边缘效应的去除函数模型及实验

邓伟杰,张 峰,郑立功

(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 130031)

摘 要: 计算机控制光学表面技术(CCOS)是加工光学非球面的一项重要技术。在计算机控制小磨头 抛光技术中,边缘效应严重制约了 CCOS 技术的加工精度和加工效率,是亟待解决的技术难点之一。 获得磨头在加工工件边缘时的定量去除模型,并通过驻留时间算法进行补偿,是解决该问题的重要途 径。采用边缘压强阶跃分布模型,并通过理论推导,得出边缘效应下的去除函数计算模型。去除函数 实验的结果表明,该边缘去除函数计算模型的数值绝对误差在 5%内,边缘去除函数模型与实际加工 吻合很好,可以用于指导实际抛光过程。

关键词:光学制造; 边缘效应; 边缘去除函数 中图分类号:TN21 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2011)09-1743-06

Removal function model and experiment of edge effect

Deng Weijie, Zhang Feng, Zheng Ligong

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China)

Abstract: Computer controlled optical surfacing (CCOS) is an important technology for manufacturing optical aspheric mirrors. Edge effect is one of the key problems in CCOS and restricts the fabrication efficiency and accuracy in practice seriously. It is an important way to solve edge effect by obtaining the quantitative removal model when grinding head is fabricating the edge of workpiece and compensating it with dwell time algorithm. Skin model is used to describe the pressure distribution in edge region. The calculation model of edge removal function was derived from skin model theoretically. In order to validate the edge removal function model, the removal function experiments were completed with the practical parameters. The experimental results show that the absolute value error between the theoretical model and the experimental results is less than 5%, and the calculation model of edge removal function

Key words: optical fabrication; edge effect; edge removal function

收稿日期:2011-01-13; 修订日期:2011-02-25

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61036015)

作者简介:邓伟杰(1983-),男,助理研究员,博士,主要从事光学非球面加工与检测方面的研究。Email:mr-deng@163.com

0 引 言

计算机控制光学表面成型技术(CCOS)建立的数 学模型认为去除函数稳定,从而当磨头的抛光模移 动、覆盖和通过加工区域时,控制加工时间达到所要 求的材料去除量。当磨头部分露出工件边缘时,由于 相对压力增大,使边缘区域去除量增加,工件发生 "塌边"。使工件边缘去除量难以控制,严重阻碍面形 误差收敛^[1]。

在 CCOS 技术中,边缘效应严重制约了 CCOS 技术的加工精度和加工效率,限制了其在先进光学系统中的应用^[2]。针对该问题,首先通过理论推导,获得了加工边缘区域时的磨头压强分布,并结合磨头平转动运动方式,修正了边缘区域的去除函数模型。

1 阶跃分布模型

将磨头当做一个刚体,对其露边方向的力矩进 行粗略分析。由于接触区域不再是对称的,为保证磨 头的力矩平衡,露边时的磨头压强分布是不均匀的, 边缘位置的压强大于内部的压强分布⁽³⁾。根据边缘压 强分布的特点,墨西哥学者提出了一种新的压强 分布模型^[4],希望能够合理近似地对边缘压强进行 的计算。

如图 1 所示, 接触区域被分成 B 、C 两个部分, 区域内的压强均为常量但两者大小不同。







$$\int_{A=B+C} p(x,y) dx dy = N$$
(1)

$$\int_{A=B+C} xp(x,y) dx dy = 0$$
(2)

式中:p(x,y)为压强分布;N为磨头受到的压力。 Skin zone 的宽度 s 可经验性的设定为。

$$s = \left(\frac{2}{r_2}\right) d(r_2 - d) \tag{3}$$

式中:r,为磨头的半径;d为磨头的露边值。

从而计算得到压强分布,区域 B 内的压强值为 $p_{\rm B}$,区域 C 内的压强值为 $p_{\rm C}$:

$$p_{\rm B} = \frac{N(I_{x\rm A} - I_{x\rm B})}{I_{\rm IA}(I_{x\rm A} - I_{x\rm B}) - I_{x\rm A}(I_{\rm IA} - I_{\rm IB})}$$
(4a)

$$p_{\rm C} = \frac{N(I_{x\rm A} - I_{x\rm B})}{I_{\rm IA}(I_{x\rm A} - I_{x\rm B}) - I_{x\rm A}(I_{\rm IA} - I_{\rm IB})} + \frac{-NI_{x\rm A}}{I_{\rm IA}(I_{x\rm A} - I_{x\rm B}) - I_{x\rm A}(I_{\rm IA} - I_{\rm IB})}$$
(4b)

