

数控抛光中不同运动方式下 小抛光盘抛光特性之比较

王权陡 余景池 张峰

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

刘民才

(成都精密光学工程研究中心 成都 610041)

摘要 阐述行星运动与平转动两种运动方式下数控抛光中小抛光盘的工作函数,论述了抛光盘本身在不同运动方式下的材料磨损情况。通过采用计算机对抛光盘工作函数及磨损曲线的模拟将抛光盘的两种运动方式进行了分析与比较。

关键词 数控抛光 工作函数 行星运动 平转动

中图分类号 TQ171.684 **文献标识码** A

1 引言

随着非球面元件越来越多的使用在光学系统中,光学非球面元件的制造技术也随之不断的发展与进步。其中,小抛光盘数控抛光技术是70年代兴起的一门新兴技术,这一技术手段主要是针对口径较大的高精度非球面元件,特别是应用在空间光学系统中轻量化的非球面元件的加工与制造。它是根据定量的面形检测数据,在加工过程控制模型的基础上,依靠计算机控制一个小抛光盘(直径通常小于工件直径的1/4)对光学元件表面进行修抛,通过控制抛光盘在元件表面的驻留时间及抛光盘与元件间的相对压力来控制材料的去除量^[1~2]。在加工过程中,由于小抛光盘能够比较有效的跟踪非球面表面各点曲率的变化,因而能与非球面面形实现良好的吻合从而获得很高的加工精度。同时由于小抛光盘工作压力较小,避免加工中“印痕”现象的出现,因而适合轻量化反射镜的加工^[3]。

小磨盘抛光过程的数学描述是: 表面材料去除量等于抛光盘工作函数在运动轨迹上对停留时间函数的卷积^[4]。即:

$$W(x, y) = R(x, y) * * T(x, y) \quad (1)$$

式中

* * 表示二维卷积;

$W(x, y)$ 表示 (x, y) 点材料的去除量;

$R(x, y)$ 表示抛光盘的工作函数;

$T(x, y)$ 表示抛光盘运动轨迹上的时间停留函数;

由上式可以看出抛光盘工作函数 $R(x, y)$ (也称作材料去除函数) 是控制加工过程的基本函数。根据运动方式的不同, 抛光盘的工作函数 $R(x, y)$ 也不同, 这样在加工过程中, 面形误差的收敛效率、收敛精度也有所不同。目前比较多的为人们所采用的运动方式有两种, 一种是抛光盘在自转的同时围绕公转轴转动, 即行星运动; 另一种是抛光盘在平动的同时围绕定轴转动, 这里称作平转动。

不论是传统的抛光技术也好, 现代的计算机控制抛光技术也好, 描述材料去除量的最基本方程是 Preston 在 1927 年提出的 Preston 方程^[3], 他指出材料的去除率正比于抛光盘与工件间的压力和相对速度, 由下式给出:

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = C \frac{L}{A} \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2)$$

式中

ΔH 表示材料表面去除量;

Δt 表示抛光盘与工件表面的作用时间;

C 表示比例系数, 有时也称作 Preston 系数, 与被抛光材料、抛光膜层材料、抛光粉种类、抛光液浓度与 PH 值以及抛光温度有关;

L 表示抛光盘作用在工件表面的负载;

A 表示抛光盘的工作面积;

Δs 表示抛光盘相对工件的作用距离;

由于抛光盘在与工件表面相互作用时, 负载 L 、抛光盘工作面积 A 及比例系数 C 一般保持不变, 将(2)简化并积分后得到:

$$H(x, y) = CP \int_{T(x, y)} V(x, y) dt \quad (3)$$

式中

$H(x, y)$ 表示 (x, y) 点单位时间内材料表面的去除量;

C 表示比例系数;

P 等于 L/A , 表示 (x, y) 点的瞬时正压强;

$V(x, y)$ 等于 $\Delta s/\Delta t$, 表示 (x, y) 点的瞬时相对速度;

$T(x, y)$ 表示点 (x, y) 在一个抛光周期中的抛光总时间。

对(3)式归一化后得到抛光盘的工作函数^[5], 表示为:

$$R(x, y) = \frac{1}{T} CP \int_{T(x, y)} V(x, y) dt \quad (4)$$

在小抛光盘数控抛光中, 被加工表面易出现“小波纹”误差, 这是抛光函数卷积效应、抛光盘与被加工面存在不吻合的结果^[6]。本文在论述两种运动方式下抛光盘工作函数的基础上, 仅从抛光过程中抛光盘磨损情况的不同使得抛光盘与被抛光表面的吻合程度不同的角度出发, 讨论了小抛光盘两种运动方式下的抛光特性。

