

计算机控制光学表面成形中的频域分析

周林*, 戴一帆, 解旭辉, 李圣怡

国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073

* E-mail: mailto:zhoulin_cn@nudt.edu.cn

收稿日期: 2007-10-11; 接受日期: 2008-10-23

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)和国家自然科学基金(批准号: 50775215)资助项目

摘要 计算机控制光学表面成形(CCOS)工艺容易在光学零件表面产生中高频误差, 从而影响光学系统的性能. 为了对中高频误差进行有效控制, 以卷积积分模型为基础, 主要考虑加工过程的材料去除有效性, 提出了修形能力值、材料去除有效率等概念, 定量分析了 CCOS 工艺过程对不同频率成份误差的修正能力. 分析得出 CCOS 工艺过程的材料去除有效率取决于工艺过程的去除函数, 正好等于去除函数傅里叶变换的归一化幅值谱. 最后, 利用离子束成形工艺进行了 3 个正弦函数面形的刻蚀试验, 对理论进行了验证. 本文所采用的方法和得出的结论为分析和优化 CCOS 工艺提供了强有力的数学支持.

关键词

计算机控制光学
表面成形
光学零件加工
去除函数
材料去除有效率
离子束抛光

现代光学零件加工较之传统加工的一个突破性进展是利用计算机控制的“小磨头”进行抛光, 这种加工技术常被称为计算机控制光学表面成形(CCOS, computer controlled optical surfacing)技术, 它由美国 Itek 公司在 20 世纪 70 年代最先提出^[1]. 当时的 CCOS 技术仅局限于计算机控制小磨头抛光(CCP, computer controlled polishing), 目前的 CCOS 技术还包括磁流变抛光(MRF, magnetorheological finishing)^[2]、离子束抛光(IBF, ion beam figuring)^[3]、应力盘抛光^[4]、气囊抛光^[5]和射流抛光^[6]等. 这些抛光方法的共同特点是利用计算机控制的“小磨头”对光学元件表面进行抛光, “小磨头”的尺寸比被抛光工件小许多, 每一时刻只对光学镜面的一个局部区域进行抛光, 抛光的时间(即驻留时间)越长, 则去除的材料越多. 由于这些 CCOS 技术都可以建立数学模型, 抛光过程确定, 因此 CCOS 技术又被称为确定性研抛技术. CCOS 技术大大提高了光学零件的加工效率, 正在被越来越多地应用, 国外如美国 Arizona 大学光学中心、Rochester 大学光学制造中心、Itek 公司、Tinsley 公司、LLNL

国家实验室、Eastman Kodak 公司、QED 公司、英国的伦敦大学学院、Zeeko 公司、法国空间光学制造中心、俄罗斯 Vavilov 国立光学研究所、德国 Zeiss 公司和日本的 Canon 公司等不同程度地使用了 CCOS 技术.

然而, 由于使用了比被加工元件小得多的抛光“磨头”, CCOS 加工后的表面误差中往往包含较多的中高频成份^[7]. 这些中高频误差严重地影响了强激光系统、短波光学系统和高分辨率成像系统等精密光学系统的光学性能^[8]. 因此, 这些中高频误差必须加以控制或消除^[9]. 本文从 CCOS 工艺过程的卷积方程出发, 主要考虑加工过程的材料去除有效性, 分析了 CCOS 工艺对不同频率成份误差的修正能力, 并进行了试验验证.

1 卷积模型

一次完整的 CCOS 工艺过程如图 1 所示, 首先进行去除函数实验获得“磨头”在设定工艺参数下单位时间内的材料去除量函数, 简称去除函数或影响函

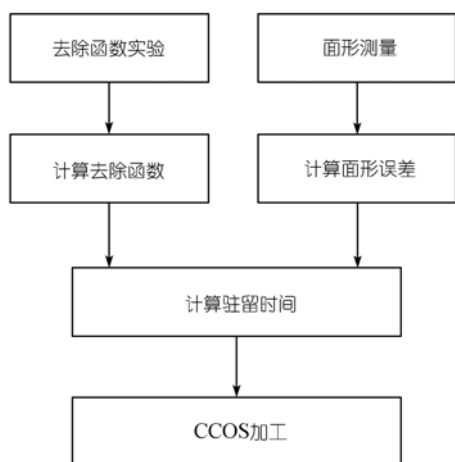


图 1 一次完整的 CCOS 工艺过程

数^[10], 并且通过面形测量获得被加工光学元件的面形误差, 然后根据去除函数和面形误差计算驻留时间, 最后按照驻留时间, 应用与去除函数实验相同的工艺参数对元件进行 CCOS 加工。

