

DOI : 10.3901/JME.2013.17.065

# 大尺寸轴对称非球面磨削精度建模和分析\*

林晓辉<sup>1</sup> 郭隐彪<sup>1</sup> 王振忠<sup>1</sup> 许 乔<sup>2</sup>

(1. 厦门大学机电工程系 厦门 361005 ;

2. 中国工程物理研究院激光聚变研究所 绵阳 621900)

**摘要：**运用刚体运动学理论和坐标变换，建立高精度平面磨床的通用误差模型。针对大尺寸轴对称非球面工件的高精度加工要求，采用光栅式平行磨削的加工方式。根据这种非球面磨削方式和高精度平面磨床的结构，给出影响大尺寸非球面加工精度的主要误差因素，并建立基于这些主要误差因素的大尺寸非球面误差模型。对主要单项误差的分析表明，磨床的直线度及定位精度误差和圆弧半径误差是影响面形分布的主要因素，而面形误差值则是各个误差综合作用的结果。通过误差模型可以预测面形误差分布和大小，并可以利用该模型进行补偿加工。加工试验结果表明，该模型能够比较准确地预测面形精度，补偿试验后精度提高，说明利用该模型进行补偿是有效的。

**关键词：**大尺寸轴对称非球面 刚体运动学 光栅式平行磨削 精度建模 面形精度

**中图分类号：**TH161

## Precision Model and Analysis of Large Axisymmetric Aspheric Grinding

LIN Xiaohui<sup>1</sup> GUO Yinbiao<sup>1</sup> WANG Zhenzhong<sup>1</sup> XU Qiao<sup>2</sup>

1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

**Abstract :** The general error model of high precision surface grinder is presented by using rigid body kinematics theory and coordinate transformation. To meet the machining requirement of large axisymmetry aspheric lens, the grating parallel grinding method is adopted. Considering high precision surface grinder structure and the main error factors affect the machining accuracy of large aspheric, a large axisymmetric aspheric error model is proposed, which can be used to predict surface accuracy and compensation grinding. The main error factors are discussed and it is shown that the straightness error, positioning error and arc radii error are main errors that effect surface error distribution, meanwhile, surface error value is the mixed result of each individual error. The experiments are carried out and in agreement with the theoretical results. The grinding experiment shows that the model can well predict surface accuracy and surface accuracy is improved after compensation grinding

**Key words :** Large axisymmetry aspheric Rigid body kinematics Grating parallel grinding Precision model Surface accuracy

## 0 前言

大口径光学非球面在国家重大光学工程及国防尖端技术中需求急速增长，然而这类元件对面形精度要求极高，而磨削作为控制面形精度的重要环节，故控制磨削过程中的精度问题显得尤为重要。工件的精度问题实际上是机床-工件系统的各个单项误差的共同作用结果，包括各个部分的尺寸、形状误差以及相互运动产生的误差。通过建立机床精

度模型可以反应各零部件与整机精度的关系，准确进行精度预测和提高工件的精度<sup>[1]</sup>。

如今，精密加工技术得到长足的发展，国内外众多学者致力于磨削误差、补偿及精度的研究。FERREIRA 等<sup>[2]</sup>基于刚体运动学和小角度近似假设，给出了多轴机床几何误差的多项式分析模型，并推出了二次线性化模型，预测和补偿二次误差项。CHATTERJEE<sup>[3]</sup>应用矢量链的表达方式建立了多轴机床的空间误差模型。康念辉等<sup>[4]</sup>基于多体系统理论建立了轴对称非球面的误差模型，并进行了补偿。黄浩等<sup>[5]</sup>提出了适用于非球面加工的工件表面误差多参数分布分离的数学模型，有效减小加工误差，

\* 国家科技重大专项(2011ZX04004-061)和国家自然科学基金(51075343)资助项目。20121010 收到初稿，20130624 收到修改稿

提高工件的加工精度。姜晨等<sup>[6]</sup>提出了倾角可调夹具与磨床协调完成离轴楔形非球面的加工方法,并分析了加工中的插补误差及形面误差,最后进行补偿加工,得到理想效果。

总体来讲,对于非球面的误差模型讨论大多是针对静态误差或准静态误差的分析以及对各单项误差的分离补偿,且对于大尺寸的非球面光学元件的加工方式及其精度误差模型研究较少。本文基于光栅式平行磨削的加工方式,利用刚体运动学理论对大尺寸轴对称非球面进行精度建模,分析单项误差的影响程度,预测面形精度并进行综合误差补偿。试验表明该模型较为准确。

## 1 非球面的加工方式

常见的轴对称非球面磨削方式有杯形砂轮磨削、平行砂轮磨削和球形砂轮磨削。而在平面磨床上加工,使用圆弧砂轮和三轴联动的加工方式,这种加工方式不仅可以加工轴对称非球面,而且可以加工其他类型的非球面,如楔形、离轴和非轴对称非球面。

