

文章编号 1004-924X(2009)05-1020-06

# 采用多种群遗传算法的全景成像系统非球面设计

王丽萍<sup>1,2</sup>, 张立超<sup>1</sup>, 何锋贇<sup>1</sup>, 金春水<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**提出了一种基于多种群遗传算法(MPGA)的折反射全景成像系统非球面元件的设计方法。结合广义科丁顿公式及几何光学原理,推导出非球面两镜系统像散表达式。在此基础上,利用 MPGA,以像散作为非球面两镜系统像差评价参数,求解出满足消像散及指定透视投影关系的非球面面形方程。给出 MPGA 求解非球面面形的实现过程,并用遗传算法最小二乘混合优化算法得到了便于实现光线追迹和像差计算的非球面多项式。研制了一个焦距为  $-1.2\text{ mm}$ ,  $F$  数为 1.5, 视场为  $360^\circ \times (35^\circ \sim 90^\circ)$  的折反射全景成像系统,给出了实验图像,获得了较好的成像质量。

**关键词:**全景成像系统;非球面;多种群遗传算法;光学设计

中图分类号:TH703 文献标识码:A

## Design of aspheric mirror for panoramic imaging system using multi-population genetic algorithm

WANG Li-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Li-chao<sup>1</sup>, HE Feng-yun, JIN Chun-shui<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** A design method of aspherical surface for a panoramic imaging system with two mirrors was proposed based on Multi-population Genetic Algorithms(MPGA). To eliminate the astigmatism induced by mirrors and to improve the image resolution, an algebraic expression of astigmatism for panoramic imagers was induced based on the generalized Coddington equation and the theory of geometric optics. Then, an optimization process for mirror profile design was proposed to eliminate the astigmatism and to provide a purposely-designed projection formula with aid of the MPGA. A series of polynomial expressions of aspherical surfaces were obtained and procedures of the design were presented. In order to facilitate ray tracing and aberration calculation, an even asphere surface model was established by using a hybrid scheme combining the MPGA and the damped least squares. Finally, a prototype of the omnidirectional panoramic imager with  $f'$  of  $-1.2\text{ mm}$  and  $F/\#$  1.5 for  $360^\circ (35^\circ \sim 90^\circ)$  was developed, which can provide clear panoramic ring images.

**Key words:** panoramic imaging system; aspherical surface; multi-population genetic algorithm(MPGA); optical design

收稿日期:2008-08-14;修订日期:2008-09-20.

基金项目:吉林省科技厅资助项目

# 1 引言

近年来,空间目标探测,机器人导航,安全监控等领域都提出了对空间各方向场景实时成像的要求,满足上述需求的折反射全景系统<sup>[1-5]</sup>日益受到关注。折反射全景系统由常规成像透镜和曲面反射镜组成,能够实时获取水平方向 360°和垂直方向一定角度的全景图像。该系统结构相对简单、光能损失低,可获取无畸变的透视投影图像;系统设计的柔性好且成本较低,已成为计算机视觉研究的热点。折反射全景系统的性能取决于前置反射镜的设计,目前多将反射面设计成旋转对称非球面以满足特殊的应用需求<sup>[6-10]</sup>,如使成像角放大率或空间放大率保持不变来消除畸变影响。引入反射镜导致的像散是全景系统像差的主要因素,影响像面清晰度。而传统近轴球面像差公式及求解手段不适于全景成像系统的设计。本文根据广义科丁顿公式及几何光学原理,提出了一种消像散两镜非球面的设计方法解决来此问题。该方法可提供更多的设计自由度,并可遵循任意给定的投影方程。在非球面反射光学元件的优化设计中,最优化问题的计算复杂,很难用传统光学设计软件提供的优化方法来求解。多种群遗传算法(MPGA)作为一种改进的全局算法,能够在相同的搜索空间产生多个子种群,各自独立进化,避免全部个体聚集在一种环境中,很好地保持种群多样性,提高进化效率和算法稳定性。在非球面设计中采用该算法,取得了较好的设计结果。为便于实现光路计算,本文还利用遗传算法(GA)最小二乘混合优化算法得到了非球面面形方程的多项式,并成功地运用于光线追迹和像差计算。设计了一个全景成像系统,获得了较好的成像质量。