假设加工过程中去除函数不随时间和空间改变, 加工过程中的材料去除总量等于驻留时间与去除函数的二维卷积^[11,12], 即

$$r(x, y) = \tau(x, y) \otimes p(x, y), \quad (1)$$

其中, $r(x, y)$ 表示材料去除总量, $\tau(x, y)$ 表示驻留时间, $p(x, y)$ 表示去除函数, $\otimes$ 表示卷积运算. 根据(1)式, 已知误差面形和去除函数, 求解驻留时间的计算为反卷积计算。

根据卷积运算的性质, 时域(或空域)的卷积运算等同于频域的乘积运算, 所以(1)式可以变为

$$R(u, v) = T(u, v) \cdot P(u, v), \quad (2)$$

其中, $R(u, v)$, $T(u, v)$ 和 $P(u, v)$ 分别表示 $r(x, y)$, $\tau(x, y)$ 和 $p(x, y)$ 的二维 Fourier 变换. 根据(2)式, 可得

$$T(u, v) = \frac{R(u, v)}{P(u, v)}. \quad (3)$$

可以发现, CCOS 过程和线性时不变系统的响应过程数学模型相同, 都为卷积方程. 因此可以将 CCOS 过程等效为一个线性时不变系统的响应过程. 去除函数 $p(x, y)$ 相当于系统的单位脉冲响应函数, 驻留时间 $\tau(x, y)$ 相当于系统的输入信号, 材料去除量 $r(x, y)$ 相当于系统的输出信号. 驻留时间求解问题就相当已知系统函数及输出, 反求输入的逆问题。

2 理论分析

2.1 一般情况

虽然 CCOS 过程和线性时不变系统的响应过程相似, 但也有其特殊性, 例如 CCOS 过程的驻留时间(系统的输入)不能为负值. 为了分析 CCOS 过程的本质特性, 下面考虑 CCOS 过程修正一个单一频率误差面形的情况。

假设要修正的误差面形 $r_e(x, y)$ 为

$$r_e(x, y) = A_e \cdot \sin[2\pi(f_x x + f_y y)]. \quad (4)$$

它表示在 x - y 平面上无限延伸的一个正弦面形, 其幅值为 A_e , 沿 x 方向上的频率为 f_x , 沿 y 方向上的频率为 f_y . 根据 CCOS 过程的二维卷积模型, 可以计算出修正该误差面形的驻留时间 $\tau_e(x, y)$ 为(计算过程见附录 A)

$$\tau_e(x, y) = \frac{A_e}{|P(f_x, f_y)|} \sin[2\pi(f_x x + f_y y) - \varphi(f_x, f_y)], \quad (5)$$

其中, $P(f_x, f_y)$ 为 $P(u, v)$ 在频率 (f_x, f_y) 处的值, $|P(f_x, f_y)|$ 和 $\varphi(f_x, f_y)$ 分别表示 $P(f_x, f_y)$ 的幅值和相位, 即 $P(f_x, f_y) = |P(f_x, f_y)| \cdot e^{i\varphi(f_x, f_y)}$.

由于实际的驻留时间不能为负值, 所以实际加工中的驻留时间 $\tau_a(x, y)$ 为

$$\tau_a(x, y) = \tau_e(x, y) + \frac{A_e}{|P(f_x, f_y)|}. \quad (6)$$

根据二维卷积模型, 加工中实际去除的材料量 $r_a(x, y)$ 的计算结果为

$$r_a(x, y) = \tau_a(x, y) \otimes p(x, y) = r_e(x, y) + \frac{A_e B}{|P(f_x, f_y)|}, \quad (7)$$

其中, $B = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) dx dy$, 为去除函数的体积, 其物理意义是加工过程的材料体积去除速率。

由(7)式可见, 误差面形 $r_e(x, y)$ 的幅值为 A_e , 实际加工中去除的材料量幅值是 $\frac{A_e B}{|P(f_x, f_y)|}$, 又根据傅里

叶变换的定义, 有 $|P(f_x, f_y)| \leq B$, 那么 $\frac{A_e B}{|P(f_x, f_y)|} \geq A_e$.

这表明加工中实际去除的材料量要大于期望去除的误差量. 正如一个无源的线性时不变系统总会对于

入信号产生衰减一样, CCOS过程也会对输入产生衰减, 表现为加工中总有额外的材料量被去除. 期望去除的误差量和实际去除的材料量之比定义为材料去除有效率 ε , 即

$$\text{材料去除有效率} = \frac{\text{期望去除的材料量}}{\text{实际去除的材料量}}, \quad (8)$$

根据定义, $0 \leq \varepsilon \leq 1$. 对于一个CCOS过程, 修形能力越强, 加工过程中去除的总材料量越少, ε 越大; 反之, 修形能力越弱, 加工过程中的总材料去除量越大, ε 越小. 因此CCOS过程的修形能力可以用材料去除有效率定量评价, 材料去除有效率也称修形能力值. 实际加工过程中的材料去除量示意图如图2所示.

