

DOI : 10.3901/JME.2012.11.183

大口径轴对称非球面气囊抛光进动运动建模及控制*

潘 日 王振忠 郭隐彪 王春锦 张东旭

(厦门大学机电工程系 厦门 361005)

摘要 :研究大口径轴对称非球面气囊抛光进动运动建模及控制。分析气囊抛光机构及大口径轴对称非球面抛光进动工艺特点,确定以气囊自转轴与气囊交点为研究对象,以气囊球心为原点建立气囊进动基础坐标系,根据大口径轴对称非球面连续进动抛光中各抛光点气囊自转轴与局部法线夹角值(即进动角)不变的原理,在分析每个抛光点时建立与其对应的坐标系,得到抛光该点时气囊自转轴与气囊交点在该点对应坐标系中的值,而后进行坐标变换,将抛光任意点时气囊自转轴与气囊交点的位置换算至气囊进动基础坐标系中;根据大口径轴对称非球面方程、加工控制模型及前述的坐标变换运算结果,利用矩阵变换得到大口径轴对称非球面抛光的进动运动模型;在上述的运动模型中加入最有效率控制算法后进行运动学仿真,得到大口径轴对称非球面抛光的进动运动曲线,并通过仿真气囊自转轴跟随加工点法线变化的趋势及比较仿真进动角与实际进动角验证所建立运动模型及控制算法的正确性。

关键词 :大口径轴对称非球面 气囊抛光 进动 运动建模 控制

中图分类号 : TH161

Movement Modeling and Control of Precession Mechanism for Bonnet Tool Polishing Large Axisymmetrical Aspheric Lenses

PAN Ri WANG Zhenzhong GUO Yinbiao WANG Chunjin ZHANG Dongxu

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

Abstract : Movement modeling and control for bonnet tool polishing large axisymmetrical aspheric lenses is present. The intersection point of the spin axis and the bonnet is selected to be object, after analyzing the structure of bonnet tool and process feature of large axisymmetrical aspheric lenses polishing; a base coordinate is set up with the centre of bonnet to be its origin point. As the included angle of the spin axis of bonnet tool and the local normal is fixed in continuous precession polishing, a corresponding coordinate is set up to get the position parameters of the intersection point of the spin axis and the bonnet when polishing a random point, the position parameters of the intersection point of the spin axis and the bonnet in base coordinate are got according to space coordinate conversion; Movement model is obtained by space matrix transformation, based on the surface equation of large axisymmetrical aspheric lenses, processing control model and the position parameters got in last step; Finally, most efficiency algorithm is added to the movement model, and precession motion curve is got by simulation. The correctness of movement model and control algorithm is confirmed through simulating the trend of spin axis of bonnet follows the local normal and comparing the simulated value of precession angle with the actual value of precession angle.

Key words : Large axisymmetrical aspheric lenses Bonnet polishing Precession Movement modeling Control

0 前言

气囊式抛光作为近几年国内外新兴的抛光技

术,由英国 Zeeko 公司的 WALKER 等^[1]提出,它采用具有一定充气压力的球形气囊作为抛光工具,不仅可以保证抛光头与被抛光工件表面吻合性好,而且可以通过调节气囊内部压力控制抛光效率和被抛光工件的表面质量,是一种极具发展潜力的大口径非球面抛光方法。气囊式抛光采用进动加工方

* 国家自然科学基金(51075343)和厦门市科技计划(3502Z20113007)资助项目。20111207 收到初稿,20120320 收到修改稿

式,即抛光过程中,气囊自转轴始终与工件局部法线呈固定角度(称进动角)进行抛光。

由于大口径轴对称非球面上每个抛光点的局部法线方向都不同,可控气囊抛光系统通过两个方面实现以相同进动角连续抛光整个工件表面:通过机床 xyz 轴的进给带动气囊抛光头的球心运动来跟踪工件法线的变化,使气囊球心与工件局部抛光点的连线为该点的法线;利用气囊工具的进动运动,即两个旋转轴旋转来控制气囊自转轴在空间的位置变化,使得气囊自转轴在加工过程中与工件局部抛光点法线之间的夹角值(即进动角)始终不变。

