

文章编号 1004-924X(2007)10-1527-07

小型非球面数控抛光技术的研究

王毅,倪颖,余景池

(苏州大学现代光学技术研究所,江苏苏州215006)

摘要:用计算机控制抛光的方法对小型非球面数控抛光技术进行了研究。对计算机控制小磨头抛光的材料去除作用进行了计算机模拟;依据计算机模拟结果,调整驻留时间函数,进行抛光补偿;最后,在自行研制的三轴联动非球面数控抛光原理样机上高效地完成了70 mm左右非球面的抛光,各项指标达到了中等精度要求,表面粗糙度为2.687 nm,面形精度为0.45 μm ,且重复精度良好。结果表明,该技术有效提高了小型非球面光学零件的批量生产效率。

关键词:数控抛光;非球面;驻留时间;补偿

中图分类号:TQ171.68 **文献标识码:**A

Computer-controlled polishing technology for small aspheric lens

WANG Yi, NI Ying, YU Jing-chi

(*Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

Abstract: Based on the computer controlling method, the polishing technology and pertinent researches for small aspheric lens were studied. The material removing function of computer-controlled polishing tool was simulated with computer at length. Then, according to the simulating results, polishing correction was accomplished after adjusting the function of tool resident time. Finally, a 70 mm aspheric lens was polished on our self-made and computer-controlled polishing machine with three universal driving shafts. Experimental results show that the polishing technology has higher efficiency and precision. The precision of profile measurement is 0.45 μm and the precision of surface roughness is 2.687 nm. Furthermore, a high repeatable accuracy is obtained also. The results also indicate that the polishing technology can improve remarkably the batch-quantity manufacturing efficiency of small aspheric lens.

Key words: computer controlled polishing; aspheric; resident time; correction

1 引言

当今军用武器系统中几乎都装备有各种各样的光电传感器件,而在这些光电传感器件中,基本

上都采用了非球面光学零件。小型非球面的批量抛光一直是制约红外热成像光学技术发展的一个瓶颈,国内常用的方法仍然是传统手工修带抛光,此方法加工周期长、效率低、重复精度差、不利于批量生产。如果采用计算机控制抛光,应用定量

收稿日期:2007-04-04;修订日期:2007-06-29.

基金项目:江苏省教育局自然科学基金资助项目(No. 05KJA14003)

的检测结果指导加工过程,可以发挥计算机执行速度快,记忆准确等优势,使加工的重复精度及生产效率大幅度提高,因此本文选择计算机控制抛光的方法进行针对性的研究。计算机控制抛光的方法始于上世纪 70 年代,以美国为首的一些发达国家已经相继投入了大量的人力、物力和财力进行了深入研究。但是 80% 的研究都是针对空间大口径光学元件的数控抛光。英国的 Zeeko 公司近年已成功开发出口径 40~1 000 mm 的气囊式数控抛光机床。我国在中小口径非球面数控抛光方面起步较晚,长春光机所基于自主设计研制的 FSGJ 3 型非球面数控加工中心,针对口径 $\Phi 108$ mm 凸非球面透镜,研究了非球面精抛光工艺,保证了光学零件具有较高的面形精度。抛光后元件面形精度达到 0.306λ (PV)、 0.028λ (RMS) ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)^[1]。

2 计算机控制抛光的理论与方法

2.1 CCOS 的理论基础^[2-3]

计算机控制非球面加工技术(CCOS)是用计算机控制一个小磨头(直径通常小于工件直径的 1/4)对光学零件进行研磨或抛光,通过控制磨头在工件表面的驻留时间及磨头与工件间的相对压力来控制材料的去除量。描述光学表面加工最成功的模型是 Preston 假设,即:

$$\Delta Z(x, y) = kP(x, y)V(x, y), \quad (1)$$

式中: $\Delta Z(x, y)$ 为磨头与工件接触区域中某点 (x, y) 单位时间内的材料去除量; $P(x, y)$ 为磨头与工件在对应点处的相对压力; $V(x, y)$ 为磨头与工件在对应点处的相对运动速度; k 为与加工过程有关的比例常数(温度、磨头材料等)。本文假设磨头的工作函数是当工件不动的情况下在磨头的运动周期中单位时间内工件与磨头相互作用区域内材料平均去除量的分布函数,用 $R(x, y)$ 表示,则有:

$$R(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T Z(x, y) dt = \frac{1}{T} \int_0^T kP(x, y)V(x, y) dt, \quad (2)$$

