

文章编号 1004-924X(2011)01-0041-10

# 多模式组合抛光技术在光学加工中的应用

宣斌<sup>1,2</sup>, 谢京江<sup>1</sup>, 宋淑梅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**介绍了将经典抛光方法与数控加工技术有机结合的多模式组合抛光技术。描述了多模式组合抛光的关键技术之一, 材料去除率仿真模型的建立方法。通过设置抛光盘因子和元件因子, 多模式组合抛光的材料去除模型不仅包含抛光模式、速度等加工参数, 还将抛光模形状、边角效应、元件面形误差等因素对材料去除的影响一并考虑入内, 可以根据抛光阶段的不同, 选择不同的仿真精度。实验发现, 多模式组合抛光可以显著提高加工效率, 并且具有较好的对中频误差的抑制和修正能力。多模式组合抛光目前的应用水平大致为球面、平面元件的面形误差达到 20 nm(rms), 非球面元件的面形误差达到 30~40 nm(rms) 左右。结果表明, 多模式组合抛光在大口径元件的光学加工方面具有较强的适用性和很大的发展空间。

**关键词:** 光学加工; 多模式组合抛光; 非球面; 材料去除

中图分类号: TQ171.684 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111901.0041

## Application of multi-mode combined polishing to optical manufacturing

XUAN Bin<sup>1,2</sup>, XIE Jing-jiang<sup>1</sup>, SONG Shu-mei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The multi-mode combined polishing technology based on traditional polishing and numerical control polishing methods was introduced. The simulation of material removal rate, one of the key processes of the multi-mode combined polishing, was described in detail. By setting the factors of laps and workpieces, the model for material removal rates involves not only polishing modes and polishing velocity but also the influences of the lap shape, edge effect and surface error on material removal rates. Furthermore, it can choose the different simulation precisions depending on the manufacture process. The practical results show that the multi-mode combined polishing technique provides high polishing efficiency and suppresses and reduces the ripple efficiently. The precision of surface error of optical spheres and flats can reach 20 nm (rms) and those of the aspheres can be 30 nm to 40 nm (rms) so far. Obtained results indicate that the multi-mode combine polishing is a proper technology for the manufacture of large components.

**Key words:** optical manufacturing; multi-mode combined polishing; aspheres; material removal

收稿日期: 2010-03-30; 修订日期: 2010-05-31.

基金项目: 中科院第三期知识创新工程资助项目

## 1 引言

随着光学设计、检测、加工和装调能力的发展,光学元件的种类从球面、平面扩展至同轴非球面、离轴非球面,元件的口径、相对口径也逐渐增大。相应的,光学加工手段随着计算机技术、控制技术的发展和逐渐走向多元化,除传统的经典抛光方法外,应力盘(Stressed Lap)<sup>[1]</sup>、数控小磨头(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)<sup>[2]</sup>、磁流变(Magnetorheological Finishing, MRF)<sup>[3]</sup>、离子束<sup>[4]</sup>、射流(Fluid Jet)<sup>[5]</sup>以及其他抛光方法<sup>[6-7]</sup>也相继出现,并在非球面加工方面取得了相当程度的认可和广泛应用。

与经典抛光方法相比,数控加工技术对加工技术人员的经验依赖性较低,具有较高的确定性抛光程度,是光学加工方法的发展趋势之一。经典抛光方法则由于采用较大抛光盘,加工效率较高,元件整体面形也较为平滑。针对经典抛光方法和数控加工技术的特点,李俊峰等人对有机结合了上述两种方法优点的多模式组合抛光技术进行了研究,并在 2007 年公开发表的文献中介绍了长春光机所在多模式组合抛光技术方面的最新进展<sup>[8]</sup>,他们的工作已在一定程度上将数控技术融合到经典抛光方法中,使经典抛光方法的确定性抛光能力得到较大提高。之后,国外也出现了类似方法的报道<sup>[9]</sup>。

本文主要对多模式组合抛光的关键技术之一,材料去除率仿真模型的建立方法进行了研究。通过将各个抛光模式、参数以及面形误差、边角效应等因素整合为抛光盘因子和元件因子,计算任意时刻的材料去除率,并在抛光时间内积分获得材料去除量。实验显示,多模式组合抛光可以显著提高加工效率,并具有较好的抑制和修正中频误差的能力。

## 2 多模式组合抛光技术简介

多模式组合抛光技术是一种结合了两种或多种不同抛光方法,或者利用同一种抛光方法的两个或多个抛光头同时工作的光学加工方法。现阶段应用更多的是采用经典抛光方法使两个抛光头

并联工作,通过选择合适的抛光模式和参数达到预定的抛光效果,如图 1 所示。图中主抛光头由经典修带抛光机负载,其载荷较大但工作模式相对单一;副抛光头为自制的 JP-01 型抛光机械手<sup>[10]</sup>,可以通过伺服电机在较大范围内实现任意路径、速率等抛光参数的自动化控制。



