

光学元件数控单轴加工中的边缘效应控制建模方法

单海洋¹ 李春林¹ 郭文¹ 张兆健¹ 沈自才²

(1 北京空间机电研究所, 北京 100094)

(2 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

文 摘 边缘效应严重制约了计算机控制光学表面成型技术(CCOS)的加工精度和加工效率,是亟待解决的技术难点之一。基于Preston方程,建立工具盘在加工工件边缘时的定量去除模型,是解决该问题的重要途径。将加工工件、工具盘尺寸、磨削压力、速度、时间、磨削点位等加工参量进行数学建模,建立边缘去除函数模型,精确计算边缘压力分布和磨削累计时间。随着工具盘在工件边缘露边量增加,工具盘压力呈指数级增长。工件磨削累计时间随工具盘中心点位不同呈现分段变化规律。研发单轴机数控设备,利用工具盘沿工件边缘母线点位移动方式,进行边缘效应控制研究。通过实验精确求出Preston方程比例系数 k ,验证模型仿真与实际加工结果吻合性,准确度达到91.9%。数控单轴机修边方法和建立的数学模型可以很好地指导实际研磨抛光过程。

关键词 光学制造,边缘效应,数控单轴机

中图分类号:TH691.9

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.04.002

Modeling Method of Edge Effect Control in CNC Single Shaft Machining of Optical Elements

SHAN Haiyang¹ LI Chunlin¹ GUO Wen¹ ZHANG Zhaojian¹ SHEN Zicai²

(1 Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094)

(2 Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094)

Abstract Edge effect seriously restricts the processing accuracy and efficiency of CCOS, which is one of the technical difficulties needed to be solved urgently. An important approach to solve this problem is to establish a quantitative removal model of tool pad based on the Preston equation on the edge of the workpiece. The model includes some process parameters such as the workpiece size, the tool pad size, the processing pressure, velocity, time and position. The model calculates accurately the edge pressure distribution and the processing cumulative time. The processing pressure increases exponentially with the edge exposure area of the tool pad on the edge of the workpiece. The accumulated processing time of workpiece presents stage variation with the central point of tool pad in different workpiece sections. A single shaft machine with numerical control function has been developed. Combining with the established model, the machine is used to control edge effect effectively. The scale coefficient k of Preston equation is worked out in the experiment firstly. The model is in good agreement with the actual experiment results, and the accuracy can reach to 91.9%. The edge effect control method with the CNC single shaft machine and the relative model are well in guiding the actual grinding and polishing process.

Key words Optical process, Edge effect, CNC single shaft machine

0 引言

宇航材料光学元件,例如空间相机反射镜,由于受航天材料尺寸和质量的限制,材料有效口径很大,

光学元件边缘留量很小,对于光学加工边缘效应更为突出。边缘效应在很多光学制造方法中非常普遍,其控制技术已成为最困难的加工技术因素之

收稿日期:2022-06-20

基金项目:基础研究项目(No. 2019-JCJQ-ZD-058-00)

第一作者简介:单海洋,1984年出生,博士,高级工程师,主要从事空间光学反射镜的加工与检测工作。E-mail:cgx542@126.com

—^[1-4]。边缘效应引起的光学元件面形误差,很大程度上影响加工效率、精度和性能。

先进的计算机控制光学表面成型技术(CCOS)^[5-6]具有优异的控制材料去除能力,基于数控技术,通过控制加工工具在工件表面的驻留时间达到目标去除量,更改工具在工件表面的平移速度实现驻留时间函数的调整。在CCOS加工过程中往往设定一个恒定的加工工具去除函数^[7-8],利用面形误差的去卷积函数计算加工驻留时间。但是当加工工具压力盘在工件表面边缘时,去除函数将变得不稳定,不再是一个恒定值。为了更好地研究加工工具在工件表面边缘的去除函数发展了很多理论研究。JONES^[9]在1986年形成一个线性压力模型,然而这个线性模型不能非常吻合压力分布,尤其在接近边缘位置。LUNA-AGUILAR等^[10]和CORDERO-DAVILA等^[11]提出皮肤模型,认为存在两个不同的压力区域:在接触面存在一个高压区和低压区。然而他们没有通过实验证据证明报道模型的正确性。结合这两个模型,HAN等^[12]提出一种恒定线性模型,将接触区域分为两部分:恒定压力区域和线性区域。KIM等^[2]提出一种基于实验结果的参数模型,而不是将边缘效应归为某一种压力分析模型。LIU^[3]、NAM^[13]和WAN^[14]等基于有限元分析软件提出对于不同工具盘的压力模型。这些模型中工具盘影响模型的计算非常耗时。在所有发展模型中,都将压力作为一个基本参量,进行了简化处理,没有根据实际情况进行详细计算,并且没有考虑接触面积磨削时间等加工实际参量。

