

文章编号: 1005-5630(2011)01-0083-06

椭圆形小磨头特性曲线研究^{*}

肖光辉¹, 李新南²

(1. 东莞宏威数码机械有限公司 研发中心, 广东 东莞 523080;
2. 中科院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 数控小磨头抛光技术中, 磨头的工作函数是加工过程中的一个基本函数。在已有的圆形磨头的数学模型及工作特性研究基础上, 讨论了椭圆形小磨头在行星运动和平转动两种常用运动方式下的工作函数及其特性曲线, 分析并模拟得出其优化后的工作参数。结果表明, 椭圆形磨头在常用运动方式下的工作特性曲线均具有中心最大峰值, 近似于高斯分布, 具有良好的材料去除能力。

关键词: 光学精密加工; 椭圆形小磨头; 特性曲线

中图分类号: TH 744. 3; TH 161 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3969/j. issn. 1005-5630. 2011. 01. 019

Research on the characteristic curve of an elliptical pad

XIAO Guanghui¹, LI Xinman²

(1. R and D Center, Dongguan Anwell Digital Machinery, Co., Ltd., Dongguan 523080, China;
2. Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: In the computer numerical control (CNC) pad polishing technology, the working function of the pad is an essential function during fabricating the workpiece. Based on the research results of the known mathematic modeling and working characteristics of a round pad, the working function and its characteristic curve of an elliptical pad in conditions of planet motion and translation are discussed, and the working parameters after optimization are analyzed and obtained by simulation. The results show that the working characteristic curve of the pentagon-shaped pad has the central peak in the conditions of both commonly-used motions, which similar to the Gauss distribution, and the pad has good material removal ability.

Key words: optical precision fabrication; mall elliptical pad; characteristic curve

引 言

数控小磨头抛光是通过计算机控制一个比被加工的光学工件小得多的抛光盘磨头的运动路径、速度和压力, 改变磨头在所经区域内的驻留时间、相对压力或相对运动速度, 达到精确控制抛光盘磨头在工件各处去除量的目的, 实现光学表面的成型或抛光^[1]。文献[2]讨论了圆形磨头在平转动和行星运动方式下的磨削特性。文献[3]刊载的“五角星形小磨头特性曲线研究”一文讨论了五角星形小磨头在平转动和

^{*} 收稿日期: 2010-04-12

作者简介: 肖光辉(1973-), 男, 湖南城步人, 工程师, 博士, 主要从事光学设计、加工与检测方面的研究工作。

行星运动两种运动方式下的工作特性曲线。现讨论椭圆形小磨头在光学车间常用的两种运动方式下的工作函数及其特性曲线,分析并得出其优化后的工作参数。

1 磨头工作函数

1.1 Preston 方程

光学镜面加工过程中,描述镜面材料去除量比较成功并被普遍采用的数学模型是 Preston 方程^[4]:

$$\frac{dZ(x,y,t)}{dt} = KP(x,y,t) \cdot V(x,y,t) \quad (1)$$

其中, $dZ(x,y,t)/dt$ 是单位时间内镜面上点 (x,y) 位置上的材料去除量; $P(x,y,t)=L(x,y,t)/A(x,y,t)$ 为某一点 (x,y) 处磨头垂直作用时的瞬时压强, $L(x,y,t)$ 表示磨头作用在被加工工件上的负载, $A(x,y,t)$ 表示磨头与工件表面的接触面积; $V(x,y,t)=ds(x,y,t)/dt$ 为磨头和被加工工件在点 (x,y) 处的相对运动速度; K 为比例常数,也称为 Preston 系数。

1.2 材料去除量

根据 Preston 方程,如果知道了相对速度和压力的分布及随时间变化的规律,就可以计算出工件表面上某一点 (x,y) 的材料去除量 $\Delta Z(x,y)$ ^[3,4]:

$$\Delta Z(x,y) = K \int_0^{\tau} P(x,y,t)V(x,y,t)dt \quad (2)$$

式(2)中 τ 为磨头和工件表面的作用时间。

假设磨头在加工过程中的时间驻留函数为 $D(x,y)$;磨头的工作函数为 $R(x,y)$,则整个工件表面的材料去除量为:

$$\Delta Z(x,y) = R(x,y) ** D(x,y) \quad (3)$$

其中 (x,y) 定域于被加工工件表面,** 表示二维卷积运算。式(3)是数控小磨头抛光技术中最重要的理论依据,式中 $R(x,y)$ 与磨头形状、尺寸及磨头运动方式有关。公式中的各种参数大多可以通过计算机进行控制,这些参数包括磨头与工件间的相对压力、相对运动速度以及磨头在某一位置处的驻留时间等^[2-4]。

