

文章编号 1004-924X(2008)08-1361-06

# 基于 MEMS 的数字式太阳敏感器光学系统设计

魏新国, 江 洁, 温志明, 张广军, 樊巧云

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为数字式太阳敏感器设计了一种光学系统。从标量的菲涅尔-基尔霍夫衍射理论出发,建立了圆孔结构数字式太阳敏感器的光学系统成像模型,在计算机上实现光学系统的数值仿真,并根据数值仿真的结果进行了光学系统参数的设计。该光学系统参数为:距离 4 mm,圆孔半径 50  $\mu\text{m}$ ,孔间距 700  $\mu\text{m}$ 。针对所设计的光学系统,利用太阳模拟器完成了地面实验。实验结果表明,光学系统设计合理,能满足微小卫星对敏感器小型化、高精度的要求。

**关键词:** 数字式太阳敏感器;光学系统;衍射;MEMS

**中图分类号:** V448.2 **文献标识码:** A

## Optical system design for MEMS based digital sun sensor

WEI Xin-guo, JIANG Jie, WEN Zhi-ming, ZHANG Guang-jun, FAN Qiao-yun

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A reasonable optical system for Micro-electro-mechanical System (MEMS) based on digital sun sensor was designed. Based on scalar diffraction theory, the imaging model of the optical system for the sun sensor with a structure of circular aperture was developed. A computer simulation was carried out to obtain the parameters of optical system in the distance of 4 mm, aperture of 50  $\mu\text{m}$  and the space between holes of 700  $\mu\text{m}$ . The ground experiment was carried out for this optical system with a sun simulator, and the results show that the optical system is designed well and can meet the requirements of miniaturization and high accuracy of a sun sensor.

**Key words:** digital sun sensor; optical system; diffraction; Micro-electro-mechanical System (MEMS)

## 1 引言

太阳敏感器是以太阳为基准方位,用于测量太阳光线与卫星等航天器某一体轴或坐标平面之间夹角的一种天体敏感器。太阳敏感器主要有“0-1”式、模拟式和数字式等几种类型。随着微小

型航天器技术的发展,研制大视场、高精度、小型化的姿态敏感器成为必然,而与“0-1”式和模拟式太阳敏感器相比,具有高精度特点的数字式太阳敏感器是研究的热点。

光学系统是天体敏感器的重要组成部分<sup>[1]</sup>,合理的光学系统是实现大视场、高精度、小型化敏感器的关键。目前,基于面阵 CCD 或 CMOS 图

收稿日期:2007-11-29;修订日期:2008-02-19.

基金项目:“十五”民用航天预研项目;“十一五”民用航天预研项目(No. C5120062104)

像传感器的数字式太阳敏感器光学系统主要利用了较成熟的微电机系统 (MEMS) 技术, 即在掩模板上刻蚀出小孔, 采用小孔衍射成像原理对太阳进行成像, 后续处理电路用某种算法提取像光斑中心位置, 然后计算出太阳入射角, 因此这些光学系统又被称为光学掩模。美国 JPL 实验室首先研制了基于 MEMS 工艺和硅基的掩模, 但是没有进行相关的理论分析<sup>[2]</sup>; 郑志敏、丁天怀对方孔阵列结构的掩模进行了理论分析并研制了小孔阵列式光线引入器<sup>[3]</sup>。

本文介绍了一种圆孔结构的太阳敏感器光学系统设计方法, 包括光学系统设计的数学模型、系统仿真及参数设计和地面实验等。

## 2 光学系统成像的数学模型

### 2.1 光学系统成像光路

如图 1 所示, 太阳光线 (近近平行光) 入射到光学掩模表面, 在表面发生折射; 经过掩模后, 小孔以外的光线被吸收或反射; 由于小孔半径  $R$  的大小一般在几十到几百微米, 光线经过小孔时发生衍射现象, 在成像面上形成衍射光斑。

