

# 变焦四反射镜系统设计

陈建发<sup>1,2</sup> 王合龙<sup>1,2</sup> 刘欣<sup>2</sup> 潘枝峰<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009  
<sup>2</sup>中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471009)

**摘要** 红外搜索跟踪系统(IRST)工作时,宽视场(短焦)实现对目标的宽域搜索;窄视场(长焦)实现对目标的定位跟踪。较之于折射变焦系统,四反射变焦系统具有较好的消色差和消热差特性,结构紧凑,可满足机载平台对IRST温度适应性、小型化和轻量化的要求。介绍了一种基于最佳最小二乘法和赛德尔像差理论的变焦四反射镜设计方法。实例设计表明了该设计方法的正确性与可行性。在连续变焦过程中,光学系统调制传递函数接近衍射极限,像质良好。

**关键词** 光学设计;赛德尔相差理论;最佳最小二乘法;变焦反射系统

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s216001

## Design of a Zoom Four-Mirror Optical System

Chen Jianfa<sup>1,2</sup> Wang Helong<sup>1,2</sup> Liu Xin<sup>2</sup> Pan Zhifeng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang, Henan 471009, China  
<sup>2</sup>Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang, Henan 471009, China)

**Abstract** When the infrared search and track (IRST) system is at work, the wide field of view (short focus) is used to achieve the target of wide-area search, and the narrow field of view (telephoto) to achieve the target of location and tracking. Compared with the refractive zoom system, the zoom four-mirror system has compact structure and performs very well at thermalization and achromatism. It can meet the requirements of aerial vehicle IRST temperature adaptability, smaller size and lighter weight. A reflective zoom system design method based on the best least squares method and Seidel aberration is described. Instance is designed to prove the correctness and feasibility of this method. In the process of continuous zoom, the modulation transfer function of this optical system is close to the diffraction limit.

**Key words** optical design; Seidel aberration; best least squares method; reflective zoom system

**OCIS codes** 120.4570; 120.4820; 220.4610

## 1 引言

红外搜索跟踪系统(IRST)主要由快速搜索系统和跟踪定位系统组成,其中快速搜索系统用于对空中或地面机动目标进行大范围快速搜索扫描,跟踪定位系统用于对已初步确定空间角度位置的机动目标进行精确探测跟踪。工作时,宽视场(短焦)实现对目标的广域搜索,窄视场(长焦)实现对目标的定位跟踪<sup>[1]</sup>。

由于红外波长较长,普通玻璃对其透射率小,导

致了红外光学系统的材料选择范围小,因此系统色差、热差较难消除。镀铝或介质膜的反射层,在很宽的波段范围内有很高的反射率,没有色差<sup>[2]</sup>,且当结构件与镜面材料一致时,可以实现系统无热化设计。利用反射镜消色差、消热差特性提高了IRST系统的成像质量。离轴四反射系统较之于thermomechanical analysis (TMA)系统,可提供更加紧凑的光学构型<sup>[3]</sup>,可满足机载平台对IRST系统小型化和轻量化的需求。

收稿日期: 2012-05-19; 收到修改稿日期: 2012-07-06

作者简介: 陈建发(1987—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: ly471141@hotmail.com

导师简介: 王合龙(1965—),男,博士,研究员,主要从事光电系统总体技术方面的研究。E-mail: whlwhl6808@sina.com

本文给出了一种基于最小二乘法和赛德尔初级像差理论的连续变焦离轴四反射镜系统的设计方法。在依据平场条件选择四镜半径的基础上,该方法可同时校正每个视场下光学系统的球差、慧差、像散、场曲和畸变 5 种像差。依据该理论设计了反射式 IRST,系统满足多视场、轻量化、小型化的设计要求,像质的评定结果表明,光学系统连续变焦过程中成像质量均接近衍射极限。