实际上,工件材料去除量 $\Delta Z(x,y)$ 也就是工件表面原有面形与加工后的面形的差值,即

$$\Delta Z(x,y) = Z_0(x,y) - Z_t(x,y) \quad (4)$$

式(4)中, $Z_0(x,y)$ 为加工前原有的面形, $Z_t(x,y)$ 为加工后的面形。

1.3 磨头工作函数

实际加工过程中,控制磨头的驻留时间比较容易,几乎不需要添加其他的辅助设备,参数控制也较为容易,此时,可将某一研磨或抛光周期内的速度和压力作为常量,对于不同的抛光周期,可以适当调整速度和压力。

先确定材料去除量 $\Delta Z(x,y)$ 和磨头的工作函数 $R(x,y)$,然后对式(3)消卷积,就可求取磨头的驻留时间函数。在实际加工中,通过实测得到预期的材料去除量^[5],而磨头的工作函数可在设定的模拟条件下根据磨头的运动方式,通过建立数学模型进行求解。

要想准确找到并建立起所有影响因素之间的数学关系几乎是不可能的,Preston 方程也是建立在一定的假设基础之上的近似数学模型。借助合理的假设,可以简化光学加工过程,从而实现光学加工过程的自动化,控制加工过程中的各种工艺参数。根据 Preston 假设,磨头匀速运动[即速度 $V(x,y,t)$ 不随时间变化],磨头作用在工件单位面积上的压力 $P(x,y,t)$ 处处恒定,并且垂直于被加工的工件表面,此时磨头的工作函数就可以用一个运动周期中,单位时间内,磨头与工件接触区域内的平均材料去除量来表示,记为 $R(x,y)$,归一化后,得到:

$$R(x,y) = \frac{1}{T} \int_0^T Z(x,y)dt = \frac{1}{T} K \int_0^T P(x,y) \cdot V(x,y)dt \quad (5)$$

式(5)中, T 为加工周期^[2-5]。式(5)是求解磨头工作函数、研究磨头加工特性的理论基础。

2 磨头运动方式

磨头工作特性曲线 $R(x, y)$ 不但与磨头的形状、材料、尺寸、磨头与被加工工件之间的相对压力有关, 而且还与磨头的运动方式密切相关, 在光学车间及数控小磨头抛光技术中, 通常采用平转动和行星运动两种运动方式作为磨头的运动方式^[2,3,5-7]。

图 1 是磨头的平转动示意图, 磨头在平动的同时绕定轴转动; 行星运动方式如图 2 所示, 磨头以角速度 ω_0 绕公转轴旋转, 同时又以角速度 ω_1 绕其自转轴运动, 从而实现对被加工工件的材料去除^[3]。这两种运动方式, 磨头与自转轴之间均采用了铰接球轴承, 且行星运动中磨头的自转轴采用了浮动机构, 偏心距 ρ_0 可调。

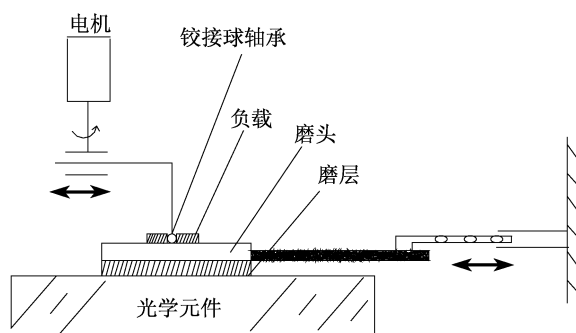


图 1 磨头平转动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of translation motion of the polishing pad

