

DOI: 10.3901/JME.2013.03.186

自由曲面光学元件气囊抛光进动运动控制技术*

潘 日 王振忠 王春锦 张东旭 谢银辉 郭隐彪

(厦门大学机电工程系 厦门 361005)

摘要: 针对自由曲面光学元件的加工特点, 研究气囊抛光自由曲面光学元件进动运动控制技术, 用于求出气囊工具进动过程中两虚拟轴的转角, 实现对气囊自转轴空间位置的控制。以气囊自转轴为研究对象, 由于自由曲面光学元件上每个点的法线三维坐标都不相同且气囊进动抛光过程中气囊自转轴与工件加工点局部法线夹角不变, 提出建立基坐标系和抛光点对应三维空间坐标系的方法, 得到抛光过程中气囊自转轴的空间位置变化情况, 而后利用旋转坐标变换得到气囊抛光进动运动控制模型; 在所建立的自由曲面光学元件气囊抛光进动运动控制模型中加入控制算法, 求出抛光自由曲面光学元件各点时气囊工具两个虚拟旋转轴的转角。利用 Matlab 对自由曲面光学元件不同方向截面进行仿真抛光试验, 得到自由曲面各方向上气囊抛光进动运动曲线以及仿真进动角曲线, 结果证明了自由曲面光学元件气囊抛光进动运动控制模型及控制算法的正确性。

关键词: 自由曲面光学元件 气囊抛光 进动 控制技术

中图分类号: TH161

Control Techniques of Bonnet Polishing for Free-form Optical Lenses with Precession

PAN Ri WANG Zhenzhong WANG Chunjin ZHANG Dongxu XIE Yinhui GUO Yinbiao

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract: Control techniques of bonnet polishing free-form optical lenses with 'precession' is studied, according to the processing characters of free-form optical lenses, to figure out the rotating angles of two virtual axes of bonnet tool, which lead to the controllability of spin axis of bonnet tool. The spin axis of bonnet tool is taken as the object, due to the difference of the local normal of each polishing point and the angle between the spin axis of bonnet tool and local normal is keeping constant in polishing process, a method about how to set up basic coordinate and corresponding coordinate of polishing point is proposed, aiming to get the positions of spin axis of bonnet tool in polishing process, by which a movement model can be obtained by combining with rotating coordinate transformation; Then control algorithm is added to the movement model, and rotating angles of two virtual axes of bonnet tool when polishing each point on free-form optical lenses are calculated. At the end, simulations in polishing different directions of free-form optical lens in Matlab are carried out, to get the curves of precession control and the simulated precession angles, the results reveal that the movement model and control algorithm presented are both correct.

Key words: Free-form optical lenses Bonnet polishing Precession Control techniques

0 前言

作为近几年国内外新兴的抛光技术, 气囊式抛光已被广泛应用到光学元件的超精密加工。目前关于气囊抛光技术的研究成果较多, 但却较少有气囊抛光进动运动控制方面的报道。作为气囊抛光技术的鼻祖, 英国 ZEEKO 公司的 WALKER 等^[1-4]开发

了一系列气囊抛光机床, 并对其加工工艺、关键技术及加工结果做了报道, 却未在文献中对抛光过程中气囊工具进动运动控制的细节进行披露; 张伟等^[5-8]以 ZEEKO 公司的产品为试验平台对气囊抛光中材料去除、边缘效应等方面进行研究, 内容也未涉及进动运动控制; 哈尔滨工业大学的高波等^[9-10]试制了气囊抛光试验机, 并进行气囊抛光进动机构的建模与仿真。但是该抛光试验机采用卧式结构并且气囊工具的两虚拟轴线之间相互垂直, 与本文中两虚拟轴线呈一定夹角的气囊抛光工具结构有所不

* 国家自然科学基金(51075343)和厦门市科技计划(3502Z20113007)资助项目。20120614 收到初稿, 20121109 收到修改稿

同，此外，该试验机主要针对小口径、轴对称类光学元件的抛光，而并不适用于自由曲面光学元件；浙江工业大学的计时鸣等^[11-12]将气囊抛光技术与工业机器人相结合建立新型气囊抛光系统，并利用机器人学进行模具自由曲面气囊抛光运动控制研究。然而，由于工业机器人在结构上与传统机床有区别，其运动控制方法并不适用于本文中以数控机床为载体的气囊抛光系统；厦门大学潘日等^[13]以大口径轴对称非球面为加工对象，进行气囊抛光进动运动建模及控制，该方法是基于轴对称非球面的旋转对称性，以工件一条母线为对象，根据母线上抛光点的法线在 x 方向上相同从而建立二维 (y, z) 进动坐标系在同一平面内进行分析建模，而本文以自由曲面光学元件为加工对象，其上每个抛光点的法线在三维方向都不相同，因此建立同一平面内坐标系的方法并不适用。