## 2 系统初始结构参数求解

### 2.1 反射光学系统变焦理论

反射镜的共轭方程式可表示为

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} = \varphi, \quad (1)$$

式中  $l$  为反射镜的物距,  $l'$  为像距,  $f'$  为反射镜的焦距。 $\varphi$  为反射镜的光焦度,可表示为

$$\varphi = \frac{1}{f'} = \frac{2}{R}, \quad (2)$$

式中  $R$  为反射镜的曲率半径。反射镜的垂轴放大率的计算公式为

$$\beta = \frac{nl'}{n'l} = -\frac{l'}{l}, \quad (3)$$

$$\beta = -\frac{x}{f'} = \frac{l' - f'}{f'}$$

推出镜子的物距和像距的计算公式

$$\begin{cases} l = \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)f' \\ l' = (1 - \beta)f' \end{cases}. \quad (4)$$

欲满足像点位置不变,必须使图 1 中的点  $A$  到  $A'$  之距离  $D$  为常量,即变焦组和补偿组在移动过程中合成共轭距  $L_2 + L_3$  为常量,因此可以得到

$$L_2 + L_3 = \left(\frac{1}{\beta_{20}} - \beta_{20}\right) \cdot F_2 + \left(\frac{1}{\beta_{30}} - \beta_{30}\right) \cdot F_3, \quad (5)$$

式中  $\beta_{20}, \beta_{30}$  对应某一位置的放大率。实现变焦后

$$L_2 + L_3 = \left(\frac{1}{\beta_2} - \beta_2\right) \cdot F_2 + \left(\frac{1}{\beta_3} - \beta_3\right) \cdot F_3. \quad (6)$$

可将(5)式和(6)式整理为

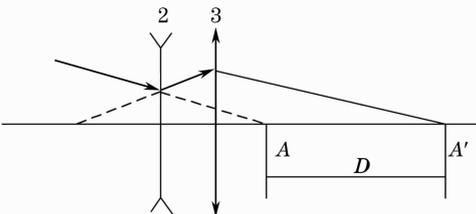


图 1 变焦运动过程

Fig. 1 Zoom movement diagram

$$a\beta_2^2 - b\beta_2 + C = 0, \quad (7)$$

式中

$$a = -F_2 + \frac{1}{\beta}F_3,$$

$$b = \left(\frac{1}{\beta_{20}} - \beta_{20}\right)F_2 + \left(\frac{1}{\beta_{30}} - \beta_{30}\right)F_3,$$

$$C = F_2 - \beta F_3.$$

解(7)式得

$$\beta_2 = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad \beta_3 = \beta/\beta_2. \quad (8)$$

该方法可用于已知初始值  $\beta_{20}, \beta_{30}$ , 并给定变倍比  $\Gamma$  时, 求出相应的  $\beta_2, \beta_3$  [4-6]。

### 2.2 四反射镜系统赛德尔像差理论

单色像差共有 5 种:球差、慧差、像散、像面弯曲及畸变,其三级像差系数分别为  $S_1, S_2, S_3, S_4$  及  $S_5$ 。三级像差理论给出单色像差的表示式为

$$\begin{cases} S_1 = \sum hP + \sum h^4 K \\ S_2 = \sum yP - J \sum W + \sum h^3 yK \\ S_3 = \sum \frac{y^2}{h} P - 2J \sum \frac{y}{h} W + J^2 \sum \Phi + \sum h^2 y^2 K \\ S_4 = \sum \frac{H}{h} \\ S_5 = \sum \frac{y^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{y^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{y}{h} \left(3\Phi + \frac{H}{h}\right) - J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \frac{1}{n^2} \end{cases}. \quad (9)$$

假定:物体位于无穷远,即  $l_1 = \infty, u_1 = 0$ ;入瞳位于主镜上,即  $x_1 = 0, y_1 = 0$ 。四反射光学系统光路如图 2 所示,其主镜  $M_1$ 、次镜  $M_2$ 、三镜  $M_3$  和四镜  $M_4$  的二次非球面系数分别为:  $e_1^2, e_2^2, e_3^2, e_4^2$ 。