对于大尺寸的非球面光学元件而言,采用工件回转运动的方式加工对回转精度要求很高,再加上加工类型有限,因此更倾向在精密的平面磨床上加工非球面。非球面磨削加工时,使得砂轮的切削方向和工件的运动方向相同,即砂轮线速度与工件速度方向平行,则圆弧金刚石砂轮上的磨削点轨迹呈圆周分布,如图 1 所示。磨削时砂轮上磨削点是移动的,即参与磨削的有效切削刃增多,砂轮有效使用宽度增大,砂轮磨损明显减小,该方式称为平行磨削方式。试验结果表明,平行磨削加工比横向磨削能获得更好的表面加工质量。本文所采用的加工方式是光栅式平行磨削<sup>[7-9]</sup>。

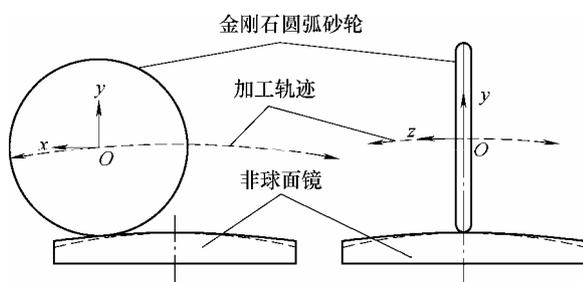


图 1 光栅式平行磨削

## 2 磨床通用精度建模

非球面加工过程中存在着许多误差,主要包

括:几何误差,热误差、插补误差、砂轮误差和主轴误差等。基于刚体运动学理论,加工工件时,刀具相对于工件的运动误差可由位置特征误差矩阵、运动特征误差矩阵来加以确定。

理想情况下,工件加工点的位置矢量与刀具的加工点位置矢量是一致的。根据坐标变换理论,假设加工点  $P$  在工件坐标系  $W$  中的齐次坐标为  $P_W$ ,在刀具坐标系  $T$  中的齐次坐标为  $P_T$ 。则它们之间的关系可以表示为

$$T_i \Phi_i P_T = T_j \Phi_j P_W \quad (1)$$

式中  $T_i, T_j$ ——位置特征误差矩阵

$\Phi_i, \Phi_j$ ——运动特征误差矩阵

实际加工中,不可能出现理想情况,故实际情况下的磨床的误差模型为

$$e = P_W - T_{res} P_T \quad (2)$$

式中,  $T_{res} = (T_j \Phi_j)^{-1} T_i \Phi_i$ 。式(2)是数控磨床的通用误差模型。

## 3 非球面精度建模

图 2 为加工大尺寸非球面元件的高精度数控平面磨床 2MK1760 的结构简图。

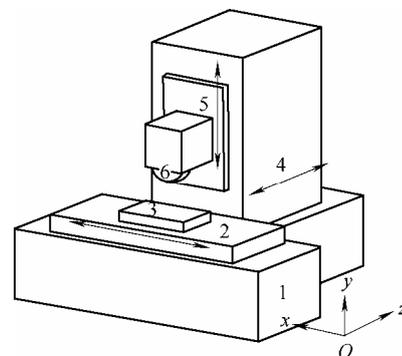


图 2 2MK1760 结构简图

1. 底座 2. 工作台 3. 工件 4. 立柱 5. 主轴箱 6. 砂轮

底座 1 自由度为零,工作台 2 在底座 1 上沿  $x$  轴直线运动,工件 3 固定在工作台 2 上,立柱 4 在底座 1 上沿着  $z$  轴直线运动,主轴箱 5 在立柱 4 上沿着  $y$  轴运动,砂轮 6 有 1 个旋转自由度。

针对本台磨床的结构,其具体误差模型为

$$e = P_W - (T_1 \Phi_1)^{-1} (T_2 \Phi_2)^{-1} T_3 \Phi_3 T_4 \Phi_4 T_5 \Phi_5 P_T \quad (3)$$

式中,  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$  为各个部件位置特征误差矩阵;  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5$  为各个部件运动特征误差矩阵。

数控机床加工工件的精度与机床、刀具、加工工艺和加工环境等一系列因素有关。相关资料表明

机床的几何误差、热变形误差、刀具误差等对加工精度占到70%以上。具体到本磨床，由于磨床放置于恒温车间，温度严格控制 $20 \pm 0.1$ ，磨削液温度控制 $20 \pm 0.1$ ，温度影响并不大，故不予考虑。所以本文主要考虑磨床几何误差、刀具误差和插补误差。