本课题组针对大口径光学元件加工需求，开发了大口径非球面元件可控气囊抛光系统，本文将解决自由曲面光学元件的气囊抛光进动运动控制问题。通过建立自由曲面光学元件上各抛光点对应的三维空间坐标系，求解自由曲面光学元件气囊抛光进动运动控制模型；并在所建立的自由曲面光学元件气囊抛光进动运动模型中加入控制算法，最后利用 Matlab 软件进行自由曲面光学元件不同方向截面的抛光仿真试验验证。

1 气囊抛光进动运动控制

自由曲面光学元件气囊进动抛光原理如图 1 所示。其中气囊抛光光学元件采用连续进动抛光的方式，即工件的抛光过程中，气囊自转轴始终与工件上抛光点的局部法线呈一个固定的角度，这个角度称为进动角，图 1 中用 ρ 表示。

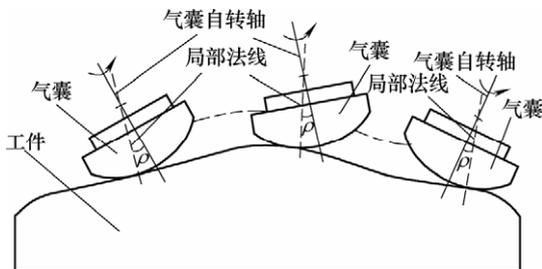
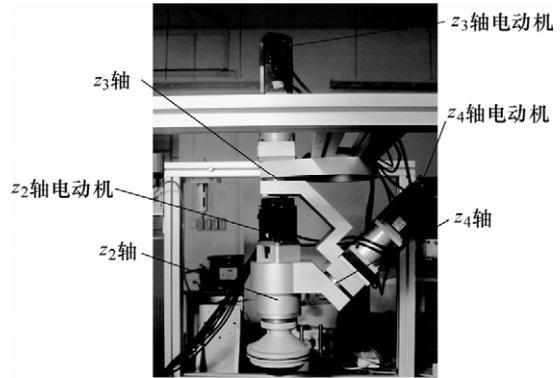


图 1 气囊连续进动抛光大口径非球面原理

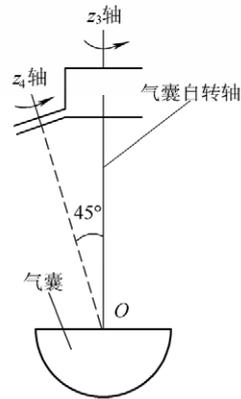
气囊的连续进动抛光方式具有两个优点：被加工区域的材料受到不同方向的切削作用，使得表面更加均匀、光滑；去除函数近似于高斯分布，且是对称的，能够解决高空间频率及中心去除零点的问题。已有的研究文献^[3-4]表明这种加工方式可以得

到更好的工件表面质量。

图 2 为本文采用的气囊抛光工具实物图及机构简图，气囊工具主要包括两个虚拟旋转轴 z_3 和 z_4 轴以及自转轴 z_2 ，三轴轴线相交于气囊球心 O 且 z_2 和 z_3 轴线在空间重合并与 z_4 轴线呈 45° 夹角。气囊工具的进动过程定义为：气囊抛光工具 z_3 轴先旋转一定角度 θ_A ，而后气囊工具 z_4 轴再旋转一定角度 θ_B 。气囊工具进动的目的是控制气囊工具 z_2 轴的空间位置，以实现连续进动抛光过程中气囊自转轴和工件局部法线的夹角不变。



(a) 气囊工具实物图



(b) 气囊工具机构简图

图 2 气囊抛光工具实物图及机构简图

自由曲面光学元件气囊抛光进动运动控制的实质是，通过自由曲面光学元件抛光过程中各抛光点法线方向的变化，计算气囊自转轴在空间中位置的变化，从而求出气囊抛光自由曲面光学元件上各个点时气囊工具两虚拟轴 z_3 和 z_4 需要转过的角度值，来控制气囊自转轴达到预期的空间位置。为了方便求解气囊自转轴在空间中位置的变化，需要建立基坐标系及抛光点对应三维空间坐标系。

2 基坐标系和抛光点对应三维空间坐标系的建立方法

由于自由曲面光学元件上每个抛光点的法线空间位置都不相同，抛光过程中的气囊工具进动运

动控制(即抛光过程中气囊工具两虚拟轴转角的控制)计算复杂,因此本文提出建立基坐标系和抛光点对应三维空间坐标系的方法,来求得气囊抛光自由曲面光学元件上各个点时气囊工具两虚拟轴需要转过的角度值。

2.1 基坐标系建立

根据气囊工具结构,气囊工具进动运动不改变气囊球心位置,且气囊工具 z_3 轴处于竖直方向不随进动运动而变化,因此以气囊工具球心 O 为原点建立基坐标系 $Oxyz$,其 z 轴为竖直方向, y 轴为水平方向, x 轴方向通过右手定则得到。

2.2 抛光点对应三维空间坐标系建立

根据气囊连续进动抛光的原理,由于自由曲面光学元件上各抛光点的法线的 x 、 y 、 z 方向都不相同,因此为方便计算,分析各抛光点时可以建立抛光点对应三维空间坐标系,该坐标系的 z 轴方向与抛光点局部法线相同,通过抛光点对应三维空间坐标系的建立,可以很容易的得到抛光该点时气囊自转轴在该对应坐标系中的位置,而后通过空间坐标变换,将其变换到基坐标系中,最后通过旋转矩阵计算抛光该点时气囊工具两虚拟轴需要转过的角度以实现控制。