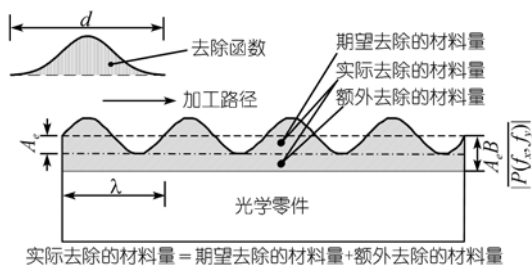


图2 实际CCOS过程的材料去除量示意图

根据材料去除有效率的定义和上文的分析, 当使用去除函数为 $p(x, y)$ 的CCOS过程修正频率为 (f_x, f_y) 的误差面形时, 材料去除有效率 $\varepsilon(f_x, f_y)$ 为

$$\varepsilon(f_x, f_y) = \frac{A_e}{A_e B} = \frac{1}{B} |P(f_x, f_y)|. \quad (9)$$

(9)式表明材料去除有效率取决于工艺过程的去除函数, 等于去除函数傅里叶变换的归一化幅值谱. (9)式也可以写成极坐标形式

$$\varepsilon(f, \theta) = \frac{1}{B} |P(f, \theta)|. \quad (10)$$

(10)式明确表明材料去除有效率随误差频率的大小 f 或方向 θ 的改变而改变.

以上的分析过程没有涉及具体的CCOS技术, 也没有使用具体的去除函数, 所以, 结论(9)和(10)式对于各种CCOS过程普遍成立, 不论是CCP, MRF还是IBF等, 也不论去除函数是否回转对称.

2.2 特殊情况

以上分析表明, 一般情况下, 材料去除有效率是

误差频率的大小和方向的函数. 然而, 对于以下2种特殊情况, 材料去除有效率仅是误差频率大小的函数, 计算较为简单.

2.2.1 对称型去除函数. 大部分CCOS工艺的去除函数都是回转对称的, 例如CCP和IBF. 由于去除函数的回转对称性, 这些CCOS工艺在任意方向上的修形能力是相同的, 修形能力值仅是误差频率大小 f 的函数, 简记为 $\varepsilon(f)$. 根据(10)式, 可以计算出 $\varepsilon(f)$ 为(计算过程略)

$$\varepsilon(f) = \frac{1}{B_p} |F\{p(r)\}|, \quad (11)$$

其中, $p(r)$ 为去除函数的母线表达式, $B_p = \int_{-\infty}^{\infty} p(r) dr$.

(11)式说明, 回转对称型去除函数的修形能力值等于去除函数母线傅里叶变换的归一化幅值谱.

2.2.2 一维加工. 假设要修正的误差面形仅沿 x 方向, 即它的空间频率 $(f_x, f_y) = (f, 0)$, 此时修形能力仅与频率 f 有关, 简记为 $\varepsilon(f)$, 则根据(9)式, 可以计算出(计算过程略)

$$\varepsilon(f) = \frac{|P(f, 0)|}{B} = \frac{1}{B} |F\{p_x(x)\}|, \quad (12)$$

其中, $p_x(x)$ 为 x 方向上的一维去除函数, 定义为

$$p_x(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) dy. \quad (12)$$

(12)式说明, 一维加工在加工方向上的修形能力值等于相应方向上一维去除函数傅里叶变换的归一化幅值谱.

3 CCOS 试验

3.1 试验设计

我们可以设计正弦面形误差修正试验来考察实际过程的材料去除有效率, 以验证理论计算结果. 根据线性时不变系统的响应规律和材料去除有效率的定义, 要修正一个单一频率的正弦误差面形时, 实际输入的驻留时间亦为同频率的正弦函数, 并且误差面形幅值 A_e 、实际去除的材料量 A_a 、驻留时间的幅值 A_r 和材料去除有效率 τ 之间满足以下关系

$$A_e = \varepsilon A_a = \varepsilon B A_r. \quad (13)$$

假设要修正的误差面形仅沿 x 方向, 那么理论的修形能力值 τ 由(12)式计算. 由(12)式还可以看出, 计算 x 方向上的修形能力, 仅需要 x 方向上的一维去除函数.

为了获得可信度高的一维去除函数, 我们拟采用线扫描实验法^[13].

