e+01	3.354 1;5.488 1	*
ϵ_{xz}	8.240 0e-07	2	4.120 0e-07	1.236 0e+02	3.354 1;5.488 1	*
ϵ_{yx}	7.066 7e-07	2	3.533 4e-07	1.060 0e+02	3.354 1;5.488 1	*
ϵ_{yy}	6.334 8e-08	2	3.167 4e-08	9.502 2e+00	3.354 1;5.488 1	*
ϵ_{yz}	1.959 6e-07	2	9.798 0e-08	2.939 4e+01	3.354 1;5.488 1	*
ϵ_{zx}	4.537 0e-09	2	2.268 5e-09	6.805 6e-01	3.354 1;5.488 1	
ϵ_{zy}	1.247 0e-08	2	6.235 2e-09	1.870 6e+00	3.354 1;5.488 1	
ϵ_{zz}	7.959 3e-09	2	3.979 6e-09	1.193 9e+00	3.354 1;5.488 1	
S_{xy}	3.981 5e-09	2	1.990 7e-09	5.972 2e-01	3.354 1;5.488 1	
S_{yz}	7.974 8e-08	2	3.987 4e-08	1.196 2e+01	3.354 1;5.488 1	*
S_{xz}	6.943 3e-06	2	3.471 7e-06	1.041 5e+03	3.354 1;5.488 1	*
空列	3.154 8e-08	8	3.943 5e-09	1.183 1e+00	2.305 3;3.255 8	
误差	9.000 0e-08	27	3.333 3e-09			
总和	6.703 1e-04	53				

对于表 4 中线性误差值,其单位为 mm,对于角误差和垂直度误差,其单位为 μrad , $0.01/1000=10 \times 10^{-6}=10 \mu\text{rad}$.对于表 5 中 F_α 值, α 取 0.01 及 0.05。

从方差分析表可知,对磨床工作空间位置误差 z 向分量 E_z 影响大的几何误差因素为: $\delta_{yx}, \delta_{yy}, \delta_{zx}, \delta_{zy}, \delta_{zz}, \epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{yx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{yz}, S_{yz}, S_{xz}$ 。

3.2 几何误差参数试验

参数试验研究每一个设计因子独立于其他所有因子情况下对响应的敏感性,即一次改变一个参数来分析参数对响应的影响.根据式(3),对于磨床 21 项几何误差的参数试验有:

$$\Delta E = F(u_1, u_2, u_i + \Delta u, \dots, u_{21}) - F(u_1, u_2, \dots, u_{21}). \quad (4)$$

式中: $u_i (i=1 \sim 21)$ 表示 21 项几何误差。

根据式(4)对 21 项几何误差进行参数试验,初始值均设为 0,线性误差单位微变量取 0.001 mm,角误差和垂直度误差单位微变量取 $10 \mu\text{rad}$.试验结果见表 6。

对表 6 几何误差参数试验结果分析:

1)单位各线性误差微变量均等大小地反映在误差的同一方向上,但其值可正可负.凡是引起 E_z 变化的误差因素,均为敏感误差。

2)单位各角误差及垂直度误差微变量引起的空间位置误差变化存在较大的差异,但其数值的大小基本相同,且相对于单位微变量有较大的误差放大效应.对于引起 E_z 变化的误差因素,均为敏感误差,在设计中应加以严格的控制.

表 6 21 项几何误差参数试验
Tab. 6 Parameter study of 21 geometric errors

误差源	结果偏差			
	$\Delta E_x/\text{mm}$	$\Delta E_y/\text{mm}$	$\Delta E_z/\text{mm}$	
线性误差	δ_{xz}	1.00e-03	0	0
	δ_{xy}	-1.00e-03	0	0
	δ_{xz}	-1.00e-03	0	0
	δ_{yz}	0	1.00e-03	0
	δ_{xy}	0	-1.00e-03	0
	δ_{yz}	0	-1.00e-03	0
	δ_{xz}	0	0	1.00e-03
	δ_{xy}	0	0	-1.00e-03
	δ_{xz}	0	0	-1.00e-03
角度误差	ϵ_{xz}	0	0	5.00e-04
	ϵ_{xy}	0	0	-4.50e-04
	ϵ_{xz}	0	-5.00e-05	-4.50e-04
	ϵ_{yz}	0	0	-5.00e-04
	ϵ_{xy}	0	0	5.50e-04
	ϵ_{yz}	5.00e-05	0	5.50e-04
	ϵ_{xz}	-5.00e-04	5.00e-04	0
	ϵ_{xy}	4.50e-04	-5.50e-04	0
	ϵ_{xz}	4.50e-04	-5.50e-04	0
垂直度误差	S_{xy}	5.00e-04	-5.50e-04	0
	S_{yz}	0	0	-4.50e-04
	S_{xz}	0	0	5.50e-04