其中 T 为加工周期。再假设 $D(x, y)$ 为磨头的驻留时间函数,它表示磨头在点 (x, y) 处的驻留时间。这样,磨头在工件表面以不同的速度移动时工件表面材料去除量的分布函数 $E(x, y)$ 与 $D(x, y), R(x, y)$ 的关系为:

$$E(x, y) = \iint_{path} R(x, y)D(x - \xi)(y - \eta) d\xi d\eta. \quad (3)$$

式(3)表明在 CCOS 加工过程中,材料的去除量等于小磨头工作函数 $R(x, y)$ 与其驻留时间 $D(x, y)$ 沿其运动路径的卷积,这就是 CCOS 加工过程中最重要的理论依据。

2.2 $R(x, y)$ 的计算机模拟

抛光方法如图 1 所示。

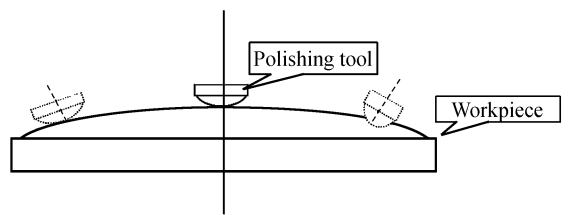


图 1 抛光示意图

Fig. 1 Polishing diagram

抛光头在自转的同时,有一个绕被加工工件对称轴的摆动运动(但不进行公转运动),以适当的接触面积和压力接触被加工零件,并保证抛光磨头的旋转轴与抛光头和被加工零件的接触面的中心点处的切线始终保持垂直。被加工件随着工作台自转的同时在水平方向和垂直方向按一定的速度 v 和轨迹移动。

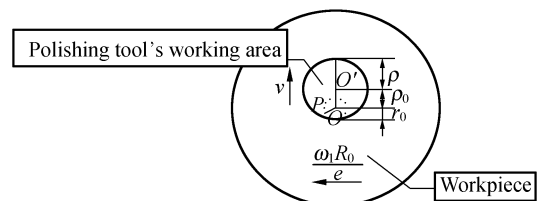


图 2 抛光头作用于工件的运动模拟图

Fig. 2 Polishing tool moving on workpiece

图 2 为抛光头作用于工件的运动模拟图, ρ 为磨头工作区域半径(本运动模型中磨头只自转,无公转,则 ρ 即为磨头半径), ρ_0 为磨头工作函数中心到工件中心的距离,当 $\rho_0 > \rho$ 时,磨头与工件在一个周期内接触区域为环带;当 $\rho_0 < \rho$ 时,磨头

与工件在一个周期内接触区域为圆带,此时 $\rho_0 + \rho$ 为磨头覆盖区域半径 ($r' = \rho_0 + \rho$), r_0 为运动周期中磨头与工件始终接触区域圆半径 ($r_0 = \rho - \rho_0$), O 为工件中心, O' 为磨头中心, ω_1 为磨头自转角速度, ω_2 为工件旋转角速度 (以匀线速度旋转 $\omega_2 = \omega_1 R_0 / e$, R_0 为工件半径, e 为磨头中心到工件中心的距离, $e = \rho_0$)。通常在抛光过程中保持压力及其它工艺条件不变,由式(2)可知, $R(x, y)$ 仅是 v 的函数,在任一瞬间与 v 成正比,所以求得磨头覆盖区域内各点在磨头绕工件旋转一周时相对速度的积分即可得磨头覆盖区域内材料去除量的相对分布函数,即 $R(x, y)$ 。

