

离轴非球面加工中最接近球面及研磨去除量的求解

赵 星¹ 宋丽培¹ 孔 强² 母国光¹

(¹南开大学现代光学研究所 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071
²Precision Asphere, LLC. 48860 Milmont Drive, # 105-C, Fremont, CA 94538 USA)

摘要 离轴非球面元件的应用可以使光学系统在成像质量和轻量化程度上得到最大限度的提高。但最接近球面以及研磨去除量的求解仍然是加工环节中极为重要的问题,为此,提出了一种同时考虑研磨去除量最小准则和研磨变化量要求的最接近球面及研磨去除量的求解方法,可适用于二次及高次离轴非球面最接近球面及研磨去除量的精确求解,具有普遍意义。通过编程实例计算了最接近球面的半径、最大研磨去除量和研磨去除总量,与经验公式计算结果的比较表明了该方法求解结果的优势,同时离轴非球面加工中的实际应用也证明了该方法的正确性。该方法的提出对离轴非球面加工具有一定的理论和实际指导意义。

关键词 光学制造; 离轴非球面; 最接近球面; 研磨去除量

中图分类号 TQ171.684 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200929s1.0061

Resolving of the Best-Fit Sphere and the Material Removal in off-Axis Asphere Fabrications

Zhao Xing¹ Song Lipei¹ Kong Qiang² Mu Guoguang¹

(¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China
²Precision Asphere, LLC. 48860 Milmont Drive, # 105-C, Fremont, CA 94538 USA)

Abstract The application of off-axis aspheres can improve the imaging quality and the compactness of the optical system furthest. The resolving of the best-fit sphere and the material removal, however, is a very important problem during the fabrications. In this paper, an algorithm available for the precise calculation of the conic and high order off-axis asphere is proposed, considering the requirement of minimum material removal and the slope of material removal. The radius of the best-fit sphere, the maximum material removal and the total volume of material removal are calculated by programming. The advantage of the algorithm is shown by the comparison of results derived from new algorithm and empirical equation. At the same time, the application in the off-axis asphere fabrication also proves the correctness of the algorithm. This algorithm is very helpful for the theory and practice of the fabrications of off-axis asphere.

Key words optical fabrication; off-axis asphere; best-fit sphere; material removal

1 引 言

近年来随着先进制造技术和计算机、数控等技术的发展,非球面加工技术有了长足的进步,同时也推动了离轴非球面的发展和应用^[1]。然而传统离轴非球面制造所采取的子孔径研抛方法已不再适用于大离轴量和大孔径元件的加工,基于计算机控制光学表面成形(Computer controlled optical surfacing, CCOS)

的非球面离轴加工技术正成为近年来离轴非球面加工的研究热点^[2-4]。该技术无需进行非球面母镜的整体加工,而是借助计算机的辅助控制,先加工出与所需口径离轴非球面最接近的球面,再进行精密的研抛得到所需的离轴非球面。这种技术极大的缩短了离轴非球面的加工周期,可以实现较低成本、高精度的离轴非球面制造。在该技术的实际应用中,最

基金项目: 光电信息技术科学教育部重点实验室开放课题(2007KFKT029)资助课题。

作者简介: 赵 星(1980—),男,博士,讲师,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: zhaoxingzhx@yahoo.com.cn

接近球面的求解是加工前非常关键的问题,它直接决定了加工的难度、周期和成本。已有的文献报道虽然提出了一些计算方法,但并未考虑加工中研磨去除量变化率要求这一影响加工难度的因素,因此所得结果距离最优解还有一定差距^[4~7]。本文从实际工艺角度出发,提出了一种同时考虑研磨去除量最小准则和研磨去除量变化率要求的最接近球面及研磨去除量的求解方法,可适用于二次及高次离轴非球面最接近球面及研磨去除量的精确求解,对离轴非球面的加工有着很好的指导意义。

2 算 法

求解离轴非球面的最接近球面,需要考虑凸镜和凹镜在加工中的不同,但二者仅在负研磨去除量的处理上略有差别,计算方法的基本思想还是一致的。故此处以凹面镜为例来详细说明算法的基本原理,凸面镜的算法与此相似。如图 1 所示,首先定义相应的坐标系,将离轴非球面母镜所处的坐标系 XYZ 称为工件坐标系,将数控机床加工时所采用的坐标系 $X'Y'Z'$ 称为加工坐标系。二者之间存在一定的坐标变换关系。离轴非球面的表达式为

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2r^2}} + a_1|r| + a_2|r|^2 + a_3|r|^3 + \dots + a_{20}|r|^{20}, \quad (1)$$

其中, z 为矢高, c 为顶点曲率, k 为二次系数, a_n 为高次非球面系数(若 $a_n = 0$, 则为二次离轴非球面), r 为回转半径。若已知离轴量 s 和口径 D , 就能根据上式得到离轴非球面上每一点的矢高 z 。