## 2 反射镜面形设计

### 2.1 折反射全景系统原理结构

折反射全景系统由 3 部分组成:曲面反射镜(球面、圆锥面、双曲面、抛物面或高次旋转对称非球面)、中继镜和光敏元件。入射光线经前置反射镜反射后进入转像系统,最终到达像面,如图 1 所示。折反射全景成像系统根据是否满足单视点成像约束分为单视点成像系统和非单视点成像系

统两类。单视点成像要求一个视点对所有方向的场景成像,即所有入射光线汇集于一点,对反射镜偏心等公差要求严格。本文研究含有两个共轴反射镜的非单视点成像全景系统,两个反射面将为设计提供更大自由度以校正场曲及像散,提高成像质量。由于摆脱了单视点成像的约束,对反射镜装调要求放松,有助于提高系统整体性能。

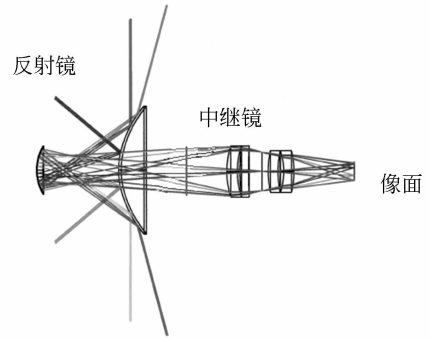


图 1 折反射全景系统

Fig. 1 Catadioptric panoramic imaging system

### 2.2 非球面设计

折反射全景系统的性能取决于前置反射镜的设计,反射镜的面形决定系统成像特性及透视投影关系。非球面反射镜的引入有效地扩大了系统视场,也带来了严重影响系统成像质量的像差。根据像差理论,由反射镜导致的像散是全景系统像差的主要因素,影响像面清晰度。根据广义科丁顿公式及几何光学原理,本文建立了一套非球面两镜的设计方法,消除了反射面像散并满足任意给定的透视投影方程。

#### 2.2.1 两镜系统数学模型建立

首先建立非球面两镜系统光路数学模型,由图 2 所示,设子午面内两个旋转对称共轴反射镜,主镜(Primary mirror,  $P$ )和次镜(Secondary mirror,  $S$ ),其  $P, S$  曲线为  $f_1(x_1), f_2(x_2)$ 。 $N_1, N_2$  分别为  $P, S$  法向量。与竖直方向成  $\theta$  角的主光线沿矢量方向射向  $P$ ,经  $P$  反射后沿矢量  $B$  方向射向  $S$ ,再由  $S$  反射,沿矢量  $C$  进入转像系统节点  $O$ 。 $A, B, C, N_1, N_2$  表示如下:

$$A = (-\sin \theta, -\cos \theta), \quad (1)$$

$$B = (x_2 - x_1, z_2 - z_1), \quad (2)$$

$$C = (-x_2, -z_2), \quad (3)$$

$$N_1 = (-f_1'(x_1), 1), \quad (4)$$

$$N_2 = (f_2'(x_2), -1), \quad (5)$$

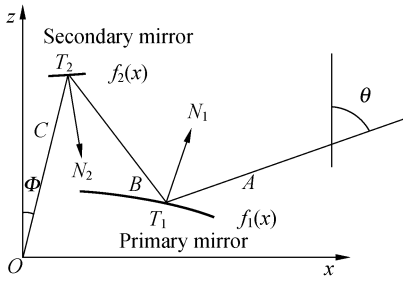


图 2 两镜系统光路

Fig. 2 Light path between primary and secondary mirrors

$f_1'(x_1)$  为  $f_1(x_1)$  在  $x=x_1$  处的一阶导数,  $f_2'(x_2)$  为  $f_2(x_2)$  在  $x=x_2$  处的一阶导数, 反射定律可表示为:

$$\left(\mathbf{A} + \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|}, \mathbf{N}_1\right) = 0, \quad (6)$$

$$\left(\frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|} + \frac{\mathbf{C}}{|\mathbf{C}|}, \mathbf{N}_2\right) = 0, \quad (7)$$