由于机床的进给运动简单易于控制,本文只对气囊抛光工具进动运动进行建模及控制仿真分析。目前国内研究气囊抛光技术主要集中在哈尔滨工业大学^[2-5]和浙江工业大学^[6-7]。而文献中涉及气囊抛光系统进动机构运动控制主要有高波等^[3,7]的研究成果,但是由于前述学者们研究的气囊工具机构与本文中所采用的气囊工具机构都有差别,因此其运动模型均不适用。本文以气囊自转轴与气囊的交点为研究对象,通过建立合适的坐标系并进行坐标变换,求出大口径轴对称非球面抛光过程中,在各个抛光点时气囊自转轴与气囊交点的位置,并通过旋转坐标变换公式得到可控气囊抛光系统的进动运动方程,而后通过效率最高控制算法求出最有效率抛光时气囊工具两个旋转轴转过的角度,最后利用 Matlab 软件进行运动控制仿真,验证所求运动模型及控制算法的正确性。

1 气囊进动机构坐标系建立

图 1 为气囊连续进动抛光大口径非球面原理图。抛光过程中,气囊自转轴与局部法线始终呈固定角度 ρ_0 。

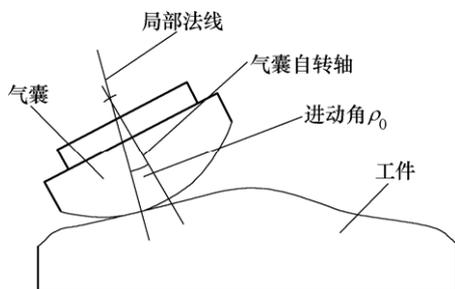


图 1 气囊连续进动抛光大口径非球面原理图

图 2 为气囊抛光工具模型。气囊抛光工具的一个进动运动过程包括:气囊抛光工具 z_3 轴先旋转 θ_1 ,而后气囊工具 z_4 轴再旋转 θ_2 ,如图 2 所示。根据气囊抛光工具结构, z_2 、 z_3 、 z_4 轴线相交于气囊球心 O ,则进动运动不改变气囊球心的位置,因此以初始状

态气囊球心位置为原点建立基础坐标系 $Oxyz$;由于气囊抛光系统中的进给和进动运动互不干涉影响,因此,建立气囊进动抛光运动模型时,以气囊自转轴与气囊的交点 P (图 2)为对象,不考虑进给运动的效果,即假设球心位置不变,将大口径轴对称非球面上所有抛光点的进动过程平移至以初始状态气囊球心为原点建立的基坐标系,来计算抛光大口径轴对称非球面工件上各个点时气囊工具两个旋转轴 z_3 、 z_4 需要转动的角度。

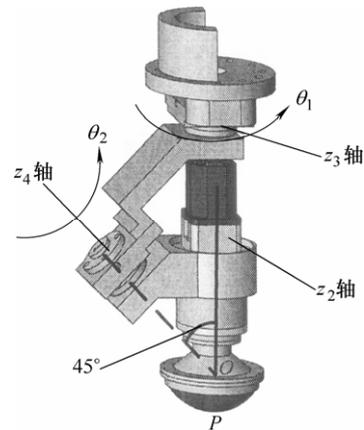


图 2 气囊抛光工具模型

图 2 中, θ_1 为进动过程中 z_3 轴转过的角度, θ_2 为进动过程中 z_4 轴转过的角度, O 为气囊球心, P 为气囊自转轴与气囊的交点。

由于大口径轴对称非球面连续进动抛光中各抛光点上气囊自转轴与局部法线夹角值(即进动角)不变,因此分析每个抛光点时,需要建立一个对应的坐标系,该坐标系的 y 方向与该抛光点的切线方向平行, z 方向为该抛光点的法线方向, x 方向与基础坐标系相同,而后平移到基础坐标系中进行变换,图 3 为气囊以进动角 ρ 抛光任意点 A 时对应坐标系的建立及处理,图 4 为空间坐标变换原理图。

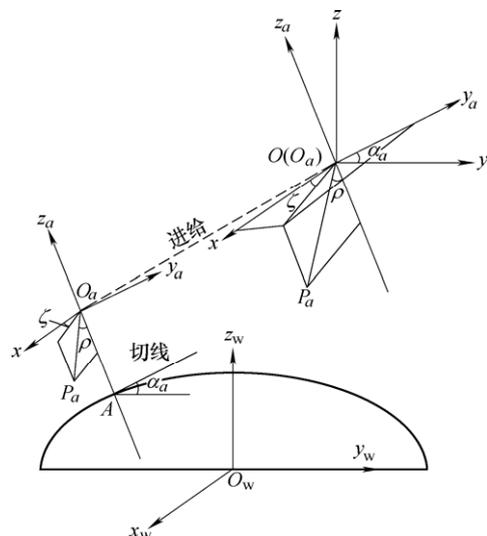


图 3 抛光任意点 A 时对应坐标系的建立及处理

图3中, $Oxyz$ 为基础坐标系, $O_axy_az_a$ 为所建立的点 A 对应进动坐标系, $O_wx_wy_wz_w$ 为工件坐标系, P_a 为抛光任意点 A 时气囊自转轴与气囊交点的位置, ζ 为 O_aP_a 在 O_axy_a 平面内的投影与 x 轴正方向的夹角, α_a 为点 A 的切线与水平方向的夹角。