2 抛光工作函数

2.1 行星运动方式下抛光盘的工作函数

抛光盘行星运动方式如图 1 所示:

为便于推导将图 1 简化如图 2 所示。O₁ 为公转中心, O₂ 为抛光盘中心, ρ 为抛光盘半径, ρ₀ 为偏心距。设抛光盘自转的角速度为 ω₂,

公转的角速度为 ω₁, V₁, V₂ 分别是抛光盘上对应于 A 点的点相对于 O₁ 及 O₂ 点运动的线速度。工作函数 R(x, y) 覆盖区域的半径为 ρ₀ + ρ。由式(4)可知, 当压力及其它工艺条件不变的情况下, 抛光盘的工作函数与相对运动速度 V 成正比。所以求得抛光盘覆盖区域内各点抛光盘相对运动速度 V 随 θ 角的变化规律 V(x, y, θ), 在公转一周内对其积分后即可得到抛光盘覆盖区域内材料去除量的分布函数, 也就是抛光盘的工作函数 R(x, y)。

对于图中工件上一点 A 点, 其相对抛光盘的运动速度为:

$$V = V_1 + V_2$$

$$V_1 = -r\omega$$

$$V_2 = -r_1\omega$$

整理后得:

$$V = \omega \rho [r^2(1+e)^2 - 2er g(1+e)\cos\theta + g^2e^2]^{1/2} \quad (5)$$

其中 e = ω₂/ω₁, g = ρ₀/ρ, r = r/ρ, 考虑(4)式中 C, P 为常量, 且 dt = dθ/ω, 则抛光盘工作函数为:

$$R(r) = CP \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \rho [r^2(1+e)^2 - 2er g(1+e)\cos\theta + g^2e^2]^{1/2} d\theta \quad (6)$$

其中,

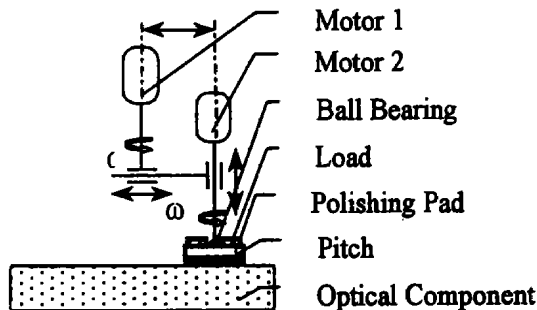
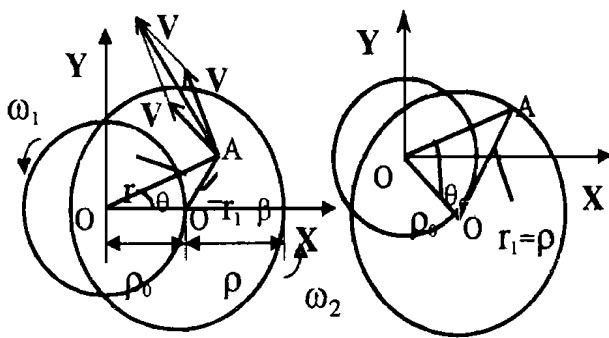


Fig. 1 Principle map of planet motion model



a) a covered with polishing pad

b) a just left covering area

Fig. 2 Motion of the polishing pad

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{r^2 - 1 + g^2}{2r g} \right] \quad (7)$$

适当选取抛光盘结构参数 e 与 g , 得到优化后的抛光盘工作函数 $R(r)$, 经计算机模拟其抛光特性曲线如下图所示:

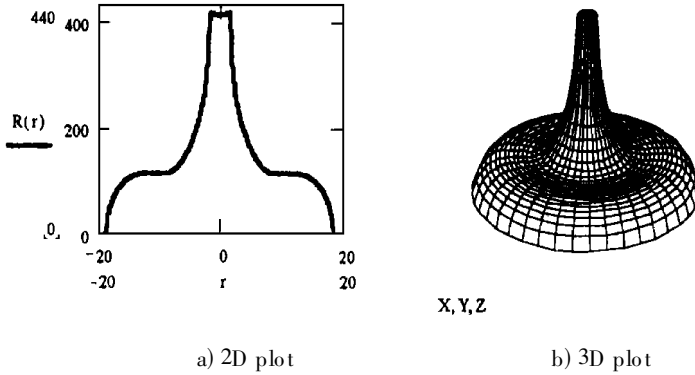


Fig. 3 Optimized performance curve of polishing pad ($e = 8, g = 0.83, F = 0.479$)