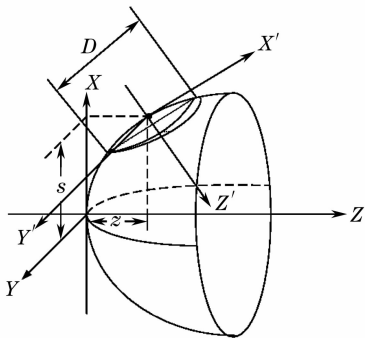


图 1 离轴非球面

Fig. 1 Off-axis asphere

将(1)式写作 $z = z(x, y)$, 通过坐标变换可以得到加工坐标系下的离轴非球面表达式为 $z' = z'(x', y')$, 令最接近球面的球心位于 Z' 轴上, 球心坐标为 $(0, 0, z'_{s0})$, 则球面方程写作:

$$z'_s = z'_s(x'_s, y'_s) = \sqrt{R_s^2 - x'^2_s - y'^2_s}, \quad (2)$$

式中 R_s 为最接近球面的半径, 由于离轴非球面关于 $X'Z'$ 平面对称, 因此 $R_s = \sqrt{z'^2_{s0} + (D/2)^2}$, 即最接近球面经过 Y' 方向上口径的边缘点。在保证研磨去除量为正的前提下, 加工区域内任一点 (x', y', z') 处的研磨去除量为

$$\delta'_z = z'_s - z' + \Delta, \quad (3)$$

式中 Δ 是为保证去除量为正而进行的平移量, 相应的最接近球面的球心变为 $(z'_{s0} + \Delta)$ 。总的研磨去除量 V 表示为:

$$V = \iint_B \delta'_z dx' dy'. \quad (4)$$

由此可知, 最接近球面的半径应当满足研磨去除量 V 最小, 才能有效的缩短加工周期, 降低成本。然而实际的加工还需兼顾研磨去除量变化率的问题。研磨去除量变化率是加工区域内单位长度去除量的变化率, 可表示为 δ'_z 关于 x' 和 y' 的偏导数。其值越大, 实际加工的难度也越大, 加工精度也越难保证。设 δ'_z 在 x' 方向和 y' 方向的变化率分别为 P_x 和 P_y , 则

$$P_x = \frac{\partial \delta'_z}{\partial x'}, \quad P_y = \frac{\partial \delta'_z}{\partial y'}, \quad (5)$$

定义 P 为工件上某点的去除量变化率, 可表示为

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2},$$

为满足实际加工的要求, 应使 P 尽可能小, 或者应达到加工设备的性能要求。

综上所述, 最接近球面的确定应当遵循这样的原则, 即在研磨去除量变化率满足要求的前提下, 保证去除总量最小, 这样才能同时兼顾加工难度、精度和加工周期的要求。为方便实际加工的需要, 计算求解时, 既可以设定 P 的阈值, 通过在阈值条件下寻找去除总量的最小值来求解最接近球面; 也可以分别设定研磨去除总量 V 和去除量变化率 P 各自的权重, 通过在加工难度精度和加工周期期间寻找平衡点, 来求解最接近球面的半径, 以及加工区域内各点相应的研磨去除量。

3 计算实例与工程验证

上述算法适用于二次和高次离轴非球面, 只是在求解加工坐标系下非球面表达式时根据表达式的复杂程度采用不同的变换处理方法而已, 因此, 算法具有一定的普遍意义。为了便于举例和比较, 这里仅对文献[4]中的一个离轴抛物面的例子进行计算。

该例中, 已知 $R_0 = 3000$ mm, $k = -1$, 离轴量

$s=196$ mm, 口径 $D=232$ mm。使用上述算法分别对研磨去除总量 V 和去除量变化率 P 取权重 1 和 10 进行计算求解, 得到的结果与经验公式比较如表 1 所示。

表 1 本文算法与经验公式的比较

Table 1 Comparison of results derived from new algorithm and empirical equation

	New algorithm	Empirical equation
Radius of best-fit-sphere /mm	3006.4008	3007.5091
Max. of material removal /mm	0.0159	0.0153
Total volume of material removal /mm ³	112.1760	103.4552
Max. slope of material removal	0.0158	0.0657

从表 1 中的数据可以看到, 本文所提出的算法较经验公式在研磨去除总量和最大研磨去除量上十

分接近, 而加工区域内最大的去除量变化率则有很明显的减小。这说明本文所提出的算法确实能够在缩短加工周期的同时, 有效的降低加工难度, 提高加工精度。

使用此算法计算得到的加工口径内的研磨去除量分布如图 2 所示。

为了更好的对算法进行验证, 我们参照该算法的计算结果进行了离轴非球面的实际加工, 离轴非球面的参数为 $R_0=1460$ mm, $k=-1$, 离轴量 $s=195.9$ mm, 口径 $D=243$ mm, 加工后的面形精度可达 $\lambda/15$ P-V 和 $\lambda/90$ RMS ($\lambda=632.8$ nm), 完全达到了设计和应用要求。加工后干涉仪的检测结果如图 3 所示。