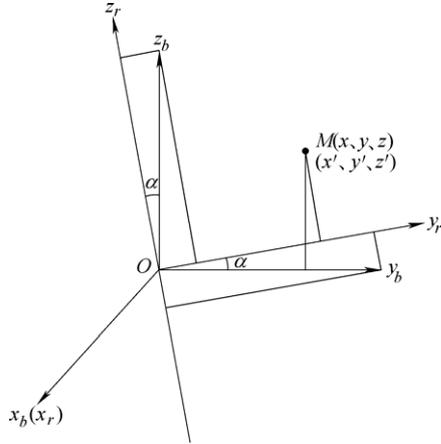


图4 空间坐标变换原理图

图4中, x, y, z 为点 M 在坐标系 $Ox_by_bz_b$ 中的坐标, x', y', z' 为点 M 在坐标系 $Ox_r y_r z_r$ 中的坐标, α 为坐标系 $Ox_by_bz_b$ 绕 x_b 轴转过的角度。

由图4可得变换公式为^[8]

$$\begin{cases} x = x' \\ y = \cos \alpha y' - \sin \alpha z' \\ z = \sin \alpha y' + \cos \alpha z' \end{cases} \quad (1)$$

通过上述抛光点对应的进动坐标系建立方法及空间坐标变换公式(1), 即可求得抛光任意点 A 时, 气囊自转轴与气囊交点在基础坐标系中的表示, 而后利用旋转矩阵进行抛光过程中的进动建模。

2 气囊进动机构运动建模

实际光学系统中, 轴对称非球面的应用极为广泛。轴对称非球面方程可表示为^[9-10]

$$z = -c \frac{x^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 x^2}} \quad (2)$$

式中, $c=R^{-1}$, R 为非球面基础曲率半径。

图5为气囊抛光大口径轴对称非球面控制模型。由于大口径轴对称非球面的旋转对称性, 并且气囊抛光系统的工作台可旋转, 气囊抛光工具只需要走工件一条母线的一半即可实现对工件的加工^[11], 假设以等步长方式进行加工, 则可通过大口径轴对称非球面方程求得各加工点的斜率及法线的方向矢量, 而后建立气囊进动机构的运动模型。由于非球面基

础曲率半径 R 越大, 对应的轴对称非球面上抛光点斜率变化越小, 因此后续的仿真试验中, 以 $R=50$ mm 的轴对称非球面方程进行试验, 并在进动角 $\rho=20^\circ$ 的情况下进行加工仿真。

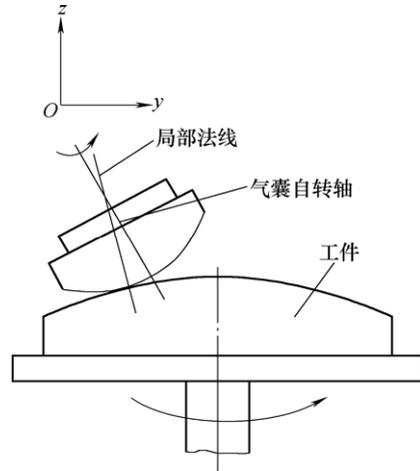


图5 气囊抛光大口径轴对称非球面控制模型

根据大口径轴对称非球面的加工工艺, 其进动运动模型分为两部分: 初始状态到初始加工点的进动运动和工件上任意两相邻抛光点的进动运动。

2.1 初始状态到初始加工点的运动模型

假设初始状态下气囊自转轴与气囊的交点位置为 P , 经过进动(z_3 轴旋转 θ_A , z_4 轴旋转 θ_B)后运动到以进动角度 ρ 加工初始点的位置 P_0 , $Ox_y_0z_0$ 为初始加工点对应的进动坐标系, 假设初始加工点切线与水平方向的夹角为 α_0 , 则初始加工点对应的进动坐标系 $Ox_y_0z_0$ 与基础坐标系 $Oxyz$ 关系如图6所示。