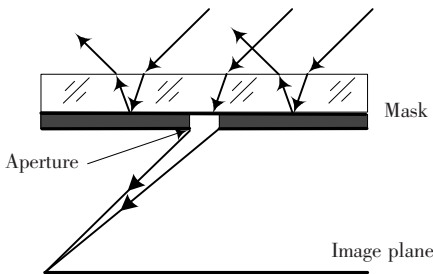


图 1 光学系统成像光路

Fig. 1 Imaging light path of optical system

### 2.2 光学系统的数学模型

考虑光强的影响, 本文所选的太阳敏感器入射光波长为  $1 \mu\text{m}$  左右, 由于目前的光学掩模的孔径基本上都在几十到一百多微米, 因此涉及了衍射效应。首先考虑单个孔的情况, 根据标量衍射理论<sup>[4-5]</sup>, 建立圆孔衍射模型如图 2。设孔中心与掩模中心重合, 以其为原点建立坐标系。根据惠更斯-菲涅耳原理和菲涅尔-基尔霍夫衍射公式, 成像面上任意一点  $p(x', y')$  的光强复振幅可

以用式(1)表示:

$$\tilde{E}(p) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} \tilde{E}(q) \frac{\exp(jkr)}{r} \cdot \frac{\cos(n, r) - \cos(n, l)}{2} d\sigma, \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  为波长,  $r$  为衍射光线,  $(n, r)$  和  $(n, l)$  分别为孔径面法线与  $r$  和入射光线的夹角。

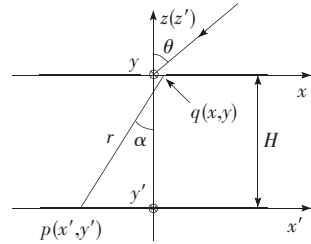


图 2 圆孔衍射模型

Fig. 2 Circular aperture diffraction mode

当太阳光以垂直于  $y$  轴, 与  $z$  轴成  $\theta$  角入射时, 圆孔平面上任意一点  $q(x, y)$  的复振幅为:

$$E(q) = E_0 \exp(-jkx \sin \theta), \quad (2)$$

由图 2 可以看到: 孔径面法线与  $r$  的夹角  $(n, r)$  为  $\alpha$ , 孔径面法线与入射光线的夹角  $(n, l)$  为  $\pi - \theta$ , 带入式(2), 得到:

$$\tilde{E}(p) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} E_0 \exp(-jkx \sin \theta) \cdot \frac{\exp(jkr)}{r} \frac{\cos \alpha + \cos \theta}{2} d\sigma, \quad (3)$$

其中,  $r = \sqrt{H^2 + (x' - x)^2 + (y' - y)^2}$ 。当  $H$  很大时, 分母中  $r \approx \sqrt{H^2 + x'^2 + y'^2}$ ; 分子中  $r$  的微小变化会引起相位很大的变化, 因此不能简单代替。对于  $P$  点来说,  $\alpha$  和  $\theta$  可以认为是常数。令  $r' = \sqrt{H^2 + x'^2 + y'^2}$ , 式(3)可以简化为:

$$\tilde{E}(p) = \frac{E_0}{j\lambda r'} \frac{\cos \alpha + \cos \theta}{2} \cdot \iint_{\Sigma} \exp(-jkx \sin \theta) \exp(jkr) d\sigma, \quad (4)$$

此式为圆孔衍射的接收面的光波复振幅分布式。要分析圆孔衍射情况需要进行积分运算, 因为上式不是初等函数, 无法直接积分, 因此采用了数值积分的方法。

采用的计算精度较高且计算比较简单的复化 Simpson 公式<sup>[6]</sup>如下:

$$\int_{D_{ij}} \int f(x,y) dx dy \approx \frac{h\tau}{9} \sum_{i=0}^{2m} \sum_{j=0}^{2n} [f_{2i,2j} + 2_{2i+2,2j} + f_{2i,2j+2} + f_{2i+2,2j+2} + 4 \times (f_{2i+1,2j} + f_{2i,2j+1} + f_{2i+2,2j+1} + f_{2i+1,2j+2}) + 16f_{2i+1,2j+1}] \quad (5)$$

其中,矩形区域  $D$  满足:

$$D = \{(x,y) \mid a \leq x \leq b, c \leq y \leq d\},$$

$$h = \frac{b-a}{2m}, \tau = \frac{d-c}{2n}.$$

因为是圆孔衍射,因此需要将衍射公式化成极坐标形式:

$$\tilde{E}(p) = \frac{E_0}{j\lambda r'} \frac{\cos \alpha + \cos \theta}{2} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R \xi \exp(-jk\xi \cos \omega \sin \theta) \exp(jkr) d\xi \quad (6)$$