理论上，三轴加工中心几何误差包含21项，每轴有6个误差元素，另外还包含三轴间的垂直度误差。由于加工方式为光栅式平行磨削，故认为加工非球面的主要影响的几何误差因素为 $x, z$ 方向的直线度误差，定位误差和 $y$ 向定位误差。刀具误差主要表现为圆弧半径误差，误差模型简化为

$$e = P_w - (T_1 \Phi_1)^{-1} T_3 \Phi_3 T_4 \Phi_4 P_T \quad (4)$$

为了方便分析，记 $x$ 轴直线度误差和 $z$ 轴直线度误差为 $\beta(x)$ 和 $\beta(z)$ 。分别记3轴定位误差为 $\alpha(x)$ 、 $\alpha(y)$ 和 $\alpha(z)$ 。

考虑到 $x$ 轴向采用闭式静压导轨结构，磨削时，类似于正弦交变载荷作用，由自动调节原理知道，当输入为正弦函数，在系统达到稳定后，输出亦为周期相同的正弦函数。则静压导轨产生的位移变形

$$|e_s| = h_0 \frac{\Delta F}{A_e p_s} |T(j\omega)| \quad (5)$$

式中  $|T(j\omega)|$ ——系统传递函数

$h_0$ ——静压导轨间隙

$\Delta F$ ——法向磨削力

$A_e$ ——有效承载面积

$p_s$ ——液压

这是液体静压支承系统在正交变载荷作用下的频率特性计算式<sup>[10]</sup>，并将静压导轨的动态特性考虑进误差建模里。

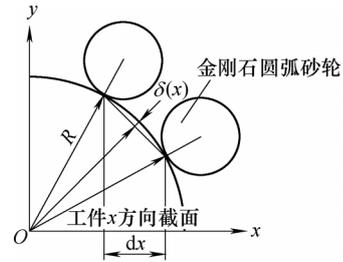
刀具误差在非球面加工中主要表现为砂轮圆弧半径误差，该误差主要是由修整器修整误差引起的。其中影响最大的修整误差为修整器定位倾斜下的误差。加工时，圆弧半径误差直接会复写到加工面上，因此刀具误差对加工面形影响甚大。

插补误差是加工当中无法避免的，通常在大尺寸轴对称非球面加工中，在 $x$ 轴和 $z$ 轴方向上均采用等步长分割方式，即每两个加工点之间在 $x$ 轴或 $z$ 轴方向上等距<sup>[11]</sup>。采用平行磨削的加工方式时，图3为 $x$ 轴与 $z$ 轴方向插补误差示意图。

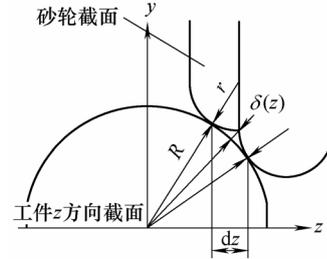
由几何关系可得 $x$ 向的插补误差

$$\delta(x) =$$

$$R - \sqrt{R^2 - \frac{dx^2}{4}} - \frac{1}{4} \left( \sqrt{R^2 - (x+dx)^2} - \sqrt{R^2 - x^2} \right)^2 \quad (6)$$



(a) x轴向插补误差



(b) z轴向插补误差

图3 插补误差

与 $x$ 轴类似， $z$ 向插补误差

$$\delta(z) = \mu(R+r) - \sqrt{\mu^2(R+r)^2 - (R^2 + 2Rr)} - R \quad (7)$$

$$\mu = \cos \left[ \frac{\arccos\left(\frac{z}{R}\right) - \arccos\left(\frac{z+dz}{R}\right)}{2} \right]$$

综合考虑直线度误差、定位精度误差和插补误差，各误差变换矩阵表示如下

$$T_1 \Phi_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha(x) \\ 0 & 1 & 0 & \beta(x) + \delta(x) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$T_3 \Phi_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \beta(z) + \delta(z) \\ 0 & 0 & 1 & \alpha(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$T_4 \Phi_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \alpha(y) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

其他各单项均为单位矩阵 $E$ 。根据加工方式和机床的结构，确定插补磨削点与砂轮中心点的关系，再考虑静压导轨的位移误差及圆弧半径误差后的综合误差，利用式(4)，可得误差公式如下

$$e = \begin{pmatrix} -\Delta r(z) \frac{a}{\sigma} + \alpha(x) \\ -\frac{b}{\sigma} \Delta r(z) + \beta(x) + |e_s| + \beta(z) + \delta(x) + \delta(z) - \alpha(y) \\ -\Delta r(z) \frac{c}{\sigma} + \alpha(z) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$n(a, b, c, 1) = n \left( -\frac{\partial y}{\partial x}, 1, -\frac{\partial y}{\partial z}, 1 \right)$$

$$\sigma = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$$

若考虑加工点处的法向误差, 则

$$e_n = e \cdot n \quad (12)$$

### 4 加工试验

为了验证上文的理论分析的正确性, 进行了加工试验, 试验设备如图 4 所示。表 1 列举了本试验用到的仪器设备型号。其中磨床的直线度误差和定位精度误差在加工前用激光干涉仪测量得到, 砂轮圆弧半径利用非接触式位移传感器测量, 并经过最小二乘圆方法拟合, 得到砂轮的圆弧半径值, 进而得到砂轮圆弧半径误差值。