图 3 为抛光任意点 A 时基坐标系与其对应三维空间坐标系的建立,其中, P 为气囊自转轴与气囊交点, OP 为气囊自转轴线, ρ 为进动角, $Oxyz$ 为基坐标系, $Ox'y'z'$ 为抛光点 A 对应三维空间坐标系, OA 为抛光点 A 的局部法线,与 Oz' 共线。

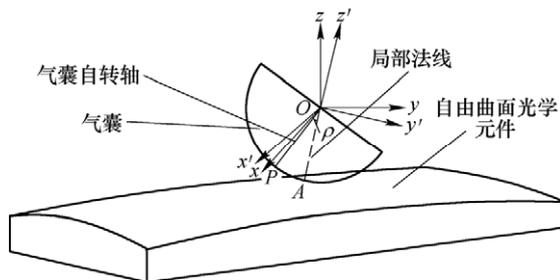
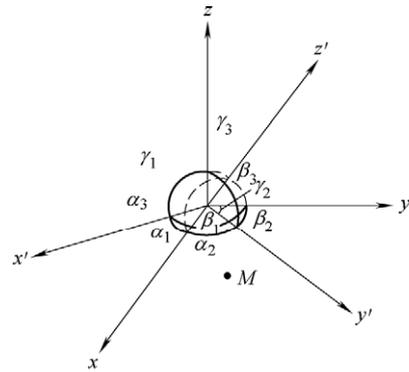


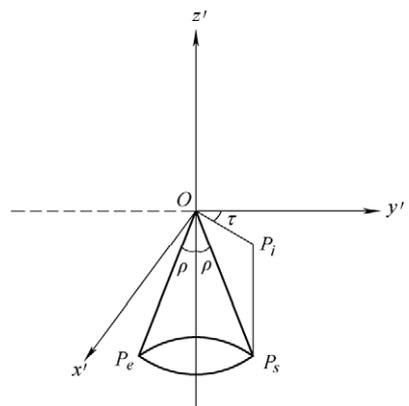
图 3 抛光件任意点 A 时基坐标系与其对应三维空间坐标系的关系

图 4 为基坐标系与抛光点对应坐标系及气囊自转轴在抛光点对应坐标系中可能的位置,其中图 4a 为图 3 中所建立的基坐标系与抛光点 A 对应三维空间坐标系关系, $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ 为 Ox' 轴与 Ox, Oy, Oz 的正向夹角; $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ 为 Oy' 轴与 Ox, Oy, Oz 的正向夹角; $\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$ 为 Oz' 轴与 Ox, Oy, Oz 的正向夹角; M 为空间任意一点。图 4b 为气囊自转轴在抛光点 A 对应三维空间坐标系中可能的位置,其中以 OP_e, OP_s 为母线的圆锥面即是气囊自转轴可能的位置,

该圆锥面上的所有母线与 Oz' 负方向夹角都为进动角 ρ 。 OP_i 为 OP_s 在 $Ox'y'$ 平面投影, τ 为 OP_i 与 y' 轴正方向的夹角。



(a) 基坐标系与抛光点 A 对应三维空间坐标系关系



(b) 气囊自转轴在抛光点 A 对应三维空间坐标系中可能的位置

图 4 基坐标系与抛光点 A 对应三维空间坐标系关系及气囊自转轴在抛光点 A 对应三维空间坐标系中可能的位置

假设图 4a 中 M 在坐标系 $Oxyz$ 和 $Ox'y'z'$ 下的坐标分别为 (X,Y,Z) 和 (X',Y',Z') , 则根据三维空间坐标变换可得到相应的坐标变换为^[14]

$$\begin{cases} X = X' \cos \alpha_1 + Y' \cos \alpha_2 + Z' \cos \alpha_3 \\ Y = X' \cos \beta_1 + Y' \cos \beta_2 + Z' \cos \beta_3 \\ Z = X' \cos \gamma_1 + Y' \cos \gamma_2 + Z' \cos \gamma_3 \end{cases} \quad (1)$$

由于自由曲面光学元件上各抛光点的法线可以根据自由曲面光学元件表面方程结合抛光路径及加工方式求出,即每个抛光点对应的三维坐标系 $Ox'y'z'$ 的 z' 轴的位置矢量可以确定;求解 x' 和 y' 轴空间位置时,可基于 z' 轴的空间矢量值根据两矢量垂直则内积为 0 的定理求得 y' 轴的位置矢量,而后根据两轴位置矢量的叉乘获得 x' 轴的位置矢量。

气囊连续进动抛光过程中,通过气囊抛光机床的进给运动带动气囊抛光头的球心运动来跟踪工件抛光点法线的变化,使气囊球心与工件局部抛光点的连线为该点的法线;利用气囊工具进动运动即气囊工具 z_3 和 z_4 轴的旋转来控制气囊自转轴在空间的