其中, I_{IA} , I_{IB} , I_{xA} , I_{xB} 为积分运算,具体的计算式如下:

$$I_{\rm IA} = \iint_{A} dxdy \qquad I_{\rm IB} = \iint_{B} dxdy$$
$$I_{xA} = \iint_{A} xdxdy \qquad I_{xB} = \iint_{B} xdxdy \qquad (4c)$$

图 2 为压强分布的示意图,比较形象地说明了 磨头在加工工件边缘时,某一驻留位置下的压强分 布的形式。



2 平转动下边缘去除函数

磨头在平动的同时围绕定轴转动,称作平转动。 平转动工作下的磨头在对光学表面进行加工时,特 别是对非球面面形进行加工时,与被加工表面的吻 合程度相对较好,且由于平转动时磨头上各点的线 速度相同,因而磨头各点的磨损情况相同。因此,平 转动是 CCOS 中较常用的磨头运动方式^[4]。 令平转动运动方式下,磨头的半径为 r,偏心 为 e,抛光盘在一个作用周期内所覆盖的工作表 面的区域为以(r + e)为半径、以 O 点为中心的圆 域。一个周期内,由于作用圆域内距 O 点不同距 离的点与磨头的相对作用时间不同,所以材料的 去除量不同。考虑距 O 点为 R 处一点 A,其与 y 轴的夹角为 α,由于系统是回转对称的,所以在一 个作用周期内,工件上的 A 点与磨头的相对作用 角度为 2α₀。

$$2\alpha_0 = \begin{cases} 2\arccos(\frac{R^2 + e^2 - r^2}{2Re}) & r - e < R \le r + e \\ 2\pi & 0 \le R < r - e \end{cases}$$
(5)

工件上任一点相对磨头的运动速度为恒量,等 于角速度 ω 乘以偏心距 e,同时 dt = d α / ω ,因此,根 据公式(5)得到磨头的去除函数:

$$R(r) = eK \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} P(r, \alpha) d\alpha$$
 (6)

当压强 P 为恒定值 P_0 时,

$$R(r) = \begin{cases} 2eKP_0 \arccos(\frac{R^2 + e^2 - r^2}{2Re}) & r - e < R \le r + e \\ 2\pi eKP_0 & 0 \le R \le r - e \end{cases}$$
(7)

图 3 为平转动下磨头在工件边缘位置加工时的 示意图,当驻留点位置为 C 时,磨头平转动后会有多 个不同的与工件接触的位置,即磨头转动一圈过程 中,磨头的露边值 d 是变化的。





Fig.3 Location of tool and workpiece in the edge area with planar motion

如公式(6)所示,边缘区域的去除函数变化的 主要原因是压强发生了改变,即边缘区域的去除函 数是一圈内各个接触位置的不同压强对应去除量 的综合。 图 4 为计算磨头在加工工件边缘区域时各位 置的露边值,进而计算压强分布的示意图。绕驻留



图 4 平转动下磨头与边缘参数计算示意图

Fig.4 Computing parameters of the skin model with planar motion 点 $C(x_c, y_c)$ 平转动一圈中,对去除范围内的点A的相 对作用角度为 $-\alpha_{max}$ 到 α_{max} ,式中R=AC为驻留点到 去除点的距离,e=BC为偏心距, r_2 为磨头半径, r_1 为 工件半径:

$$\alpha_{\max} = \begin{cases} \arccos(\frac{R^2 + e^2 - r_2^2}{2Re}) & r_2 - e < R \le r_2 + e \\ \pi & 0 \le R \le r_2 - e \end{cases}$$
(8)