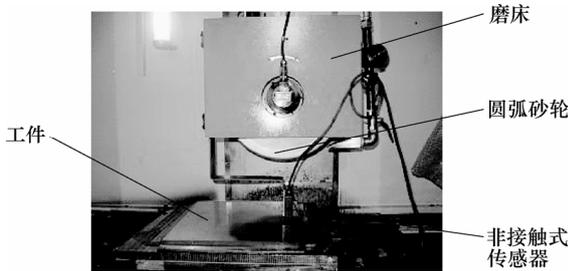


图 4 试验设备

表 1 试验设备型号

设备	型号
高精度平面磨床	2MK1760
金刚石圆弧砂轮	D15A
激光干涉仪	Renishaw LaserXL
非接触式激光位移传感器	KEYENCE LK-G10

#### 4.1 单项误差分析

根据以上的分析结果以及试验得到的磨床几何误差数据, 分别对主要单项误差进行仿真分析。各单项仿真的面形误差是通过将各单项误差数据在工件大小范围内进行插值和拟合得到的, 然后分析各主要单项误差对加工结果的影响程度, 并最终得到综合的影响效果。

##### 4.1.1 直线度、定位精度误差

令其他误差项为 0, 则

$$e_n = \alpha(x)a + (\beta(x) + \beta(z) - \alpha(y))b + \alpha(z)c$$

用激光干涉仪测量  $x$  和  $z$  轴的直线度误差, 以及  $x, y$  和  $z$  轴的定位精度误差。利用这些数据来仿真直线度和定位精度误差作用下工件的面形误差。图 5 为直线度误差和定位误差作用下的工件面形误差图。

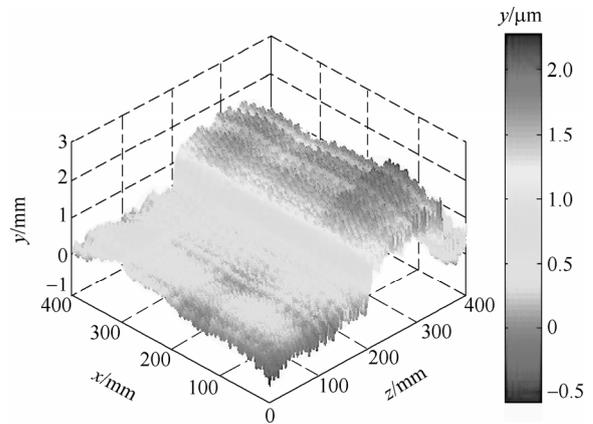


图 5 直线度和定位精度误差对工件面形精度的影响

##### 4.1.2 圆弧半径误差

令其他误差项为 0, 则  $e_n = \sigma \Delta r(z)$ 。圆弧半径误差如果是定值, 如图 6 所示, 工件尺寸越大, 则误差越大。但是实际情况下半径误差一般不为常数, 修整圆弧砂轮后最常见, 也是最影响加工质量的误差形式是由于修整器定位倾斜引进的误差, 其圆拟合后的残差很大, 表现为沿着  $z$  向的误差分布, 且中间误差最大。

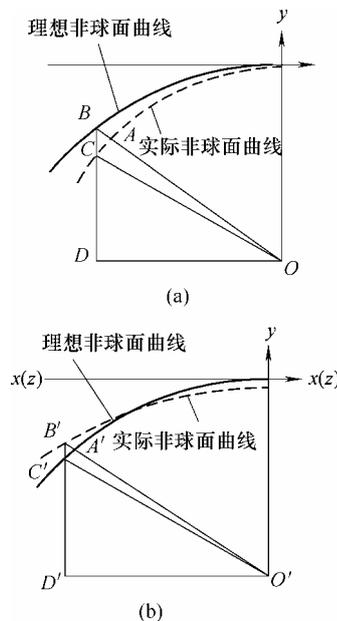
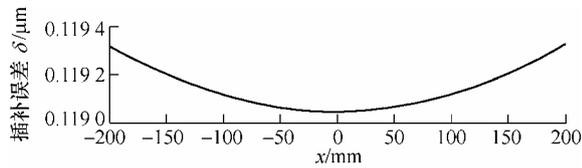