即:

$$\left(-\sin \theta + \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}}\right) (-f_1'(x_1)) +$$

$$\left(-\cos \theta + \frac{z_2 - z_1}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}}\right) = 0, \quad (8)$$

$$\left(\frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} + \frac{-x_2}{\sqrt{x_2^2 + z_2^2}}\right) (f_2'(x_2)) +$$

$$\left(\frac{z_2 - z_1}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} + \frac{-z_2}{\sqrt{x_2^2 + z_2^2}}\right) (-1) = 0, \quad (9)$$

非球面像散定义

利用广义科丁顿公式中定义的非球面半径表达式, 分别求出经两次反射后, 子午及弧矢像面位置, 其差值即为反射系统像散。

子午半径表达式<sup>[11]</sup>:

$$R_m = \frac{(1 + (f'(x))^2)^{\frac{3}{2}}}{f''(x)}, \quad (10)$$

弧矢半径表达式:

$$R_s = \frac{x \sqrt{1 + (f'(x))^2}}{f'(x)}, \quad (11)$$

以子午面为例求解经两次反射后子午像面位置。由图 3 所示,  $I_1$  表示无穷远物体经  $P$  成像后子午像面位置。  $I_2$  表示  $I_1$  经  $S$  成像后子午像面位置。  $I_{m1}$  为反射点  $T_1$  至  $I_1$  距离,  $I_{m2}$  为反射点  $T_2$  至  $I_2$  距离,  $\alpha_1$  为光线到达  $T_1$  点入射角,  $\alpha_2$  为光线经一次反射后到达  $T_2$  点入射角。  $D$  表示

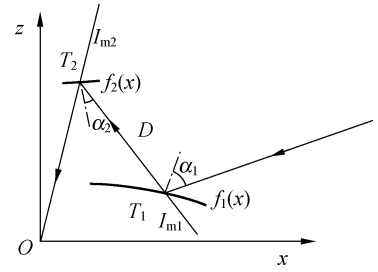


图 3 像点位置

Fig. 3 Image position

$T_1, T_2$  两点间距离。

$P$  子午面半径  $R_{mP}$  由公式 1 导出,  $I_{m1}$  计算公式如下:

$$R_{mP} = \frac{(1 + (f_1'(x))^2)^{\frac{3}{2}}}{f_1''(x)}, \quad (12)$$

$$I_{m1} = \frac{R_{mP}}{2 \cos \alpha_1}, \quad (13)$$

进入  $S$  光线由  $I_1$  点发出, 物距为  $(D + I_{m1})$ ,  $S$  子午面半径  $R_{mS}$ ,  $I_{m2}$  计算公式如下:

$$R_{mS} = \frac{(1 + (f_2'(x))^2)^{\frac{3}{2}}}{f_2''(x)}, \quad (14)$$

$$I_{m2} = \frac{(I_{m1} + D)}{\frac{2 \cos \alpha_2 (I_{m1} + D)}{R_{mS}} + 1}, \quad (15)$$

同理推导出弧矢面半径  $R_{sP}, R_{sS}$  及像面位置  $I_{s1}, I_{s2}$ :

$$R_{sP} = \frac{x \sqrt{1 + (f_1'(x))^2}}{f_1'(x)}, \quad (16)$$

$$I_{s1} = \frac{R_{sP}}{2}, \quad (17)$$

$$R_{sS} = \frac{x \sqrt{1 + (f_2'(x))^2}}{f_2'(x)}, \quad (18)$$

$$I_{s2} = \frac{(D + I_{s1})}{\frac{2(D + I_{s1})}{R_{sS}} + 1}, \quad (19)$$

像散可表示为:

$$A_{st} = I_{m2} - I_{s2}, \quad (20)$$

投影方程可根据要求任意设定, 例如满足等距投影<sup>[5]</sup>、等角度投影、 $f\theta$  成像关系的方程分别为:

$$\theta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{\tan \phi_{\max} - \tan \phi_{\min}} (\tan \phi - \tan \phi_{\min}) + \theta_{\min}, \quad (21)$$

$$\theta = k\phi, \quad (22)$$

$$\theta = k \tan \phi. \quad (23)$$

$\theta_{\max}, \theta_{\min}$  为最大,最小入射角。 $\tan \phi_{\max}, \tan \phi_{\min}$  为最大、最小出射角。