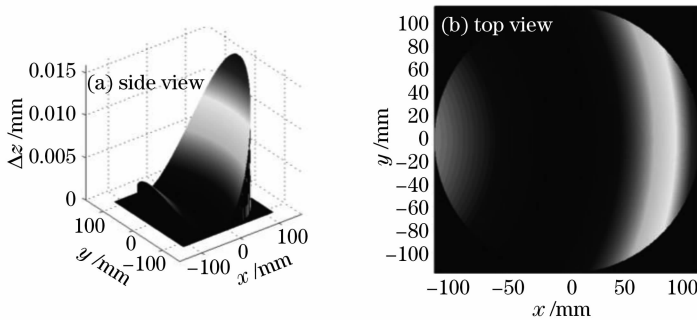


图 2 加工口径内的研磨去除量

Fig. 2 The removed in the fabricating aperture

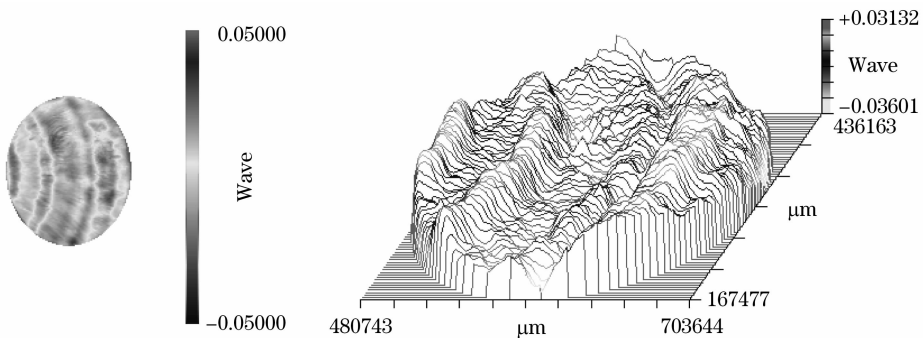


图 3 离轴非球面加工检测结果

Fig. 3 Testing of the result off-axis asphere

从实际离轴非球面的加工检测和应用结果可以看出, 本文所提出的算法是能够被应用于工程实践中的, 而实际的应用也表明该算法是完全可靠的。

4 结 论

本文针对离轴非球面 CCOS 加工中的最接近球面求解问题, 提出了一种新的算法, 该算法考虑了实际加工难度和精度的要求, 并根据研磨去除量最小的原则确定最接近球面的半径及相应的研磨去除

量, 同时还可给出最大去除量以及最大去除量变化率。算法既适用于二次和高次离轴非球面, 也适用于凹镜和凸镜的求解, 具有一定的普遍意义。通过与经验公式计算结果的对比, 以及实际离轴非球面的加工, 在理论和工程上证明了该算法的可靠性。算法能够根据实际加工需要在保证加工难度和精度的前提下, 最大程度的缩短加工周期, 对 CCOS 离轴非球面的加工具有重要的理论指导意义。

参 考 文 献

- 1 Tom Miller. Aspherics come of age[J]. *Photonics Spectra*, 2004, **2**: 76~77
- 2 Zheng Ligong, Chang Jun, Zhang Xuejun *et al.*. Fabricating and testing of a large NA, even high order aspheric lens[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(5): 584~586
郑立功, 常 军, 张学军 等. 大数值孔径、高次非球面透镜的加工与检验[J]. *光学技术*, 2003, **29**(5): 584~586
- 3 Zhang Zhongyu, Zhang Xuejun, Niu Haiyan. Discussion on the fabrication technology of middle and small size aspheric optics element [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(6): 524~525
张忠玉, 张学军, 牛海燕. 中小口径非球面元件加工技术的探讨[J]. *光学技术*, 2001, **27**(6): 524~525
- 4 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004. 152~155
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 1994. 152~155
- 5 Zheng Ligong, Zhang Xuejun, Zhang Feng. NC surfacing of two off-axes aspheric mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(1): 113~117
郑立功, 张学军, 张 峰. 矩形离轴非球面反射镜的数控加工[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(1): 113~117
- 6 Wang Quandou, Yu Jingchi, Zhang Xuejun *et al.*. Solution for best fitting spherical curvature radius and asphericity of off-axis aspherics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(3): 16~19
王权陡, 余景池, 张学军 等. 离轴非球面最接近球面半径及非球面度的求解[J]. *光电工程*, 2000, **27**(3): 16~19
- 7 Cheng Haobo, Wang Yingwei, Feng Zhijing. Methods to determine best fit sphere for large off-axis aspheric lenses[J]. *J. Tsinghua University (Sci. & Technol.)*, 2004, **44**(8): 1041~1042
程灏波, 王英伟, 冯之敬. 大偏离量非球面最接近球面的确定方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, **44**(8): 1041~1042