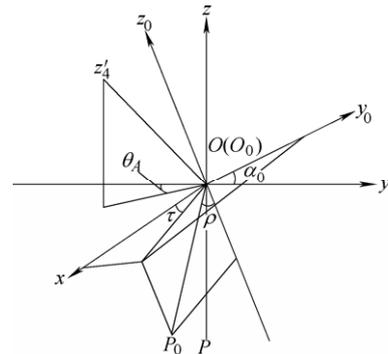


图6 初始状态到初始加工点的运动模型

图6中, τ 为 OP_0 在 Ox_y_0 平面内的投影与 x 轴正方向的夹角, z'_4 为气囊工具 z_3 轴旋转后 z_4 轴的位置。

令气囊半径 $R_B=1$ mm, 根据图6所示的几何关系得 OP 的位置矢量

$$l_{OP} = (0, 0, -1)^T \quad (3)$$

OP_0 在 $Oxyz$ 坐标系中的位置矢量可由其在 $Ox_y_0z_0$ 坐标系中的位置结合式(1)得到

$$l_{OP_0} = \begin{pmatrix} \sin \rho \cos \tau \\ \cos \alpha_0 \sin \rho \sin \tau + \sin \alpha_0 \cos \rho \\ \sin \alpha_0 \sin \rho \sin \tau - \cos \alpha_0 \cos \rho \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$T = E^{\theta_B} E^{\theta_A} \quad (5)$$

式中 T —— l_{OP} 绕 z_3 、 z_4 轴旋转的变换矩阵

E^{θ_A} —— l_{OP} 绕 z_3 轴旋转的变换矩阵

E^{θ_B} —— l_{OP} 绕 z_4 轴旋转的变换矩阵

$$E^{\theta_A} = \begin{pmatrix} \cos \theta_A & -\sin \theta_A & 0 \\ \sin \theta_A & \cos \theta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$k = \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_A \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_A \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

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

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

$$\begin{pmatrix} \lambda\mu(1 - \cos \theta_B) - \nu \sin \theta_B & \nu\lambda(1 - \cos \theta_B) + \mu \sin \theta_B \\ \cos \theta_B + \mu^2(1 - \cos \theta_B) & \mu\nu(1 - \cos \theta_B) - \lambda \sin \theta_B \\ \mu\nu(1 - \cos \theta_B) + \lambda \sin \theta_B & \cos \theta_B + \nu^2(1 - \cos \theta_B) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$l_{OP_0} = T l_{OP} \quad (9)$$

根据式(3)~(9)得

$$\sin \rho \cos \tau = -0.5 \sin \theta_A (1 - \cos \theta_B) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_A \sin \theta_B \quad (10)$$

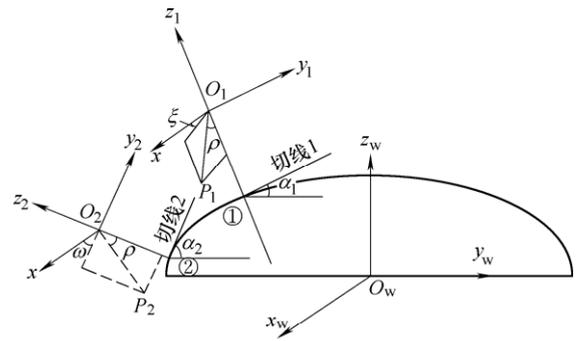
$$\cos \alpha_0 \sin \rho \sin \tau + \sin \alpha_0 \cos \rho = \frac{1}{2} \cos \theta_A (1 - \cos \theta_B) + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_A \sin \theta_B \quad (11)$$

式(10)、(11)即为气囊抛光初始状态到初始加工点的进动运动控制方程，当初始加工点切线与水平方向的夹角 α_0 根据大口径轴对称非球面方程确定后，由于 OP_0 在 Oxy_0 平面的投影 τ 取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，利用控制算法确定 τ 后，即可求出 z_3 和 z_4 轴旋转的角度 θ_A 、 θ_B 。