图 1 多模式组合抛光 510 mm 离轴抛物镜

Fig. 1 Multi-mode combined polishing for a 510 mm off-axis parabola

多模式组合抛光技术采用如下步骤进行操作,如图 2 所示。首先建立基础的材料去除率模型;然后根据实际抛光参数进行模型参数设置,对元件进行简单的验证性抛光,将仿真材料去除量与实际抛光结果进行比对;差异较大时修改模型参数,重新进行验证性抛光、材料去除量比对直至仿真结果与实际相符程度达到要求;最后,根据修正完毕的材料去除率数学模型,针对元件的面形误差,选择合适的工艺参数进行确定性抛光,并与光学检测迭代多次完成元件的光学加工。



图 2 多模式组合抛光技术操作流程

Fig. 2 Flowchart of multi-mode combined polishing technology

多模式组合抛光的关键技术之一是建立材料去除率的数学模型,此模型的准确程度很大程度上决定了确定性抛光结果与预期效果之间的吻合程度。因此,对多模式组合抛光技术中的材料去除率做更多分析是必要的。

### 3 多模式组合抛光技术中的 Preston 方程

#### 3.1 Preston 方程中的抛光要素

Preston 于 1927 年提出了其著名的假设, 并成为现今各种数控光学加工的理论基础。根据 Preston 方程, 光学加工的材料去除率可以表示为:

$$\frac{dZ(x, y, t)}{dt} = K \cdot p(x, y, t) \cdot v(x, y, t), \quad (1)$$

其中,  $Z(x, y, t)$  为  $t$  时刻位置  $(x, y)$  处的元件表面高度;  $K$  为抛光常数, 与元件材料、抛光模材料、抛光粉的成分粒度、抛光液的浓度 pH 值以及抛光时的温度湿度等因素有关;  $p(x, y, t)$  为  $t$  时刻  $(x, y)$  处的压强;  $v(x, y, t)$  为  $t$  时刻  $(x, y)$  处抛光盘与元件的相对速率。

当假设抛光盘在整个抛光区域的任意单位时间内具有相同的去除函数  $R(x, y)$ , 即假设抛光符合线形空间不变性质时, 元件的材料去除量为

$$Z(x, y) = R(x, y) * * D(x, y), \quad (2)$$

其中,  $D(x, y)$  为抛光盘在位置  $(x, y)$  处的驻留时间,  $**$  表示二维空间卷积。数控小磨头等数控加工技术较多的采用这一假设, 并利用实测获取去除函数, 通过控制驻留时间达到预定的材料去除量。

多模式组合抛光技术由于采用较大磨头进行抛光, 不同抛光区域内的去除函数具有较大差别, 不再满足空间不变性质, 这一点在加工非球面特别是相对口径较大的非球面时尤为明显。因此, 与数控小磨头等技术不同, 多模式组合抛光技术将关注重点转为  $t$  时刻抛光盘对整个元件区域的材料去除率  $W(x, y, t)$ , 通过在整个抛光过程中的时间积分得到材料去除量, 即

$$Z(x, y) = \int W(x, y, t) dt, \quad (3)$$

其中,  $W(x, y, t)$  仍然由抛光常数  $K$ 、压强  $p$  和相对速率  $v$  构成,

$$W(x, y, t) = K \cdot p(x, y, t) \cdot v(x, y, t). \quad (4)$$

#### 3.2 多模式组合抛光球面、平面时的 Preston 方程设定

假设  $t$  时刻  $(x, y)$  处的抛光盘速度分解至  $x$  和  $y$  方向的速率分别为  $(v_{Lx}(t), v_{Ly}(t))$ , 元件的速度分别分解为  $(v_{Wx}(t), v_{Wy}(t))$ , 则两者的相对速率为

$$v(x, y, t) = \sqrt{(v_{Lx}(t) + v_{Wx}(t))^2 + (v_{Ly}(t) + v_{Wy}(t))^2}. \quad (5)$$

出于安全因素的考虑, 元件的速度一般不易过快, 为了提高抛光效率, 通常利用抛光盘的自转增大与元件的相对速率, 因此实际应用中抛光盘的自转成为常用的工艺模式。

为了将抛光的工艺参数融入 Preston 方程, 多模式组合抛光技术中的压强  $p$  的设置相对复杂, 包含抛光盘因子  $p_L$  和元件因子  $p_W$ ,

$$p(x, y, t) = p_L(x, y, t) \cdot p_W(x, y, t). \quad (6)$$

抛光盘因子和元件因子设有初始值, 并分别根据抛光盘和元件的平移、旋转进行相应的齐次坐标变换后相乘得到  $t$  时刻的 Preston 压强。利用 Matlab 进行乘积运算时, 要求各因子在相同的矩阵维数下进行, 因此还必须对齐次坐标变换后的各因子项进行扩展。抛光盘和元件因子的初始值可以设定如下。