$$R(r) = c \int_{-\theta_0}^{\theta_0} v(r) d\theta, \quad (4)$$

其中 θ_0 为工件旋转过程中磨头对考察点开始起材料去除作用时的角度, v 为磨头覆盖区域中考察点的瞬时线速度, r 为参考点到工件中心的距离^[4-5]。

可以分两种情况求解 $R(r)$ ：

(1) 当 $\rho_0 < \rho$ 时,磨头与工件在一个周期内接触区域为圆带,根据 θ_0 的特点可以将磨头覆盖区域分为两个区域:当 $0 < r \leq \rho - \rho_0$, 区域内的点始终和磨头接触,轨迹为圆, $\theta_0 = \pi$; 当 $r > \rho - \rho_0$, 区域内的点部分时间和磨头接触,轨迹为圆弧,

$$\theta_0 = \arccos \left[\frac{r^2 + \rho_0^2 - \rho^2}{2r\rho_0} \right]. \quad (5)$$

经过计算机模拟可以得到几种不同情况下磨头去除特性曲线,如图 3、4、5 所示。

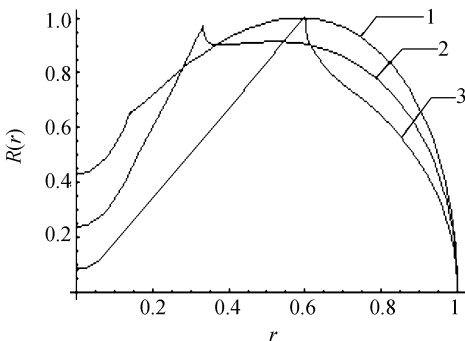


图 3 磨头工作函数曲线

Fig. 3 Polishing tools working function curves

- Curve 1: $\rho_0/\rho = 3/4$ $\omega_2/\omega_1 = 1/5$
- Curve 2: $\rho_0/\rho = 1/2$ $\omega_2/\omega_1 = 1/5$
- Curve 3: $\rho_0/\rho = 1/4$ $\omega_2/\omega_1 = 1/5$

Workpiece and polishing tool rotate in same direction

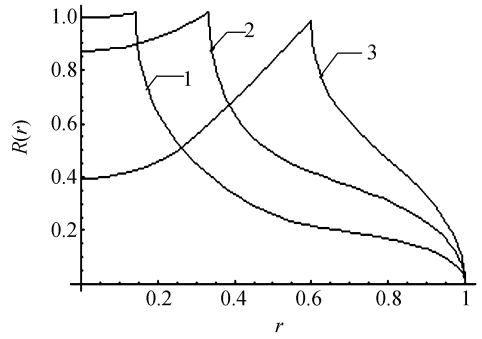


图 4 磨头工作函数曲线

Fig. 4 Polishing tools working function curves

- Curve 1: $\rho_0/\rho = 3/4$ $\omega_2/\omega_1 = 5/1$
- Curve 2: $\rho_0/\rho = 1/2$ $\omega_2/\omega_1 = 5/1$
- Curve 3: $\rho_0/\rho = 1/4$ $\omega_2/\omega_1 = 5/1$

Workpiece and polishing tool rotate in same direction

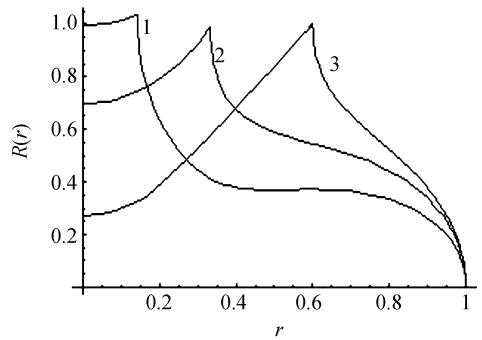


图 5 磨头工作函数曲线

Fig. 5 Polishing tools working function curves

- Curve 1: $\rho_0/\rho = 3/4$ $\omega_2/\omega_1 = 5/1$
- Curve 2: $\rho_0/\rho = 1/2$ $\omega_2/\omega_1 = 5/1$
- Curve 3: $\rho_0/\rho = 1/4$ $\omega_2/\omega_1 = 5/1$