图 6 圆弧砂轮半径误差的影响

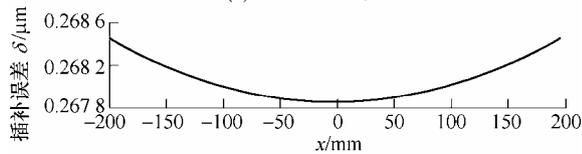
##### 4.1.3 插补误差

如图 7、8 所示, 无论是  $x$  轴还是  $z$  轴, 插补误差  $\delta$  都随着步距变大而变大, 随着非球面基础半径变

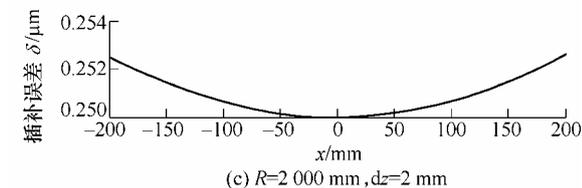
小而变大,误差在工件位置上呈抛物线形分布,但误差数值差别很小。 $x$ 轴的插补误差很小,即便步距变大插补误差也不大,而 $z$ 轴的插补误差较大,特别是 $z$ 轴步距变大后误差明显变大。圆弧半径也影响 $z$ 轴的插补误差,圆弧半径越小,误差越大。因此, $z$ 轴的插补误差是影响非球面磨削精度的主要因素。



(a)  $R=4\ 200\text{ mm}, dz=2\text{ mm}$

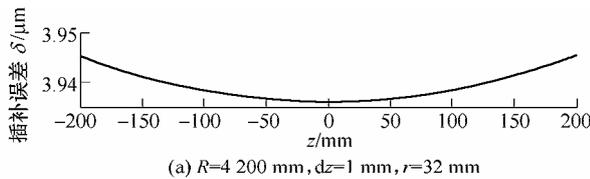


(b)  $R=4\ 200\text{ mm}, dz=3\text{ mm}$

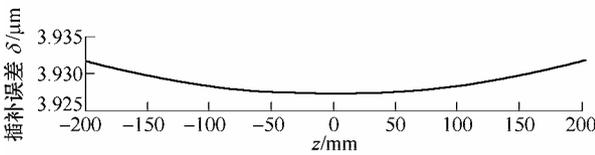


(c)  $R=2\ 000\text{ mm}, dz=2\text{ mm}$

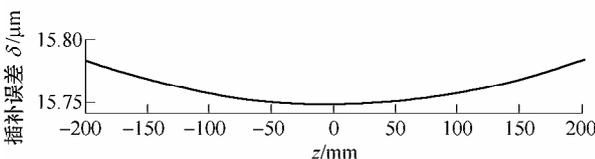
图7  $x$ 轴向插补误差对面形精度的影响



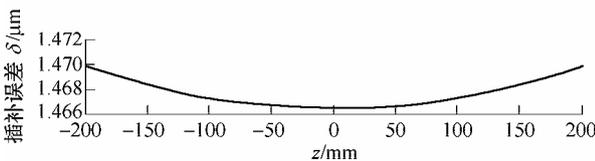
(a)  $R=4\ 200\text{ mm}, dz=1\text{ mm}, r=32\text{ mm}$



(b)  $R=6\ 000\text{ mm}, dz=1\text{ mm}, r=32\text{ mm}$



(c)  $R=4\ 200\text{ mm}, dz=2\text{ mm}, r=32\text{ mm}$



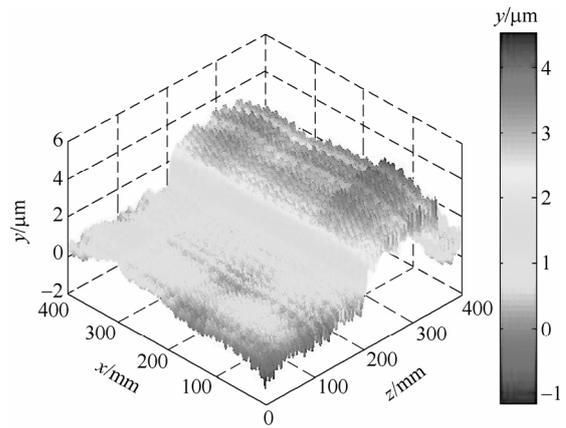
(d)  $R=4\ 200\text{ mm}, dz=1\text{ mm}, r=87\text{ mm}$