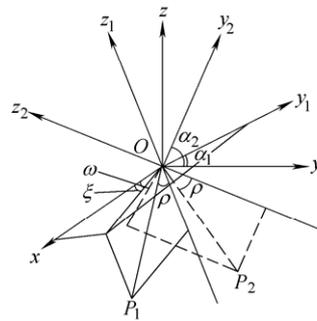
2.2 工件上任意两相邻抛光点的进动运动模型

假设气囊以进动角 ρ 抛光任意两相邻抛光点、时，气囊自转轴与气囊交点位置分别为 P_1 、 P_2 (图 7)，从点 到点 进动过程中气囊工具 z_3 和

z_4 轴分别旋转 θ'_A 和 θ'_B 。抛光任意两相邻抛光点时工具与工件位置及坐标关系如图 7 所示。



(a) 气囊自转轴和工件的位置关系



(b) 气囊自转轴变换到基础坐标系时的位置关系

图 7 任意两点抛光时工具与工件位置及坐标关系

图 7 中， Oxy_1z_1 为点 对应的进动坐标系， Oxy_2z_2 为点 对应的进动坐标系， α_1, α_2 为点 和点的切线与水平方向的夹角， ξ 为 OP_1 在 Oxy_1 平面内的投影与 x 轴正方向的夹角， ω 为 OP_2 在 Oxy_2 平面内的投影与 x 轴正方向的夹角。

根据前述空间坐标变换公式(1)可得 P_1 、 P_2 点在基坐标系 $Oxyz$ 中的坐标

$$P_{10} = (\sin \rho \cos \xi, \cos \alpha_1 \sin \rho \sin \xi + \sin \alpha_1 \cos \rho, \sin \alpha_1 \sin \rho \sin \xi - \cos \alpha_1 \cos \rho)^T \quad (12)$$

$$P_{20} = (\sin \rho \cos \omega, \cos \alpha_2 \sin \rho \sin \omega + \sin \alpha_2 \cos \rho, \sin \alpha_2 \sin \rho \sin \omega - \cos \alpha_2 \cos \rho)^T \quad (13)$$

则在基坐标系 $Oxyz$ 中， OP_1 、 OP_2 位置矢量

$$l_{OP_1} = \begin{pmatrix} \sin \rho \cos \xi \\ \cos \alpha_1 \sin \rho \sin \xi + \sin \alpha_1 \cos \rho \\ \sin \alpha_1 \sin \rho \sin \xi - \cos \alpha_1 \cos \rho \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$l_{OP_2} = \begin{pmatrix} \sin \rho \cos \omega \\ \cos \alpha_2 \sin \rho \sin \omega + \sin \alpha_2 \cos \rho \\ \sin \alpha_2 \sin \rho \sin \omega - \cos \alpha_2 \cos \rho \end{pmatrix} \quad (15)$$

根据图 7 中的空间运动关系有

$$T'' = E^{\theta'_B} E^{\theta'_A} \quad (16)$$

式中 T'' —— l_{OR_1} 绕 z_3 、 z_4 轴旋转的变换矩阵

$E^{\theta'_A}$ —— l_{OR_1} 绕 z_3 轴旋转的变换矩阵

$E^{\theta'_B}$ —— l_{OR_1} 绕 z_4 轴旋转的变换矩阵

$$E^{\theta'_A} = \begin{pmatrix} \cos \theta'_A & -\sin \theta'_A & 0 \\ \sin \theta'_A & \cos \theta'_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$k' = \begin{pmatrix} \lambda' \\ \mu' \\ \nu' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(\phi + \theta'_A) \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\phi + \theta'_A) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \quad (18)$$

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

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

$$\begin{pmatrix} \lambda'\mu'(1 - \cos \theta'_B) - \nu'\sin \theta'_B & \nu'\lambda'(1 - \cos \theta'_B) + \mu'\sin \theta'_B \\ \cos \theta'_B + \mu'^2(1 - \cos \theta'_B) & \mu'\nu'(1 - \cos \theta'_B) - \lambda'\sin \theta'_B \\ \mu'\nu'(1 - \cos \theta'_B) + \lambda'\sin \theta'_B & \cos \theta'_B + \nu'^2(1 - \cos \theta'_B) \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$l_{OP_2} = T'' l_{OR_1} \quad (20)$$

式(14)~(20)即为工件上任意两相邻抛光点的进动控制方程，在实际控制中，除第一加工点外，抛光点在任意抛光点时 OP_1 的位置参数 ξ 和在 OP_1 时 z_4 轴的位置参数 ϕ 可由前一个抛光点推导出来，在进动角可以设定的情况下，只有 θ'_A 、 θ'_B 、 ω 三个未知数，而 ω 的取值范围是 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，当 ω 取值不同时，对应的 θ'_A 和 θ'_B 取值也不同，根据上述进动方程，利用控制算法确定 ω 后，即可求出抛光各个加工点时两轴对应的转角，进而实现大口径轴对称非球面工件连续进动抛光控制。