Workpiece and polishing tool rotate in opposite direction

(2) 当 $\rho_0 > \rho$ 时,磨头与工件在一个周期内接触区域为环带,磨头工作函数随着 ρ_0 的变化而变化,可以用相同的方法进行推导。不同情况下磨头特性曲线如图 6、7、8 所示。

$R(x, y)$ 为一个 δ 函数时,时间驻留函数等于表面材料的去除量函数,很容易求得。但这在工程上是无法实现的,即磨头不可能是一个绕自身转动的点,而此时相对速度也为零。但在实际加工中,仍以误差分布函数作为时间驻留函数,其结果使抛光过程变为一个向终极目标逐次逼近的过程,逼近的速度与磨头工作函数 $R(x, y)$ 密切相关, $R(x, y)$ 越接近于 δ 函数,则收敛速度加快,

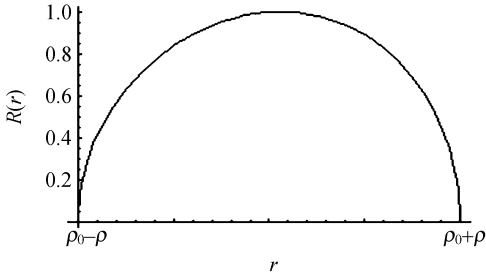


图 6 磨头工作函数曲线

Fig. 6 Polishing tools working function curve

$$\rho_0/\rho=5/1, \omega_2/\omega_1=1/5$$

Workpiece and polishing tool rotate in same direction

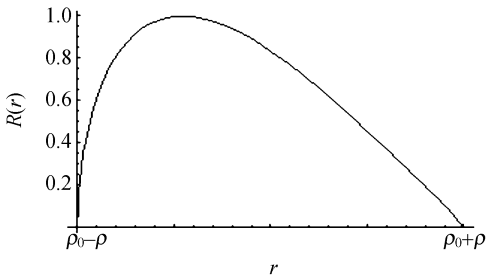


图 7 磨头工作函数曲线

Fig. 7 Polishing tools working function curve

$$\rho_0/\rho=5/1, \omega_2/\omega_1=5/1$$

Workpiece and polishing tool rotate in same direction

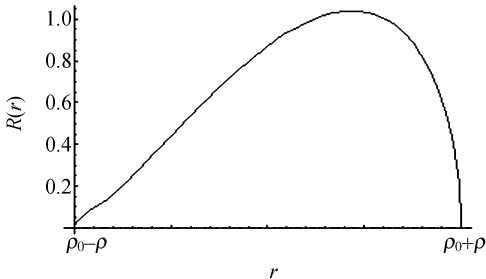


图 8 磨头工作函数曲线

Fig. 8 Polishing tools working function curve

$$\rho_0/\rho=5/1, \omega_2/\omega_1=5/1$$

Workpiece and polishing tool rotate in opposite direction

逐次逼近的次数变少,加工效率提高。根据以上分析,得到以下结论:

(1)当 $\rho_0 > \rho$ 时,工件转速远大于磨头自转速度,磨头工作函数曲线接近高斯函数。当 $\rho_0 < \rho$

时,磨头自转速度远大于工件转速,磨头工作函数接近高斯函数。

(2)当 $\rho_0 > \rho$ 时,工件转速远大于磨头自转速度,磨头与工件之间正反转对磨头工作函数曲线影响不大。

(3)当 $\rho_0 < \rho$ 时,磨头与工件之间同向转比反向转工作函数更接近于高斯函数。

2. 3 整个工作表面去除量函数 $E(R)$ 的计算机模拟

将磨头工作函数 $R(r)$ 根据理论推导结果进行优化,并与磨头驻留函数 $D(r)$ 做卷积,即可得到整个工件表面去除量的分布函数。而对于工件上的某一点而言,此卷积可演变成如下的积分过程^[6-7]。