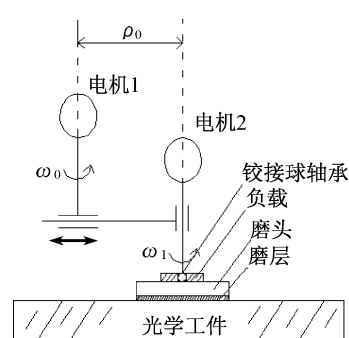


图 2 磨头行星运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of planet motion of the polishing pad

3 椭圆形磨头特性曲线研究

椭圆形磨头的形状如图 3 所示, 磨层一般采用硬度适中的软性材料, 如沥青, 并在磨层上开槽(图中的沟槽)。

3.1 椭圆形磨头在行星运动方式下的特性曲线

首先讨论椭圆形磨头作行星运动时的情况。设磨头长轴半径为 R_M , 短轴半径为 R_N , 如图 4 所示。磨头在以角速度 ω_0 绕公转中心 O_0 转动的同时又以角速度 ω_1 绕自身几何中心 O 自转。图中圆形虚线为磨头几何中心在公转过程中的运动轨迹。磨头运动过程中, 对工作区域内任意点 P 的材料去除量, 可以认为是一组半径不同的圆形磨头作用效果的叠加, 这组圆形磨头的半径从 R_N 变化到 R_M 。因此, 椭圆形磨头对 P 点处工件材料的去除量为

$$\Delta z_{\text{elliptical}}(x, y) = \sum_{r=R_N}^{R_M} \Delta z_{\text{round}}(x, y, r) = \int_{R_N}^{R_M} \Delta z_{\text{round}}(x, y, r) dr \quad (6)$$

式(6)中, $\Delta z_{\text{elliptical}}(x, y)$ 为椭圆形磨头在 $P(x, y)$ 点处的材料去除量, $\Delta z_{\text{round}}(x, y, r)$ 为半径为 r 的圆形磨头在 $P(x, y)$ 点处的材料去除量。

对于被加工工件上同一点, 椭圆形磨头覆盖情况与圆形磨头不相同, 在确定椭圆形磨头磨削曲线时, 需要在式(5)中加入一个修正因子以反映椭圆形磨头和圆形磨头之间的差异。考虑到在其他工艺条件相同的情况下, 工件上某一微面元在一个加工周期内的磨削量与磨头覆盖该面元的面积有关, 所以采用椭圆形磨头面积与圆形磨头面积的比值作为修正因子, 记作为 $\kappa(t)$ 。

根据以上分析, 得出椭圆形磨头的工作函数为:

$$R_{\text{elliptical}}(r) = \int_{R_N}^{R_M} \kappa(t) R_{\text{round}}(r, t) dt \quad (7)$$

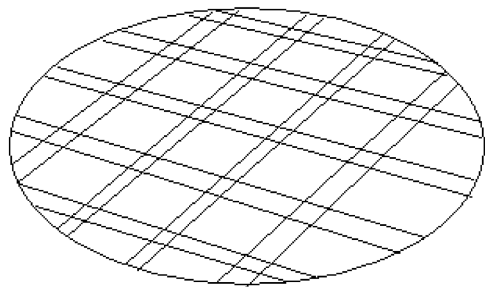


图 3 椭圆形磨头
Fig. 3 An elliptical pad

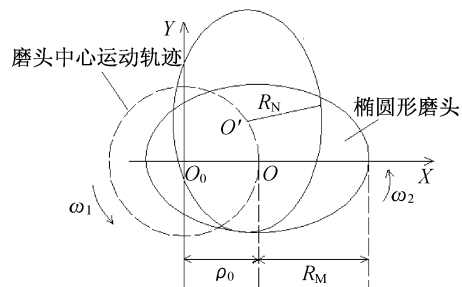


图 4 椭圆形磨头行星运动示意图
Fig. 4 Schematic diagram of planet motion of an elliptical pad

图 5 给出了修正因子求解过程中椭圆形磨头和圆形磨头之间的关系,图中坐标系 XOY 的原点为椭圆形磨头中心 O,磨头长轴所在直线为 X 轴, E(x₁, y₁) 和 F(x₂, y₂) 为磨头周界上任意两点,过点 E 的圆的半径为 t_N,过点 F 的圆的半径为 t_{N+1},椭圆和圆的方程分别为