因为修正正弦面形误差和刻蚀正弦面形时的材料去除量相同, 都为正弦函数, 所以对于同一个工艺过程, 它对正弦面形误差的修正能力, 与它在平面上刻蚀正弦面形的能力相同. 由于修正正弦面形误差试验, 需要准备正弦面形, 试验量较大, 因此我们的试验设计为在平面上刻蚀正弦面形.

为了提高试验结果的可靠性, 试验使用去除函数稳定、确定性高的 IBF 工艺^[13]. 下面的试验都是在国防科技大学自研的 IBF 设备 KDIFS-500 上进行, 面形测量设备为南京理工大学生产的激光波面干涉仪.

3.2 去除函数试验

在一块预先抛光好的直径 100 mm 的平面微晶玻璃样件上进行线扫描法去除函数试验^[13]. 试验前和试验后该样件的面形测量结果分别如图 3(a)和(b)所示. 根据试验前后的面形计算所得的材料去除量如图 3(c)所示, 计算所得的一维去除函数如图 3(d)所示, 计算所得的去除函数强度 B 为 $90.9 \mu\text{m}\cdot\text{mm}^2\cdot\text{min}^{-1}$. 根

据试验获得的一维去除函数, 运用(12)式计算所得的材料去除有效率如图 3(e)所示.

3.3 正弦面形刻蚀试验

选取将要刻蚀的正弦面形的波长分别为 70, 40 和 20 mm, 相应的频率分别为 0.0143, 0.025 和 0.05 mm^{-1} , 理论计算的材料去除有效率分别为 0.566, 0.145 和 0.0084(根据图 3(e)).

刻蚀试验中输入的驻留时间均为正弦函数, 幅值为 $0.011 \text{ min}\cdot\text{mm}^{-2}$, 因此根据去除函数强度可计算出刻蚀过程中实际的材料去除量为 $1 \mu\text{m}$. 刻蚀试验中的工艺参数与去除函数试验中的一致, 刻蚀试验结果分别如图 4~6 所示. 为了缩短加工时间, 完整的正弦面形仅刻蚀在沿 x 方向上宽度为 8 mm 的窄带上, 在这 8 mm 窄带上刻蚀所得的正弦面形分别如图 4(d), 图 5(d)和图 6(d)所示. 利用最小二乘拟合算法计算出它们的幅值分别为 0.607, 0.147 和 $0.0111 \mu\text{m}$, 如图 4(e), 图 5(e)和图 6(e)所示. 由于实际的材料去除量均为 $1 \mu\text{m}$, 说明刻蚀试验的材料去除有效率分别为 0.607, 0.147 和 0.0111. 试验结果整理在表 1 中.

