

# 光学抛光中模具磨损的计算机控制补偿

吴鸿钟, 冯之敬, 赵广木, 张 云

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要:** 模具的磨损消耗对计算机控制光学表面的抛光工艺影响甚大,但在实际加工中不利于将工艺中断来重新调整加工的零点以对模具的磨损进行补偿。因此本文提出了一个指数形式的模具磨损函数,并依此对 Preston 方程进行了修正,达到了实时补偿模具磨损的目的。通过实验确定了该函数磨损时间常数并将该方法用于计算机控制的抛光和误差修正。实验证明,采用该方法进一步提高了计算机控制光学表面成形工艺模型精度。

**关键词:** 光学抛光; 计算机控制光学表面成形; 磨损; 计算机控制补偿

**中图分类号:** TQ 171.684 **文献标识码:** A

## 1 引言

除了光学玻璃的化学稳定性和水解物的硬度对玻璃抛光效率的影响以外,其它的因素包括:抛光剂的化学活性,抛光剂的浓度。此外,抛光模对工件的适应效能和压紧也对抛光有直接的影响<sup>[1]</sup>。这是因为,在计算机控制光学表面成型工艺中,抛光的路径按照预设的程序自动进行,而预设的数控程序往往是按照成型的表面轮廓生成的。特别是通过建模使数控程序按照某种要求对工件误差进行修正时<sup>[2]</sup>,模具在加工中由于压力的作用造成的磨损是比较严重的。模具的磨损对抛光效率和抛光的一致性产生了极为不利的影。在计算机控制的抛光中,不利于将加工的工艺中断来重现调整加工的零点以对模具的磨损进行补偿,否则将会阻断材料化学反应和塑性流动的一致性,在工件表面留下一定的皱褶纹理。因此本论文对计算机控制加工中采用的基本抛光公式进行了修正,以使之适应模具在长时间范围内的加工。

## 2 光学抛光公式的修正

到目前为止,光学抛光中采用的是 Preston 提出的抛光去除率公式:在单位时间内,材料的去除量  $l$  与模具对工件的压力  $p$  和两者之间的相对

运动速度  $v$  成正比,即:

$$\frac{dl}{dt} = kpv \quad (1)$$

(1) 式中的  $k$  是常系数;

把模具在平移速度为零的情况下在单位时间内所获得的材料去除量轮廓图景看作模具是在单位输入时的脉冲响应<sup>[3]</sup>,定义为  $r(x, y)$ ; 并且把材料的加工状态近似为线性和齐次系统,从而获得抛光状态下去除量定量关系:

$$l(x, y) = kr(x, y) \otimes (p(x, y)v(x, y)) \quad (2)$$

(2) 式中符号  $\otimes$  表示卷积运算。下面考虑模具在加工中随加工时间的磨损。材料的磨损是材料在接触应力的持续作用下的破坏和损耗,它和材料所受的正应力成正比。在抛光的初始阶段,接触应力大,模具的磨损也严重;在抛光的中后期,模具的磨损使模具和工件贴合程度降低,磨损减小。

因此考虑磨损情况下,(1)式附加一个磨损因子  $\varphi$ ,  $\varphi = \varphi(x, y, t)$ , 磨损因子  $\varphi$  是模具位置和时间的函数。

在简单情况下,假设磨损因子只是时间的状态函数,并设为如下的指数函数形式:

$$\varphi = a + be^{-t/\tau} \quad (3)$$

把(3)式代入(1)式,并考虑初始条件:  $t = 0, \varphi = 1; t \rightarrow \infty, \varphi = 0$ , 求得  $a = 0, b = 1$ , (1)式变化为:

$$\frac{dl}{dt} = ke^{-t/\tau}pv \quad (4)$$

因此在  $x(0, 0)$  的一个脉冲输入引发的响应为： $r(x, y)e^{-t/\tau}$ 。对于平面二维输入  $p(x, y)$ 、 $v(x, y)$ ，总的二维输出为：