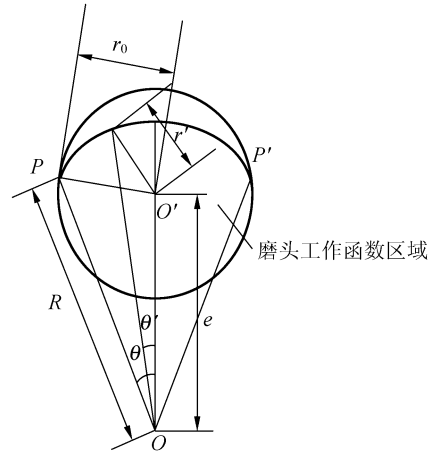


图 9 磨头与工件相互作用示意图

Fig. 9 Diagram of polishing tool and work piece

如图 9 所示, O 为工件中心, O' 为磨头中心, P 为工件上任意一点,它与工件中心距离为 R ,磨头从工件中心以速度 v 向外匀速移动,同时工件以 ω_1 的角速度旋转, R_0 为工件半径。在这种运动形式下,磨头工作函数在工件上的轨迹为螺旋线,如果螺距远远小于磨头工作函数的直径,而工件的旋转速度远远大于磨头的径向移动速度, P 与圆形磨头工作函数区域接触时间非常短暂,轨迹为 $P \rightarrow P'$,这时可以近似认为 P 和 P' 是相对于工件中心与磨头工作函数中心连线对称的。在接触过程中, P 点与磨头工作中心的距离不断改变。 r_0 为磨头工作函数半径, r' 为 P 点与磨头接触过

程中某时刻距离磨头工作中心的距离, θ 为 P 和 P' 对工件中心的半张角, $E(R)$ 为工件去除量分布函数,可以得到:

$$r' = \sqrt{R^2 + e^2 - 2R \cdot e \cos \theta'} \quad (6)$$

$$E(R) = \int_{e_1 - \theta}^{e_2} \int_{\theta} R(r') d\theta' de \quad (7)$$

$$\theta = \arccos \left[\frac{R^2 + e^2 - r_0^2}{2Re} \right] \quad (8)$$

从式(7)可见,去除量分布函数是一个双重积分,下面求解积分的上下限, e_1 和 e_2 分别为 P 点切入和离开磨头时磨头工作函数中心到工件中心的距离。开始工作时,设置磨头工作函数中心与工件中心的初始偏心为 e_0 ,如图 10 所示。根据 e_1

$e_2 = R + r_0$; θ 同式(8),见图 10。

(4)当 $R_0 - r_0 < R \leq R_0$ 时, $e_1 = R - r_0$; $e_2 = R_0$; θ 同式(8)。

用前面优化的磨头工作函数并采用上述卷积方法,经过计算机模拟,得到一个半口径为 35 mm 的工件材料去除量分布函数图,如图 11。

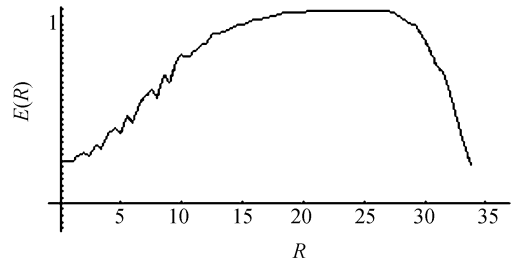


图 11 工件材料去除量分布函数图

Fig. 11 Distribution of material removals

可以看到,中间与边缘的去除量不够,可以采用调整驻留时间函数的方法进行补偿。图 11 只是一个经过理论推导后的材料去除量分布计算机模拟图,而实际上抛光是一个极其复杂的过程,它由多种因素所决定,如抛光工件的材料、抛光模的运动方式、材料、几何结构、压力以及与抛光工件的接触面积、抛光磨削材料、浓度、甚至抛光环境温度、湿度等都对抛光效果有很大的影响。因此,实际抛光时,其材料去除量分布不可能与图 11 完全吻合。对实际抛光的一些参数运用可由理论推导的材料去除量分布曲线进行指导。

