

## 基于像方摆扫的空间红外双波段光学系统设计

李 刚<sup>1,2</sup>, 樊学武<sup>1</sup>, 邹刚毅<sup>1,2</sup>, 王红娟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 红外探测器的尺寸是制约光学系统大幅宽成像的重要因素, 选择合适的光学系统结构和成像方式, 则可以规避探测器的限制。文中提出了一种像方摆扫成像模式, 基于成熟的常规尺寸红外面阵探测器, 采用多帧图像拼接的方式, 满足了光学系统的大幅宽成像要求。鉴于像方摆扫需要在平行光路中进行, 在两反无焦系统的基础上, 研究了三反无焦系统的设计方法, 给出了初始结构的计算公式。光学系统总体上分为前置的无焦压缩系统、扫描摆镜、成像组。其中, 扫描摆镜位于平行光路中的出瞳位置, 采用视场分光的方式分别实现中波红外和长波红外成像, 通过仿真分析, 光学系统的冷反射得到有效抑制, MTF 接近衍射极限。

**关键词:** 红外双波段; 三反无焦系统; 像方摆扫; 光学设计

**中图分类号:** TN216   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0861-06

## Design of space optical system with double infrared waveband based on image space scanning

Li Gang<sup>1,2</sup>, Fan Xuewu<sup>1</sup>, Zou Gangyi<sup>1,2</sup>, Wang Hongjuan<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The design of optical systems with wide ground coverage are restricted by the size of infrared detector. This problem can be solved by choosing the appropriate imaging mode. A kind of image space scanning method was given in the paper. It could satisfy the optical systems with general area infrared detectors. The picture was built by image mosaics technology. Because the image space scanning method needs to be done in the parallel light path, the design method of three-mirror afocal system was studied based on two-mirror afocal system and the formulas to compute the initial structure was given. The optical system consists of afocal system, scanning mirror and imaging part. The scanning mirror was placed at the exit pupil of the afocal system. The MWIR and LWIR were separated by the field-bias method and imaged respectively. The simulation analysis shows that the Narcissus is under control and the MTF of the optical system is very close to the diffraction limit.

**Key words:** double infrared waveband; three-mirror afocal system; image space scanning; optical design

收稿日期: 2013-07-05; 修订日期: 2013-08-12

基金项目: 青年基金(61107008); 西部之光(J11-022)

作者简介: 李刚(1985-), 男, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究。Email: ligang85@opt.ac.cn

导师简介: 樊学武(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光学设计、光学检测方面的研究。Email: fanxuewu@opt.ac.cn

## 0 引言

红外光学系统在空间遥感中有着重要的应用价值,随着空间光学系统分辨率的提高,系统口径和焦距进一步增大,像面也随之增大,而红外探测器的尺寸相对较小。目前,面阵的中波红外探测器已经可以做到  $2048 \times 2048$  元,长波红外可以做到  $640 \times 480$  元<sup>[1]</sup>。长线阵探测器有 768 元、960 元、1500 元等,对于更长线阵的探测器,则只能根据系统的要求进行专门研制<sup>[2]</sup>。探测器成为制约红外成像系统分辨率的主要因素之一。针对空间大幅宽成像的红外光学系统,文中提出了一种像方扫描方式,使用常规尺寸红外面阵探测器,采用多帧图像拼接的方式,满足了大幅宽成像系统的要求。

对于大口径扫描光学系统,采用像方摆扫方式成像,需要无焦压缩系统,文中在两反无焦系统的基础上,研究了三反无焦系统的设计方法,并给出了相应的初始结构计算公式。依此,设计了一种大口径的空间红外双波段光学系统。

## 1 设计思路

### 1.1 光学系统的成像方式

空间相机因为在轨运动,一般都使用长线阵探测器沿轨推扫成像,对于如文中设计的光学系统(指标见表 1),若采用推扫方式,根据光学系统像面大小与焦距和视场的关系  $2h' = 2f \tan w$  ( $w$  为半视场角),需要的线阵探测器垂直推扫方向上的最少像元数分别为:中波红外 2 234 元,长波红外 1 340 元,目前,红外探测器的拼接仍有一定的技术难度。文中选用法国 Sofradir 公司的两款常规的制冷型面阵红外探测器,具体型号参数如表 2 所示。