积分后,成像平面上任意一点  $P$  的光波复振幅可以表示为:  $\tilde{E}(p) = R + jI$ , 则光强为:

$$I(p) = R^2 + I^2, \quad (7)$$

若有  $n(n \geq 1)$  个圆孔,以掩模中心为原点建立坐标系,设光线以垂直于  $y$  轴,且与  $z$  轴成  $\theta$  角入射;设第  $i$  个孔的孔中心坐标为  $(x_i, y_i)$ ,则孔  $i$  对点  $p$  的光波复振幅的贡献为:

$$\tilde{E}_i(p) = \frac{E_0}{j\lambda r'} \frac{\cos \alpha + \cos \theta}{2} \iint_{\Sigma} \exp(-jkx \sin \theta) \cdot \exp(jkr) \exp(-jkx_i \sin \theta) d\sigma. \quad (8)$$

设  $\tilde{E}_i(p) = R_i + jI_i$ , 则  $P$  点总光强复振幅为:

$$\tilde{E}(p) = \sum_{i=1}^n (R_i + jI_i), \quad (9)$$

光强为:

$$I(p) = \left(\sum_{i=0}^n R_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n I_i\right)^2. \quad (10)$$

### 3 仿真分析及光学系统参数设计

本文采用 VC++ 编程在计算机上对上述的光学系统数学模型进行仿真。太阳传感器响应波段由图像传感器和掩模的透射光谱决定,大约在  $1 \mu\text{m}$  左右,因此响应波长选择为  $1 \mu\text{m}$ ;图像传感器采用 FillFactor 公司的 STAR1000,分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,单个像素大小为  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 。设最大视场为  $\theta_{\text{max}}$ ,感光面边长为  $S$ ,小孔半径为  $R$ ,孔间距为  $L$ ,则圆孔所在平面与成像平面距离  $H$  主要由式(11)决定:

$$H < \frac{S-L-2R}{2 \tan \theta_{\text{max}}}, \quad (11)$$

感光面边长  $S = 1024 \times 15 = 15360 \mu\text{m}$ 。由  $R \ll S, L \ll S$ ,最大视场要求为  $\pm 60^\circ$ ,推算出  $H$  约为  $4.4 \text{ mm}$ 。考虑到角度大时,光斑会出现拉伸现象,因此取  $H = 4 \text{ mm}$ 。以下仿真中  $H$  均取  $4 \text{ mm}$ 。

#### 3.1 单孔衍射光斑大小随孔径变化规律及孔半径设计

通过取不同的小孔半径进行数值仿真,得出如图 3、4、5 所示的结果。其规律如下:

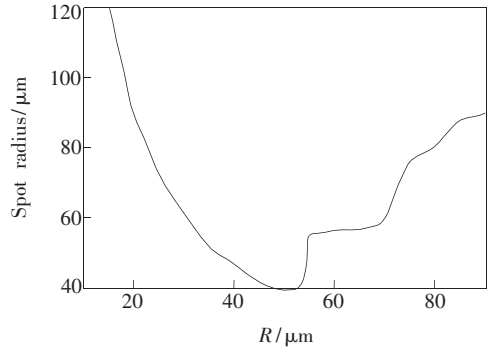


图 3 垂直入射光斑半径随小孔半径变化曲线  
Fig. 3 Relationship between spot radius and pinhole radius when  $\theta = 0^\circ$

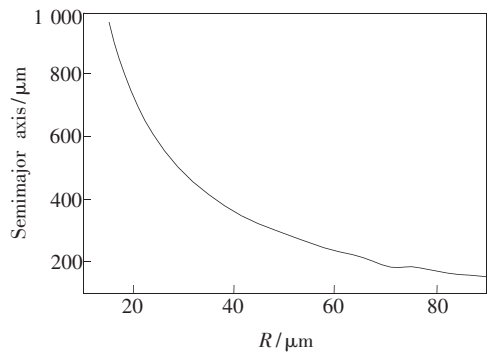


图 4  $60^\circ$  入射光斑半长轴随小孔半径变化曲线  
Fig. 4 Relationship between semimajor axis and pinhole radius when  $\theta = 60^\circ$