位置变化，使其与工件局部抛光点法线之间的夹角值(即进动角)保持不变。气囊工具的进给运动和进动运动互不影响，因此求解进动运动控制模型时，消去进给运动的效果即将所有抛光点对应的三维空间坐标系平移至基坐标系中，并以 O 为公共原点，通过抛光任意两个抛光点时，气囊自转轴在基坐标系中位置的变化，结合旋转矩阵变换公式建立自由曲面光学元件气囊抛光进动运动模型。

3 气囊抛光进动运动控制

3.1 自由曲面光学元件气囊抛光进动运动建模

以抛光自由曲面光学元件上任意两相邻点的进动运动控制进行运动建模。根据坐标系的建立方法，抛光工件上任意两相邻点 i 、 $i+1$ 时建立的对应坐标系如图 5 所示。坐标系 $Ox_i y_i z_i$ 、 $Ox_{i+1} y_{i+1} z_{i+1}$ 分别为抛光点 i 、 $i+1$ 对应的三维空间坐标系， OP_i 、 OP_{i+1} 为抛光 i 、 $i+1$ 点时，气囊自转轴可能的位置， OP'_i 、 OP'_{i+1} 为 OP_i 和 OP_{i+1} 在 $Ox_i y_i$ 和 $Ox_{i+1} y_{i+1}$ 平面内的投影， α_i 、 α_{i+1} 为 OP'_i 与 y_i 、 OP'_{i+1} 与 y_{i+1} 的夹角。

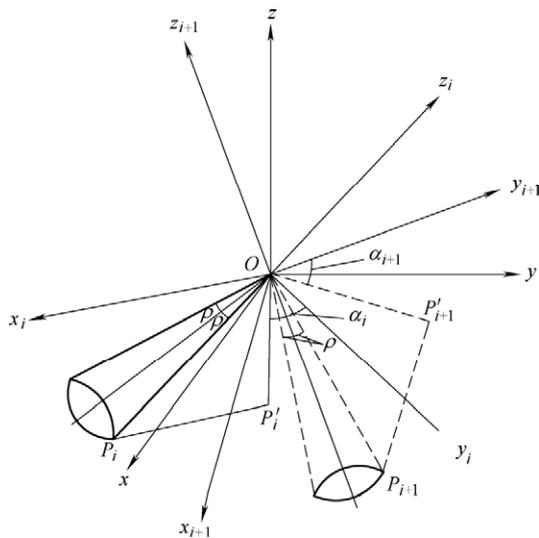
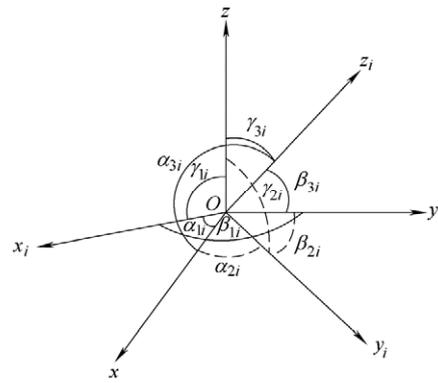


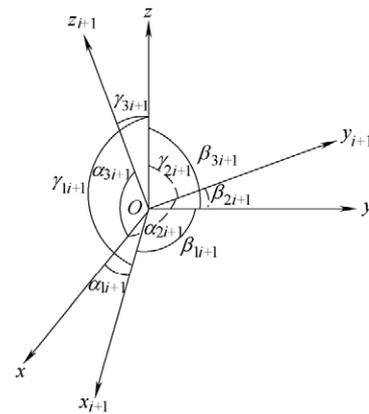
图 5 抛光任意两相邻点时建立的对应坐标系

图 6 为图 5 中的基坐标系与抛光点 i 和 $i+1$ 对应三维空间坐标系的位置关系。其中 α_{1i} 、 β_{1i} 、 γ_{1i} 为 Ox_i 与 Ox 、 Oy 、 Oz 的正向夹角， α_{2i} 、 β_{2i} 、 γ_{2i} 为 Oy_i 与 Ox 、 Oy 、 Oz 的正向夹角， α_{3i} 、 β_{3i} 、 γ_{3i} 为 Oz_i 与 Ox 、 Oy 、 Oz 的正向夹角； α_{1i+1} 、 β_{1i+1} 、 γ_{1i+1} 为 Ox_{i+1} 与 Ox 、 Oy 、 Oz 的正向夹角， α_{2i+1} 、 β_{2i+1} 、 γ_{2i+1} 为 Oy_{i+1} 与 Ox 、 Oy 、 Oz 的正向夹角， α_{3i+1} 、 β_{3i+1} 、 γ_{3i+1} 为 Oz_{i+1} 与 Ox 、 Oy 、 Oz 的正向夹角。