图8  $z$ 轴向插补误差对面形精度的影响

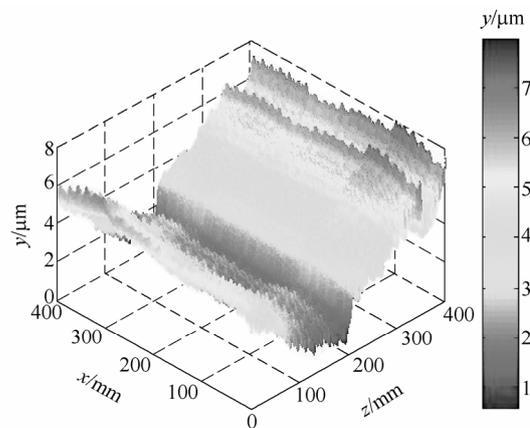
4.1.4 综合误差

综合误差模型包含了非球面加工中的主要误差因素。图9为主要误差项对工件面形精度的综合影响。从图中可以看出定值砂轮圆弧半径误差对面

形分布影响不大,但修整定位倾斜下圆弧半径误差对面形分布影响很大。



(a) 定值砂轮圆弧半径误差



(b) 修整定位倾斜下砂轮圆弧半径误差

图9 主要误差项对工件面形精度的综合影响

4.2 非球面加工试验

利用本磨床加工非球面镜。采用光栅式平行磨削方式,加工工件为矩形轴对称非球面,非球面方程如下所示

$$y(x, z) = \frac{C(x^2 + z^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C^2(x^2 + z^2)}} - \sum_{i=1}^n a_i(x^2 + z^2)^i \quad (13)$$

式中  $C=1/R$

$R$ ——非球面基础半径

$a_i, k$ ——非球面系数

工件参数如表2所示,加工参数如表3所示。

表2 工件参数

参数	取值
非球面基础半径/mm	4 200
非球面系数 $k$	-2.180 72
非球面系数 $a_1 \sim a_6$	$4.343\ 3 \times 10^{-10}, 0, 0, 0, 0, 0$
工件尺寸 $\frac{\text{长}}{\text{mm}} \times \frac{\text{宽}}{\text{mm}} \times \frac{\text{高}}{\text{mm}}$	$4\ 500 \times 4\ 500 \times 27.5$

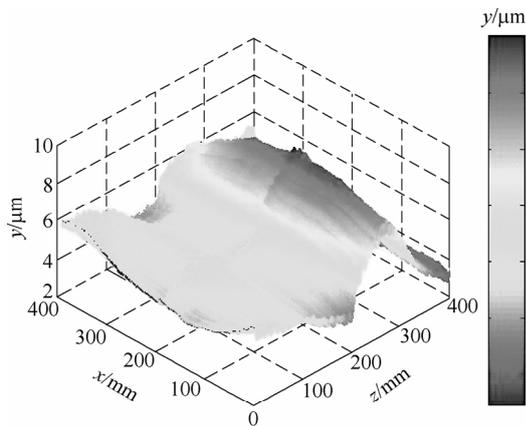
表 3 加工参数

参数	取值
砂轮转速/(r/min)	1 500
$x$ 轴进给速度/(mm/min)	7 000
切深/ $\mu\text{m}$	5

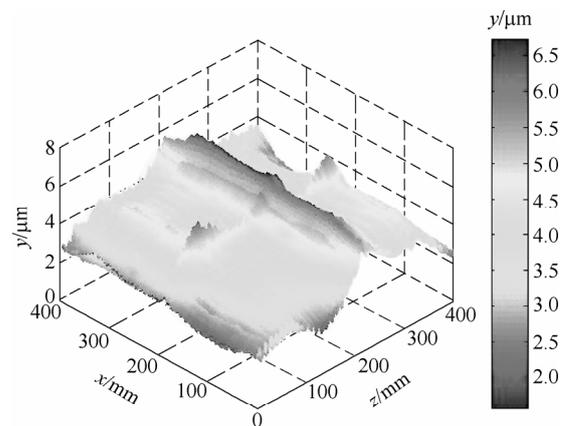
采用金刚石圆弧砂轮加工,  $x$  轴插补步距 2 mm,  $z$  轴插补步距 1 mm。金刚石圆弧砂轮分别在修整器定位误差极小和定位倾斜误差角度为  $0.057^\circ$  的情况下修整, 然后利用其加工非球面。加工完后用非接触传感器测量面形误差, 测量范围为  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 。测量方法: 在工件的  $x$  向与  $z$  向采集若干条数据, 测量的轨迹是沿着加工轨迹的, 是理想的非球面轨迹(非母线), 这样得到的数据即是面形误差。数据处理的方法: 将这些误差数据分别经过剔除奇异项、平滑处理、插值、拟合和去倾斜, 最终得到整个工件的面形误差。经过数据处理后的面形误差如图 10 所示, 其定值砂轮圆弧半径误差情况下的峰谷(Peak and valley, PV) 值和方均根(Root mean square, RMS) 值分别为  $6.55\ \mu\text{m}$  和  $1.29\ \mu\text{m}$ , 而在修整定位倾斜下砂轮圆弧半径误差情况下, PV 值和 RMS 值分别为  $7.67\ \mu\text{m}$  和  $1.68\ \mu\text{m}$ 。从面形误