##### 3.2.1 抛光盘因子

抛光盘因子包括抛光盘和抛光模形状因子  $p_{L0}$  以及抛光盘压强因子  $p_{Lp}$ ,

$$p_L(x, y) = p_{L0}(x, y) \cdot p_{Lp}(x, y). \quad (7)$$

##### 3.2.1.1 抛光模形状因子

为了抛光液的分布均匀, 抛光模上通常刻有不同形状的沟槽。假设抛光模的沟槽不具有抛光能力, 材料的去除只在抛光模与元件的接触区域发生,

$$p_{L0}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{抛光模与元件接触} \\ 0, & \text{抛光模不与元件接触} \end{cases}. \quad (8)$$

常用的几种抛光模形状如图 3 所示。

##### 3.2.1.2 抛光盘压强因子

根据抛光盘压力施加方式的不同, 一般可以将抛光盘压强设定为余弦型或者高斯型。余弦型可以表示为

$$p_{Lp} = p_{Lp0} \cdot \cos(\arcsin(r_L/R)), \quad (9)$$

其中,  $p_{Lp0}$  为抛光盘中心点压强,  $r_L$  为抛光盘各点

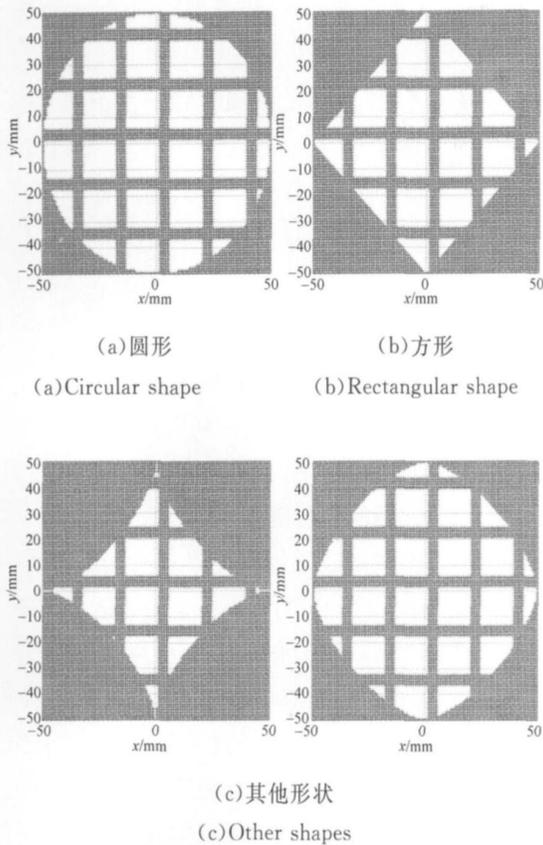


图 3 常用的抛光模形状

Fig. 3 Usual shapes of pitch

与抛光盘中心点的距离,  $R$  为抛光盘曲率半径。高斯型可以表示为

$$p_{Lp} = p_{Lp0} \left[ \exp \left( - \frac{r^2}{2^2} \right) \right], \quad (10)$$

其中,  $\sigma$  为高斯函数的标准差,  $p_{Lp0}$  为高斯型压强的调制参数。这两种抛光盘压强分布如图 4 所示。

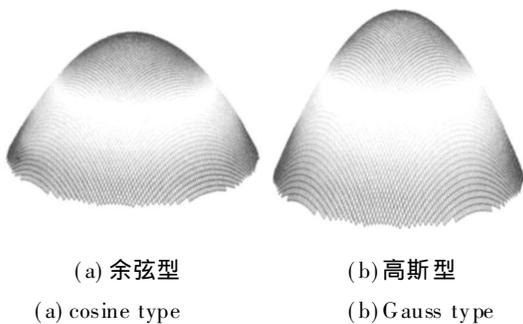


图 4 抛光盘压强分布

Fig. 4 Pressure distribution of polishing lap

高斯型压强分布与一般的高斯型静态抛光去除函数<sup>[11]</sup>比较吻合,但是当抛光盘曲率半径相对于抛光盘尺寸较小时,余弦型压强分布的趋势更强。具体设置时,可以根据实际情况对这两种分

布进行选择,或者结合使用。

### 3.2.2 元件因子

元件因子包括边角效应因子  $p_{we}$  和面形因子  $p_{wr}$ ,

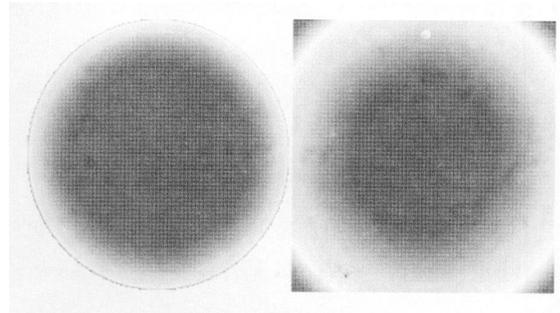
$$p_w(x, y) = p_{we}(x, y) \cdot p_{wr}(x, y). \quad (11)$$