2.2.2 用遗传算法(GA)设计非球面

全景系统前置非球面反射镜的设计不同于传统近轴系统,满足特殊约束的最优化问题计算复杂,很难用传统光学设计软件提供的优化方法来求解。多种群遗传算法(MPGA)<sup>[12]</sup>为解决此问题提供了一个有效的途径。遗传算法(GA)是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法。多种群并行遗传算法是近年来提出的一种改进的遗传算法,依据实现形式主要分为 3 类:孤岛模型、细胞模型和协同进化。本文利用的是孤岛模型并行遗传算法,其思想是:在相同搜索空间上以一定方式生成多个进化种群,每隔一定的进化代数(称为种群进化周期)以一定的方式交换各种群的最优个体,从而生成新的种群,在此基础上进行下一代种群进化周期的进化,直到满足算法终止条件。多个子种群的同时进化,降低了初始种群和选择压力、收敛速度对寻优结果的影响,保持了种群多样性,降低了算法早熟收敛的可能性,能够更快、更好地搜索全局最优值,是一种简单易行的提高 GA 性能的方法。

非球面设计实现过程:

(1) 变量设置

为便于微分计算,将矢高  $z$  表示成以口径  $x$  为变量的非球面幂级数形式标准方程:

$$z_1 = A_0 + A_1 x^2 + A_2 x^4 + A_3 x^6, \quad (24)$$

$$z_2 = B_0 + B_1 x^2 + B_2 x^4 + B_3 x^6, \quad (25)$$

系数  $A_0, A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, B_2, B_3$  为拟合参数。

(2) 评价函数

$$E = \sum_{i=1}^4 w_i E_i + \sum_{i=1}^n C_i, \quad (26)$$

$E_1$  代表系统非球面像散,  $E_2, E_3$  代表入射到镜面 1、镜面 2 光线满足反射定律的约束条件,  $E_4$  代表投影方程,  $w_i$  为各项权重,  $C_i$  代表系统结构限制条件。评价函数下限设为无穷小量。

(3) GA 参数设置

设置最大进化代数  $T$ , 随机生成  $n$  个子种群, 各子种群规模数同为  $m$ , 独立进行遗传操作  $m$  次发生一次种群间的迁徙。采用高斯型变异模式, 矢量化运算提高计算效率。达最大进化代数后以

进化过程中得到的具有最大适应度个体作为最优解输出。

幂级数形式的非球面表达式形式简单, 便于微分计算, 但不利于在通用的光学设计软件中实现光线追迹和像差计算。须转化为如下所示的常见非球面方程:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6, \quad (27)$$

$r$  对应子午截线方程中的  $x$ ,  $c$  为顶点处的曲率,  $k$  为非球面系数。

利用 GA 最小二乘混合优化算法编制曲面拟合程序, 给出了形如方程(27)的形式。

最小二乘算法在拟合非球面时, 对初始值依赖性较大, 常陷入局部最小区域, 无法满足要求。而遗传算法虽然对初始值依赖性很小, 可以全局寻优, 但作为一种全局优化算法, 其局部搜索能力有限。所以, 本文在拟合中采用了 GA 最小二乘混合优化算法, 保证即能全局寻优, 又能局部最优。

3 设计实例

设计了一个焦距为  $-1.2 \text{ mm}$ ,  $F$  数为  $1.5$ , 视场为  $35 \sim 90^\circ$ , 与  $1/2 \text{ inch COMS}$  配用的折反射全景镜头。两镜反射系统  $F$  数定为  $4.5$ , 焦距  $3.6 \text{ mm}$ 。中继镜缩小倍率为  $3$ 。

将结构参数以约束形式加入 GA 最小二乘混合优化算法求解出的消像散, 满足  $f\theta$  成像关系两镜系统。图 4 为求解得到两镜系统(原系统放大两倍):