3.3 关键几何误差识别

综合几何误差正交试验设计和参数试验的结果发现:两者关键几何误差分析识别结果基本一致,而对于 δ_{yz} 和 δ_{xy} 两项,根据前述误差方向的定义, δ_{yz} 和 δ_{xy} 两误差方向均为 y 向,与敏感误差方向^[10]即 z 向垂直,因此不予以重点关注.综上,关键几何误差因素为 δ_{xz} , δ_{xy} , δ_{xz} , ϵ_{xz} , ϵ_{xy} , ϵ_{xz} , ϵ_{yz} , ϵ_{xy} , ϵ_{yz} , S_{yz} 和 S_{xz} 共 11 项.

4 关键几何误差的公差稳健设计

基于稳健设计理论,利用最优拉丁超立方试验设计获取试验数据,结合 Isight 软件建立磨床加工精度质量水平的响应面近似模型;考虑产品全寿命周期,在成本分析和误差溯源的基础上,建立磨床加工精度的成本-质量模型,从而实现关键几何误差公差的稳健设计.

4.1 响应面法求解磨床加工精度质量水平

磨床的加工精度属于望小特性类型的质量特征,且其质量损失函数是关键几何误差因素的函数,则有:

$$L(y) = Ky^2 = G(V).$$

式中: $V=(v_1, v_2, \dots, v_{11})$ 表示 11 项关键几何误差因素; K 为质量损失系数(常数).

若产品质量特性 y 表现为随机性,即 $L(y)$ 为随机变量时,产品的质量水平可用质量损失函数 $L(y)$ 的期望值来表示^[15],如式(5)所示.现代机械精度设计理论表明,机床零部件的几何误差均为随机量.因此,由零部件几何误差导致的机床加工误差也是随机量,则磨床加工精度的质量水平可由式(5)来表示:

$$E\{L(y)\} = KE\{y^2\} = K(\sigma_y^2 + \mu_y^2). \quad (5)$$

由误差模型可知,加工精度质量损失函数的结构复杂,且高度非线性,难以直接求解其期望值.为此,采用二阶多项式形式的响应面方法构造磨床加工精度质量损失函数的响应面近似模型,从而求解加工精度质量水平.二阶响应面模型一般形式如下所示:

$$\hat{L}(y) = \hat{G}(V) = a_0 + \sum_{i=1}^{11} b_i v_i + \sum_{i < j}^{11} c_{ij} v_i v_j + \sum_{i=1}^{11} d_i v_i^2.$$

式中: a_0, b_i, c_{ij}, d_i 为未知系数,共 78 项.从而可以求得磨床加工精度的质量水平如式(6)所示,其中 μ_{v_i} 表示 v_i 的期望, $\sigma_{v_i}^2$ 表示 v_i 的方差.

$$C_q(y) = E\{\hat{L}(y)\} = a_0 + \sum_{i=1}^{11} b_i \mu_{v_i} + \sum_{i < j}^{11} c_{ij} \mu_{v_i} \mu_{v_j} + \sum_{i=1}^{11} d_i (\mu_{v_i}^2 + \sigma_{v_i}^2). \quad (6)$$

一般情况下机床几何误差可以看做是服从正态分布,且几何误差均值 μ 为 0,则几何误差的标准差 σ 与其公差 T 之间关系如式(7)所示.这里的几何误差的公差 T 就是允许几何误差变动的范围.

$$T = 6\sigma. \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)中即可求得用关键几何误差的公差表示的磨床加工精度质量水平为:

$$C_q(T) = a_0 + \sum_{i=1}^{11} d_i \left(\frac{T_i}{6}\right)^2. \quad (8)$$

4.2 磨床加工精度的成本-质量模型

产品寿命周期成本一般包括生产成本和使用成本,且一般情况下产品质量越高,生产成本则越高,而使用成本越低.故产品的使用成本可以表示为与产品的质量损失成正比^[15],如式(9)所示,其中 λ 为比例系数(常数).

$$C_u(T) = \lambda E\{L(y)\} = \lambda C_q(T). \quad (9)$$

本文选用加工特征模型来表示生产成本与公差之间的函数关系,通过对关键几何误差因素进行误差溯源,分析误差产生的原因,进而选用加工特征模型.