椭圆方程:

$$\frac{x^2}{R_M^2} + \frac{y^2}{R_N^2} = 1 \quad (8)$$

圆的方程:

$$x^2 + y^2 = t^2 \quad (9)$$

因此,式(7)可表述为

$$R_{\text{elliptical}}(r) = R(r, R_N) + \int_{R_N}^{R_M} \kappa(t) [R_{\text{round}}(r, t_{N+1}) - R_{\text{round}}(r, t_N)] dt \quad (10)$$

式(10)中, r 为磨头作用区域内的任一点到磨头公转中心的距离, R_{round}(r, R_N) 表示半径为 R_N 的圆形磨头的工作函数, t_N 表示以内接圆为起始第 N 个圆的半径(如图 5 所示)。

则,式(10)中的修正因子 κ(t) 为

$$\kappa(t) = \frac{\int_0^{y_2} (\sqrt{t_{N+1}^2 - y^2} - \sqrt{t_N^2 - y^2}) dy + \int_{y_2}^{y_1} \left(\frac{R_M}{R_N} \sqrt{R_N^2 - y^2} - \sqrt{t_N^2 - y^2} \right) dy}{\frac{1}{4} \pi (t_{N+1}^2 - t_N^2)} \quad (11)$$

式(11)中

$$y = \frac{\sqrt{R_M^2 - t^2}}{\sqrt{R_M^2 - R_N^2}} \quad (12)$$

下面采用数值计算的方法研究椭圆形磨头的磨削特性。先讨论行星运动方式下的磨削特性。假定椭圆形磨头的长半轴 R_M 与圆形磨头的半径 ρ 相等,根据式(10)和式(11),计算机模拟得到比值 R_{elliptical}/R_{round} 与比值 R_N/R_M 之间的关系曲线,如图 6 所示,相关参数可选取: e = ω₂/ω₁ = 2, η = ρ₀/ρ = 0.82, ρ = 2, 其中 ρ 为半径为 r 的圆形磨头半径, ρ₀ 为磨头圆心距公转中心的距离(称为偏心距)。从图中看出,在相同的工艺条件下,椭圆形磨头材料去除能力随比值 R_N/R_M 的增大而增大,当 R_N/R_M = 0.5 时,椭圆形磨头的材料去除能力仅为圆形磨头的一半。一般情况下,取 R_N/R_M = 0.7 ~ 1, 此时,椭圆形磨头的材料去除效果最好。因此,对于椭圆形磨头,选取其短半轴和长半轴的比值在 0.7 ~ 1 之间。

图 7 模拟了 R_N/R_M = 0.7、0.8、0.9 和 0.95 时椭圆形磨头的磨削特性曲线,图中同时绘出了圆形磨头在相同工艺条件下的特性曲线。从图上可以看出,椭圆形磨头的中心峰值随 R_N/R_M 的增大而增大,磨头在作用区域边缘部分的磨削能力比圆形磨头要低。