#### 3.2.2.1 边角效应因子

边角效应因子的设置主要对应于经典抛光方法经常出现的元件塌边现象,即接近元件边缘区域的材料去除率要比元件中间的大,矩形元件两边交汇的角处更大。圆形元件的边角效应可以表达如下:

$$p_{we} = 2 - (1 - r_{L0})^{1/2}, \quad (12)$$

其中,  $r_{L0}$  为归一化后的  $r_L$ ,  $\alpha$  为边角效应的调制参数,可以控制边角效应的区域大小。椭圆和方形元件的表达式与圆形元件类似,如图 5 所示。



(a) 圆形元件 (b) 方形元件  
(a) Circular workpiece (b) Rectangular workpiece

图 5 不同形状元件的边角效应因子

Fig. 5 Edge-effect factors of different workpieces

#### 3.2.2.2 面形误差因子

采用较大磨头进行加工时,抛光范围往往覆盖元件面形误差区别较大的不同区域。根据实际的抛光结果,元件面形呈现高点区域的材料去除率往往要比低点处大,这在高、低点差别即局部面形的 PV 值较大并且位置比较接近时尤为明显。根据这种经典抛光特点,根据元件面形误差对元件因子进行修正是合理的。

### 3.3 多模式组合抛光非球面时的 Preston 方程设定

当加工元件为球面、平面时,元件表面的任意区域均符合回转对称性质,当抛光模的曲率半径与元件的曲率半径一致,抛光盘和元件自转时的抛光模仍然可以保持与元件的贴合。与球面和平

面不同, 非球面元件只有在光轴处符合回转对称性质, 理论上抛光盘只有停留在元件光轴处自转才能保持与元件的贴合。但此时中心点的相对速率为零, 中心点附近的材料去除率很低, 容易出现抛光无力的所谓“死点”, 这对光学加工是极为不利的, 实际应用中会尽量避免抛光盘中心长时间停留在光轴附近。根据范成法原理, 抛光盘覆盖在其他区域时会出现将元件向着球面抛光的趋势。假设抛光模的曲率半径为非球面的最佳比较球面半径, 将非球面度设定为面形误差因子的附加项是合理的。需要注意的是, 面形误差因子或者附加了非球面度的面形误差因子的各个分量的物理意义不同, 需要做不同的处理。

### 3.3.1 常数项(Piston)

抛光材料去除量总是大于等于 0, 因此首先必须对面形误差附加一个常数项使之没有负值。另外较大磨头工作时, 元件面形误差最低点的位置往往也伴随着高点产生材料的去除量, 因此, 还需要对面形误差增加一个适当的基础权值性质的常数项, 其大小与面形误差、抛光模材料硬度、抛光盘压强等诸多因素有关。例如在本论文涉及到的实践中, 高点与低点区域的材料去除量在 5/4 左右, 基础权值按照此原则并根据面形误差大小进行设置。

### 3.3.2 倾斜(Tilt)

抛光盘与压力施加装置之间大多都有万向连轴节机构, 可以实现较大角度范围内的倾斜以保持与元件的贴合, 因此面形误差中的倾斜分量通常是可以去除的。

### 3.3.2 光焦度(Power)

根据 Zygo 公司 MetroPro 软件的定义, 面形误差中的光焦度表征检测面与参考面之间在曲率半径上的偏离。当抛光盘采用自转工作模式时, 抛光模保持为某一曲率半径的球面。为了方便根据需要改变形状等目的, 抛光模通常采用沥青等硬度较低的材料制备, 加工过程中抛光模可以在一定程度上随着工件光焦度的变化自动调整自身的曲率, 因此一般情况下面形误差因子中的光焦度分量是可以去除的。但是当抛光盘工作区域内的光焦度差别较大并且抛光盘的移速、摆速较大

时, 抛光模的曲率调整跟不上元件面形的光焦度变化, 将光焦度完全去除会产生较大的仿真误差, 这也是非球面尤其是深焦比非球面的加工难点之一。

图 6(a) 为检测给出的元件面形误差, 图 6(b) 为经过上述方法去除倾斜和光焦度并设置了适当常数项后的元件面形误差因子。

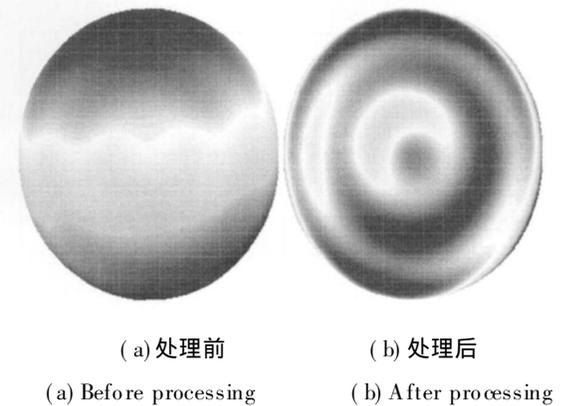
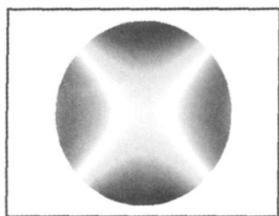