对于 11 项关键几何误差因素,其与磨床零部件精度的对应关系如下^[5]:

- 1) δ_{zx} 对应丝杠的螺距累计误差,即丝杠螺母副的制造精度;
- 2) $\delta_{zy}, \delta_{zx}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{xy}$ 和 ϵ_{yx} 对应各导轨在其垂直面内的直线度误差;
- 3) ϵ_{yz} 对应各导轨在其水平面内的直线度误差;
- 4) $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ 对应导轨的平行度误差;
- 5) S_{xz}, S_{yz} 与各导轨的直线度及导轨长度有关。

其中,导轨的直线度和平行度与导轨各尺寸有关,而导轨尺寸属于平面特征尺寸;丝杠的螺距则可以看做定位特征尺寸。

根据上述误差溯源的分析,对于 $\delta_{zy}, \delta_{zx}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yx}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, S_{xz}$ 和 S_{yz} 这 10 个误差可采用我国中型机械类企业在中等批量加工时,平面特征尺寸加工的成本-公差模型;对于定位误差 δ_{zx} ,可选用定位特征尺寸加工的成本-公差模型^[16],分别如下所示。

$$C(T) = \begin{cases} 5.026 1e^{-15.890 3T} + \frac{T}{0.392 7T + 0.117 6}, & T \leq 0.165; \\ 1.273 338, & T > 0.165. \end{cases}$$

$$C(T) = \begin{cases} 13.311 4Te^{\frac{0.043 8}{T}} + 7.659 3e^{-25.173 1T}, & T \leq 0.11; \\ 1.463 467, & T > 0.11. \end{cases}$$

则磨床整体的生产成本为各项加工成本之和,如式(10)所示:

$$C_m(T) = \sum_{i=1}^{11} C_i(T_i). \quad (10)$$

结合式(8),(9),(10)可得到低成本高质量的磨床几何误差的公差稳健设计的准则函数为:

$QC(T) = WC_q(T) + (1 - W)[C_m(T) + C_u(T)]$. 式中: $W \in (0, 1)$ 为加权因子,一般取 $W > 0.5$ 以确保产品质量.从而可建立磨床几何误差公差稳健设计的成本-质量模型,如式(11)所示。

$$\begin{cases} \min_T & QC(T), \\ \text{s. t.} & T^L \leq T_i \leq T^U. \end{cases} \quad (11)$$

4.3 磨床关键几何误差的公差的稳健设计

以 11 项关键几何误差为设计变量,以磨床工作空间位置误差 z 向分量 E_z 为分析目标,利用最优拉丁超立方试验设计的方法生成试验数据,并代入式(3)的误差传递模型中,得到相应的试验结果即 E_z 值.根据试验结果,应用 Isight 软件中的最小二乘法拟合响应面,从而得到式(8)中磨床加工精度质量水平的二阶响应面模型函数的未知系数,见表 7。

对上述响应面近似模型进行适应性检验,其结果见表 8.根据检测结果可知,模型可靠性在允许精度范

围(大于 0.9)内.则由试验数据拟合的响应面近似模型代替实际模型进行进一步的研究.表中 R^2 为决定系数, R_c^2 为调整的决定系数,用来验证响应面模型的拟合程度。

表 7 加工精度质量水平的响应面模型系数
Tab.7 Coefficients of response surface model

系数	a_0	d_1	d_2	d_3
值	-3.595e-07	0.772 3	0.955 1	0.998 9
系数	d_4	d_5	d_6	d_7
值	-19 134.871 9	-2 444.941 5	-504.257 2	-637.817 1
系数	d_8	d_9	d_{10}	d_{11}
值	-19 605.470 3	-20 217.971 2	-19 748.341 8	2 584.647 3

表 8 模型可靠性验证结果
Tab.8 Model reliability verify results

分析目标	$L(y)$
R^2	0.999 9
R_c^2	0.997

根据现有一般数控设备能达到的精度和中华人民共和国卧轴矩台平面磨床精度检验标准(GB/T4022—2007),确定式(11)中几何误差的公差值,见表 9.这里的公差值是指公差带宽度,也就是允许几何误差变动的范围值。

表 9 几何误差公差值
Tab.9 Values of geometric error tolerance

误差变量	δ_{zx}	δ_{zy}	δ_{zz}	ϵ_{xx}
公差/mm	0.005~0.010	0.005~0.010	0.005~0.015	0~0.04/1000
误差变量	ϵ_{xy}	ϵ_{xz}	ϵ_{yx}	ϵ_{yy}
公差/mm	0~0.04/1000	0~0.04/1000	0~0.04/1000	0~0.04/1000
误差变量	ϵ_{yz}	S_{yz}	S_{zx}	
公差/mm	0~0.04/1000	0~0.04/300	0~0.02/500	

取 $W=0.7, \lambda=1$,根据成本-质量模型,结合 Isight 软件对几何误差公差进行稳健设计,得到稳健设计的公差值见表 10。

表 10 几何误差公差稳健设计值
Tab.10 Values of geometric error tolerance robust design

误差变量	δ_{zx}	δ_{zy}	δ_{zz}	ϵ_{xx}
公差/mm	0.010 0	0.009 7	0.014 9	0.039 3/1 000
误差变量	ϵ_{xy}	ϵ_{xz}	ϵ_{yx}	ϵ_{yy}
公差/mm	0.030 3/1 000	0.029 8/1 000	0.033 3/1 000	0.027 6/1 000
误差变量	ϵ_{yz}	S_{yz}	S_{zx}	
公差/mm	0.033 3/1 000	0.038 8/300	0.003 0/500	