本文根据Preston方程假设,将边缘效应与工具盘和工件接触面积关联,基于边缘位置接触面积不同引起的压力明显变化,求解加工工件各点磨削面积、磨削时间,分析磨削去量发生的明显变化。基于CCOS思想,研发数控单轴机床,提出母线点位去除函数模型,求解工件边缘点位工具盘压力和磨削时间。实验中,首先求解Preston方程比例系数 k ,然后根据 k 值,求解工件边缘理论去除量,通过理论模拟与实际加工结果比对,验证模型准确性。

1 数控单轴机构造

小工具盘抛光是一种确定性的光学元件加工方法,在抛光过程中使用计算机数控技术对抛光工具的加工参数和驻留时间进行精确控制。

进行光学加工的工具盘一般采用平转动运动方式,带有一定偏心圆形转动同时,在镜面平动。在加工镜面边缘时,由于压力的存在,工具中心不能超出镜面边缘,否则工具就会掉到镜子外面而且无法再回来。在速度快或者压力大的情况下这个动作还会造成镜边损坏,因此是十分危险的。现实中往往会保证工具中心不出镜面边缘而在加工路径规划时对边缘保留一段距离,如图1所示,不可避免地造成边缘区域过少加工或者加工不到,造成“翘边”现象。镜面边缘本身未能加工到,这就是所谓的“边缘问题”^[15]。

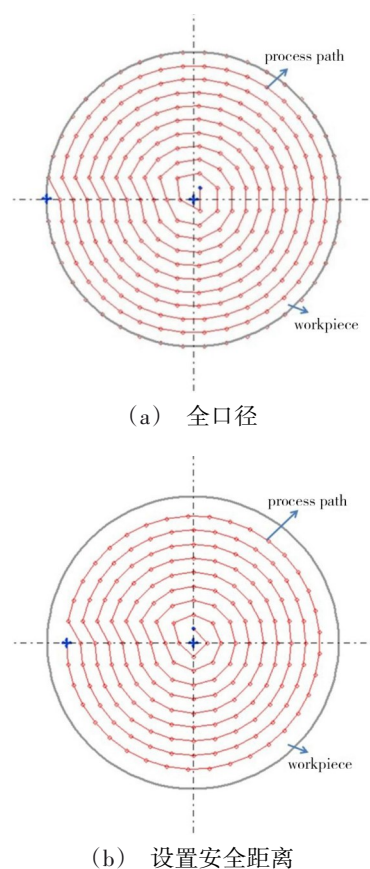


图1 小工具盘加工轨迹设置

Fig. 1 The track setting of small tool disk processing

通过对传统单轴机进行改造,将摆动工作臂设计成数控平移臂,如图2所示。

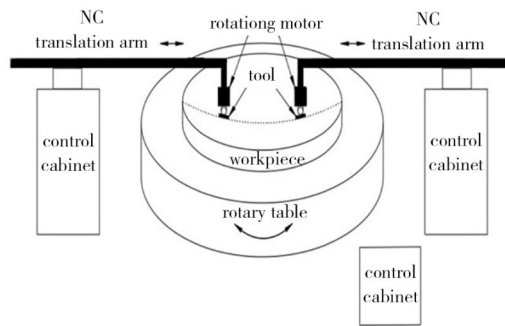


图2 数控单轴机构造示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CNC single shaft machine

数控单轴机加工时,转台转动和数控平移臂一维移动,工具盘相对于工件轴向和径向运动,同时工具盘自转。在这个过程中,工具盘露边量调节度相对机械手偏心结构工具盘更大,并且露边工具盘压力恒定。相对机械手研磨和抛光过程形成翘边面形结构,数控单轴机还可以形成面形塌边结构,更加有利于反射镜工件边缘的环带误差修正。

2 理论模型

根据Preston理论,光学加工过程中,当材料和环境一定时,去除量只跟接触面上的压强、工具盘相对工件镜面的移动速度和加工时间三者有关。因此在

材料和环境不变以及压强、相对速度一致的条件下,通过控制加工时间就可以实现对去除量的控制,从而达到要求的加工面形精度。

2.1 工具盘露边压力计算

图3为工件与工具盘位置关系图,为了便于观察,适当调整图中工具盘相对工件的大小(下同),工具盘位于工件边缘位置,用不同字母标注距离、尺寸和位置大小关系,工具盘中心距离工件中心距离为 x_{tc} ,工件半径为 a ,工具盘半径为 b ,工具盘边缘与工件边缘距离为露边量 d ,在工件坐标系中,工具盘边缘与工件边缘相交两点中心坐标为 $(x_0, 0)$,上部交点坐标为 (x_0, y_0) ,加工过程施加外力为 F 。定义工具盘和工件重叠部分为工具盘对工件作用面积,标记为 I ,通过积分求解,工具盘作用面积 I 如下:

$$I = \iint dx dy \quad (1)$$

$$I = 2 \iint_{x=-b, y=0} dx dy + 2 \iint_{y=0, x=x_0} dx dy \quad (2)$$

$$x_0 = \frac{a^2 - b^2 - x_{tc}^2}{2x_{tc}} \quad (3)$$

$$y_0 = (b^2 - x_0^2)^{1/2} \quad (4)$$

积分得到:

$$I_1 = x_0(b^2 - x_0^2)^{1/2} + b^2 \arcsin\left(\frac{x_0}{b}\right) + b^2 \frac{\pi}{2} - 2y_0(x_{tc} + x_0) + y_0(a^2 - y_0^2)^{1/2} + a^2 \arcsin\left(\frac{y_0}{a}\right) \quad (5)$$

工具盘与工件作用压力 P 为:

$$P = \frac{F}{I_1} = F \left[x_0(b^2 - x_0^2)^{1/2} + b^2 \arcsin\left(\frac{x_0}{b}\right) + b^2 \frac{\pi}{2} - 2y_0(x_{tc} + x_0) + y_0(a^2 - y_0^2)^{1/2} + a^2 \arcsin\left(\frac{y_0}{a}\right) \right]^{-1} \quad (6)$$

以工件半径 a 为150 mm,工具盘半径 b 为20 mm,施加外力 F 为20 N作为实例,模拟压力 P 与露边量 d 关系,如图4所示。发现随着工具盘在工件边缘露边量增加,工具盘与工件间压力呈指数级增长。这表明当工具盘在工件径向方向处于边缘位置时,需要根据露边量引起的压力变化,调整去除函数数值。

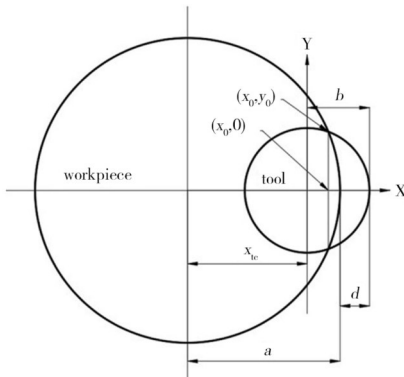


图3 工件与工具盘位置关系图

Fig. 3 Position diagram of workpiece and tool pad

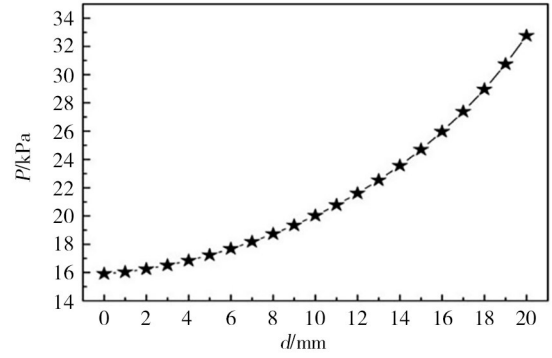


图4 压力与露边量关系图

Fig. 4 Diagram of pressure and edge exposure

2.2 工具盘速度模拟计算

图5中 ω_1 和 ω_2 分别为工件和工具盘转动角速度, O_1 和 O_2 分别为工件和工具盘几何中心, P 为工件上任意一点, $\angle O_1PO_2 = \theta_0$,工件转速 V_1 和工具盘转速 V_2 之间夹角的补角为 θ 。

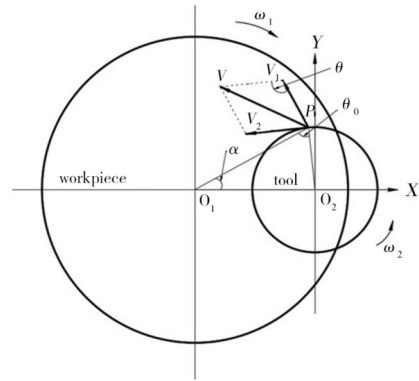


图5 工件与工具盘速度矢量分析

Fig. 5 Velocity vector analysis of workpiece and tool pad

P 点的相对速度 V 等于工件转速 V_1 和工具盘转速 V_2 之和,即

$$V = V_1 + V_2 \quad (7)$$

应用余弦定理, P 点的相对速度大小

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 + 2V_1V_2\cos\theta \quad (8)$$

继续假设 $O_1P = a, O_1O_2 = b, PO_2 = c$ 。

根据几何关系图中 $\theta = \pi - \theta_0$,所以 $\cos\theta = -\cos\theta_0$ 。

$$V_2^2 = \omega_2^2 c^2, V_1^2 = \omega_1^2 a^2 \quad (9)$$

在 $\triangle O_1PO_2$ 中,应用余弦定理,

$$\cos\theta_0 = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac} \quad (10)$$