图 6 元件面形误差因子

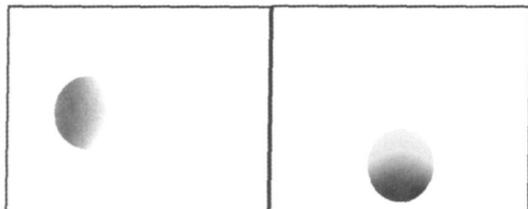
Fig. 6 Surface error factor of workpiece

当元件的整体面形误差呈现缓慢但一致性较强的变化趋势时, 抛光盘覆盖区域内的局部面形误差有时自身又会含有较大的倾斜、光焦度或者常数项分量。以光学加工中经常出现的初级像散为例, 图 7(a) 为一个去除了倾斜和光焦度并设置好了常数项的像散形面形误差; (b) 和 (c) 为在抛光盘不同的覆盖范围内从整体误差中直接提取出的局部误差, 两个局部面形误差的常数项权值具有很大不同; (d) 为对局部误差 (c) 的常数项重新设置后的面形误差; (e) 为进一步去除了倾斜和光焦度后的面形误差。可以看出 (e) 和 (c) 具有明显不同, 直接提取于整体误差的局部面形误差因子含有较大的倾斜和光焦度分量以及不合理的常数项, 如果不对抛光盘工作区域覆盖范围内的局部面形误差因子做处理可能给仿真结果带来较大的误差。但是, 对每一个时刻  $t$  的局部误差都重新进行倾斜、光焦度和常数项的处理是极其消耗运算时间的, 有时可能也没有必要。在元件面形误差很大的抛光初期, 可以从已经运算好并建立起来的数据库中经验性的提取一些加工参数, 多次积累以后, 仿真效果还是令人满意的。



(a) 元件区域

(a) Workpiece area

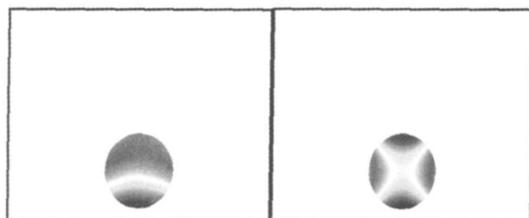


(b) 抛光区域

(b) Polishing area

(c) 抛光区域

(d) Polishing area



(d) 重新设置了常数项的抛光区域

(d) Polishing area with piston reset

(e) 重新设置了常数项并去除了倾斜和光焦度的抛光区域

(e) Polishing area with piston reset and tilt and power removed

图 7 像散形面形误差因子的处理

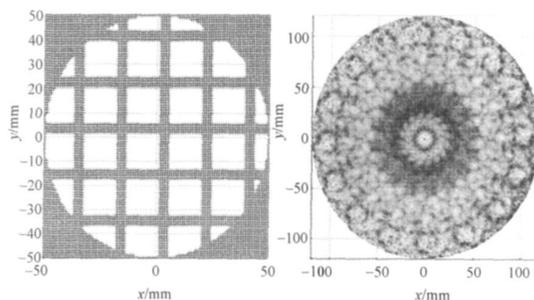
Fig. 7 Processing for surface error factor of astigmatism-like surface

## 4 仿真与实验

### 4.1 抛光模形状对材料去除率的影响

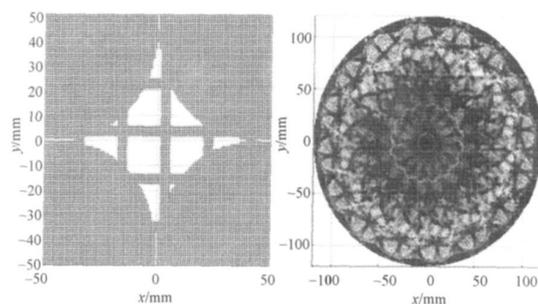
光学加工尤其是非球面加工中,根据面形误差选用不同形状的抛光模是比较常用的技巧。现假设使用一个口径为 100 mm 的圆形抛光盘对口径为 240 mm 的圆形球面元件进行抛光,元件面形误差如图 6 所示。在其他各项参数均相同的情况下,抛光模的形状对材料去除量具有较大的影响,如图 8 所示。由于运算周期内的时间采样频率不足造成材料去除量数据点稍有残缺,但是整体的预抛光效果还是有明显不同。图 8(a) 所示的圆形抛光模产生的材料去除量与元件面形误

差更加吻合,可以有效地对元件中心和两个环带进行材料去除,采用圆形抛光模和其他的仿真参数进行抛光应当可以达到较好的效果。另外,元件面形的高、低点的影响也有所体现,元件的正上、正下区域较同一环带的材料去除率更高。