$$l(x, y) = \int \int kr(u, v) e^{-t/\tau} p(x-u)v(y-v) du dv \quad (5)$$

(5)式中时间  $t$  可以看作是平面二维坐标  $(x, y)$  的函数：

$$t = f(x, y) \quad (6)$$

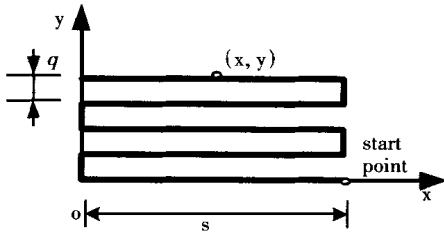


Fig. 1 Working-time determination of the polishing head

图 1 是模具加工时间的确定示意图。对于图中的数控路径，对表面上的任意点  $(x, y)$ ，模具从加工起点到该点移动的距离为  $s(y/q) + y + s - x$ ，其中  $s$  为矩形路径的长边， $q$  为矩形路径的短边。设模具的移动速度为  $v$ ，则模具从起点到  $(x, y)$  的移动时间  $t$  为：

$$t = (s(y/q) + y + s - x)/v \quad (7)$$

(7)式代入(5)式，并化为式(2)的形式：

$$l(x, y) = ke^{-(s(y/q) + y + s - x)/v\tau} r(x, y) \otimes (p(x, y)v(x, y)) \quad (8)$$

(8)是考虑模具磨损时的抛光模型；实际上，除了模具的磨损，还有加工噪声的影响<sup>[4]</sup>，完整的模型为：

$$l(x, y) = ke^{-(s(y/q) + y + s - x)/v\tau} r(x, y) \otimes (p(x, y)v(x, y)) + g(x, y) \quad (9)$$

(9)式中  $g(x, y)$  表示噪声。

### 3 时间常数 $\tau$ 的求解

通过实验确定磨损的时间常数。实验条件如表 1。

Table 1 Determination of coefficient  $\tau$

Items	Data
Rotative speed of the polishing head (rpm)	420
Material of the polishing head	Polystyrene covering with pitch
Polishing fluid	Ceria(5%)
The separation distance of Y	1mm
Circle of polishing	7h

实验方法是：在初始状态时把抛光工件表面

任意一点确立为抛光模的参考原点，经过一个抛光周期后，测量抛光模相对参考点的偏差。在每一个抛光周期，抛光模对工件的初始压力始终保持一致。表二是磨损实验结果数据。

Table 2 Wearing experiment results

Working hours	7	14	21
Wearing Amount (mm)	0.15	0.25	0.33

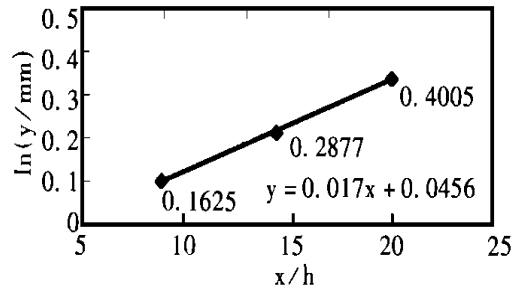


Fig. 2 Log curve of the polishing time vs. the wearing amount

图 2 是磨损量同加工时间的对数拟合。磨损量  $(\ln(y))$  与时间的关系为：

$$y = -0.017x - 0.0456 \quad (10)$$

从而磨损量

$$\varphi = 0.9554e^{-t/3528} e^{-t/3528} \quad (11)$$

因此时间常数为 3528min。

## 4 计算机补偿控制抛光

### 4.1 计算机控制光学表面抛光

光学玻璃经过磨削成形、研磨以后进行计算机控制抛光，计算机按照型面所生产的数控轨迹进行抛光。抛光的模具形式、轨迹路径等方式对抛光的效果有直接的影响。由于抛光模对工件形状的适应性能和对工件的压力对抛光影响很大，因此由模具的磨损造成的抛光不均匀性是严重的。通常采用变换每个抛光周期模具的起始位置和行走方式来逼近加工的一致性。但是由于磨损因子不是线性函数，这种方式的效果不是十分理想。