将公式(9)、(10)带入公式(8),得到 P 点的相对速度数值为:

$$v = V = \sqrt{\omega_1^2 a^2 + \omega_2^2 c^2 - \omega_1 \omega_2 a^2 - \omega_1 \omega_2 c^2 + \omega_1 \omega_2 b^2} \quad (11)$$

由于 P 点在运动过程中 a 和 b 保持不变, c 随时变化,所以将 c 继续分解。

设 $\angle PO_1O_2 = \alpha$,在 $\triangle O_1PO_2$ 中,应用余弦定理,

$$c^2 = a^2 + b^2 + 2ab\cos\alpha \quad (12)$$

将公式(11)带入公式(10),得到 P 点的相对速度数值为:

$$v = V = \sqrt{a^2(\omega_1 - \omega_2)^2 + b^2\omega_2^2 - 2ab\omega_2(\omega_2 - \omega_1)\cos\alpha} \quad (13)$$

将 $\alpha = \omega_1 t$ 带入公式(12),得到:

$$v = V = \sqrt{a^2(\omega_1 - \omega_2)^2 + b^2\omega_2^2 - 2ab\omega_2(\omega_2 - \omega_1)\cos(\omega_1 t)} \quad (14)$$

2.3 工具盘对应工件磨削积分时间模拟计算

为了便于分析理解,首先求解工具盘中心点位置固定时,与工件磨削作用下,工件上单点磨削时间,然后求解工具盘中心点位置固定时,与工件磨削作用下,工件上多点磨削时间,最后求解工具盘中心点位置移动时,即描述数控单轴机平移臂带动工具盘平移运动时,与工件磨削作用下,工件上多点磨削时间。

2.3.1 工具盘对应工件上一点磨削积分时间模拟计算

图6为工件上 P 点磨削积分时间分析,工具盘中心点相对工件径向距离不变,工具盘和工件绕各自几何中心转动。假定图6中 x 和 y 坐标轴位置不变,工件和工具盘相对转动, ω_1 和 ω_2 分别为工件和工具盘转动角速度,考虑距 O_1 点为 a 处一点 P ,与磨头工具的相对作用距离为圆弧 $\widehat{PP'}$, O_1P 与 x 轴的夹角为 α , O_1P' 与 x 轴的夹角为 β ,建立对称坐标系令 $\alpha=\beta$,所以在一个作用周期内,工件上 P 点与工具盘的相对作用角度为 2α 。

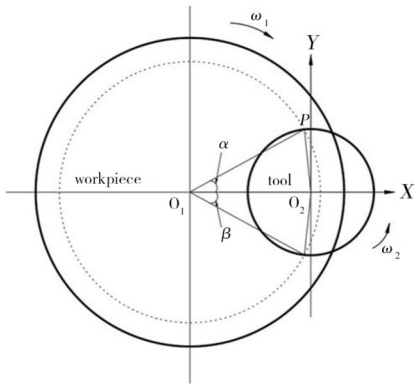


图6 P 点磨削积分时间分析

Fig. 6 Grinding integral time analysis of P point

根据图5速度矢量分析,容易得出 P 点与 P' 点速度数值相等。图4在工具盘露边量固定的情况下,压力恒定。所以可以简化图6中 P 点磨削积分时间分析,减少程序数据处理量,只求 P 点运动在 x 坐标轴以上部分的磨削时间对应的积分时间,然后乘以二倍即可得到总的积分结果。

在 $\triangle O_1PO_2$ 中,假设 $O_1P = a$, $O_1O_2 = b$, $PO_2 = c$,

应用余弦定理, P 点磨削积分时间为:

$$t = 2 \frac{\alpha}{\omega_1} = \frac{2}{\omega_1} \arccos \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \quad (15)$$

2.3.2 工具盘对应工件上三点磨削积分时间模拟计算

图7为工件三点磨削积分时间分析,工具盘中心点相对工件径向距离不变,工具盘和工件绕各自几何中心转动。令工件上一点 P 与工具盘几何中心 O_2 位置重合,左右两点 M 和 N 点,距离 P 点间隔距离为 l 。假设 $O_1P = a$, $O_1O_2 = b$,工具盘半径为 c 。

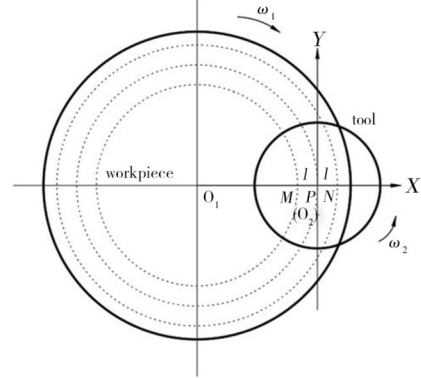


图7 三点磨削积分时间分析

Fig. 7 Grinding integral time analysis of three points

按照图7积分时间计算分析,得到工件旋转一圈过程中 M 、 P 、 N 三点与工具盘磨削积分时间 t_{m10} 、 t_{p10} 、 t_{n10} 分别为:

$$t_{m10} = \frac{2}{\omega_1} \arccos \frac{(a-l)^2 + b^2 - c^2}{2(a-l)b} \quad (16)$$

$$t_{p10} = \frac{2}{\omega_1} \arccos \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \quad (17)$$

$$t_{n10} = \frac{2}{\omega_1} \arccos \frac{(a+l)^2 + b^2 - c^2}{2(a+l)b} \quad (18)$$