(a) 圆形抛光模及其材料去除量

(a) Circular pitch and its material removal function



(b) 花形抛光模及其材料去除量

(b) Floriated pitch and its material removal function

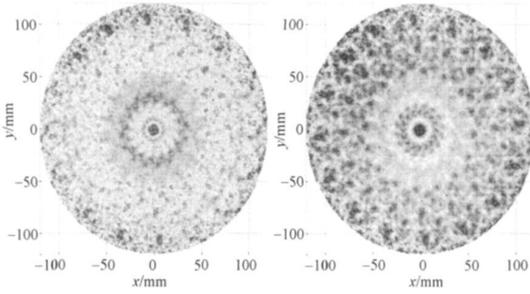
图 8 抛光模形状对材料去除量的影响

Fig. 8 Material removal functions of different pitch shapes

### 4.2 元件面形的实时变化对材料去除率的影响

材料的去除现象在整个光学加工的过程中一直发生,抛光的材料去除率也随着实时变化的元件面形而改变。为了更加准确地对长时间连续抛光的材料去除量进行仿真,对元件的面形误差进行循环式的重置是有必要的。仍以图 6 的元件面形为例,在各个参数均不变的情况下,图 9(a) 为循环重置面形误差因子后的仿真材料去除量,与图 8(a) 有较大的差别。图 9(b) 为剩余面形残差。采用仿真参数进行实际光学加工前后的检测结果如图 10 所示。图 10(a) 为加工前的元件面形误差,与图 6(b) 相同;图 10(b) 为加工后的元件面形,与图 9(b) 的仿真结果基本一致。与对局部误差的处理类似,采用循环的面形误差因子重置可以提高仿真精度,但是极大降低了仿真效率。随

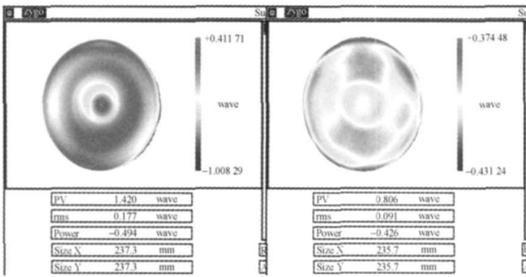
着面形误差的收敛, 每次的抛光时间逐渐缩短, 检测频率增加, 在抛光中后期不采用循环重置的仿真效果一般也能达到实用要求。



(a) 材料去除量 (b) 面形残差结果  
(a) Material removal function (b) Residual surface error

图 9 循环重置面形误差因子后的结果

Fig. 9 Simulation results after resetting surface error factor



(a) 加工前 (b) 加工后  
(a) Before processing (b) After processing

图 10 面形检测结果

Fig. 10 Surface errors

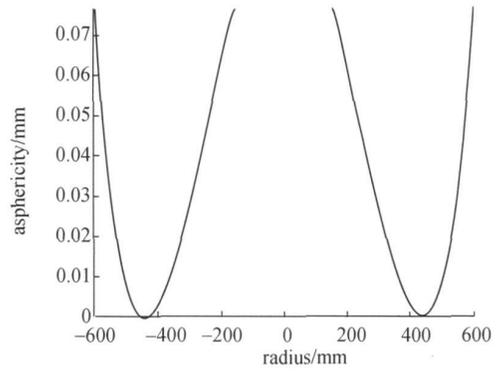
### 4.3 多模式组合抛光对中频误差的抑制

对于已经产生的中频误差, 可以利用面形高点的材料去除率大于低点的去除率, 采用较大抛光盘进行跨带式的抛光, 这是传统的经典抛光在中频误差性能方面的优势。对于非球面加工, 较小的抛光盘与元件表面吻合程度较好, 可以采用较高的平移、摆动以及自转速度等工艺参数有效地提高抛光效率。但是较小抛光盘的抛光路径接合处往往出现面形的不平整, 比较容易引起中频误差。采用多模式组合抛光, 可以在较小抛光盘的路径接合区域使用一个较大的抛光盘进行材料的整体去除。虽然较大抛光盘的摆速、转速等都受到非球面度的制约, 只能提供较低的抛光效率, 但是根据元件面形对材料去除率的影响, 较大抛光盘还是可以实时地对中频误差产生抑制作用。

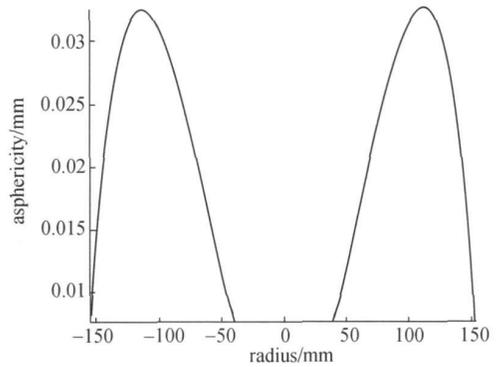
从实际工程来看, 这种方法取得的效果往往比大、小抛光盘的交替串联工作要好, 这一点也成为多模式组合抛光技术的独特优势。