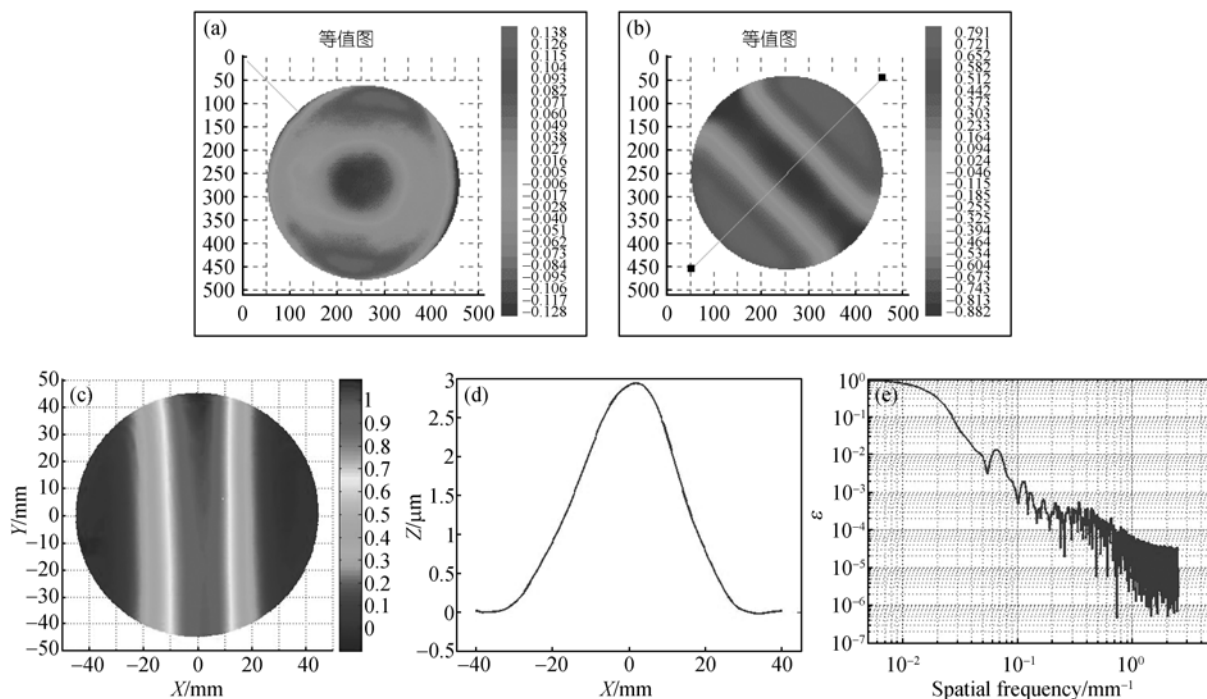


图 3 去除函数试验

- (a) 试验前的面形; (b) 试验后的面形; (c) 加工过程的材料去除量(测量坐标系相对旋转了 45°);
(d) 试验所得的一维去除函数; (e) 计算所得的修形能力曲线 $\varepsilon(f)$

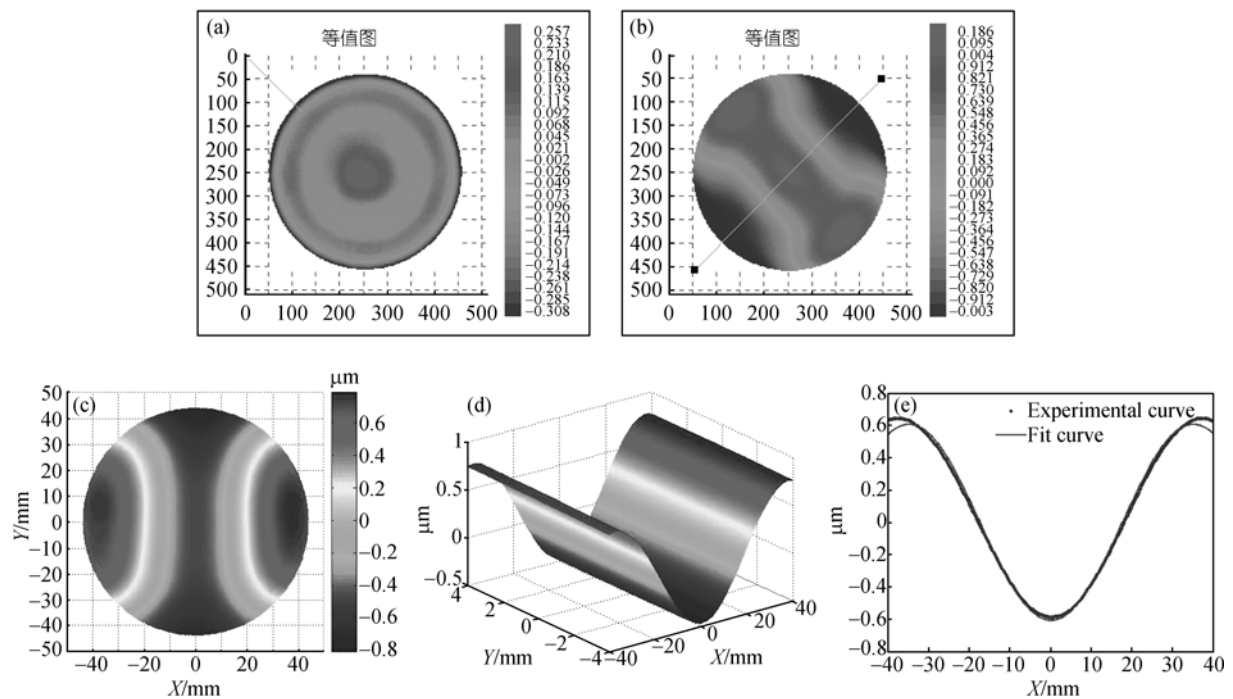


图 4 波长为 70 mm 的正弦面形刻蚀试验结果

(a) 试验前的面形; (b) 试验后的面形; (c) 加工过程的材料去除量(测量坐标系相对旋转了 45°);
(d) 沿 x 方向上 8 mm 窄带内刻蚀所得的面形; (e) 面形的平均值及正弦函数拟合值(幅值为 0.607 μm)