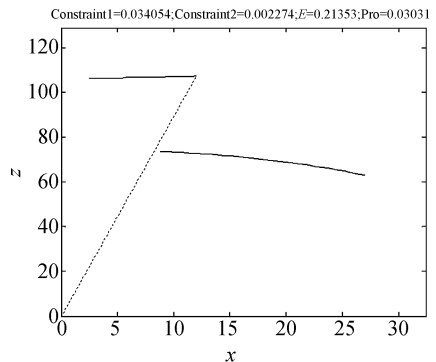


图 4 混合算法求解的两镜系统

Fig. 4 Two-mirror system solved by hybrid scheme

镜间距  $d=A_0-B_0=-30.65\text{ mm}$ ,

两镜非球面表达式为:

$$z_1 = \frac{0.026\ 98x^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - 1.637\ 22) \times 0.026\ 98^2 x^2}} + 2.004\ 62 \times 10^{-5} x^2 + 1.484\ 78 \times 10^{-6} x^4 - 2.445\ 31 \times 10^{-10} x^6, \quad (28)$$

$$z_2 = \frac{-0.016\ 034x^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - 10.674\ 04) \times 0.016\ 034^2 x^2}} - 5.046\ 81 \times 10^{-6} x^2 + 1.838\ 44 \times 10^{-6} x^4 - 2.588\ 39 \times 10^{-9} x^6. \quad (29)$$

将该系统导入 Zemax,图 5 为两镜系统图。

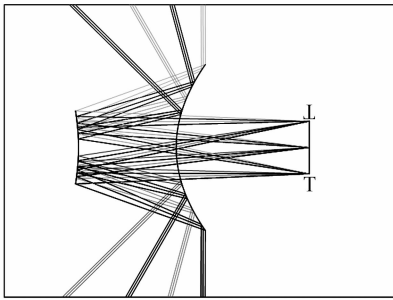
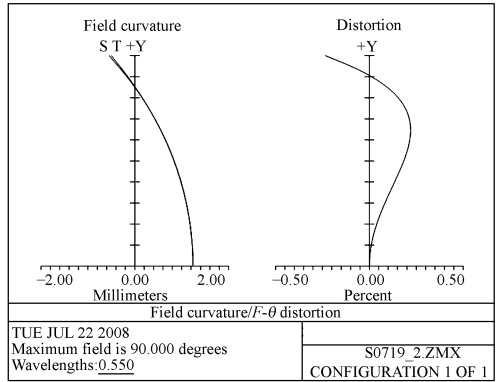


图 5 导入 ZEMAX 中的两镜系统

Fig. 5 Two-mirror system in ZEMAX

图 6(a)、(b)为分别用 ZEMAX,GA 最小二乘混合优化算法设计非球面两镜初解的像散及 F-THETA 畸变图。对比可以看出后者设计出的非球面能更好地消除像散,并且满足  $f\theta$  成像关系。



(b) 混合算法优化结果

(b) Results from hybrid scheme

图 6 像散及场曲曲线

Fig. 6 Field curvature and  $F-\theta$  distortion

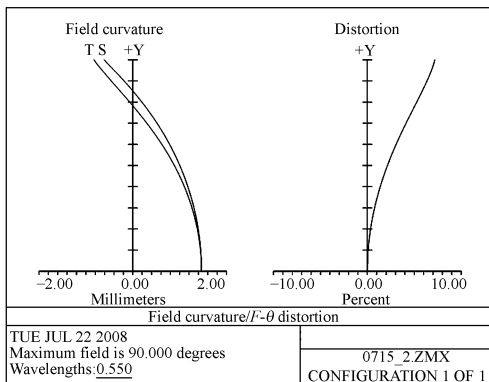
### 4 实例

采用以上方法,研制了一个焦距为  $-1.2\text{ mm}$ , $F$  数为 1.5,视场为  $35\sim 90^\circ$  的全景镜头如图 7 所示。图 8 为该镜头在室内采集的清晰图像。