3 气囊抛光进动控制及运动仿真

可控气囊抛光系统由于其特性适用于大口径轴对称非球面工件加工的粗抛和精抛阶段，而抛光效率决定整个工件的加工周期。在气囊抛光加工中，气囊工具进动运动中两旋转轴转过角度的时间决定进给运动的时间，从而决定抛光效率，因此在前述建立的运动模型基础上提出最有效率运动控

制策略，该算法的核心思想是在上述求得的进动运动方程的基础上，利用控制算法算出在保持连续进动抛光进动角度不变的情况下，两个转角的绝对值和最小，即 z_3 和 z_4 轴转过的角度的绝对值和取最小值，这样可以减少工艺时间提高抛光效率。

3.1 气囊自转轴运动空间仿真

要研究气囊抛光大口径轴对称非球面的进动运动控制，首先要验证气囊进动结构是否满足大口径轴对称非球面的连续进动抛光要求，即求解气囊自转轴的运动空间。仍以气囊自转轴与气囊交点 P 为研究对象，假设气囊经过一个进动后，从 OP 运动到 OP_0 ，令点 P_0 在 $Oxyz$ 坐标系中的坐标为 (X', Y', Z') ，则

$$l_{OP_0} = (X', Y', Z')^T \quad (21)$$

结合式(3)、式(5)~(9)及式(21)，在两转角无约束情况下，即 θ'_A 、 θ'_B 取值范围为 $-2\pi \sim 2\pi$ 时得到气囊自转轴运动空间如图 8 所示。

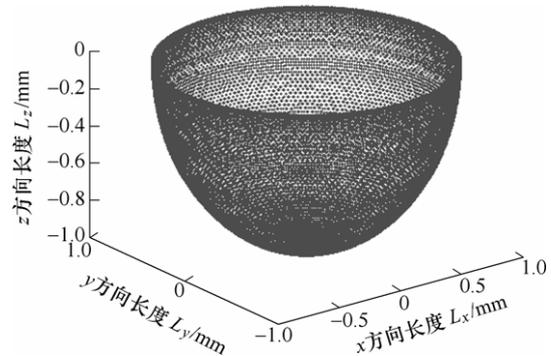


图 8 气囊自转轴运动空间

仿真结果表明气囊运动空间高度与气囊半径相等 ($R_B=1$ mm)，即气囊自转轴的运动空间是以气囊半径为半径的半球形。结合实际加工过程对仿真结果进行分析，加工初始状态下气囊与工件垂直放置，而由图 8 中气囊自转轴仿真运动空间可以看出，气囊自转轴线可以达到与工件平行的状态。因此，该气囊进动机构可以满足大口径轴对称非球面的连续进动抛光要求。

3.2 初始状态到初始加工点运动控制策略及仿真

结合初始状态到初始加工点的运动模型即式(10)、式(11)，设计控制算法流程如图 9 所示。

该算法的核心策略是将式(10)、(11)中的参数 τ 从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 进行循环迭代后，通过数值解法^[12]求两个转角的值，并筛选其中两轴转过的角度 $|\theta_A| + |\theta_B|$ 取最小值时，对应的 τ 的值和两个转角的值。

根据该算法结合运动模型，对前面文中提到的大口径轴对称非球面进行仿真，并设定非球面顶点为初始加工点，即式(11)中 $\alpha_0=0^\circ$ ， $\rho=20^\circ$ 得到初始状态到初始加工点的进动机构仿真如图 10 所示。