由空间几何关系易得，在各自对应的空间三维坐标系中，气囊自转轴的位置矢量



(a) 基坐标系与点 i 对应的抛光三维空间坐标系的关系



(b) 基坐标系与点 $i+1$ 对应的抛光三维空间坐标系的关系

图 6 基坐标系与抛光点 i 和 $i+1$ 对应三维空间坐标系的位置关系

$$l^i_{OP_i} = \begin{pmatrix} \sin \rho \sin \alpha_i \\ \sin \rho \cos \alpha_i \\ -\cos \rho \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$l^{i+1}_{OP_{i+1}} = \begin{pmatrix} \sin \rho \sin \alpha_{i+1} \\ \sin \rho \cos \alpha_{i+1} \\ -\cos \rho \end{pmatrix} \quad (3)$$

结合式(1)~(3)可得， OP_i 和 OP_{i+1} 在基坐标系中的位置矢量

$$l_{OP_i} = \begin{pmatrix} T_1 \cos \alpha_{1i} + T_2 \cos \alpha_{2i} - \cos \rho \cos \alpha_{3i} \\ T_1 \cos \beta_{1i} + T_2 \cos \beta_{2i} - \cos \rho \cos \beta_{3i} \\ T_1 \cos \gamma_{1i} + T_2 \cos \gamma_{2i} - \cos \rho \cos \gamma_{3i} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} T_1 &= \sin \rho \sin \alpha_i \\ T_2 &= \sin \rho \cos \alpha_i \end{aligned} \quad (4)$$

$$l_{OP_{i+1}} = \begin{pmatrix} T_3 \cos \alpha_{1i+1} + T_4 \cos \alpha_{2i+1} - \cos \rho \cos \alpha_{3i+1} \\ T_3 \cos \beta_{1i+1} + T_4 \cos \beta_{2i+1} - \cos \rho \cos \beta_{3i+1} \\ T_3 \cos \gamma_{1i+1} + T_4 \cos \gamma_{2i+1} - \cos \rho \cos \gamma_{3i+1} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} T_3 &= \sin \rho \sin \alpha_{i+1} \\ T_4 &= \sin \rho \cos \alpha_{i+1} \end{aligned} \quad (5)$$

根据气囊自转轴在空间的变换关系有

$$l_{OP_{i+1}} = T^T l_{OP_i} \quad (6)$$

式中 T'' —— l_{OP_i} 绕 z_3 、 z_4 轴旋转的变换矩阵

$$T'' = E^{\theta_b} E^{\theta_A}$$

E^{θ_b} —— l_{OP_i} 绕 z_4 轴旋转的变换矩阵

E^{θ_A} —— l_{OP_i} 绕 z_3 轴旋转的变换矩阵

$$E^{\theta_A} = \begin{pmatrix} \cos \theta'_A & -\sin \theta'_A & 0 \\ \sin \theta'_A & \cos \theta'_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

θ'_A —— z_3 轴转过的角度

$$k' = \begin{pmatrix} \lambda' \\ \mu' \\ \nu' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(\phi + \theta'_A) \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\phi + \theta'_A) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 k' —— 气囊工具 z_3 轴旋转后, z_4 轴的位置矢量

λ' , μ' , ν' —— 矢量 k' 在 $Oxyz$ 坐标系 x, y, z 方向矢量

ϕ —— 气囊工具 z_4 轴的位置参数

$$E^{\theta_b} = \begin{pmatrix} \cos \theta'_B + (\lambda')^2 (1 - \cos \theta'_B) & & & \\ \lambda' \mu' (1 - \cos \theta'_B) + \nu' \sin \theta'_B & & & \\ \nu' \lambda' (1 - \cos \theta'_B) - \mu' \sin \theta'_B & & & \\ \lambda' \mu' (1 - \cos \theta'_B) - \nu' \sin \theta'_B & \nu' \lambda' (1 - \cos \theta'_B) + \mu' \sin \theta'_B & & \\ \cos \theta'_B + (\mu')^2 (1 - \cos \theta'_B) & \mu' \nu' (1 - \cos \theta'_B) - \lambda' \sin \theta'_B & & \\ \mu' \nu' (1 - \cos \theta'_B) + \lambda' \sin \theta'_B & \cos \theta'_B + (\nu')^2 (1 - \cos \theta'_B) & & \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, θ'_B 为 z_4 轴转过的角度。

式(2)~(8)即为自由曲面光学元件抛光过程中的进动运动控制方程。在实际加工控制中, 抛光点在任意抛光点时, 都可由前一个抛光点推导出气囊自转轴 OP_i 的位置参数 α_i 以及 z_4 轴的位置参数 ϕ , 且所有抛光点对应三维空间坐标系坐标轴与基坐标系的夹角可以根据自由曲面光学元件方程求解各加工点空间位置后求得, 只要进动角确定, 方程中的未知数只有 θ'_A 、 θ'_B 、气囊自转轴的空间位置参数 ω , 由前述分析易知 ω 范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。根据上述进动方程, 利用控制算法确定角度 ω 后, 即可求解出抛光任意两相邻点时气囊工具两虚拟轴对应的转角, 进而实现自由曲面光学元件连续进动抛光控制。