因此,只需要计算出相对作用角度范围内的磨头对 去除点 $A(x_A, y_A)$ 的压强值。令磨头在某一时刻的相 对作用角度为 α ($-\alpha_{max} \le \alpha \le \alpha_{max}$),对应图中的 $\angle BCA, B$ 点为磨头的瞬时位置。

$$R = AC = \sqrt{(x_c - x_A)^2 + (y_c - y_A)^2}$$
(9)

$$L_{c} = CO = \sqrt{x_{c}^{2} + y_{c}^{2}}$$
(10)

$$L_A = AO = \sqrt{x_A^2 + y_A^2} \tag{11}$$

因此,得出角度参数:

$$\beta = \angle ACO = \arccos\left(\frac{R^2 + L_c^2 - L_A^2}{2 \cdot L_c \cdot L_A}\right) \tag{12}$$

$$\gamma = \angle BCO = \angle BCA + \angle ACO = \alpha + \beta \tag{13}$$

可以计算出磨头在瞬时位置时, 磨头中心相对工件 中心的距离 LB:

$$L_{B} = BO = \sqrt{BC^{2} + CO^{2} - 2 \cdot BC \cdot CO \cdot \cos(\angle BCO)} = \sqrt{e^{2} + L_{c}^{2} - 2 \cdot e \cdot L_{c} \cdot \cos\gamma}$$
(14)

因此,磨头在瞬时位置 B 的露边值为:

$$d = BO + r_2 - r_1 = L_B + r_2 - r_1 \tag{15}$$

$$x_{\rm tc} = r_1 + d - r_2 \tag{16}$$

计算得到磨头与工件的瞬时相对位置后,就可 以根据第一节的压强分布模型,计算驻留点作用于 去除点的在每个相对作用角度 α 下的瞬时压强。然 后使用公式(17)、(18)进行积分,采用自适应递归辛 普森公式:

$$R(r) = eK \int_{-\alpha_{max}}^{\alpha_{max}} P(\alpha) d\alpha \qquad (17)$$

$$\alpha_{max} = \begin{cases} \arccos(\frac{R^2 + e^2 - r_2^2}{2Re}) & r_2 - e < R \le r_2 + e \end{cases} \qquad (18)$$

 $0 \leq R \leq r_2 - e$

3 边缘去除函数工艺实验

 π

在实际加工条件下,对边缘区域的磨头去除函 数进行了工艺实验,考察上节所得到的去除函数公 式是否符合实际加工。

实验工件为 φ 230 mm 的圆形平面元件,材料为 K9 玻璃。采用磨头直径为 50 mm,偏心距为10 mm, 抛光压强为 0.15 MPa。抛光模为 55 # 沥青,抛光磨 料为 W2 氧化铈。笔者在工件中间以及边缘进行 了 定 点去除函数试验,转数为 800 r,加工时间为 4 min,即抛光过程中磨头保持转速恒定为200 r/min。 如图 5 所示。



图 5 边缘去除函数工艺实验装置

Fig.5 Equipment of edge removal function experiment

利用 MetroPro 软件的自带功能,首先测得去 除函数实验前的工件面形分布,然后将其存为系 统误差 SysErr.dat,去除函数实验后,将工件定位 到和加工前一致,开启 Subtract Sys Err 的功能并 进行测量,此时得到的结果相当于去除函数实验 前后的面形之差,即为要测的去除函数的分布。 如图 6 所示。





图 6 边缘去除函数工艺实验结果 Fig.6 Results of edge removal function experiment

使用阶跃分布模型,计算得出了驻留点距离工件中心 95 mm 时的去除函数,如图 7(a)所示。与实际 去除函数实验结果进行对比可知,相对于无校正去 除函数(图 7(b)),阶跃分布模型的结果和实验结果 的吻合程度很高,对边缘去除量的迅速增加的趋势 进行了有效的预测。

为了使问题的定量分析简单化,考虑到去除函 数具有一个方向的对称性,因此,提取非旋转对称 方向的测量母线,对边缘去除函数与正常去除函数 进行数值分析。如图8所示,左侧区域为最大露边 距15mm时(驻留点距离工件中心95mm)的去除 函数母线,右侧区域为无边缘效应时正常去除函数 的母线。

使用profile plot 中的 inspect 功能,可以显示母 线上任意一点的位置(单位为像素)以及去除深度(单 位为波长)。非有效去除的位置的深度不是理想的 0 值,原因是实验前后的定位无法保证完全一致,因