采用计算机进行补偿的方法是：随着抛光的进行，计算机不断调整模具对工件型面的偏离程度。在加工的初期，这种偏离还不是十分严重；随着抛光的进行，计算机控制的数控型面越来越偏离原始型面。但是由于模具的磨损，综合效果将使模具对工件的去除量保持一致。

### 4.2 计算机控制误差修正

在采用抛光对型面误差进行修正时，计算机补偿的方式同上述不完全相同。在误差修正中，需要求得(9)式的解。当需要的去除量  $l(x, y)$ 、 $r(x,$

$y$ ) 已知时,在某些特殊情况下,能通过直接的富立叶求得输入的稳定解,但是在一般情况下,由(9)式不能唯一决定输入控制量  $p(x, y)$  或  $v(x, y)$ 。 $l(x, y)$  的微小变动将使  $p(x, y)$ 、 $v(x, y)$  变化剧烈。因此只能在某种条件下求得  $p(x, y)$  或  $v(x, y)$  的近似解。并且把此时  $p(x, y)$  或  $v(x, y)$  所决定的去除量同要求去除量的差值定义为“噪声”。由于该差值是一个随机变量,因此这样的处理是恰当的。在物理上,我们把该差值的产生原因看作是加工过程中的一些不确定因素造成的,也就是说,使定义的“噪声”确实具有一定的工程背景。在这样的条件下,文献[4]求出了加工中所需要的完善解。

考虑模具磨损情况下的特殊之处在于:先把需要的去除量按照磨损因子进行处理,即  $l(x, y)$  变化为  $l(x, y) = l(x, y) / Q(x, y)$ 。然后再按照文献[4]的方法进行求解。

由此可见,如果采用基于压力控制的误差修正方法并且采用模具补偿技术,数控机床对原始

#### 参考文献:

- [1] 作花洛夫,境野照雄,高桥克明,蒋国栋译. 玻璃手册(第一版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1985.
- [2] 冯之敬,吴鸿钟,赵广木,等. 自由曲面透镜型面误差的压力抛光修正[J]. 清华大学学报(自然科学版),2000,40(8):69-72.
- [3] 辛企明. 近代光学制造技术[M]. 北京:国防工业出版社,1997.3-26.
- [4] 吴鸿钟,冯之敬. 自由曲面光学镜误差修正加工控制的算法[J]. 光学技术,2000,26(6):502-505.

## Computer-controlled compensation for wearing of polishing head

WU Hong-zhong, FENG Zhi-jing, ZHAO Guang-mu, ZHANG Yun

(Department of Precision Instruments and Mechanology,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The wearing of the die is an important factor to the computer-controlled optical surfacing (CCOS). But in actual work, process can not be interrupted to adjust the zero and the wearing of the polishing head can not be compensated on real-time. So an exponential function is put forward to compensate the wearing of the head. The Preston function is modified according to this theory. The constant of the function is also determined by our experiment. This method is introduced into the polish process and the materials error correction. With this method, the ratio of precision of the CCOS is improved.

**Key words:** optical polishing; computer-controlled optical surfacing(CCOS); wearing, computer-controlled compensation

作者简介:吴鸿钟(1973-),男,汉族,四川人,92考入清华大学,97年在清华大学精仪系攻读博士。主要研究方向是:光学工艺,机械制造及其自动化。已发表论文多篇。

型面的偏离程度更为巨大。如果采用基于驻留时间的误差修正方法,这种偏离相对较小。因此作者在研究中采用了不同的误差修正处理方法,本质上是希望对数控加工的路径进行优化而加工出精度较高表面质量较好的型面。因此采用计算机控制的模具补偿技术也要把这两种方法结合起来。

## 5 结 论

模具的磨损消耗影响了计算机控制光学表面抛光工艺中模具对工件的适应效能和压紧效能,但在实际加工中不利于将加工工艺中断来重新调整加工的零点以对模具的磨损进行补偿。本文提出了在抛光加工中模具磨损的计算机补偿方法,并根据实验求得了补偿因子的时间常数,并用于计算机控制的型面抛光和误差修正。采用模具补偿方法进一步提高了计算机控制光学表面成形技术中加工模型的精度。取得了理想的结果。