- (1) 孔径并不是越小越好,孔径越小,弥散效应反而越大,如图 5(a) 所示;
- (2) 随着孔径的增大,光斑弥散逐渐减小,如图 5(b) 所示;减小到一定程度时候,光斑出现暗环(曲线中跃迁处),如图 5(c) 所示,光斑的尺寸逐渐和孔径相等,衍射效应减小,形成小孔成像,

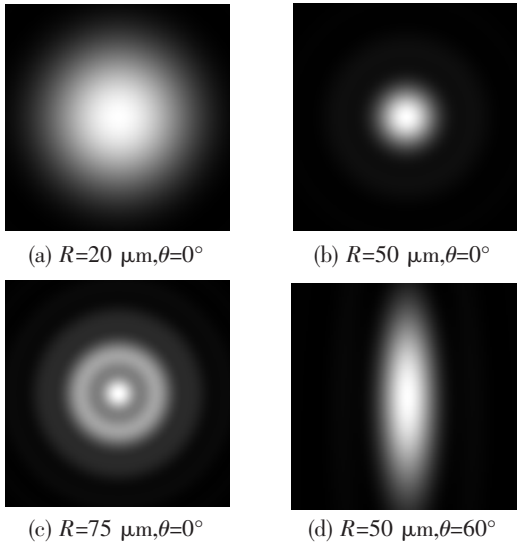


图 5 单孔二维仿真结果

Fig. 5 Simulation results of single pinhole

这时随着孔径的增大光斑尺寸也增大。

(3) 倾斜入射时, 光斑为椭圆光斑, 如图 5(d) 所示, 长轴拉长至圆孔半径的数倍; 随着孔径的增大, 光斑长轴逐渐减小。在半径为 0~90 μm 内, 光斑长轴始终减小。

从太阳传感器精度考虑, 光斑越小, 质心定位精度越高。上述规律表明: 在  $H$  取 4 mm 时, 半径在 50 μm 附近所成的光斑图像尺寸最小; 综合考虑光强因素, 最终确定半径取 50 μm。

### 3.2 单孔光强随角度变化规律

半径取 50 μm, 取不同的入射角度进行数值仿真的结果如图 6 所示, 其规律如下:

(1) 衍射光斑的光强最大值随着角度增大而减小。

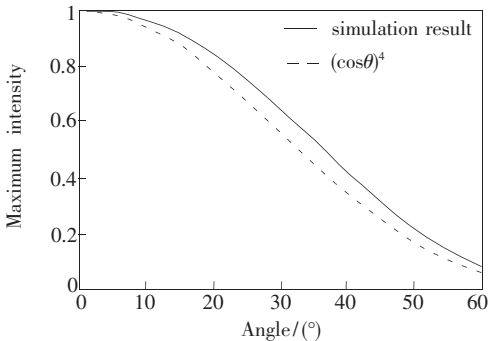


图 6 相对光强随着角度变化的曲线

Fig. 6 Relative intensity variation curve

(2) 将光强变化曲线与  $\cos^4\theta$  (虚线) 构成的曲线比较, 发现它们基本一致。

因此, 在垂直入射和斜入射情况下, 由于光强变化可能会引起图像传感器成像的差异, 需要改变系统中的曝光时间来解决这个差异。本文得到的规律为曝光时间的设置提供了一个可参考的参数。

### 3.3 孔间相互影响与间距的关系及孔间距设计

半径取 50 μm, 通过取不同得间距  $s$  对 2 个孔的情况进行数值仿真, 结果如图 7、8 所示。并得到规律如下:

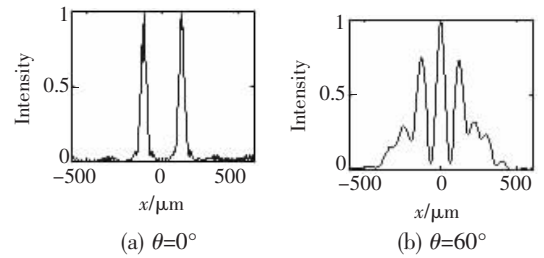
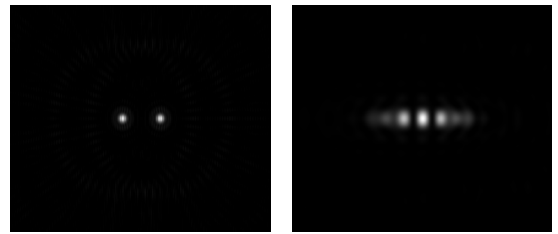