3.2 自由曲面光学元件气囊抛光进动运动控制算法

在气囊抛光加工中, 抛光工具进动运动的时间影响进给运动的时间, 从而影响工件的抛光效率。再者, 根据前述分析可知, 由于与抛光点局部法线

成同一角度的位置为一个圆锥面, 气囊自转轴可以是圆锥面上任意一条母线, 因此在实际控制中需要在气囊工具进动运动模型中加入限制条件(控制算法)得到想要的气囊自转轴空间位置。针对这种情况, 结合自由曲面光学元件气囊抛光进动运动模型提出最有效率运动控制算法, 算法流程图如图 7 所示。

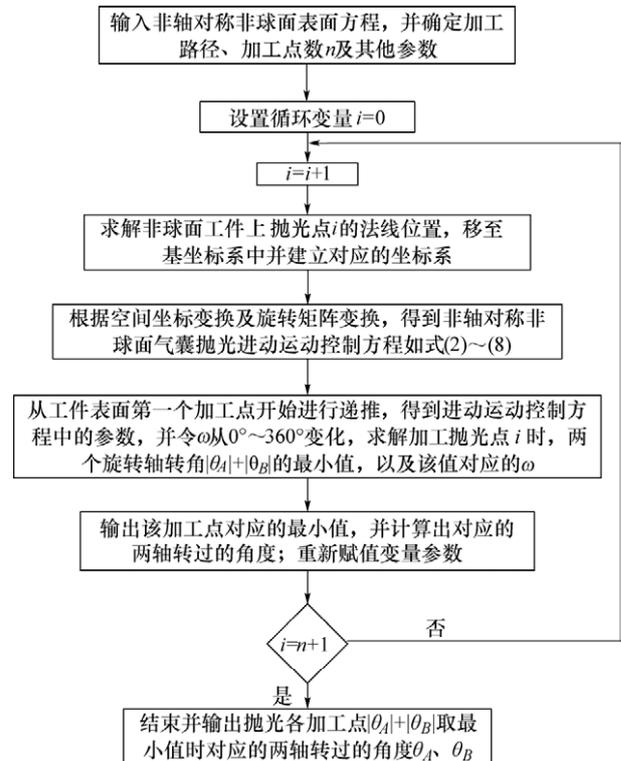


图 7 自由曲面光学元件气囊抛光进动运动控制算法流程图

根据进动抛光要求, 与某一抛光点法线呈相同角度的气囊自转轴可能的位置为一个圆锥面上的所有母线, 如图 4b 所示, OP_e 、 OP_s 所在的圆锥上的所有母线与 Oz' 负方向夹角都为 ρ 。因此, 在连续进动抛光中, 要保持整个抛光过程进动角不变, 当上一个抛光点的气囊自转轴位置确定, 其下一个抛光点的气囊自转轴可能的位置有很多种(对应圆锥面上的所有母线), 由于气囊自转轴空间位置由气囊工具 z_3 和 z_4 轴确定, 也就对应了无数组 z_3 和 z_4 轴转角的解, 而最有效率算法的目标就是通过迭代法在所有可能的位置中确定下一个抛光点的气囊自转轴的位置, 使得 z_3 和 z_4 轴的转角绝对值和最小, 即上一点到下一点的进动过程 z_3 和 z_4 轴转过的角度和最小, 从而减少进动时间提高抛光效率。

3.3 运动模型及控制算法验证

非轴对称非球面光学元件是自由曲面光学元

件中的重要类型，其通用方程可表示为

$$z(x,y) = -R_x + \sqrt{R_x^2 - x^2} + \frac{C_s y^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C_s^2 y^2}}$$

$$C_s = 1/R_s$$

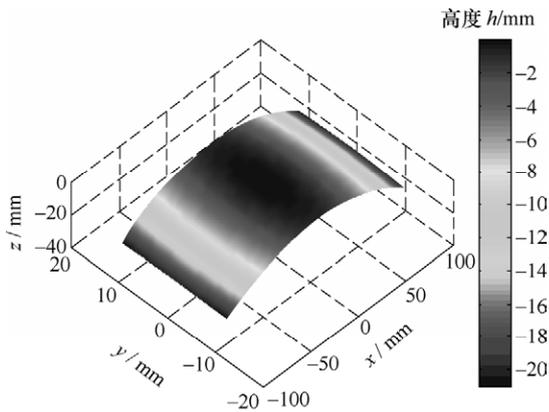
$$R_s = -R_y + Ax^2 + Bx^4 + Cx^6 + Dx^8 + Ex^{10} + Fx^{12} \quad (9)$$

式中， R_s 为非球面副轴半径， R_x 为非球面主轴基础半径， R_y 为非球面副轴基础半径； A, B, C, D, E, F 为非球面副轴系数， k 为非球面系数。