## 5 工程应用

多模式组合抛光技术已经成功应用于地基高分辨率成像望远镜试验系统的主、次镜光学元件加工中。其中, 主镜为 1 230 mm、 $F/1.5$  的凹双曲面, 次镜为 315 mm、 $F/1.8$  的凸双曲面, 其非球面度最大值分别为 0.077 mm 和 0.033 mm, 分布如图 11 所示。



(a) 主镜  
(a) Primary mirror



(b) 次镜  
(b) Secondary mirror

图 11  $\Phi 1\ 230$  mm 系统元件的非球面度分布

Fig. 11 Asphericity distribution of mirrors in  $\Phi 1\ 230$  mm system

主镜采用 Offner 式补偿器进行零位检测并独立加工; 其镀膜后与次镜组成望远镜系统, 通过检测中心视场的系统波像差进行次镜的光学加工。主、次镜的初抛光阶段元件面形误差超出数

字干涉仪量程,因而可先利用刀口仪检测,面形误差达到一定精度后再转入干涉检测的精抛光阶段。主镜的初抛光阶段以及精抛光阶段前期利用 DJ1600 型修带抛光机和 JP-01 型抛光机械手进行多模式组合抛光,面形误差迅速收敛至 30 nm (rms)<sup>[12]</sup>,并且较为平整,具有较好的中频误差特征,如图 12 所示。最后采用传统的经典抛光方法进行修磨,最终主镜面形精度优于 15 nm (rms)。主镜镀膜后重新安装支撑,由于心轴以及边缘部件施力状态的改变,面形误差略微降低。望远系统搭建后开始次镜的光学加工,利用数控改造后的 JM 030. 2A 抛光机对次镜进行多模式组合抛光,如图 13 所示。最终次镜的面形精度没有降低系统波像差性能。

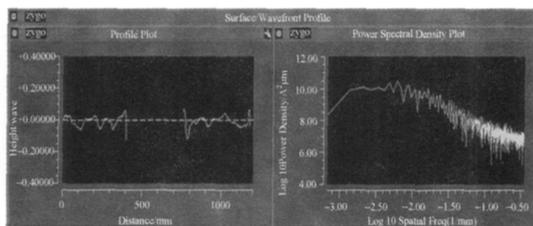


图 12  $\Phi 1$  230 mm 主镜采用多模式组合抛光后的面形误差分布

Fig. 12 Surface error distribution of  $\Phi 1$  230 mm primary mirror after multi-mode combined polishing



图 13  $\Phi 315$  mm 次镜的多模式组合抛光

Fig. 13 Multi-mode combined polishing for  $\Phi 315$  mm secondary mirror

实践总结可以发现,多模式组合抛光在初抛光阶段的效果往往要优于精抛光阶段。随着面形误差的逐渐收敛,非球面度在面形误差因子中所占的比例逐渐增大,精抛光阶段使用较大的抛光盘时,材料去除率往往与局部非球面度的分布比较接近。因此,精抛光阶段使用较大抛光盘的难度相对较高,通常只能采用较低的平移和摆动速度使得抛光模具有更大的形状调整能力,并采用很低的自转速度甚至停止自转,避免出现范成法形成的球面抛光模。

## 6 结 论

本文提出了通过将各个抛光模式、参数以及面形误差、边角效应等因素整合为抛光盘因子和元件因子,计算任意时刻的材料去除率并在抛光时间内积分,从而获得多模式组合抛光技术的材料去除量。这种仿真方法可以应用于球面和平面元件的光学加工,使得多模式组合抛光技术对大口径的球面和平面元件具有很强的适用性。通过将非球面度作为面形误差因子的附加项处理,多模式组合抛光的仿真范围扩展至非球面元件的光学加工。对于非球面加工,多模式组合在初抛光阶段显示出极高的抛光效率。随着元件面形的收敛,较大抛光盘的使用难度逐渐增大,并且随着元件材料去除残量的逐渐减少,多磨头并联工作的效率优势相对降低。根据元件通光口径、相对口径等参数的不同,目前多模式组合抛光技术所能达到的适用程度大致为球面和平面的面形精度达到 20 nm (rms) 左右、非球面元件面形精度达到 30~40 nm (rms) 左右。对于精度要求更高的精加工,通常仍然采用传统的经典抛光方法。但是得益于初抛光阶段对中频误差较好的抑制能力,最终的元件面形也往往体现出较好的中频误差特征,这也成为多模式组合抛光技术的独特技术优势。