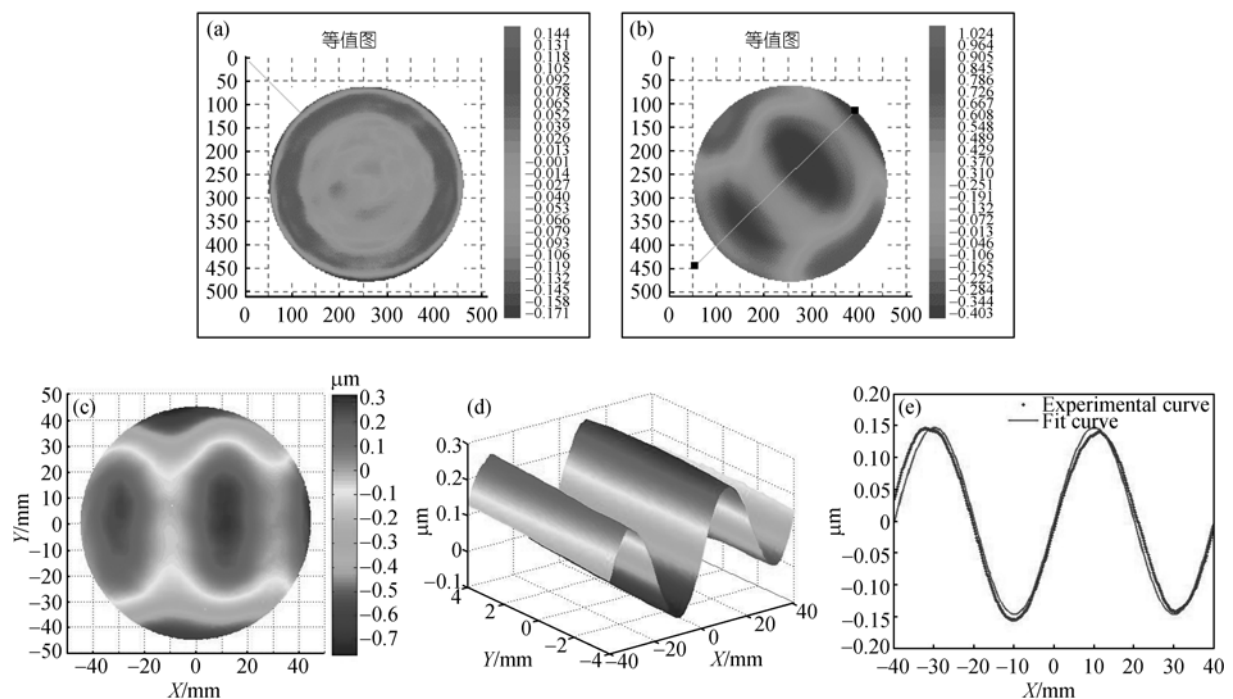


图 5 波长为 40 mm 的正弦面形刻蚀试验结果

(a) 试验前的面形; (b) 试验后的面形; (c) 加工过程的材料去除量(测量坐标系相对旋转了 45°);
(d) 沿 x 方向上 8 mm 窄带内刻蚀所得的面形; (e) 面形的平均值及正弦函数拟合值(幅值为 0.147 μm)