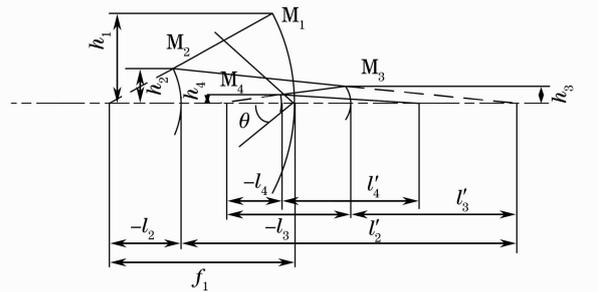


图 2 同轴四反射镜结构图

Fig. 2 Systematic structure of the four-mirror system

$\alpha_i$  定义为该镜对于前一反射镜的遮拦比;  $\beta_i$  定义为该镜对于前一反射镜所成像的放大率。 $r_i$  定义为每个镜面的半径;  $d_i$  定义为该镜到后一反射镜的距离;  $h_i$  为边缘光线在各个镜面上的入射高度;  $y_i$  为

主光线在各个镜面上的入射高度; $K_i$ 为各个镜面归一化非球面系数; $P_i$ 为各个镜面的球差系数; $W_i$ 为各个镜面的慧差系数,

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{l_2}{f'_1} \approx \frac{h_2}{h_1}; \beta_1 = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{u_2}{u'_2} \\ \alpha_2 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{h_3}{h_2}; \beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} = \frac{u_3}{u'_3} \\ \alpha_3 = \frac{l_4}{l'_3} \approx \frac{h_4}{h_3}; \beta_3 = \frac{l'_4}{l_4} = \frac{u_4}{u'_4} \end{cases} \quad (10)$$

对于反射系统  $n_1 = n'_2 = n_3 = n'_4 = 1, n'_1 = n_2 = n'_3 = n_4 = -1$ , 令  $h_1 = 1, f' = 1$  及  $\theta = -1$ , 当光阑位于主镜时,

$$\begin{cases} y_1 = 0 \\ y_2 = \frac{\alpha_1 - 1}{\beta_1 \beta_2 \beta_3} \\ y_3 = \frac{\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)}{\beta_1 \beta_2 \beta_3} \\ y_4 = \frac{\alpha_3 \alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \alpha_3 \beta_1 (1 - \alpha_2) + \beta_1 \beta_2 (\alpha_3 - 1)}{\beta_1 \beta_2 \beta_3} \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} K_1 = \frac{e_1^2}{4} \beta_1^3 \beta_2^3 \beta_3^3; & h_1 = 1 \\ K_2 = -\frac{e_2^2}{4} \frac{(1 + \beta_1)^3 \beta_2^3 \beta_3^3}{\alpha_1^3}; & h_2 = \alpha_1 \\ K_3 = \frac{e_3^2}{4} \frac{(1 + \beta_2)^3 \beta_3^3}{\alpha_1^3 \alpha_2^3}; & h_3 = \alpha_1 \alpha_2 \\ K_4 = \frac{e_4^2}{4} \frac{(1 + \beta_3)^3}{\alpha_1^3 \alpha_2^3 \alpha_3^3}; & h_4 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \end{cases}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_1 = -\frac{\beta_1^3 \beta_2^3 \beta_3^3}{4}; \\ W_1 = \frac{\beta_1^2 \beta_2^2 \beta_3^2}{2} \\ P_2 = \frac{\beta_3^3 \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4}; \\ W_2 = \frac{\beta_3^2 \beta_2^2 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)}{2} \\ P_3 = -\frac{\beta_3^3 (1 - \beta_2)^2 (1 + \beta_2)}{4}; \\ W_3 = \frac{\beta_3^2 (1 - \beta_2)(1 + \beta_2)}{2} \\ P_4 = \frac{(1 - \beta_3)^2 (1 + \beta_3)}{4}; \\ W_4 = \frac{(1 - \beta_3)(1 + \beta_3)}{2} \end{cases}. \quad (13)$$