## 参考文献:

- [1] 汪达兴,李颖,杨世海,等.主动抛光盘磨制非球面镜面控制技术的研究[J].光学技术,2005,31(3):373-379.  
WANG D X, LI Y, YANG SH H, *et al.*. Study on control technology of active stressed lap polishing aspherical mirror [J]. *Opt. Tech.*, 2005, 31(3): 373-379. (in Chinese)
- [2] 王毅,倪颖,余景池.小型非球面数控抛光技术研究[J].光学精密工程,2007,15(10):1527-1533.  
WANG Y, NI Y, YU J CH. Computer-controlled polishing technology for small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1527-1533. (in Chinese)
- [3] 彭小强,戴帆,唐宇.基于灰色预测控制的磁流变抛光液循环控制系统[J].光学精密工程,2007,15(1):100-105.  
PENG X Q, DAI Y F, TANG Y. Circulatory system for MR fluid based on gray forecast control algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 100-105. (in Chinese)
- [4] 焦长君,李圣怡,王登峰,等.离子束加工光学镜面的材料去除特征[J].光学精密工程,2007,15(10):1520-1526.  
JIAO CH J, LI SH Y, WANG D F, *et al.*. Material removal property in ion figuring process for optical components [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1520-1526. (in Chinese)
- [5] GUO P J, FANG H, YU J CH. Computer-controlled fluid jet polishing [J]. *SPIE*, 2007, 6722: 672210.
- [6] 高波,谢大纲,姚英学,等.气囊式工具抛光新技术[J].光学技术,2004,30(3):333-336.  
GAO B, XIE D G, YAO Y X, *et al.*. New technology of balloon tool for polishing [J]. *Opt. Tech.*, 2004, 30(3): 333-336. (in Chinese)
- [7] 高宏刚,陈斌,曹健林.超光滑光学表面加工技术[J].光学精密工程,1995,3(4):7-14.  
GAO H G, CHEN B, CAO J L. Fabrication technology for supersmooth surfaces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(4): 7-14. (in Chinese)
- [8] LI J F, XUAN B, SONG SH M, *et al.*. Multi-mode combined manufacturing technology for large aperture aspheric mirrors [J]. *SPIE*, 2007, 6721: 67210W.
- [9] KIM D W, KIM S W, BRUGE J H. Non-sequential optimization technique for a computer controlled optical surfacing process using multiple tool influence functions [J]. *Opt. Exp.*, 2009, 17(24): 21850-21866.
- [10] 王朋,陈亚,宣斌,等.大口径光学元件机械手抛光技术[J].光学精密工程,2010,18(3):289-295.  
WANG P, CHEN Y, XUAN B, *et al.*. Polishing technology of manipulator for large mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 289-295. (in Chinese)
- [11] KIM D W, KIM S W. Static tool influence function for fabrication simulation of hexagonal mirrors segments for extremely large telescope [J]. *Opt. Exp.*, 2005, 13(3): 910-917.
- [12] 李俊峰,宋淑梅,陈亚,等.多模式组合修正大口径非球面环带误差[J].光学精密工程,2010,18(7):1272-1279.  
LI J F, SONG SH M, CHEN Y, *et al.*. Zonal error removal with multi-mode combine manufacture technique for large aspheric [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1272-1279. (in Chinese)

作者简介:



宣 斌(1983-),男,江苏南通人,博士研究生,2005年于浙江大学获得学士学位,主要从事光学检测及中频误差方面的研究。E-mail: xbjst@sina.com

通讯作者:



谢京江(1954-),男,北京人,研究员,博士生导师,主要从事先进光学精密加工与检测方面的研究。E-mail: jjxie@ciomp.ac.cn



宋淑梅(1963-),女,吉林人,研究员,硕士生导师,主要从事大口径非球面加工与检测技术方面的研究。E-mail: smsong@ciomp.ac.cn

下期预告

## 纳秒、皮秒和飞秒激光脉冲对材料的表面处理

M. S. Trtica<sup>1</sup>, B. M. Gakovic<sup>1</sup>, B. B. Radak<sup>1</sup>, D. Batani<sup>2</sup>, V. F. Tarasenko<sup>3</sup>,  
S. Petrovic<sup>1</sup>, J. Stasic<sup>1</sup>, D. Milovanovic<sup>1</sup>, A. Krmpot<sup>4</sup>, B. Jelenkovic<sup>4</sup>

(1. VINCA Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, P. O. BOX 522, 11001 Belgrade, Serbia;

2. Universita degli Studi di Milano Bicocca, Piazza della Scienza 3, 20126 Milano, Italy;

3. High Current Electronics Institute SB of RAS, 634055 Tomsk, Russia;

4. Institute of Physics, P. O. BOX 57, 11001 Belgrade, Serbia)

对基体材料镉镍铁合金 600 和镀多层 TiAlN/TiN 涂层的激光表面处理在基础研究和实际应用中有着很好的前景。观察了由超短脉冲(fs 和 ps)和短脉冲(ns)激光器引起的镉镍铁合金 600 和 TiAlN/TiN 镀层的表面变化。三种激光都能使靶面发生形态改变,超短脉冲的破坏轮廓更清晰。相比于 ps 激光脉冲,fs 激光脉冲能产生更剧烈的破坏。同时与产生半球体形状的 ps 激光束相反,fs 激光脉冲产生的破坏斑是圆锥形的。ns 脉冲辐照时热效应占支配地位。