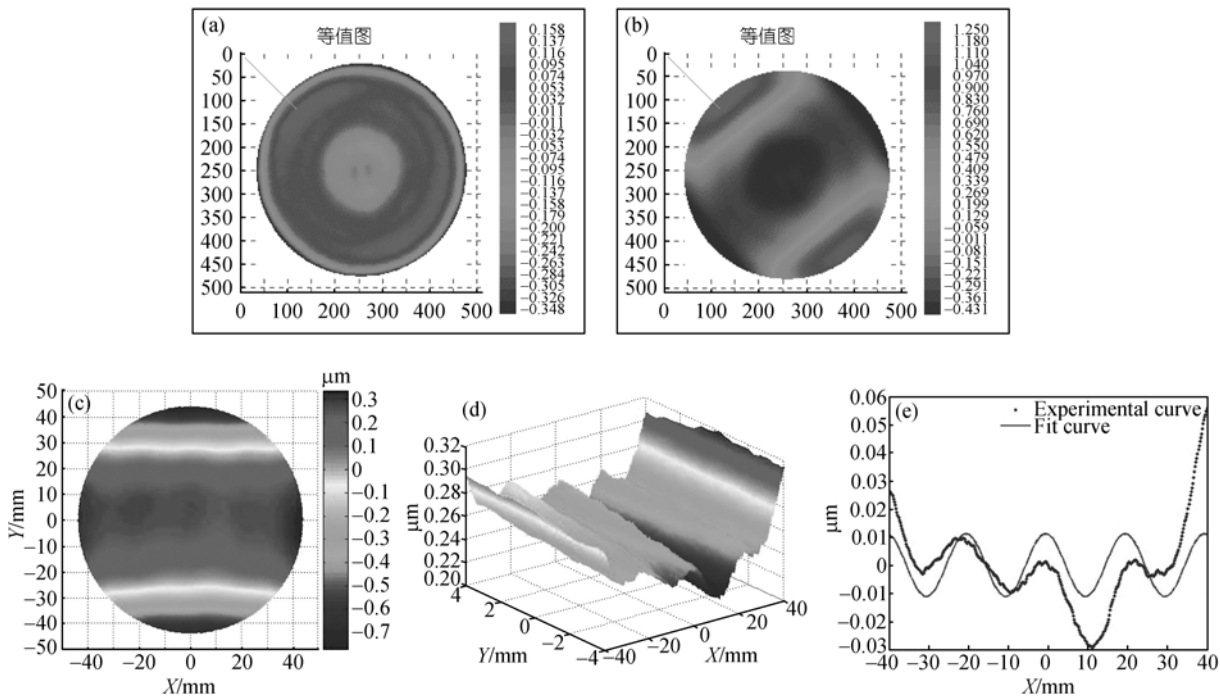


图 6 波长为 20 mm 的正弦面形刻蚀试验结果

(a) 试验前的面形; (b) 试验后的面形; (c) 加工过程的材料去除量(测量坐标系相对旋转了 45°);
(d) 沿 x 方向上 8 mm 窄带内刻蚀所得的面形; (e) 面形的平均值及正弦函数拟合值(幅值为 0.0111 μm)

表 1 不同波长正弦函数面形的刻蚀试验结果

波长/mm	70	40	20
试验的材料去除有效率	0.607	0.147	0.0111
理论的材料去除有效率	0.566	0.145	0.0084
偏差	7%	1%	32%

3.4 试验结果分析

由表 1 可以看出, 材料去除有效率试验值与理论值基本吻合. 20 mm 波长的试验结果与理论预测结果偏差较大, 其原因可能来源于测量误差, 因为此时的正弦面形幅值很小, 测量误差的影响较大. 由试验结果还可以看出, 由于材料去除有效率不同, 相同大小的驻留时间刻蚀不同频率的正弦函数, 刻蚀所得的幅值差异很大. 材料去除有效率越大, 刻蚀的幅值越大.

4 讨论

由以上的理论分析和试验结果可知, CCOS 过程对中高频误差的修正能力, 取决于过程的修形能力值. 当修形能力值较小时, CCOS 过程将不具备有效的修形能力. 由试验结果可知, 当修形能力值小于 0.1 时, IBF 工艺不具备有效的修形能力^[14]. 因此实际

加工中, 应该对工艺的修形能力值进行评估和优化, 以提高 CCOS 过程的修形能力值, 达到对误差的有效修正. 在具体的加工中, 可以结合误差面形的频率成分特点和主要频率, 选择合适的工艺及工艺参数, 以保证加工过程对误差主频的材料去除有效率较大.

对于非回转对称型去除函数的 CCOS 工艺, 例如 MRF 工艺, 应该将误差主频的方向放在去除函数修形能力较强的方向, 以提高对主频的材料去除有效率, 达到较好的修形效果.

此外, 减小去除函数直径也会增大材料去除有效率. 因此, 为了提高加工过程的修形能力, 减小去除函数的直径也是一个有效方法^[15].

5 结论

正如一个无源的线性时不变系统总会对输入信号产生衰减一样, CCOS 过程也会对输入产生衰减, 这导致加工中额外的材料被去除, 实际的材料去除量大于期望去除的误差材料量. 期望去除的误差材料量和实际去除的材料量之比定义为材料去除有效率 ε , 它反应了 CCOS 过程的修形能力强弱. 材料去除

有效率取值 $0 \leq \varepsilon \leq 1$, ε 越接近 1, 加工过程中额外去除的材料量越少, 修正能力越强。

CCOS 过程对大小或方向不同的频率误差修正能力不同. CCOS 过程对不同频率的修形能力值取决于工艺过程的去除函数, 它正好等于去除函数傅里叶变换的归一化幅值谱. 具有回转对称型去除函数的工艺过程在任意方向上的修形能力值相同, 正好等于去除函数母线傅里叶变换的归一化幅值谱; 一维

加工过程在加工方向上的修形能力值等于相应方向上一维去除函数傅里叶变换的归一化幅值谱。

根据修形能力理论, CCOS 过程对中高频率误差的修正能力, 取决于它的修形能力值. 当修形能力值较小时, CCOS 过程将不再具备有效的修形能力. 因此实际加工中, 应该对工艺的修形能力值进行评估和优化, 以提高 CCOS 过程的修形能力, 达到对误差的有效修正。