将以上各参数代入(9)式,令5种单色像差为零,可得到平场曲条件式(14)和非球面系数的线性方程组(15)式

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} = 0, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} h_1^4 & h_2^4 & h_3^4 & h_4^4 \\ h_1^3 y & h_2^3 y & h_3^3 y & h_4^3 y \\ h_1^2 y^2 & h_2^2 y^2 & h_3^2 y^2 & h_4^2 y^2 \\ h_1 y^3 & h_2 y^3 & h_3 y^3 & h_4 y^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

通过求解线性方程组(15)式,可得到球差、慧差、像散和畸变为0时,4个镜子的非球面参数。此时即可确定一个四反射镜光学系统的初始结构<sup>[2]</sup>。

变倍四反射镜光学系统的设计步骤如下:

1) 依据平场曲条件(14)式,确定每个镜子的合理半径  $r_i$ ; 依据系统要求焦距、长度、后截距,确定各个镜子间合理的间隔。然后由(10)式,算得初始轮廓参数  $\alpha_{i0}、\beta_{i0}$ ;

2) 依据变倍比  $\Gamma$  和初始值  $\alpha_{i0}、\beta_{i0}$ ,由(8)式,算得相应的  $\alpha_i、\beta_i$ ;

3) 由轮廓参数即可算得  $h_{i0}、h_i、y_{i0}、y_i、K_{i0}、K_i、P_{i0}、P_i、W_{i0}、W_i$  等参数,由(15)式,可得变倍四反射镜系统的非球面系数的线性方程组

$$\begin{bmatrix} h_{10}^4 & h_{20}^4 & h_{30}^4 & h_{40}^4 \\ h_{10}^3 y & h_{20}^3 y & h_{30}^3 y & h_{40}^3 y \\ h_{10}^2 y^2 & h_{20}^2 y^2 & h_{30}^2 y^2 & h_{40}^2 y^2 \\ h_{10} y^3 & h_{20} y^3 & h_{30} y^3 & h_{40} y^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{1i}^4 & h_{2i}^4 & h_{3i}^4 & h_{4i}^4 \\ h_{1i}^3 y & h_{2i}^3 y & h_{3i}^3 y & h_{4i}^3 y \\ h_{1i}^2 y^2 & h_{2i}^2 y^2 & h_{3i}^2 y^2 & h_{4i}^2 y^2 \\ h_{1i} y^3 & h_{2i} y^3 & h_{3i} y^3 & h_{4i} y^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_{10} \\ A_{20} \\ A_{30} \\ A_{40} \\ \dots \\ A_{1i} \\ A_{2i} \\ A_{3i} \\ A_{4i} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

4) 可将(16)式整理为

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B}, \quad (17)$$

因为未知数的个数小于方程组的个数,没有精确解,可采用最佳最小二乘法进行求解。由数学定理:设矩阵方程  $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$ , 其中  $\mathbf{A} \in \mathbf{C}^{m \times n}, \mathbf{B} \in \mathbf{C}^{m \times k}$ , 则  $\mathbf{X}_0 = \mathbf{A}^+ \mathbf{B}$  是  $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$  的最佳最小二乘解<sup>[7]</sup>, 即可得到变倍四反射镜系统的最佳非球面参数;

5) 将求得同轴变倍四反射镜系统进行光阑离轴或视场倾斜,在软件中进行优化,即可得到无遮拦的离轴变倍四反射镜系统。

### 3 设计实例

#### 3.1 光学系统的设计指标

给出一个设计实例,系统设计参数如表1所示。

### 3.2 光学系统设计及性能分析

根据以上理论及方法,设计好同轴变焦四反系统,然后加入光阑离轴及限制条件,采用光学设计软件 CodeV 优化得到一成像质量良好的无遮拦变焦离轴四反射镜光学系统。系统优化后的参数如表 2 所示,光阑离轴量为 200 mm。

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength / $\mu\text{m}$	3.7~4.8
Focal length /mm	400~800
Entrance pupil /mm	100
Zoom ratio	2
Field of view /( $^\circ$ )	0.64~0.32
Pixel size / $\mu\text{m}$	25
Detector size	128×128