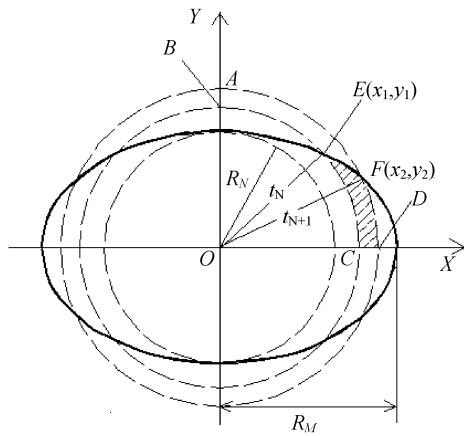


图 5 椭圆形磨头与圆形磨头之间的关系
Fig. 5 Relationship between the elliptical and round pads

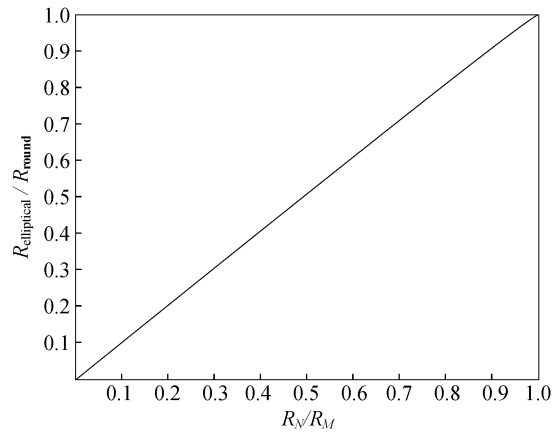


图 6 $R_{\text{elliptical}}/R_{\text{round}}$ 与 R_N/R_M 之间的关系曲线
Fig. 6 Relation between $R_{\text{elliptical}}/R_{\text{round}}$ and R_N/R_M

3.2 椭圆形磨头在平转动方式下的特性曲线

接下来讨论椭圆形磨头在平转动方式下的磨削特性。根据小节前面的分析,可得出椭圆形磨头在平转动方式下的工作函数

$$R_{\text{elliptical}}(r) = \begin{cases} 2\pi \int_{R_N}^{R_M} \kappa(t) dKP dt & 0 \leq r \leq R-d \\ 2 \int_{R_N}^{R_M} \kappa(t) dKP \arccos\left(\frac{r^2 + d^2 - R^2}{2rd}\right) dt & R-d < r \leq R+d \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中, d 为偏摆量,即磨头中心距磨头作用中心的距离。

依据式(10)、式(11)和式(13),选取优化得到的参数 $d/R=0.76$,模拟得到了椭圆形磨头在平转动方式下的磨削特性曲线,如图 8 所示,图中曲线 a、b、c 和 d 分别对应于 $R_N/R_M=0.7, 0.8, 0.9, 0.95$,图中同时绘出了半径为 R_M 的圆形磨头在平转动方式下的特性曲线。从图中可以看出,平转动方式下椭圆形磨

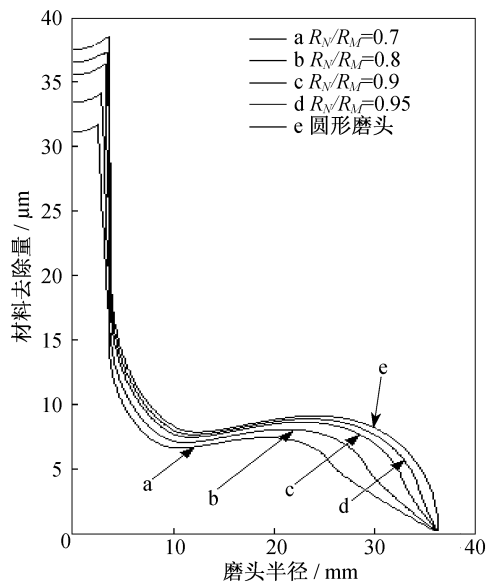


图 7 行星运动方式下的椭圆形磨头工作特性曲线
Fig. 7 The characteristic working curve of the elliptical pad in the planet motion

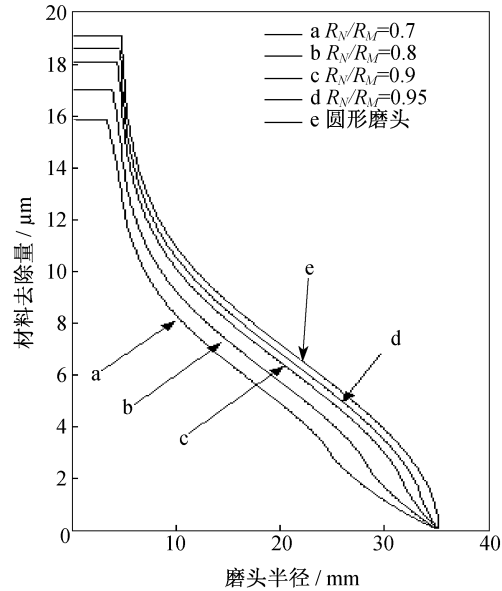


图 8 平转动方式下的椭圆形磨头工作特性曲线($d/R=0.76$)
Fig. 8 The characteristic working curve of the elliptical pad in the translation($d/R=0.76$)