5 结论

1)建立了磨床几何误差传递模型,且经过试验验证,模型具有比较理想的预测性能。

2)运用正交试验设计和参数试验的试验设计方法,识别出了影响磨床加工精度的关键几何误差因素,即: δ_{zx} 、 δ_{zy} 、 δ_{zz} 、 ϵ_{rx} 、 ϵ_{ry} 、 ϵ_{rz} 、 ϵ_{yx} 、 ϵ_{yy} 、 ϵ_{yz} 、 S_{yz} 和 S_{xz} 共11项。

3)结合最优拉丁超立方试验设计及响应面的方法,在成本分析和误差溯源的基础上,建立了磨床几何误差公差稳健设计的成本-质量模型,并实现了几何误差的公差的稳健设计。

研究表明,本文几何精度分析与设计的过程及结果为高效合理分配磨床精度、实现可行的磨床精度设计提供了理论依据和实践参考。

参考文献

- [1] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Error compensation in machine tool—a review part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, 40(9): 1235—1256.
- [2] 康方. 数控机床制造精度分配优化方法的研究[D]. 北京: 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 2008.
KANG Fang. Research on method of CNC machine tool manufacturing accuracy distribution and optimization [D]. Beijing: College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, 2008. (In Chinese)
- [3] 李圣怡, 戴一凡. 精密和超精密机床精度建模技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007.
LI Sheng-yi, DAI Yi-fan. Accuracy modeling technology of precision and ultra-precision machine tool[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2007. (In Chinese)
- [4] 刘志峰, 刘广博, 程强, 等. 基于多体系统理论的精密立式加工中心精度建模与预测[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2012, 42(2): 388—391.
LIU Zhi-feng, LIU Guang-bo, CHENG Qiang, et al. Precision modeling and prediction of precise vertical machining center based on theory of multi-body system[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2012, 42(2): 388—391. (In Chinese)
- [5] 刘婷婷, 李新平, 汪惠芬, 等. 基于多体系统理论的机床静态精度分析方法研究[J]. *航空精密制造技术*, 2012, 48(2): 28—31.
LIU Ting-ting, LI Xin-ping, WANG Hui-fen, et al. Method of static precision digital analysis of machine tool based on theory of multi-body system[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2012, 48(2): 28—31. (In Chinese)
- [6] 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 Fei-fei, 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. (In Chinese)
- [7] KHAN A W, CHEN W Y. Systematic geometric error modeling for workspace volumetric calibration of a 5-axis turbine blade grinding machine[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, 23(9): 604—615.
- [8] ZHU Shao-wei, DING Guo-fu, YAN Kai-yin, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 52(1): 24—29.
- [9] MAJDA P. Modeling of geometric errors of linear guideway and their influence on joint kinematic error in machine tools[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(3): 369—378.
- [10] 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 Gen-bao, ZHANG Xin-yu. Sensitivity analysis of the pose error of machine tool[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(6): 141—146. (In Chinese)
- [11] 程强, 刘广博, 刘志峰, 等. 基于敏感性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 Guang-bo, LIU Zhi-feng, et al. An identification approach for key geometric error source of machine tool based on sensitivity analysis[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(7): 171—179. (In Chinese)
- [12] 王禹林, 陶丽佳, 孙文钊, 等. 基于多体系统理论的螺杆转子磨床精度分析与优化[J]. *南京理工大学学报*, 2012, 36(6): 1015—1020.
WANG Yu-lin, TAO Li-jia, SUN Wen-zhao, et al. Accuracy analysis and optimization of screw rotor grinding machine based on multi-body system theory[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2012, 36(6): 1015—1020. (In Chinese)
- [13] 余治民, 刘子建, 艾彦迪, 等. 大型数控龙门导轨磨床几何误差建模与基于可靠性理论的精度分配[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(17): 142—151.
YU Zhi-min, LIU Zi-jian, AI Yan-di, et al. Geometric error model and precision distribution based on reliability theory for large CNC gantry guideway grinder[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(17): 142—151. (In Chinese)
- [14] 王岩, 隋思莲. 试验设计与 MATLAB 数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 153—173.
WANG Yan, SUI Si-lian. Experimental design and MATLAB data analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 153—173. (In Chinese)
- [15] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 278—286.
CHEN Li-zhou. Robust design[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 278—286. (In Chinese)
- [16] 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: 409—410.
LI Zhu, XU Zhen-gao, JIANG Xiang-qian. Geometric product specifications and verification[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 409—410. (In Chinese)