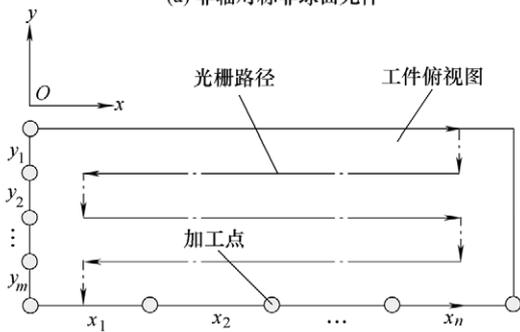
本文所采用的非轴对称非球面元件重要参数为

$$R_y = 65.95 \quad R_x = 225 \quad (10)$$

图8为非轴对称非球面元件及其抛光路径和方式。其中图8a为非轴对称非球面元件，图中的色带标签与面形高低相对应。图8b为非轴对称非球面抛光路径和方式，其中 y_1, y_2, \dots, y_m 为非轴对称非球面元件y方向上相邻加工点的间隔； x_1, x_2, \dots, x_n 为非轴对称非球面元件x方向上相邻加工点的间隔。



(a) 非轴对称非球面元件



(b) 非轴对称非球面抛光路径和方式

图8 非轴对称非球面元件及其抛光路径和方式

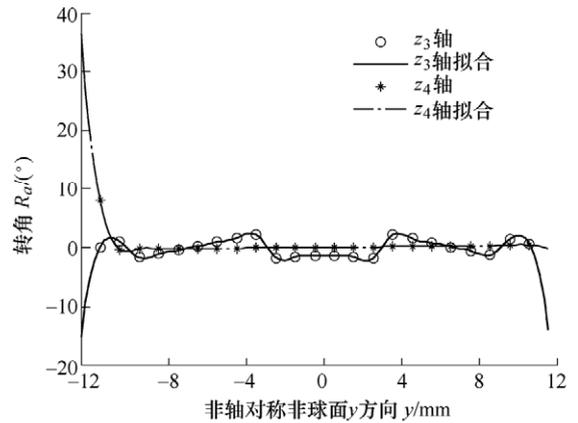
本文以非轴对称非球面光学元件为加工对象，进行气囊抛光进动运动控制仿真试验。试验中采用光栅式加工路径和等步长方式抛光如图8b所示，即各方向上两个相邻加工点之间的间隔相等，结合图8b有

$$\begin{cases} y_1 = y_2 = \dots = y_m \\ x_1 = x_2 = \dots = x_n \end{cases} \quad (11)$$

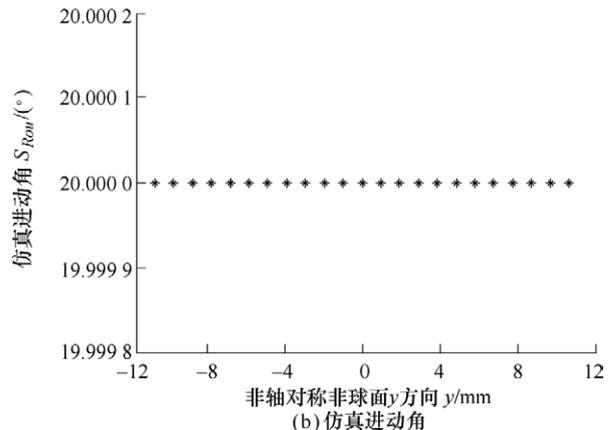
取自由曲面光学元件 x, y 方向各一个截面进行抛光进动运动控制仿真，为简化计算过程， y, x 方向上的抛光步长分别设为1 mm、6 mm，加工点数为23、32，即式(11)中 $m=22, n=31$ ，则有

$$\begin{cases} y_1 = y_2 = \dots = y_{22} = 1 \text{ mm} \\ x_1 = x_2 = \dots = x_{31} = 6 \text{ mm} \end{cases} \quad (12)$$

同时设置加工时的进动角 $\rho=20^\circ$ 得到仿真结果如图9、10所示。



(a) 两虚拟轴转角



(b) 仿真进动角

图9 非轴对称非球面y方向截面进动运动控制及仿真验证

图9a、10a为非轴对称非球面y方向截面上共23个点和非轴对称非球面x方向截面上共32个点进行进动仿真抛光时根据气囊抛光自由曲面进动运动模型和控制算法得到的两虚拟轴转角，由图9a、10a中可以看出，两轴转过的角度变化较小，基本平稳，符合实际加工中的控制要求。

图9b、10b为图9a、10a中各加工点求解出来的两个虚拟轴转角代入进动运动模型，并计算两虚拟轴以该角度旋转后气囊自转轴与下一个抛光点局部法线的夹角，从图中可以看出，两个方向上仿真进动角都为 20° ，与程序中设置的进动角值在 0.001° 的误差范围内相等，因此，可以证明文中气囊抛光自由曲面进动运动模型和控制算法的正确性。