图 7  $R=50 \mu\text{m}, s=250 \mu\text{m}$ , 孔间相互影响情况

Fig. 7  $R=50 \mu\text{m}, s=250 \mu\text{m}$ , influence of interference

(1) 对于阵列小孔构成的光学系统, 在成像距离  $H$  固定情况下, 圆孔的间距对多孔结构的成像影响很大, 特别是倾斜入射时, 各个孔除了自身的衍射效应, 还有邻近孔的干涉效应。

(2) 间距太小, 两孔相互干涉, 光斑粘连在一起, 无法分辨各自光斑中心; 当距离增大到一定程度时, 2 个光斑有一定的相互干涉, 但是不影响各自光斑质心定位。

从太阳传感器精度考虑, 相邻的 2 个光斑在垂直和倾斜入射时均不相连, 这样才能保证单独计算各个光斑的中心坐标; 同时间距尽可能小, 以保证大视场。从图 8 中可以看到, 孔间距取 600 μm 能满足要求, 在实际应用中孔间距选择为 700 μm。

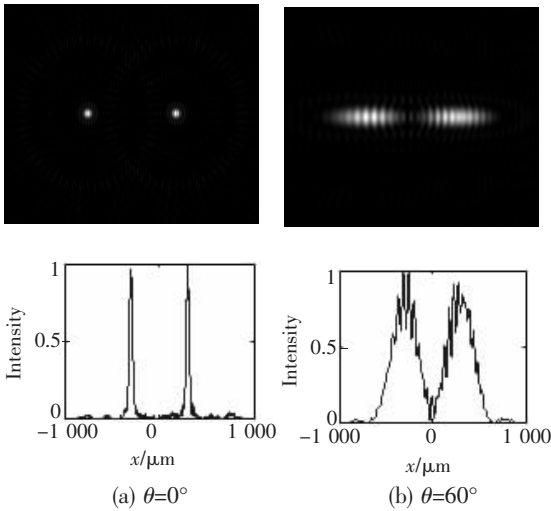


图 8  $R=50 \mu\text{m}$ ,  $s=600 \mu\text{m}$ , 孔间相互影响情况  
Fig. 8  $R=50 \mu\text{m}$ ,  $s=600 \mu\text{m}$ , influence of interference

### 4 地面实验

根据以上设计的光学系统参数为:圆孔与成像面距离 4 mm,圆孔半径  $50 \mu\text{m}$ ,孔间距  $700 \mu\text{m}$ ,图 9 为计算机仿真光斑图像;图 10 为利用太

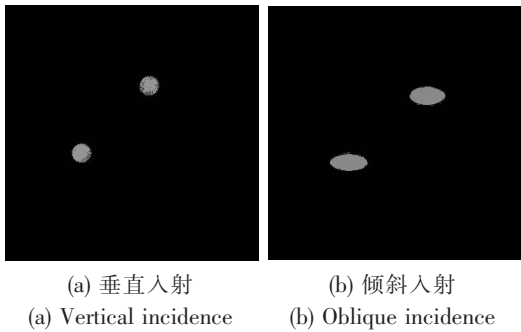


图 9 计算机仿真光斑图像  
Fig. 9 Simulation results

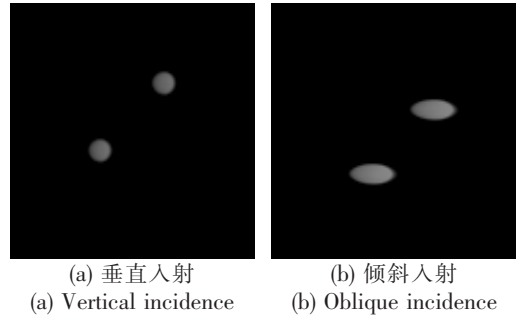


图 10 地面实验光斑图像  
Fig. 10 Ground experiment results

阳模拟器在实际光学系统下采集到的光斑图像。该光学系统主要为利用 MEMS 技术研制的光学掩模,参数与设计值一致。可以看出,仿真结果和实际采集的图像一致表明:所设计的光学系统在垂直入射和大角度倾斜入射时,太阳光通过小孔所成光斑形状规则,没有出现光斑相连的情况,符合高精度太阳传感器的设计要求。