其中, F 为趋近因子, 以距抛光区域中心点 $1/4$ 范围内的抛去量 $W_{1/4}$ 与总抛去量 W 的比值来表示。趋近因子的大小决定工作函数趋近高斯分布形式的程度。

2.2 平转动方式下抛光盘的工作函数

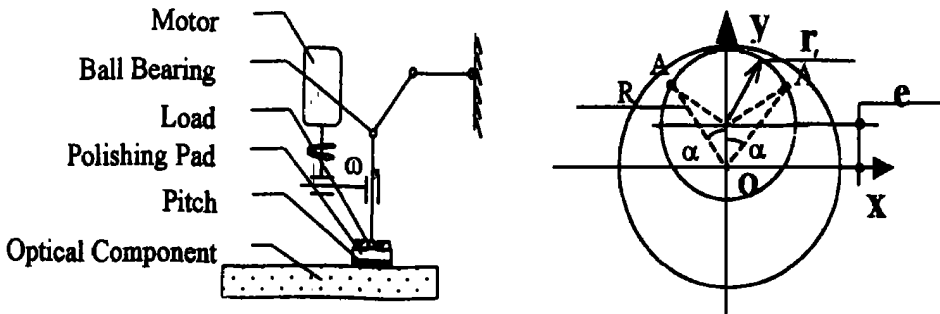


Fig. 4 Principle map of translation model

图 4 为平转动运动方式下抛光盘的运动原理图, 其中抛光盘的半径为 r , 偏摆量为 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 点为中心的域。一个周期内, 由于作用区域内距 O 点不同距离的点与抛光盘的相对作用时间不同, 所以材料的去除量不同。如图(4) 考虑图中距 O 点为 R 的一点 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 点与抛光盘的相对作用角度为 2α 。

$$2\alpha = \begin{cases} 2 \ar \cos \left(\frac{R^2 + e^2 - r^2}{2 Re} \right) & r - e < R < r + e \\ 2\pi & 0 < R < r - e \end{cases} \quad (8)$$

工件上任一点相对抛光盘的运动速度为一恒量, 等于角速度 ω 乘以偏心 e , 同时 $dt = d\alpha / \omega$, 因此根据(4) 式得到抛光盘的工作函数:

$$R(r) = \begin{cases} 2eKP ar \cos\left(\frac{R^2 + e^2 - r^2}{2Re}\right) & r - e < R \quad r + e \\ 2\pi eKP & 0 \leq r \leq R - e \end{cases} \quad (9)$$

其工作特性曲线图 5 所示:

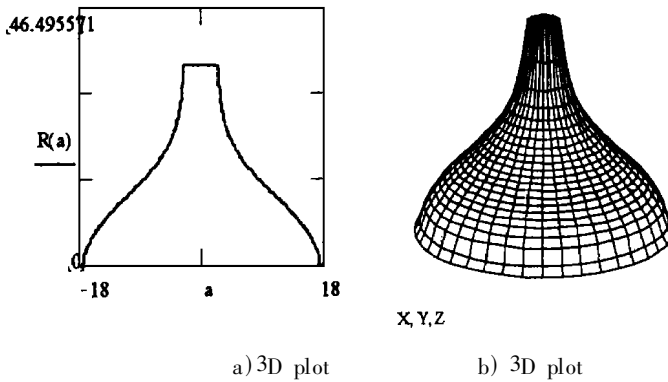


Fig. 5 Optimized performance curve of polishing pad ($e = 0.72, F = 0.462$)

3 两种运动方式下抛光盘的磨损分布

根据(2)式确定行星运动方式下抛光盘的磨损分布。将(2)式两边消去 Δt 并积分得到下式:

$$H = C \frac{L}{A} ds \quad (10)$$

由(10)式可知,求抛光盘上各点的材料去除量即为求抛光盘上各点的曲线积分。设抛光盘上一点 A , 0 时刻的坐标为: $(C1, C2)$, 其中, $C1, C2$ 为常数, 经 t 时间后 A 点坐标如下:

$$\begin{aligned} x &= C1 + r \cos(\omega t) + e \cos(\omega t) \\ y &= C2 + r \sin(\omega t) + e \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中, r 为 A 点距自转中心的距离, ω 为公转角速度, ω 为自转角速度。根据曲线积分有:

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (12)$$

对(11)式两边微分并带入(12)式有:

$$ds = \sqrt{[-r\omega \sin(\omega t) - e\omega \sin(\omega t)]^2 + [r\omega \cos(\omega t) + e\omega \cos(\omega t)]^2} dt \quad (13)$$