差分布来看, 在定值砂轮圆弧半径误差情况下, 实际与理论都在  $z$  坐标 300 mm 附近出现误差高值, 整体呈现不对称的凸形分布。在修整定位倾斜下砂轮圆弧半径误差情况下, 实际与理论面形整体都在中心附近呈对称凹形分布。另外, 从误差大小来看, 经过计算, 两种情况下 PV 差值分别为  $0.45\ \mu\text{m}$  和  $0.31\ \mu\text{m}$ , RMS 差值分别为  $0.09\ \mu\text{m}$  和  $0.28\ \mu\text{m}$ , 由于实际加工情况下包含了更多的误差, 因此理论和实际结果是比较吻合的。试验结果证明该误差模型能较准确的预测面形精度, PV 值由各个主要误差项大小决定, 而面形分布主要取决于磨床各个轴的直线度误差、定位精度误差和砂轮圆弧半径误差。

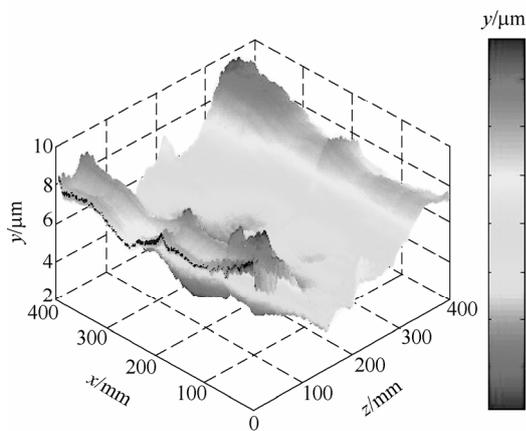
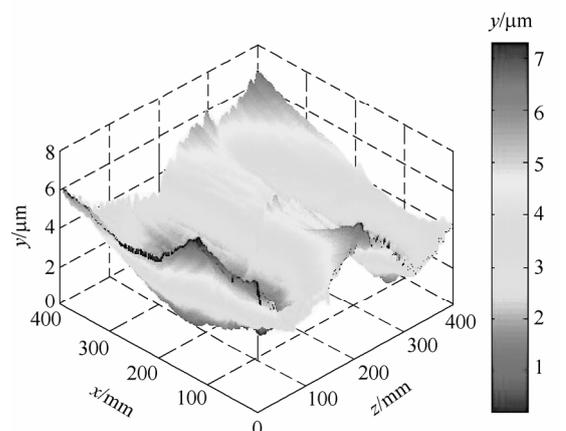
传统的非球面补偿加工只考虑  $y$  向的误差数据, 而未考虑其他两轴的误差, 因此实际上很难将  $y$  向误差数据准确的补偿到真正误差点上。而根据本精度模型及非球面参数, 按照加工的步距分别生成 3 轴的误差数据, 可以准确地将误差数据补偿到真正的误差点上。利用这些数据与初始加工的非球面数据叠加, 从而生成补偿的 NC 程序, 然后进行补偿加工试验。补偿试验结果如图 11 所示, 补偿结



(a) 定值砂轮圆弧半径误差



(a) 定值砂轮圆弧半径误差

(b) 修整定位倾斜下砂轮圆弧半径误差  
图 10 初始加工的面形误差(b) 修整定位倾斜下砂轮圆弧半径误差  
图 11 补偿后的面形误差

果的 PV 值变小,误差的面形误差分布分别也发生了改变。在定值砂轮圆弧半径误差情况下,补偿后试验数据的 PV 值为  $5.16\ \mu\text{m}$ ,下降了 21.22%,RMS 值为  $0.86\ \mu\text{m}$ ,下降了 33.33%。在修整定位倾斜下砂轮圆弧半径误差情况下,试验数据的 PV 值为  $7.07\ \mu\text{m}$ ,下降了 8.06%,RMS 值为  $1.27\ \mu\text{m}$ ,下降了 24.4%。说明利用该模型进行误差补偿是有效的。

## 5 结论

(1) 基于光栅式平行磨削的加工方式,利用刚体运动学理论,建立了大尺寸轴对称非球面磨削误差模型。

(2) 对主要单项误差进行分析,以确定其对面形精度的影响程度。结果表明:直线度和定位精度误差和定位倾斜下的圆弧半径误差是影响面形分布的主要因素,而 PV 值则是各个单项误差共同作用的结果。