### 5 结 论

通过对圆孔衍射进行理论分析,总结了衍射光斑与孔径的关系、光强随角度变化的关系和孔间相互影响与孔间距的关系等成像规律,在此基础上设计了一种数字式太阳传感器光学系统,该光学系统主要为蚀刻了 2 个小圆孔的光学掩模,具体参数为:成像面与小孔面的距离为 4 mm;掩模上小圆孔半径为  $50 \mu\text{m}$ ;孔间距为  $700 \mu\text{m}$ 。利用太阳模拟器完成了地面实验,地面实验与计算机仿真结果一致。实验结果表明,本文理论分析正确,所设计的光学系统设计合理,能满足微小卫星对姿态传感器的高精度、小型化、大视场的要求。

### 参考文献:

[1] 杨皓明,王灵杰,翁志成,等.大孔径大视场轻小型星敏感器光学系统[J].光学精密工程,2007,15(2):151-1540.  
YANG H M, WANG L J, WENG ZH CH, et al.. Optical system of light star tracker with wide field and large aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (2): 151-1540. (in Chinese)

[2] LIEBE C C, MOBASSER S, BAE Y, et al.. Micro sun sensor[J]. *IEEE*, 2002, 5: 2263-2273

[3] 郑志敏,丁天怀.小孔阵列式太阳传感器的光学系统设计 [J]. 光学技术, 2006, 32(2): 240-243.  
ZHENG ZH M, DING T H. Optical system design for a micro digital sun sensor [J]. *Optical Technique*, 2006, 32 (2): 240-243. (in Chinese)

[4] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,1999.  
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 1999. (in Chinese)

- [5] WOLF B. 光学原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.  
WOLF B. *Principles of Optics*[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
- [6] 颜庆津. 数值分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1989.  
YAN Q J. *Numerical Analysis*[M]. Beijing:BUAA Press, 1989. (in Chinese)

作者简介:魏新国(1977—),男,湖北人,博士,讲师,主要从事光电测量、天体敏感器技术相关研究。E-mail: wxg@buaa.edu.cn

江洁(1973—),女,福建人,博士,副教授,主要从事光电信息处理和光电导航的研究。E-mail: jiangjie@buaa.edu.cn

## ● 下期预告

# 基于 PZT 的非球面能动抛光盘定位误差分析

胡自强<sup>1,2,4</sup>, 凌 宁<sup>1</sup>, 潘君骅<sup>3</sup>, 饶长辉<sup>1</sup>, 姜文汉<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院 成都光电所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;  
3. 苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006; 4. 烟台大学 光电信息学院, 山东 烟台 264001)

研制了一个口径为 100 mm、含 19 个 PZT 驱动器的非球面能动抛光磨盘, 用于一个口径为 350 mm、 $k=-1.112\ 155$ 、顶点半径  $R=840$  mm 双曲面镜的加工实验。为研究定位误差对非球面能动抛光磨盘输出面形精度的影响, 对磨盘上任意点所需变形量  $\delta$  以及由定位误差引入的变形量误差  $\Delta\delta$  进行了理论公式推导, 并利用有限元分析方法计算得到: 当非球面能动抛光磨盘中心到非球面工件中心的距离  $L=120$  mm 且  $\delta L$  分别为 0, -1.0, -0.5, 0.5, 1 mm 时, 非球面能动抛光磨盘输出面形与理论面形比较剩余残差 RMS 相应分别为 0.329  $\mu\text{m}$ , 0.454  $\mu\text{m}$ , 0.366  $\mu\text{m}$ , 0.367  $\mu\text{m}$ , 0.461  $\mu\text{m}$ , 定位误差导致剩余残差 RMS 分别相应增加 0, 38%, 10.9%, 11.2%, 40%。因此, 定位误差应该控制在  $\pm 0.5$  mm 以内。