表 2 优化后的离轴四反变焦光学系统结构参数

Table 2 Optimized parameters of four-mirror anastigmatic zoom optical system

Mirror	Radius /mm	Aspherical coefficient	Thickness /mm
Aperture stop	NA	NA	0
Primary mirror	-1023.00	-0.85	Refer to zoom curve
Secondary mirror	-487.72	-1.19	
Tertiary mirror	1149.13	-21.13	
Fourth mirror	200	-1.0	
Image plane	NA	0	0

变焦离轴四反镜系统变倍组和补偿组的运动曲线如图 3 所示。

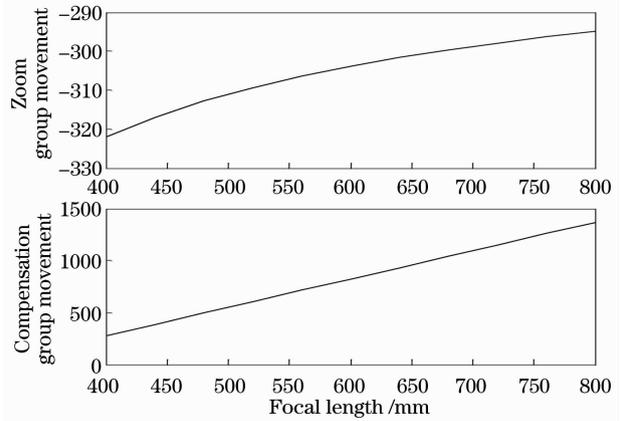


图 3 变倍组和补偿组的运动曲线

Fig. 3 Movement curves of zoom optical system

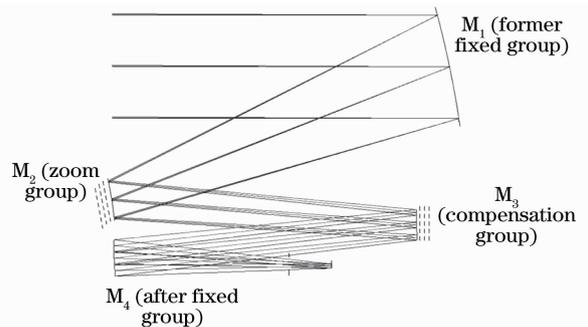


图 4 离轴四反变焦光学系统结构图

Fig. 4 Four-mirror anastigmat zoom optical system layout

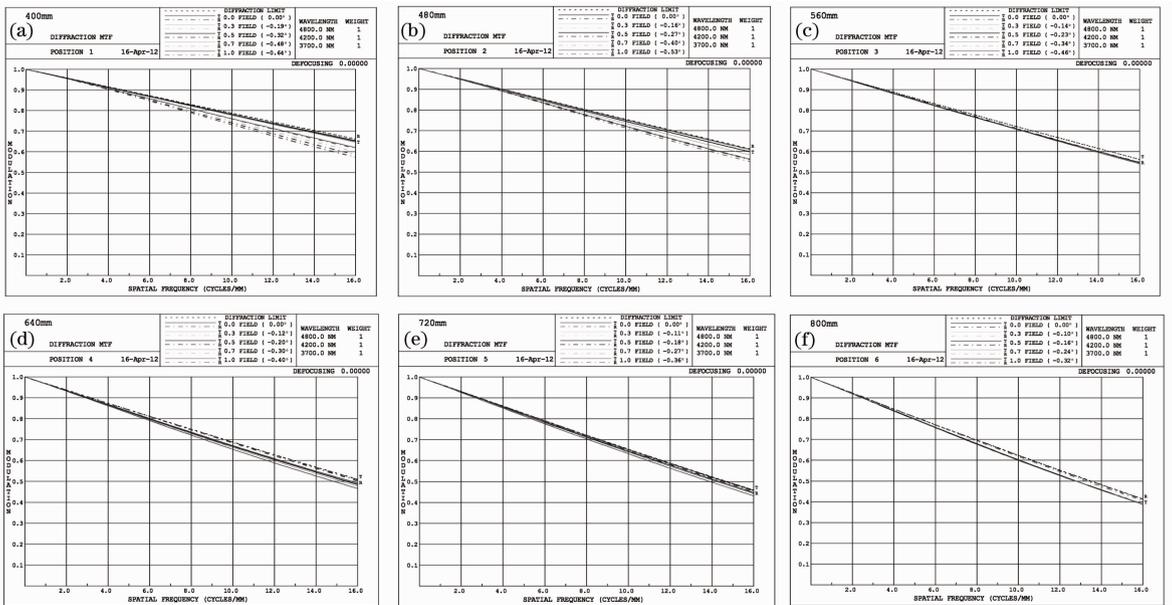


图 5 系统调制传递函数图。(a) EFL(有效焦距)=400 mm; (b) EFL=480 mm; (c) EFL=560 mm; (d) EFL=640 mm; (e) EFL=720 mm; (f) EFL=800 mm

Fig. 5 MTF curves of the system, (a) EFL (effective focal length)=400 mm; (b) EFL=480 mm; (c) EFL=560 mm; (d) EFL=640 mm; (e) EFL=720 mm; (f) EFL=800 mm

变焦离轴四反镜系统结构如图 4 所示。

变焦离轴四反射镜系统在连续变焦过程中的调制传递函数(MTF)如图 5 所示。

利用 CodeV 软件默认公差数据对变焦四反射

光学系统进行公差分析,结果如表 3 所示。由表可知,变焦光学系统有 97.7% 概率,光学传递函数下降的最大值为 0.041,符合加工和装配条件。

表 3 系统公差分析

Table 3 Tolerance analysis of system

Field of view	97.7% probable change in MTF					
	EFL /mm					
	400	480	560	640	720	800
0	-0.041	-0.008	-0.011	-0.018	-0.012	-0.0306
0.3	-0.018	-0.008	-0.010	-0.019	-0.014	-0.031
0.5	-0.010	-0.009	-0.010	-0.021	-0.017	-0.030
0.7	-0.016	-0.009	-0.010	-0.024	-0.020	-0.025
1	-0.027	-0.011	-0.011	-0.026	-0.021	-0.022

该设计中,由三镜出射至四镜的光束为平行光,可将四镜替换为汇聚系统,前三镜作为一个单独的望远系统,从而实现不同的设计功能。例如,四镜替换为二次成像系统,实现系统出瞳与探测器冷光阑匹配,实现红外系统冷光阑效率 100%。