3 实验结果

根据理论推导的结果进行实验,对口径 70 mm 已经细磨好的非球面在三轴联动数控抛光原理样机上进行抛光实验,非球面为二次双曲面,材料为 BK7。抛光头采用柔性橡胶做成的球形气囊,气囊内部充有一定压强的气压,其压强可根据需要调节,外表面粘贴耐磨性能较好 0.5~1 mm 厚的进口聚胺脂抛光片^[8-9]。抛光工艺参数如表 1 所示。

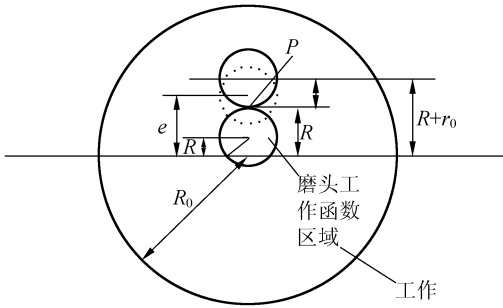


图 10 磨头在工件上运动区间示意图

Fig. 10 Diagram of polishing tool's home range on work piece

和 e_2 的不同取值,可以将工件分为四个部分求 $E(R)$:

(1)当 $R \leq r_0 - e_0$ 时,又可分为两部分,这部分去除量分布函数为两部分之和。第一部分,磨头工作函数中心到工件中心的距离从 e_0 到 $r_0 - R$,这个过程 P 点磨头工作函数区域始终接触且接触轨迹为圆,见图 10,则: $e_1 = e_0$; $e_2 = r_0 - R$; $\theta = \pi$;第二部分,磨头工作函数中心到工件中心的距离从 $r_0 - R$ 到 $r_0 + R$,这个过程 P 点与磨头工作区域接触轨迹为圆弧,见图 10,则: $e_1 = r_0 - R$; $e_2 = r_0 + R$; θ 同式(8)。

(2)当 $r_0 - e_0 < R \leq r_0 + e_0$ 时, $e_1 = e_0$; $e_2 = r_0 + R$; θ 同式(8)。

(3)当 $r_0 + e_0 < R \leq R_0 - r_0$ 时, $e_1 = R - r_0$;

表 1 抛光工艺参数

Tab.1 Processing parameters of polishing

抛光工件转速	800 r/min
抛光头转速	200 r/min
抛光工件在 x 轴的进给速度	1 500 mm/min
接触面口径	8~10 mm
充气抛光头压强	101 325 Pa

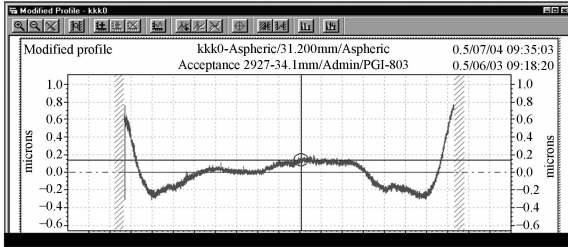


图 12 面形检测结果

Fig. 12 Result of profile measurement

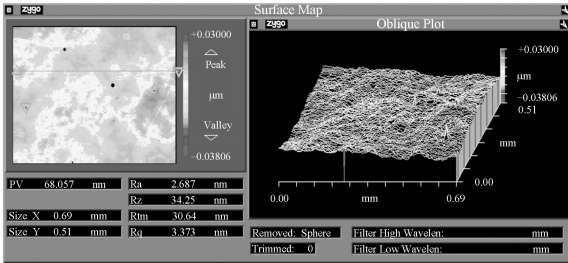


图 13 表面粗糙度检测结果

Fig. 13 Result of roughness measurement

抛光时间约 40 min,抛光结果如图 12、13 所示。

检测结果表明:表面粗糙度为 2.687 nm,面形精度为 0.45 μm (去除边缘效应部分),且多次实验后的重复性好($\pm 0.2 \mu\text{m}$)。