参考文献

- 1 Jones R A. Optimization of computer controlled polishing. Appl Opt, 1977, 16(1): 218—224[DOI]
- 2 张峰, 余景池, 张学军. 磁流变抛光技术. 光学精密工程, 1999, 7(5): 1—7
- 3 戴一帆, 周林, 解旭辉, 等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现. 光学学报, 2008, 28(6): 1131—1135
- 4 范斌, 万勇建, 陈伟, 等. 能动磨盘加工与数控加工特性分析. 中国激光, 2006, 33(1): 128—132
- 5 高波, 姚学英, 谢大纲, 等. 气囊抛光进动机构的建模与仿真. 机械工程学报, 2006, 42(2): 101—104
- 6 方慧, 郭培基, 余景池. 液体喷射抛光材料去除机理的研究. 光学技术, 2004, 30(2): 248—250
- 7 Bielke A, Bechstette K, Kübler C. Fabrication of aspheric optics-process challenges arising from a wide range of customer demands and diversity of machine technologies. SPIE, 2004, 5252: 1—12[DOI]
- 8 Taylor J S, Sommargren G E, Sweeney D W, et al. Fabrication and testing of optics for EUV projection lithography. SPIE, 1998, 3331: 580—590[DOI]
- 9 Lawson J K, Worfe C R, Manes K R, et al. Specification of optical components using the power spectral density function. SPIE, 1995, 2536: 38—50[DOI]
- 10 Schinhaber M, Rascher R, Stamp R, et al. Utilisation of time-variant influence functions on the computer controlled polishing. Prec Eng, 2008, 32(1): 47—54[DOI]
- 11 Drueding T W, Bifano T G, Fawcett S C. Contouring algorithm for ion figuring. Prec Eng, 1995, 17(1): 10—21[DOI]
- 12 程颢波, 孙国正, 冯之敬. 利用有限 Fourier 系数算法求解光学制造中误差校正输入数据. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2006, 36(1): 94—104
- 13 Zhou L, Xie X H, Dai Y F, et al. Ion beam figuring system in NUDT. SPIE, 2007, 6722: 67224A-1—67224A-6
- 14 周林. 光学镜面离子束修形理论与工艺研究. 长沙: 国防科技大学, 2008
- 15 Ghigo M, Canestrari R, Spiga D, et al. Correction of high spatial frequency errors on optical surfaces by means of ion beam figuring. SPIE, 2007, 6671: 667114

附录 A

(4)式所表达的正弦面形可表示为复函数的虚部, 即

$$r_e(x, y) = \text{Im} \left[A_e e^{i2\pi(f_x x + f_y y)} \right], \quad (\text{A1})$$

其中, $i = \sqrt{-1}$. 为了运算方便, 可以省去表示虚数部分的算符, 直接写成

$$r_e(x, y) = A_e e^{i2\pi(f_x x + f_y y)}. \quad (\text{A2})$$

这样处理的目的是用比较简单的指数函数运算来代替比较复杂的三角运算. 这和信号处理中用复信号代替实信号是一个道理. 代替之后误差面形的频谱 $R_e(u, v)$ 为

$$R_e(u, v) = A_e \cdot \delta(u - f_x, v - f_y), \quad (\text{A3})$$

其中, $\delta(u, v)$ 表示单位脉冲函数。

根据(A3)式就可以计算出修正该误差面形所需的驻留时间频谱 $T_e(u, v)$ 为

$$T_e(u, v) = \frac{R_e(u, v)}{P(u, v)} = \frac{A_e}{P(f_x, f_y)} \cdot \delta(u - f_x, v - f_y). \quad (\text{A4})$$

相应的驻留时间 $\tau_e(x, y)$ 为

$$\tau_e(x, y) = F^{-1} \{ T_e(u, v) \} = \frac{A_e}{P(f_x, f_y)} \cdot e^{i2\pi(f_x x + f_y y)}, \quad (\text{A5})$$

其中, $F^{-1}\{g\}$ 表示 Fourier 反变换. 由于复频谱 $p(f_x, f_y)$ 可以写成极坐标的形式

$$P(f_x, f_y) = |P(f_x, f_y)| \cdot e^{i\varphi(f_x, f_y)}. \quad (\text{A6})$$

因此驻留时间(A5)式可以改写为

$$\tau_e(x, y) = \frac{A_e}{|P(f_x, f_y)|} \cdot e^{i[2\pi(f_x x + f_y y) - \varphi(f_x, f_y)]}. \quad (\text{A7})$$

由于上述运算的线性性质, 最终所求的驻留时间为复驻留时间的虚部, 即

$$\tau_e(x, y) = \frac{A_e}{|P(f_x, f_y)|} \cdot \sin[2\pi(f_x x + f_y y) - \varphi(f_x, f_y)]. \quad (\text{A8})$$