## 4 结 论

介绍了一种基于最佳最小二乘法和赛德尔像差理论的变焦四反射镜设计方法。推导了反射系统的机械补偿条件,建立了基于赛德尔像差理论的连续变焦四反射镜系统的线性约束方程组,采用最佳最小二乘法求解,得到系统的初始结构及变倍组和补偿组的运动曲线。实例设计证明了该方法的正确性和可行性,反射式IRST系统在连续变焦过程中,系统MTF接近衍射极限,像质良好。

## 参 考 文 献

1 Li Fudong. Status and development of airborne IRST systems

[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(5): 409~412

李富栋. 机载红外搜索与跟踪系统的现状与发展[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(5): 409~412

2 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surface [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004

潘君骅. 光学非球面的设计与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004

3 J. M. Rodgers. Compact unobscured four-mirror optical system [P]. OSA IODC, 1994, **22**: 356

4 An Liansheng. Applied Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002

安连生. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002

5 Li Lin. Modern Optical Design Method [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009

李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009

6 Zhang Tingcheng, Liu Liping, Chang Jun *et al.*. Design of infrared zoom system with 4 reflective mirrors[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2010, **29**(3): 196~200

张庭成, 刘莉萍, 常军等. 四反射镜红外变焦距系统设计[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(3): 196~200

7 Yang Ming, Liu Xianzhong. Matrix Analysis [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2010

杨明, 刘先忠. 矩阵论[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010

栏目编辑: 胡冰