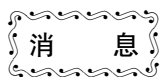
头的磨削特性曲线形状与圆形磨头在平转动方式下的形状大致相同,但在磨头作用区域的边缘部分,椭圆形磨头的材料去除能力比圆形磨头的低,几乎呈线性下降,并且 R_N/R_M 越小,下降越明显。

4 结 论

文中研究了数控小磨头抛光技术中椭圆形小磨头在不同运动方式下的磨削特性,通过引入修正因子,利用已知的圆形磨头的磨削特性函数,模拟得出了椭圆形小磨头的最佳工艺参数。从模拟结果可以看出,椭圆形小磨头在平转动和行星运动方式下的特性曲线均具有中心最大峰值,其分布均近似于高斯分布,均具有良好材料去除能力。椭圆形磨头在行星运动方式下取 $R_N/R_M=0.7\sim 1$ 时的材料去除效果最好,在平转动方式下的中心峰值随 R_N/R_M 的增大而增大,作用区域边缘部分的磨削能力比圆形磨头要低。相对于圆形磨头,椭圆形磨头靠近中央和边缘的区域其工作特性曲线较为平缓,梯度小于圆形磨头,因此椭圆形磨头中央和边缘去除能力稍弱,有利于修改 0.7 环带,并且在一定程度上可以克服抛光过程中出现的“塌边”现象。采用椭圆形小磨头进行加工,可以获得高精度超光滑的光学镜面,将其应用在数控小磨头抛光中,不但可以提高加工精度,而且还可以大大提高加工效率,缩短加工周期。但椭圆形磨头是非旋转对称性磨头,实际加工过程中磨头作用区域内的磨料应尽可能分布均匀。

参考文献:

- [1] 顾敏芝,何良芳. 中等口径光学非球面的高效研抛技术[J]. 光学仪器, 2005, 27(1): 22-27.
- [2] 王权陡,刘民才. 数控抛光技术中抛光盘的去除函数[J]. 光学技术, 2000, 26(1): 32-34.
- [3] 易国军,肖光辉,李新南. 五角星形小磨头特性曲线研究[J]. 光学仪器, 2010, 32(2): 90-94.
- [4] PRESTON F W. The theory and design of plate glass polishing machines[J]. *Journal of the Society of Glass Technology*, 1927, 11(42): 214-256.
- [5] 王毅,倪颖,余景池. 小型非球面数控抛光技术的研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1527-1533.
- [6] ZHANG X J, YU J CH, SUN X F, *et al.* Theoretical method for edge figuring in computer controlled polishing of optical surface[J]. *SPIE, Advanced Optical Manufacturing and Testing IV*, 1994, 1994: 239-246.
- [7] JONES R A. Optimization of computer controlled polishing[J]. *App Opt*, 1977, 16(1): 218-224.



中科院长春光机所两项目通过验收

由长春光机所投资企业——长春奥普光电技术股份有限公司承担的“便携式前庭功能检查仪和特殊视觉功能检查仪研制”和长春北兴激光工程有限公司承担的“全自动筛管—弹架管数控激光切割机”两个项目,不久前通过吉林省科技厅组织的验收评审。

鉴定专家认为,奥普公司采用大视场长出瞳距虚拟光学成像技术、视频目标捕获与自动跟踪技术、微型红外视频采集技术等集成研制的便携式前庭功能检查仪,主要性能指标达到国际先进水平;采用虚拟光学成像技术、自动语言识别技术等集成研发的集远视力、近视力、对比敏感性、色觉、隐斜视、立体视觉、暗适应 7 种功能于一体的特殊视觉检查仪,主要性能指标达到国内领先水平。北兴公司研制的全自动筛管—弹架管数控激光切割机可在同一设备上实现“定光”和“动光”两种方式的筛管和弹架管切割加工,可实现超长管材的切割,整机采用全自动控制,性能优异、成本低廉(售价约为国外产品的1/3)、实用性强,可满足各种管材加工用户的实际使用要求,其性能和主要技术指标达到了国际先进水平。

(摘自《科学时报》)