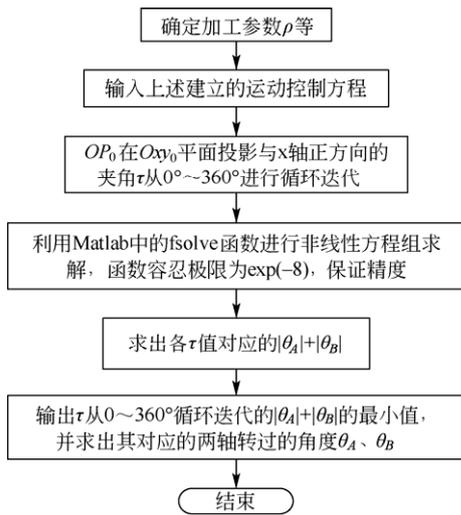


图 9 初始状态到初始加工点的运动控制算法流程

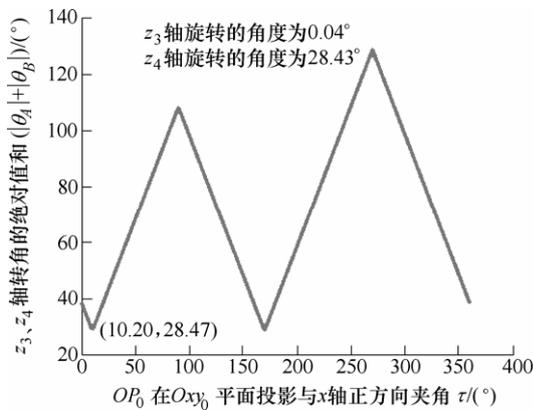


图 10 初始状态到初始加工点的进动运动仿真结果

图 10 中横坐标为 OP_0 在 Oxy_0 平面投影与 x 轴正方向夹角 τ 的值, 其变化范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 纵坐标为 $z_3、z_4$ 轴转角的绝对值和 $|\theta_A|+|\theta_B|$, 图 10 中的坐标点为两旋转轴转角的绝对值和取最小值时对应的 $x、y$ 坐标, 曲线上方显示的是两旋转轴转角的绝对值和取最小值时两个轴各自转过的角度, 由图 10 可以看出, z_3 轴的转动角度较小, z_4 轴转动较大, 且两轴的转角绝对值和随夹角 τ 的变化连续变化, 变化过程中不存在突变, 符合控制要求。

3.3 工件任意两相邻加工点运动控制策略及仿真

结合工件任意两相邻加工点的运动模型, 设计控制算法流程如图 11 所示。

算法的核心策略是先通过工件表面方程求得各抛光点的斜率, 并求得其切线与水平方向的夹角, 而后利用循环嵌套求得各个抛光点中参数 ω 从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化时, 两轴转过的角度 $|\theta'_A|+|\theta'_B|$ 取最小值时所对应的各参数, 式(14)~(20)中的非线性方程组通过数值解法求两个转角。

根据该算法结合式(14)~(20), 设定进动角 $\rho=20^\circ$, 并在 $430\text{ mm} \times 430\text{ mm}$ 的大口径轴对称非球面的一条母线的一半上等步长取 215 个加工点进

行仿真, 得到大口径轴对称气囊抛光进动仿真运动曲线如图 12 所示。

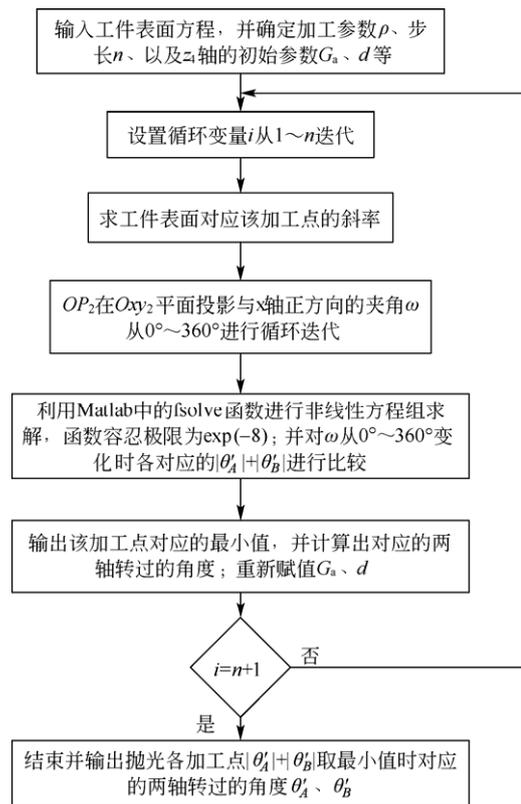


图 11 工件上任意两个抛光点运动控制算法流程

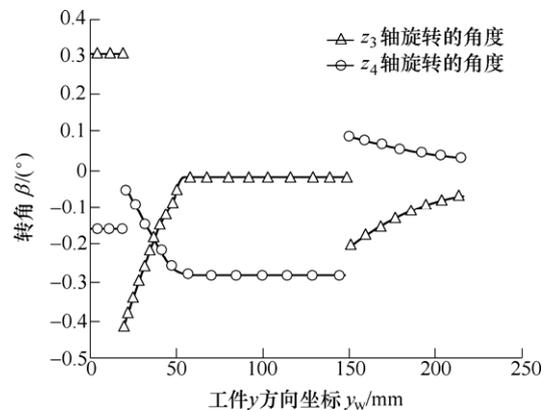


图 12 大口径轴对称非球面进动运动仿真曲线

图 10 和图 12 即为前述描述的运动模型加入最有效率控制算法后的大口径轴对称气囊抛光进动仿真运动曲线。由于大口径轴对称非球面各个抛光点间的斜率变化较小, 因此, 图 12 中所示 $z_3、z_4$ 轴转过的角度也较小。