(3) 初始加工试验表明,误差模型能够较为准确的预测面形精度,而补偿试验后的工件面形精度提高了,证明了该模型的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] PLACID M, FARREIRA, LIU C R. An analytical quadratic model for the geometric error of a machine tool[J]. Journal of Manufacturing Systems, 1986, 5(1): 51-63.
- [2] FERREIRA P M, LIU C R. A method for estimating and compensating quasistatic errors on machine tools[J]. ASME Transactions, Journal of Engineering for Industry, 1993, 115: 149-159.
- [3] CHATTERJEE S. An assessment of quasi-static and operational errors in NC machine tools[J]. Journal of Manufacturing Systems, 1997, 16(1): 459-468.
- [4] 康念辉,李圣怡,郑子文. 基于多体系统理论的非球面磨削误差模型与补偿技术[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 143-149.  
KANG Nianhui, LI Shengyi, ZHENG Ziwen. Error model and compensation technology of aspheric grinding based on multibody system theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 143-149.
- [5] 黄浩,郭隐彪,王振忠,等. 轴对称非球面加工误差分离与补偿技术[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 177-181.  
HUANG Hao, GUO Yinbiao, WANG Zhenzhong, et al. Error separation and compensation technology of axisymmetric aspheric machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 177-181.
- [6] 姜晨,郭隐彪,潘日,等. 离轴楔形非球面平行磨削及补偿技术研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(3): 193-198.  
JIANG Chen, GUO Yinbiao, PAN Ri, et al. Study on method and compensation technology of off-axis wedge aspheric parallel grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(3): 193-198.
- [7] TSUNEMOTO K, MOHAMMAD S S Z, KATSUO S. A new grinding method for aspheric ceramic mirrors[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 62(4): 387-392.
- [8] SAEKI M, LEE J, KURIYAGAWA T, et al. Machining of aspherical opto-device utilizing parallel grinding method[C]// The 16th ASPE Annual Meeting, USA, The American Society for Precision Engineering, 2001, 25: 433-436.
- [9] HWANG Y, KURIYAGAWA T, LEE S K. Wheel curve generation error of aspheric microgrinding in parallel grinding method[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 1929-1933.
- [10] 陈燕生. 液体静压支承原理和设计[M]. 北京:国防工业出版社, 1980.  
CHEN Yansheng. Theory and design of hydrostatic bearing[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1980.
- [11] WANG Zhenzhong, GUO Yinbiao, HUANG Hao, et al. Machining mode and error analysis in non-axisymmetric aspheric surface grinding[C/CD]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 3rd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies, July 8-12, 2007, Chengdu. SPIE, 2007: 6277.

作者简介:林晓辉,男,1985年出生,博士研究生。主要研究方向为超精密加工与检测。

E-mail : lxhgogle@gmail.com

郭隐彪,男,1962年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为精密加工,机电一体化,微补偿控制技术和微精密系统。

E-mail : guoyb@xmu.edu.cn

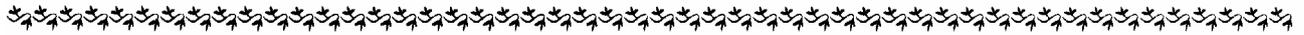
王振忠(通信作者),男,1981年出生,博士,副教授。主要研究方向为

精密加工装备及系统控制,精密检测技术。

E-mail : wangzhenzhong@xmu.edu.cn

许乔,男,1972年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为惯性约束聚变激光驱动器先进光学制造及精密光学检测技术。

E-mail : xuqiao@vip.sina.com



### 第三届并联机构的关键问题与未来发展方向国际会议征文通知

第三届并联机构关键问题与未来发展方向国际会议将于2014年7月7-8日在中国天津召开。会议由天津大学和中国机械工程学会共同主办,IFTOMM中国委员会承办。广大业界科研工作者将以此为平台,分享经验并讨论并联机构与机械手未来的发展方向。本次研讨会将邀请世界各地的专家,介绍最新的研究成果并确定并联机构今后最有发展的研究方向。会议形式主要包括主题演讲、圆桌讨论会议、专题论文研讨以及深入讨论研讨会等,以此来明确并联机构与机械手相关的关键问题。

本次研讨议题涉及并联机构和机械手在各领域的最新研究进展,主要包括运动学、动力学、控制、设计和应用;并联机构和机械手在工业领域的应用;并联机构和机械手的理论问题;并联机构和机械手取得重大理论突破的方法;并联机构和机械手领域在国际间及学术界和产业界间的合作;并联机构和机械手的教育需求及方法;并联机构和机械手加速研究和应用的战略途径等。

论文提交截止日期:2014年2月10日

论文审核通过通知:2014年3月31日

最终稿提交日期:2014年4月30日