4 结 论

本文从 Preston 方程出发,通过详细的理论推导,对数控弹性气囊抛光的效果进行了计算机模拟,并根据模拟结果,补偿抛光头在工件表面的驻留时间,保证工件表面的抛光去除量一致,同时依据理论分析的结果,在自制的三轴联动数控抛光原理样机上完成了中等口径非球面的高效抛光。实验证明,理论计算、计算机模拟的结果是可以值得信赖的。经过检测,非球面抛光零件表面粗糙度为 2.687 nm,面形精度为 0.45 μm (去除边缘效应部分),且多次实验后的重复性好($\pm 0.2 \mu\text{m}$),各项指标达到中等精度要求。该数控抛光样机可以适用于中等精度的中小口径非球面的批量生产或高精度中小口径非球面的高效粗抛。

参考文献:

- [1] 张忠玉,张学军,牛海燕. 中小口径非球面元件加工技术的探讨[J]. 光学技术, 2001, 27(6):42-43.
ZHANG ZH Y., ZHANG X J, NIU H Y. Discussion on the fabrication technology of middle and small size aspheric optics element [J]. *Optical Technology*, 2001, 27(6):42-43. (in Chinese)
- [2] 王权陡,余景池,张峰,等. 数控抛光中不同运动方式下小抛光盘抛光特性之比较[J]. 光学精密工程, 1999, 13(5), 74-80.
WANG Q D, YU J CH, ZHANG F, et al.. Polishing performance comparison of small polishing pad worked in different motion model in computer controlled optical polishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 13(5), 74-80. (in Chinese)
- [3] BINGHAM R G, WALKER D D. A novel automated process for aspheric surfaces [J]. *SPIE*, 2000, 4093:445 - 450.
- [4] 王毅,余景池. 计算机控制光学表面抛光的磨头运动方式和参数的优化研究[J]. 光学技术, 2003, 29(3):1-3.
WANG Y, YU J CH. Studying and optimizing running mode and parameter of polishing tool used in computer controlled polishing of optical surface [J]. *Optical Technology*, 2003, 29(3):1-3. (in Chinese)
- [5] 王权陡,刘民才,张洪霞. 数控抛光技术中抛光盘的去除函数[J]. 光学技术, 2000, 26(1):32-34.

- WANG Q D, LIU M C, ZHANG H X. Removing function of polishing pad in computer controlled optical polishing [J]. *Optical Technology*, 2000, 26 (1):32-34. (in Chinese)
- [6] 李全胜,成晔,蔡复之,等. 计算机控制光学表面成形驻留时间算法研究[J]. 光学技术,1999,27(3):56-62.
LI Q SH, CHENG Y, CAI F ZH, *et al.*. Dwell time algorithm in computer controlled optical surfacing [J]. *Optical Technology*, 1999, 27 (3):56-62. (in Chinese)
- [7] 薛栋林,张忠玉,张学军. 一种中小口径非球面元件数控抛光技术[J]. 光学精密工程,2005,13(2),97-103.
XUE D L, ZHANG ZH Y, ZHANG X J. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng*, 2005, 13(2), 97-103. (in Chinese)
- [8] 牛海燕,张学军. $\Phi 124$ mm 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J]. 光学精密工程,2006,13(4),19-24.
NIU H Y, ZHANG X J. Research on computer controlled polishing technology of $\Phi 124$ mm aspheric reaction-burned silicon carbide mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 13(4), 19-24. (in Chinese)
- [9] 陈智利,杭凌侠,张峰. 一种新的气囊式抛光方法的研究[J]. 光电工程,2006,33(10),125-128.
CHEN ZH L, HANG L X, ZHANG F. Novel industrial process for ballonet polishing [J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2006,33(10),125-128. (in Chinese)

作者简介:王 毅(1977—),男,江苏扬州人,苏州大学现代光学技术研究所博士研究生,助理研究员,研究方向为非球面加工与检测。E-mail:wangyi77103@sohu.com

余景池,男,苏州大学现代光学技术研究所研究员,博士生导师,研究方向为非球面加工与检测。