表 1 光学系统参数

Tab.1 Parameter of optical system

	Wavelength/ $\mu\text{m}$	Focal length/mm	Field of view/( $^\circ$ )	Diameter/mm
MWIR	3.7-4.8	1 600	1.2 $\times$ 0.3	800
LWIR	7.7-9.5	1 600	1.2 $\times$ 0.3	800

注:光学系统沿轨方向视场为  $0.3^\circ$

表 2 红外探测器参数

Tab.2 Parameter of the IR detector

Type	Detector spectrum/ $\mu\text{m}$	Format	Pixel pitch	$F$ number
Scorpio MW	3.7-4.8	640 $\times$ 480	15 $\times$ 15	2
VEGA LW	7.7-9.5	384 $\times$ 288	25 $\times$ 25	2

使用如图 1 所示的扫描方式工作,探测器在沿轨方向 ( $0.3^\circ$ ) 实现满视场覆盖,在垂直轨道方向 ( $1.2^\circ$ ) 进行扫描,然后再进行图像拼接,从而使常规的面阵探测器可以用于在轨运动的大幅宽光学系统成像。对于文中的系统,中波红外和长波红外都只需要摆动 5 次即可完成一次全视场成像。

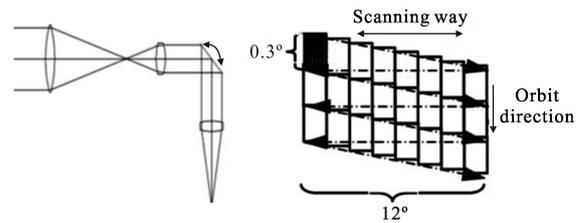


图 1 摆扫系统简图及推扫方式

Fig.1 Scanning system and scanning way

采用这种扫描方式时,相机的沿轨运动会引起一定的像移,导致像面模糊。需要使用焦面的移动来抵消相机运动所产生的像移,达到稳定像面的目的。

### 1.2 光学系统的选型

大口径的高质量透镜材料难以制作和加工,在空间光学系统中,超过 500 mm 口径,几乎都采用反射式光学系统<sup>[3]</sup>。文中设计的系统口径为 800 mm,故选用反射式结构,光学系统由无焦压缩系统、扫描摆镜和成像组组成,摆镜位于前置无焦压缩系统的出瞳位置处,成像组的入瞳与前置无焦系统的出瞳重合,使用面阵探测器,采用像方摆扫方式成像。

## 2 光学系统设计方法

### 2.1 无焦压缩系统设计

对于多波段的光学系统,若采用折反式压缩系统,则需要较多的透镜来平衡色差。全反式系统则不需要考虑色差的影响,可以简化系统结构。在全反式无焦系统中,两反式系统自由参数只有四个( $e_1^2$ 、 $e_2^2$ 、

$\alpha$ 、 $\beta$ ),最多只能同时消除四种像差<sup>[4]</sup>。因此,考虑采用三反结构来增加变量,以消除全部五种初级像差。采用三反结构时,对称视场反射系统的出瞳淹没在系统光路中,为了使出瞳偏出光路,以便在此放置摆镜,在Y方向使用偏视场。综合考虑系统压缩后的口径及后置成像系统设计难度,选择30倍缩束比。两反无焦压缩系统较为简单,主次镜为抛物面<sup>[4]</sup>,即二次曲面系数均为: $k=-e^2=-1$ 。在三反无焦压缩系统中,次镜可以看作是两反结构中加入的一个反射镜来校正像差。因此,主镜和三镜的二次曲面系数可设定为: $k_1=-e_1^2=-1$ 、 $k_3=-e_3^2=-1$ 。从另一个角度,又可认为主镜与次镜组成了经典的卡塞格林系统。依照卡塞格林系统设计主次镜的初始结构,考虑到系统的紧凑性,取主镜焦距 $D/f_1'=1:1.5$ ,可计算出次镜的曲率半径。三反无焦压缩系统的初始结构可用以下公式确定:

$$R_1 = -2f_1' \tag{1}$$

$$R_2 = \frac{\alpha_1 \beta_1}{\beta_1 + 1} R_1 \tag{2}$$

$$k_2 = -e_2^2 = -\frac{(1-\beta_1)^2}{(1+\beta_1)^2} \tag{3}$$

$$d_1 = \frac{1}{2} R_1 (1-\alpha_1) \tag{4}$$

$$R_3 = -2f_3' = -\frac{2\beta_1 f_1'}{m} \tag{5}$$

$$d_2 = \frac{1}{2} (\alpha_1 \beta_1 R_1 - R_3) \tag{6}$$

式中: $m$ 为缩束比。给定次镜的遮拦比 $\alpha_1$ 和放大率 $\beta_1$ ,则可由以上公式得到系统的结构参数,确定系统的初始结构。

### 2.2 成像系统设计

光学系统经过无焦压缩系统缩束以后,视场会相应的增大,反射式系统的视场一般较小,故成像组使用透射式结构。

使用制冷型探测器时,在探测器前一定距离处设有冷屏,成像系统的出瞳必须与冷屏重合,即系统的光阑经光学系统后成像在冷屏位置,且像的大小与冷屏相同。这样才能达到100%冷光阑效应,起到抑制杂光的作用,提高系统信噪比。因此,需要用二次成像来使系统具有100%冷光阑效率。

二次成像光学系统简图如图2所示,其中 $D_I$ 为

入瞳直径, $l_a$ 为入瞳到物镜的距离(负值), $\phi_s'$ 为入瞳经系统成像后的口径,与制冷型探测器的冷屏相匹配, $l_b$ 为转像系统到成像物镜焦点的距离(负值)。具体参数由公式(7)~(8)计算可得。

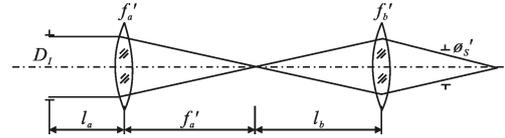


图2 光阑前置红外光学系统简图

Fig.2 Infrared optical system with the stop in the front

$$l_b = \frac{B(1-A)(l_a' - f_a')}{A-B} \tag{7}$$

$$f_b' = -\frac{f' l_b}{f_a' + f'} \tag{8}$$

式中: $l_a' = \frac{l_a f_a'}{f_a' + l_a}$ ;  $A = -\frac{f'}{f_a'}$ ;  $B = -\frac{l_a}{M l_a'}$ ;  $M = \frac{D_I}{\phi_s'}$ ;  $D_I$ 、 $f'$ 由具体方案来选定,红外探测器选定后, $\phi_s'$ 就定了,当选定 $f_a'$ ,其余量均可计算得出,因此,只要根据系统参数选定前组,转像系统的位置及焦距均可确定,从而整个系统的初始结构就确定了<sup>[5]</sup>。

成像系统的参数由以下公式确定:

$$f_i = \frac{f}{m} \quad D_I = \frac{D}{m} \quad \omega_i = m \omega \tag{9}$$

式中: $f$ 、 $D$ 、 $\omega$ 分别为总系统设计参数; $f_i$ 、 $D_I$ 、 $\omega_i$ 为成像系统设计参数; $m$ 为压缩比。