工具盘几何中心 O_2 驻留 P 点位置 T_1 时间内, M 、 P 、 N 三点磨削积分时间 t_{m1} 、 t_{p1} 、 t_{n1} 分别为:

$$t_{m1} = \frac{T_1}{\pi} \arccos \frac{(a-l)^2 + b^2 - c^2}{2(a-l)b} \quad (19)$$

$$t_{p1} = \frac{T_1}{\pi} \arccos \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \quad (20)$$

$$t_{n1} = \frac{T_1}{\pi} \arccos \frac{(a+l)^2 + b^2 - c^2}{2(a+l)b} \quad (21)$$

2.3.3 数控平移臂移动时工具盘作用工件上三点磨削积分时间模拟计算

图8为数控单轴机平移臂移动时三点磨削积分时间分析,工具盘中心点相对工件径向距离变化,工具盘和工件绕各自几何中心转动。实际加工时,单轴机数控平移臂逐点平移距离固定,可以看作在工件母线(径向)方向固定距离点位移动和磨削驻留。假设工具盘圆心 O_2 按照等间距 l 移动,从 P 点往左朝

向工件圆心方向运动到 M 点。假设 $O_1P = a, O_1O_2 = b$, 工具盘半径为 c 。

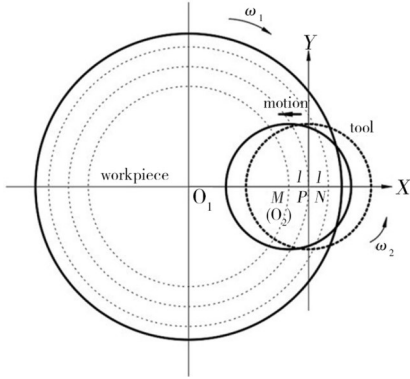


图8 运动情况下三点磨削积分时间分析

Fig. 8 Grinding integral time analysis of three points under motion

按照图8积分时间计算分析,得到工件旋转一圈过程中 M 、 P 、 N 三点磨削积分时间 t_{m20} 、 t_{p20} 、 t_{n20} 分别为:

$$t_{m20} = \frac{2}{\omega_1} \arccos \frac{(a-l)^2 + (b-l)^2 - c^2}{2(a-l)(b-l)} \quad (22)$$

$$t_{p20} = \frac{2}{\omega_1} \arccos \frac{a^2 + (b-l)^2 - c^2}{2a(b-l)} \quad (23)$$

$$t_{n20} = \frac{2}{\omega_1} \arccos \frac{(a+l)^2 + (b-l)^2 - c^2}{2(a+l)(b-l)} \quad (24)$$

工具盘几何中心 O_2 驻留 M 点位置 T_2 时间内, M 、 P 、 N 三点磨削积分时间 t_{m1} 、 t_{p1} 、 t_{n1} 分别为:

$$t_{m1} = \frac{T_2}{\pi} \arccos \frac{(a-l)^2 + b^2 - c^2}{2(a-l)b} \quad (25)$$

$$t_{p1} = \frac{T_2}{\pi} \arccos \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \quad (26)$$

$$t_{n1} = \frac{T_2}{\pi} \arccos \frac{(a+l)^2 + b^2 - c^2}{2(a+l)b} \quad (27)$$

利用数控单轴机工具盘修磨工件边缘时,工具盘点位移动距离 1~2 mm, 点位间平移时间相对点位驻留时间很小, 所以其平移磨削影响在此忽略不计。

在工具盘平移一次位置下, 图中 M 、 P 、 N 三点总的磨削积分时间分别为:

$$t_m = t_{m1} + t_{m2} \quad (28)$$

$$t_p = t_{p1} + t_{p2} \quad (29)$$

$$t_n = t_{n1} + t_{n2} \quad (30)$$

当工具盘平移 n 点时, 各点总磨削时间是工具盘在各个位置点积分时间的累加。

$$t_m = \sum_{i=1}^{i=1 + \text{truncate}(\frac{c}{2l})} t_{mi} \quad (31)$$

$$t_p = \sum_{i=1}^{i=\text{truncate}(\frac{c}{2l})} t_{pi} \quad (32)$$

$$t_n = \sum_{i=1}^{i=\text{truncate}(\frac{c}{2l})-1} t_{ni} \quad (33)$$

式中, i 为积分时间次数, 其中 $\text{truncate}(\frac{c}{2l})$ 为计算结果整数部分, 积分时间次数 i , 由几何关系可以算出。