3.4 运动模型及控制算法验证

为验证前述运动模型及控制算法的正确性, 仍以该大口径轴对称非球面方程进行试验验证, 为了使数据及图形清晰, 将抛光步长取大, 将该工件母线均分为 5 个抛光点, 通过上述运动模型及控制算法, 绘出各个抛光点上的法线及对应的气囊抛光自

转轴位置,仿真结果如图13所示。

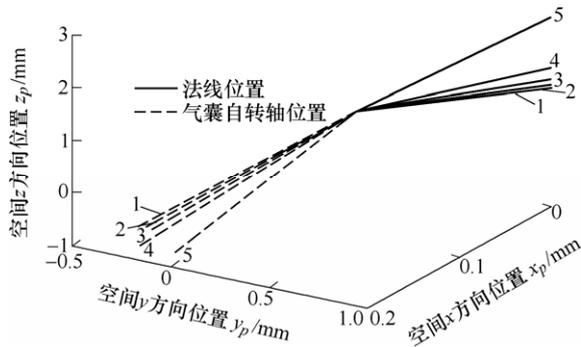


图13 法线位置及对应的气囊自转轴位置

由图13的仿真结果可以看出,气囊自转轴线的变化跟随抛光点法线的变化趋势相同,下表为图13对应的进动角的理论值与仿真值比较,结果表明,根据前述运动模型及控制算法得到的仿真进动角与实际进动角的误差绝对值均小于 0.01° ,证明该运动模型及控制算法的正确性。

表 进动角的理论值与仿真值比较

编号	理论进动角 $\rho_{al}/(^\circ)$	仿真进动角 $\rho_b/(^\circ)$	误差绝对值 $\phi/(^\circ)$
1	20	19.993 8	0.006 2
2	20	19.992 5	0.007 5
3	20	20.003 7	0.003 7
4	20	20.005 2	0.005 2
5	20	20.003 9	0.003 9

4 结论

(1) 分析气囊工具机构及大口径轴对称非球面的加工工艺特点,确定以气囊自转轴与气囊交点为研究目标,并以气囊球心为原点建立气囊进动基础坐标系及工件上抛光点对应的坐标系,进行坐标变换,将抛光任意点时气囊自转轴线与气囊交点的位置换算至气囊进动基础坐标系后建立气囊进动机构坐标系,而后,通过旋转矩阵运算,建立气囊抛光大口径轴对称非球面的进动运动模型。

(2) 在上述进动运动模型中加入最有效率控制算法,并进行气囊机构运动空间以及气囊抛光大口径轴对称非球面的仿真,气囊机构运动空间仿真结果表明,该机构可以满足大口径轴对称非球面的连续进动抛光要求。

(3) 利用大口径轴对称非球面方程进行运动模型及控制算法的正确性验证,仿真试验结果表明:文中所建立的进动运动模型及控制算法得到的仿真进动角与实际进动角的误差均值小于 0.01° ,证明该运动模型及控制算法的正确性。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] SONG Jianfeng, YAO Yingxue, XIE Dagang, et al. Effects of polishing parameters on material removal for curved optical glasses in bonnet polishing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(5): 29-33.
- [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] 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-form mold[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 2-6.
- [7] 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]. 杭州:浙江工业大学, 2009.
ZHANG Yindong. Research on robot-assisted gasbag polishing motion control and trajectory planning for mould[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.
- [8] 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.
- [9] GUO Yinbiao, WEI Lizhen. Software-controlled system of ultra-precision machining axisymmetric aspheric

- mirror[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2008 , 19(2) : 256-259.
- [10] 黄浩, 郭隐彪, 王振忠, 等. 轴对称非球面加工误差分离及补偿技术[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.
- [11] 王云飞, 姚英学, 余顺周. 回转对称非球面气囊抛光控制算法研究[J]. 现代制造工程, 2006(8) : 9-14.
WANG Yunfei , YAO Yingxue , YU Shunzhou. The algorithm for bonnet tool polishing of rotary symmetrical aspheric surface[J]. Modern Manufacturing Engineering , 2006(8) : 9-14.
- [12] 王正林, 刘明. 精通 MATLAB 7[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
WANG Zhenglin , LIU Ming. Proficient MATLAB 7[M]. Beijing : Publishing House of Electronics Industry , 2007.
-
- 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