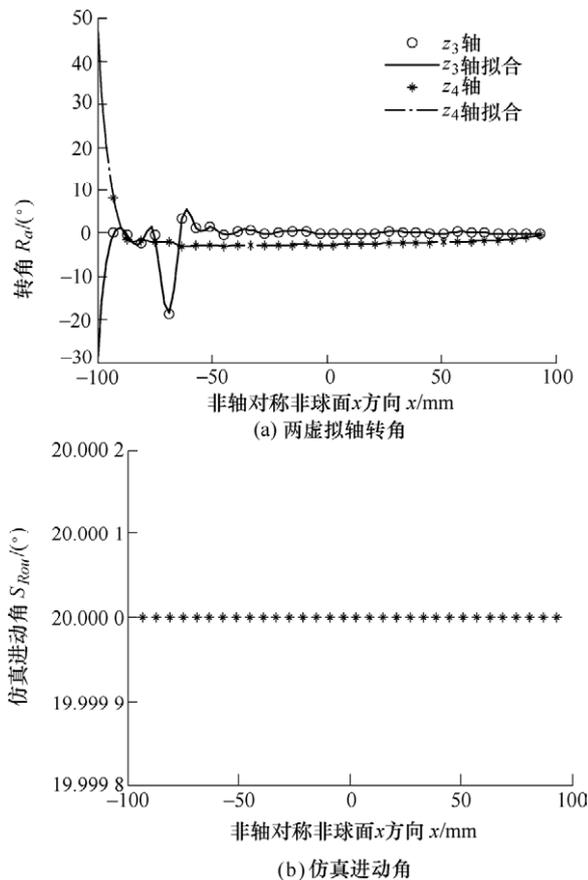


图 10 自由曲面光学元件 x 方向截面进动运动控制及仿真验证

4 结论

(1) 分析气囊进动抛光自由曲面工艺, 提出坐标系和抛光点对应空间三维坐标系的建立方法, 并以此为指导建立自由曲面连续进动抛光的运动控制模型。

(2) 设计最有效率控制算法加入进动运动控制模型, 并选取非轴对称非球面 x 、 y 方向各一个截面进行气囊抛光进动运动仿真试验, 试验结果表明, 抛光非轴对称非球面时两轴转过的角度变化较小, 基本平稳, 符合实际加工中的控制要求; 且仿真进动角值与实际设置的进动角都为 20° , 证明该运动模型及控制算法的正确性。

参 考 文 献

[1] WALKER D D, BEAUCAMPAT, BINGHAM R G, et al. Precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation[C]// Specialized Optical Developments in Astronomy, August 25-26, 2002, Waikoloa, Hawaii. Washington: SPIE, 2002: 73-84.

- [2] WALKER D D, BROOKS D, KING A, et al. The 'Precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces[J]. Optical Express, 2003, 8(11): 958-964.
- [3] WALKER D D, BEAUCAMPAT H, DOUBROVSKI V. Automated optical fabrication: First results from the new 'Precessions' 1.2 m CNC polishing machine[C]// Optomechanical Technologies for Astronomy, May 24-31, 2006, Orlando, Florida. Washington: SPIE, 2006: 1-8.
- [4] WALKER D D, FREEMAN R, MORTON R, et al. Use of the 'Precessions' process for prepolishing and correcting 2D and 21/2D form[J]. Optical Express, 2006, 14(24): 11787-11795.
- [5] 张伟, 李洪玉, 金海. 气囊抛光去除函数的数值仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 308-312. ZHANG Wei, LI Hongyu, JIN Hai. Research on digital simulation and experiment of removal function of bonnet tool polishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 308-312.
- [6] LI Hongyu, YU Guoyu, WALKER D D, et al. Modeling and measurement of polishing tool influence functions for edge control [J]. Journal of the European Optical Society, 2011, 6: 1-6.
- [7] LI Hongyu, ZHANG Wei, YU Guoyu. Study of weighted space deconvolution algorithm in computer controlled optical surfacing formation[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(7): 627-631.
- [8] KIM D W, KIM S W. Static tool influence function for fabrication simulation of hexagonal mirror segments for extremely large telescope[J]. Optical Express, 2005, 13(3): 910-917.
- [9] 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 Bo, XIE Dagang, YAO Yingxue, et al. New technology of ballonet tool for polishing[J]. Optical technique, 2004, 30(3): 333-336.
- [10] 高波, 姚英学, 谢大纲, 等. 气囊抛光进动机构的运动建模及仿真[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 101-104. GAO Bo, YAO Yingxue, XIE Dagang, et al. Movement modeling and simulation of precession mechanism for bonnet tool polishing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(2): 101-104.
- [11] 计时鸣, 金明生, 张宪, 等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 2-6.

- JI Shiming, JIN Mingsheng, ZHANG Xian, et al. Novel gasbag polishing technique for free-from mold[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 2-6.
- [12] 张银东. 机器人辅助磨具气囊抛光运动控制和轨迹规划研究[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2009.
- ZHANG Yindong. Research on robot-assisted gasbag polishing motion control and trajectory planning for mould[D]. Zhejiang: Zhejiang University of Technology, 2009.
- [13] 潘日, 王振忠, 郭隐彪, 等. 大口径轴对称非球面气囊抛光进动运动建模及控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 183-190.
- PAN Ri, WANG Zhenzhong, GUO Yinbiao, et al. Movement modeling and control of precession mechanism for bonnet tool polishing large aixsymmetrical aspheric lenses[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 183-190.
- [14] 杨文茂, 李全英. 空间解析几何[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
- YANG Wenmao, LI Quanying. Space analytic geometry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2006.
-
- 作者简介:**潘日, 男, 1988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: Ryan_P2011@126.com
- 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
- 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