同样道理, 可求解工具盘在工件边缘移动超过三点位置时各点位的总磨削时间。工具盘在平移过程中, 覆盖工件面积不断更新, 不断覆盖工件内圆表面点, 工件外圆表面点不断移出工具盘覆盖面积。

求解出 P 、 V 以及积分时间 t 情况下, 最后根据 Preston 方程, 如公式(34)所示, 求出加工过程中工件上每点的磨削去量:

$$H = k \iint_{T(x,y)} P(x,y)V(x,y)dt \quad (34)$$

每点位置固定时, 以 M 点为例, 压力 P 是已知的, v 是时间 t 的函数, 其磨削去量为:

$$H_{m1} = kP(x,y) \iint_{T(x,y)} V(x,y)dt \quad (35)$$

$$H_{m1} = k \frac{F}{I_x} \int_0^{t_{m1}} [a^2(\omega_1 - \omega_2)^2 + b^2\omega_2^2 - 2ab\omega_2(\omega_2 - \omega_1) \cos(\omega_1 t)]^{-1} dt \quad (36)$$

$$H_{m1} = kF \left\{ -\frac{2}{3} [(b^2 - x_0^2)^3]^{\frac{1}{2}} + (x_{ic}^2 + a^2 - x_0^2)y_0 - \frac{y_0^3}{3} - x_{ic} \left[y_0(a^2 - y_0^2)^{\frac{1}{2}} + a^2 \arcsin\left(\frac{y_0}{a}\right) \right] \right\}^{-1} \quad (37)$$

加工过程中, 数控平移臂移动时, M 点总的去除量累加为:

$$H_M = \sum_{i=1}^{i=1 + \text{truncate}(\frac{c}{2l})} H_{mi} \quad (38)$$

利用公式(38), 编写程序软件算法, 求解工件边缘点的磨削去量, 进行数学仿真预测, 指导加工工艺参数调整。

3 某型号反射镜数控单轴机修边仿真与实验结果

3.1 非球面反射镜技术参数

在某一型号反射镜产品上开展实验, 该反射镜为二次曲面, 曲面方程如下:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}, \quad (39)$$

式中, $r^2 = x^2 + y^2$; $c = 1/R$, 非球面顶点曲率半径 R 为 $-1\ 601.02 \pm 1$; 二次非球面系数 k 为 $-0.976\ 8 \pm 0.000\ 3$ 。

非球面反射镜的材质为 ULE 玻璃, 实际口径为 $\Phi 666$ mm。

以工件圆心为原点, 根据如下弧长公式^[16],

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx, \quad (40)$$

计算出母线长度(反射镜半径弧长)为335.4 mm,略大于反射镜半径333 mm。

3.2 实验方法

实验前采用干涉仪测量抛光工件面形。加工工具盘口径为 $\Phi 50$ mm,在数控单轴机上从工件边缘往工件圆心方向,沿工件母线方向(径向方向)每隔2 mm移动一个点,共移动9个点,每点停留30 min,使用数控单轴机机床右侧平移臂进行修边。数控单轴机机床主轴转速为3.3 r/min,工具盘转速为60 r/min,机床右侧平移臂施加在工具盘上的外力为19.668 N。修边后再次采用干涉仪进行面形测量,比较实验前后面形结果,得到边缘磨削去量。代入公式(38),得到Preston方程中 k 系数。

第二次实验采用两个 $\Phi 50$ mm工具盘,继续在数控单轴机上从工件边缘往工件圆心方向,沿工件母线每隔2 mm移动一个点,共移动9个点,每点停留14 min,使用数控单轴机两侧平移臂同时修边。数控单轴机机床主轴转速为3.3 rpm,工具盘转速为60 rpm,机床左右两侧平移臂施加在工具盘上的外力分别为80.756、56.527 N。边缘加工实验如图9所示。修边后采用干涉仪进行面形测量,比较实验前后面形结果,得到边缘磨削去量。两次实验采用同一型号的氧化铈磨料,为减小实验误差,加工过程尽力保证磨料浓度一致。实验结果与公式仿真去量结果比较,验证模型准确性。