这样根据(10)式,一个公转抛光周期内抛光盘 A 点的磨损有:

$$H = C \frac{L}{A} \int_0^{2\pi/\omega} \sqrt{[-r\omega \sin(\omega t) - e\omega \sin(\omega t)]^2 + [r\omega \cos(\omega t) + e\omega \cos(\omega t)]^2} dt \quad (14)$$

根据 2.1 节优化后的抛光盘参数: $e = 8, g = 0.83$ 得到抛光盘的磨损分布曲线如下:

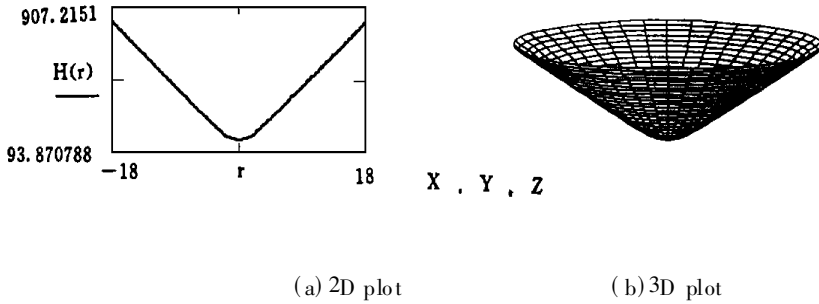


Fig. 6 Wearing distribution of polishing pad in the model of planet motion

由图 6 可以看出, 抛光盘的边缘与中心比较起来磨损较为严重。抛光盘在平转动模式下, 由于平动时抛光盘上各点的线速度相同, 因而根据(3)式抛光盘各点的磨损情况相同。

4 结 束 语

通过上述分析可以看出, 行星运动方式下抛光盘工作函数的趋近因子为 0.479, 而平转动方式下的趋近因子为 0.462, 两者相差 3.5%。由于行星运动下的抛光盘工作函数更趋近于高斯函数, 所以仅考虑理想工作函数时这种运动方式优于平转动运动方式^[6]。同时我们注意到两种不同运动方式下的抛光盘磨损情况不同。此时, 平转动方式远优于行星运动方式, 并且抛光盘随被抛光面面形变化时, 平转动抛光盘上任一点变化范围为以 $0.72 \times r$ 为半径的圆周, 而行星运动抛光盘上各点的变化范围不等, 最大为以 $0.83 \times r + r$ 为半径的圆周, 这样抛光盘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, 行星运动方式下的抛光盘与被加工表面的吻合程度相对较差。综合考虑上述因素, 我认为平转动的抛光盘运动方式更为可取。

参 考 文 献

- 1 Rupp W J. The development of optical surfaces during the grinding process. *Applied Optics*, 1965, 4(6): 743~748
- 2 Rupp W J. Loose Abrasive Grinding of Optical Surface. *Applied Optics*, 1972, 11(2): 2997~2810
- 3 Brown Norman J. *Optical Fabrication*. Lawrence Livermore National Laboratory, 1987. 6~7
- 4 Jones Rabort A. Optimization of computer controlled polishing. *Applied Optics*, 1977, 6(1): 213~224
- 5 Wagner R E, Shannon R R. Fabrication of aspherics using a mathematical model for material removal. *Applied Optics*, 1974, 13(7): 1683~1689
- 6 曹天宁. 计算机控制抛光成型抛物面. *仪器仪表学报*, 1993, 14(4), 402~407

Polishing Performance Comparison of Small Polishing Pad Worked in Different Motion Model in Computer Controlled Optical Polishing

WANG Quan-Dou, YU Jing-Chi, ZHANG Feng

(*State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

LIU Min-Cai

(*Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041*)

Abstract

Working functions of the small polishing pad that works in two motion models are discussed in the process of computer controlled optical polishing, one model is planet motion, the other is translation. Also, The wearing distribution of the polishing pad in two motions is introduced. At last, the performance curve and wearing distribution curve of the polishing pad are worked out by computer simulation. By means of analyse and comparison in two model simulation results, a better motion model is selected to be used in future process of computer controlled optical polishing.

Key words: Computer controlled optical polishing, Working function, Planet motion, Translation

王权陡 男, 1970年9月生, 1992年毕业于燕山大学流体传动与控制专业, 1998年毕业于中科院长春光机所获光学硕士学位。现为长春光机所博士研究生, 从事光学超精密加工与检测工作。