图 7 全景相机

Fig. 7 Panoramic camera



(a) ZEMAX 初始优化结果

(a) Results from initial optimization in ZEMAX



图 8 全景图像

Fig. 8 Panoramic image

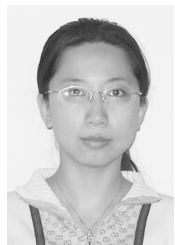
## 5 结 论

本文根据广义科丁顿公式及几何光学原理,提出了消像散并满足任意给定的投影方程的非球

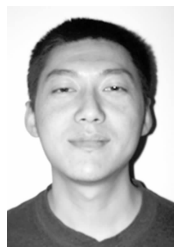
### 参考文献:

- [1] MIKHAIL G, EDDY K T, OLGA G A. Thermal infrared panoramic imaging sensor[J]. *SPIE*, 2006, 6206: 62062E\_1-62062E\_10.
- [2] SOOKWANG R, SHEAN T M, GARY S B, *et al.*. Threat mediation via a real-time stereoscopic-catadioptric omnivision system [J]. *SPIE*, 2006, 6231:62310E\_1-62310E\_10.
- [3] ZHAO L F, FENG H J, BAI J, *et al.*. Panoramic optical annular staring inspection system for evaluating the inner surface of a pipe [J]. *SPIE*, 2007, 6838:68381P\_1-68381P\_9.
- [4] POWELL I. Panoramic lens [J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33:7356-7361.
- [5] TAKEYA A, KURODA, NISHIGUCHI K, *et al.*. Omnidirectional vision system using two mirrors [J]. *SPIE*, 1998, 3430:50-60.
- [6] CHAHI J S, SRINIVASAN M V. Reflective surfaces for panoramic imaging [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36:8275-8285.
- [7] ZENG J Y, SU X Y, JIN G F. Incorporating lens distortion into the design of undistorted catadioptric omnidirectional cameras [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45: 7778-7784.

### 作者简介:



王丽萍(1981—),女,吉林长春人,博士研究生,2004年于长春理工大学获学士学位,现为中科院长春光学精密机械与物理研究所硕博连读研究生,主要从事光学系统的设计和研发。E-mail: wlp8121@126.com



张立超(1979—),男,吉林人,助理研究员,分别于2000年,2003年在吉林大学获学士、硕士学位,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事紫外、极紫外光学薄膜及相关技术的研究。E-mail: zhanglc@sklao.ac.cn

面两镜设计方法,利用GA最小二乘混合优化算法求解出非球面表达式。研制了一个焦距为 $-1.2\text{ mm}$ , $F$ 数为1.5,视场为 $360^\circ(35\sim 90^\circ)$ 的全景镜头,取得了较好的成像质量。

- [8] GYEONG-IL K, KWANG T K, GEON-HEE K, *et al.*. Folded catadioptric panoramic lens with an e-quadistance projection scheme [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44:2759-2767.
- [9] 曾吉勇, 苏显渝. 双曲面折反射全景成像系统[J]. *光学学报*, 2003, 23:1138-1142.  
ZENG J Y, SU X Y. Hyperboloidal catadioptric omnidirectional imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23:1138-1142. (in Chinese)
- [10] 程惠全, 姚炜勇, 杨国光, 等. 全景环形成像的转像系统设计 [J]. *光电工程*, 2002, 29:16-19.  
CHENG H Q, YAO W Y, YANG G G, *et al.*. Design of an image transferring system used for panoramic annular imaging [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29:16-19. (in Chinese)
- [11] CHAO S H, EVANS N C, SHEALY D L, *et al.*. Design of three-mirror telescope via a differential equation method [J]. *SPIE*, 1996, 2863:276-286.
- [12] 蔡良伟, 李霞. 一种带融合操作的实数多种群遗传算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2005(13):61-65.  
CAI L W, LI X. A real-valued multi-population genetic algorithm with mixing operation [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005(13): 61-65. (in Chinese)



何锋贇(1978—),男,浙江丽水人,副研究员,2000年于北京理工大学获学士学位,主要从事红外光学系统的设计和研发。E-mail: hefy\_78@163.com

### 导师简介:



金春水(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获学士学位,1990年,2003年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士、博士学位,主要从事紫外、极紫外光学技术的研究。E-mail: jincs@sklao.ac.cn