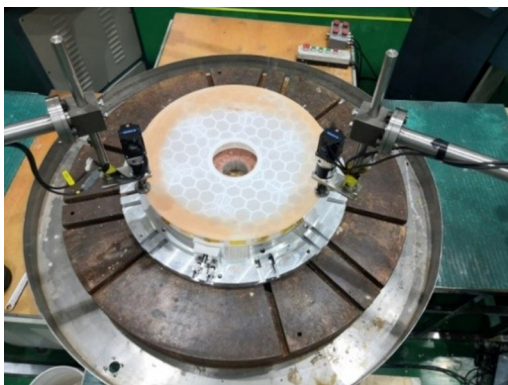


图9 边缘加工实验

Fig. 9 Edge machining experiment

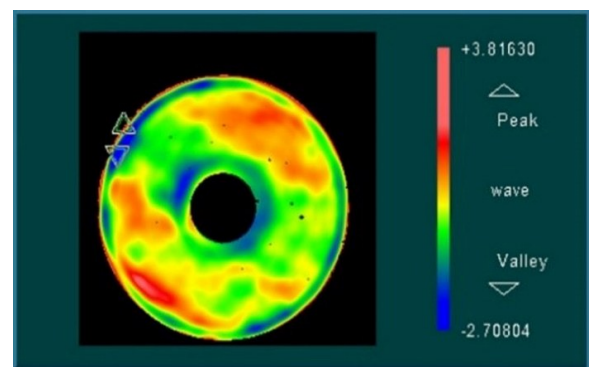
3.3 实验结果与讨论

图10为实验面形结果,图11为实验与仿真结果。干涉仪观测的平面口径,与加工反射镜弧面口径存在差异,适当简化定量分析过程,取面形波谷值变化进行分析,求得 k 值, $k=5.7386 \times 10^{-8}$ 。进行模型仿真工件边缘磨削去除量变化,如图11(c)所示。模型曲线与实验去量变化量曲线趋势吻合,呈现出指

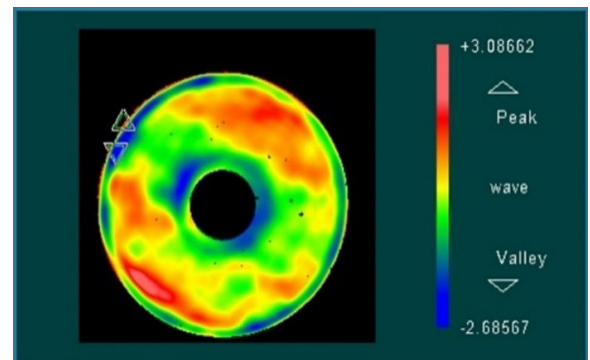
数型曲线形状。

第二次实验算法模拟中工件面形靠近边缘面形波谷位置去除量为 0.34λ ,实际加工图中面形波谷差值为 0.37λ ,理论模拟准确度为91.9%。分析误差来源,与理论模型的简化以及部分参数的近似取值有关,另外,实验过程中工具盘沥青盘面与工件表面面形不吻合、加工环境温湿度变化、氧化铈抛光液浓度变化,以及工具盘定位不准确等因素也将影响结果准确性。

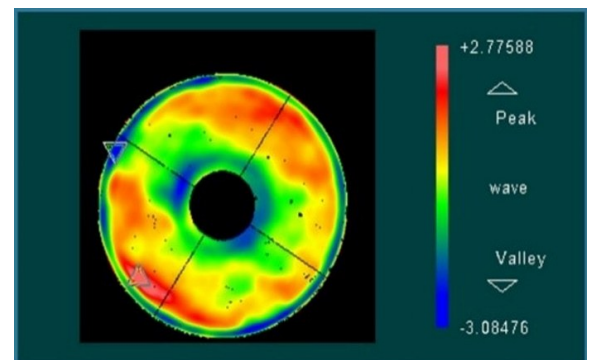
文中建立的数学模型,同样适用于元件内孔边缘研磨抛光加工时的仿真处理与工艺指导,工件内部均匀去除和环带误差修正,以及解决平转动工具盘在工件边缘不同露边情况下的去除函数不稳定情况。



(a) 实验前



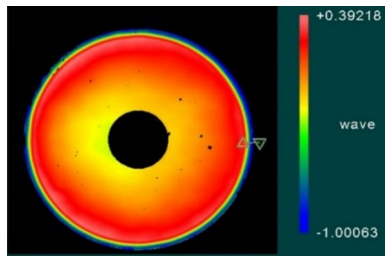
(b) 第一次实验



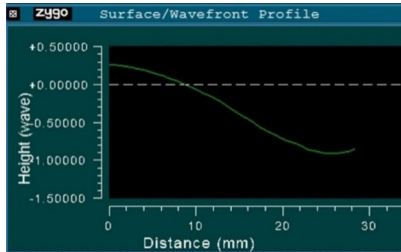
(c) 第二次实验

图10 某型号反射镜数控单轴机修边实验面形结果

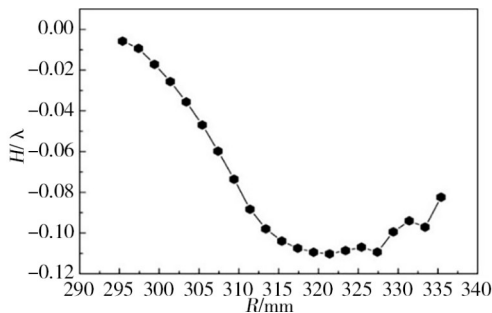
Fig. 10 Surface trimming experiment results of one mirror with the CNC single shaft machine