Fig.7 Simulation results of edge removal function



图 8 边缘去除函数的母线分析 Fig.8 Analysis of generatrix of edge removal function

此,去除函数测量结果中会有少量的误差,但是从图 中也可以看出,定位误差的影响相对去除函数来说 很小,不影响分析结果。

选取边缘去除函数以及正常去除函数的特征点 进行分析,分别是边缘去除函数的最大去除量(*A* 点)、边缘去除函数的驻留点处去除量(*B*点)、正常去 除函数的中心去除量 (*C*点)。如图 9 所示,*A*点处 0.6λ,*B*点处 0.297λ,*C*点处 0.342λ。

首先,根据 *C* 点的去除深度值 0.342 λ ,以及公 式(7)反算出在本次实验条件下的 Preston 系数 *k*= 3.56×10⁻⁷,代入公式(17)、(18),计算得到阶跃分布模 型下的边缘去除函数分布,最大去除量(*A* 点)数值为 0.575 λ ,驻留点处去除量(*B* 点)数值为 0.304 λ 。由此 可以计算模型的绝对误差百分比:

最大去除量(A 点)

$$\Delta A = \left| \frac{0.575 - 0.6}{0.6} \right| = 4.17\%$$

驻留点处去除量(B点)

$$\Delta B = \left| \frac{0.304 - 0.297}{0.297} \right| = 2.36\%$$





图 9 边缘去除函数母线的数值分析 Fig.9 Numerical analysis of generatrix of edge removal function

为说明模型的普适性,采用更大的抛光磨头进行 了边缘去除函数实验,磨头尺寸为直径80mm,露边 值分别为10mm、25mm,去除函数实验结果如图10所 示,采用上述的数值分析方法,特征点处的去除量







绝对误差分别为 3.9%、4.8%。

实验结果表明,模型绝对误差百分比在 5%内, 即边缘区域压强阶跃分布模型以及上节所推导的边 缘去除函数模型与实际加工吻合很好,可以用于指 导实际抛光过程。

4 结 论

采用边缘压强阶跃分布模型,并通过理论推导, 得出边缘效应下的平转动去除函数计算模型。实验 结果表明,该边缘去除函数计算模型的数值绝对误 差均在5%内,边缘去除函数模型与实际加工吻合 很好。获得磨头在工件边缘时准确的去除函数模型 后,就可以采用驻留时间算法进行补偿边缘效应,为 后续的加工提供了基础^[5]。

参考文献:

[1] Zhang Xuejun. Edge control in computer controlled optical

polishing [C]//SPIE, 1995, 2536: 239-242.

- [2] Li Huan, Xiang Yang. Optical design of off-axis three-mirror telescope systems of imaging spectrometers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 500-504. (in Chinese) 李欢,向阳.成像光谱仪离轴三反望远系统的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 500-504.
- [3] Cheung Chifai, Ho Laiting, Kong Lingbao. Optical surface generation in ultra-precision polishing of freeform[J]. *Infrared* and Laser Engineering, 2010, 39(3): 496–501. (in Chinese) 张志辉,何丽婷,孔令豹. 超精密抛光自由曲面光学的表面 生成[J]. 红外与激光工程,2010,39(3): 496–501.
- [4] Alberto Cordero-Da'vila. Edge effects with the Preston equation for a circular tool and work-piece [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(6): 1250–1254.
- [5] Michael Bougoin, Pierre Deny. The SiC technology is ready for the next generation of extremely large telescopes [C]// SPIE, 2004, 5494: 9–18.

下期预览

云粒子探测器研制

卜令兵,朱亚宗,单坤玲,黄兴友

(南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室 ,江苏 南京 210044)

摘要:云滴粒子探测器是人工影响天气中重要的测量仪器之一,为建立可用于业务的云滴粒子探测器,对云滴粒子探测器的光学部分进行设计。该探测器使用单模光纤耦合输出的 685 nm 的激光作为光源,通过方形光阑和 4 f 光学系统产生均匀照明,接收系统中利用 45°反射镜中心开孔抑制直接入射光,并用小孔光阑控制整个光学系统的景深。实验结果表明,激光整形后光束近似均匀,系统能对直接入射光具有较强的抑制能力、景深控制方案合理。利用小孔光阑模拟云滴粒子实验表明,该样机具有云滴粒子探测能力。