(a) 第一次和第二次实验面形变化量



(b) 实际边缘去量变化曲线



(c) 模型仿真工件边缘去除量变化

图 11 实验与仿真结果

Fig. 11 Experiment and simulation results

4 结论

研制数控单轴机,并基于 Preston 方程,通过理论推导,得出数控单轴机边缘效应下的点位移动去除函数计算模型。加工过程,工具盘沿着工件径向边缘移动时,工具盘露边量变化引起工具盘与工件间压强呈指数级变化;工件转动,工具盘在工件径向距离不变时,工具盘与工件间压力恒定,但是工件边缘不同位置点磨削时间呈现出不同的规律变化,文章求出工件转动过程中,工具盘沿工件母线移动时,由磨削压力和磨削时间共同作用的磨削去量公式。经过实验验证,该边缘去除函数计算模型的数值绝对误差在 10% 内,边缘去除函数模型与实际加工吻合很好。模型的建立为采用数控单轴机加工反射镜内外边缘以及小工具盘平转动加工方式工艺参数调整提供了指导,对于边缘效应的控制更为有效,能更好地服务于宇航材料反射镜高要求的边缘效应控制。

参考文献

- [1] WAN S, ZHANG X, HE X, et al. Modeling of edge effect in subaperture tool influence functions of computer controlled optical surfacing [J]. Appl. Opt., 2016, 55(36): 10223-10228.
- [2] KIM D W, PARK W H, KIM S, et al. Parametric modeling of edge effects for polishing tool influence functions [J].

Opt. Express, 2009, 17(7): 5656-5665.

[3] LIU H, WU F, ZENG Z, et al. Edge effect modeling and experiments on active lap processing [J]. Opt. Express, 2014, 22(9): 10761-74.

[4] 杨晓京,赵全. 单晶锗抛光过程中的材料变形和边缘效应研究[J]. 塑性工程学报, 2020(12): 97-105.

YANG X J, ZHAO L. Study on material deformation and edge effect during single crystal germanium polishing [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020(12): 97-105.

[5] 李党娟,王佳超,陈阳,等. 大功率长焦深高斯光束整形设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10): 2129-2137.

LI D J, WANG J C, CHEN Y, et al. Design of high power long-coke deep-Gaussian beam shaping system [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(10): 2129-2137.

[6] ASPDEN R, MCDONOUGH R, NITCHIE F R. Computer assisted optical surfacing [J]. Appl. Opt., 1972(11): 2739-2747.

[7] 海阔,曾雪锋,李锐钢,等. 预置曲率研磨盘提高行星研磨技术去除函数稳定性[J]. 光学精密工程, 2021, 29(7): 1620-1630

HAI K, ZENG X F, Li R G, et al. Method for improving the stability of removal function of planetary grinding technology by presetting curvature grinding disk [J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(7): 1620-1630.

[8] 彭冰,顿爱欢,吴伦哲,等. 大气等离子体变去除函数加工方法研究[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2403002.

PENG B, DUN A H, WU L Z, et al. Variable removal function in atmospheric pressure plasma polishing [J]. Chinese Journal of lasers, 2021, 48(24): 2403002.

[9] JONES R A. Computer-controlled optical surfacing with orbital tool motion [J]. Opt. Eng., 1986, 25(6): 785-790.

[10] LUNA-AGUILAR E, CORDERO-DAVILA A, GONZALEZ G J, et al. Edge effects with Preston equation [C]// Proc. SPIE, 2003, 4840: 598-603.

[11] CORDERO-DÁVILA A, GONZÁLEZ-GARCIA J, PEDRAYES-LOPEZ M, et al. Edge effects with the Preston equation for a circular tool and workpiece [J]. Appl. Opt., 2004 (43): 1250-1254.

[12] HAN Y, WU F, WAN Y J. Pressure distribution model in edge effect [C]//Proc. SPIE, 2009, 7282, 72822Q.

[13] NAM H S, KIM G C, KIM H S, et al. Modeling of edge tool influence functions for computer controlled optical surfacing process [J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2016, 83: 911-917.

[14] WAN S, WEI C, HU C, et al. Modeling and prediction of tool influence function under complex edge in sub-aperture optical polishing [J]. Opt. Express, 2021, 29(15): 23582-23596.

[15] 沙晨春,郭晓凌. 工业机器人光学加工中边缘效应问题的解决方法 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(12): 2800-2804.

SHA S C, GUO X L. The edge effect problem in industrial robot optical processing method [J]. Science, Technology and Engineering, 2012, 12(12): 2800-2804.

[16] 同济大学数学系编. 高等数学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

The Mathematics Department of Tongji University. Advanced Mathematics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.