## 3 设计实例

### 3.1 无焦压缩系统

根据系统结构和布局,取次镜遮拦比为 $\alpha_1=0.20$ ,放大率 $\beta_1=-7$ 。缩放比 $m=-30$ ,口径 $D=800$  mm,代入公式(1)~(6)计算可得系统初始参数为:

$$R_1 = -2400 \quad R_2 = -560 \quad R_3 = -560$$

$$k_2 = -1.778 \quad d_1 = -960 \quad d_2 = 1960$$

再结合前面的讨论可知, $k_1=-1$ 、 $k_3=-1$ ,得到了初始结构的全部参数。采用Y方向偏视场并逐步扩大视场进行优化,当使视场偏置 $0.45^\circ$ 时,出瞳偏出光路,选取9个视场来分析系统性能,依次为 $(0^\circ, 0.3^\circ)$ 、 $(0^\circ, 0.45^\circ)$ 、 $(0^\circ, 0.6^\circ)$ 、 $(0.3^\circ, 0.3^\circ)$ 、 $(0.3^\circ, 0.45^\circ)$ 、 $(0.3^\circ, 0.6^\circ)$ 、 $(0.6^\circ, 0.3^\circ)$ 、 $(0.6^\circ, 0.45^\circ)$ 、 $(0.6^\circ, 0.6^\circ)$ 。最后得到的无焦压缩系统如图3所示。

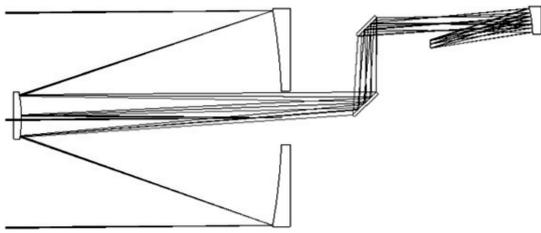


图 3 无焦压缩系统

Fig.3 Afocal compression system

### 3.2 成像系统

由公式(9)可得,红外成像系统的焦距为53.34 mm。通光口径均为 26.67 mm,视场为  $36^\circ \times 9^\circ$ 。红外系统设计参数可由公式(7)~(8)求出。综合考虑系统布局,取  $f_a''=80$  mm,  $l_a=-100$  mm。冷屏尺寸  $\phi_s'=10.55$  mm,计算得:

$$l_b=-68.89 \text{ mm} \quad f_b''=27.56 \text{ mm}$$

中波红外和长波红外焦距和口径相同,因此系统参数也相同。设计时,先按照计算结果,使用简单透镜搭建起初始结构,然后逐步扩大视场,对简单透镜进行复杂化,逐步优化,中波红外使用硅和锗,长波红外使用硒化锌和锗,利用不同的材料搭配以校正色差。为了保证系统的透过率,只使用六片透镜,部分表面使用了非球面来校正像差,最终系统设计结果如图 4 所示。系统均达到了 100%冷光阑的设计要求。

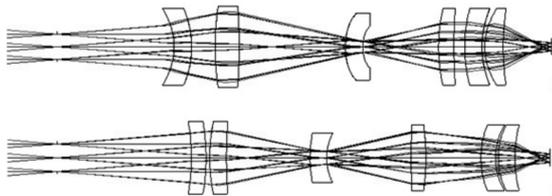


图 4 中波红外系统(上)、长波红外系统(下)

Fig.4 MWIR system(top) and LWIR system(bottom)

### 3.3 冷反射分析

制冷型红外系统中普遍存在冷反射,由于探测器光敏面的工作温度与光学系统的温度相差很大,是非常强的冷辐射源,它的辐射经系统中各透镜表面反射回来进入光敏面,由此产生了制冷型探测器自身的像<sup>[6]</sup>。冷反射通常表现为在图像中心有一个黑斑,严重时将影响系统的成像性能,因此,在光学设计时应尽量抑制冷反射的发生。由于冷反射发生在透镜的各表面,因此,在设计后接的透射成像系统时应加以考虑。

文中在透射系统设计过程中,对系统的冷反射进行了控制,尽量提高冷光线在各个折射面上的 YNI 值,使得冷反射返回探测器时产生离焦,被冷光阑和其他孔径遮拦;提高  $I/i$  的比值,使其尽量大于 1 或小于 -1,阻碍冷反射随视场的变化( $Y$  为边缘光线高度,  $N$  为折射率,  $I$  为边缘光线的入射角度,  $i$  为主光线入射角度)<sup>[7]</sup>。

使用 CODE V 软件对系统的冷反射进行分析,设定的环境温度为  $20^\circ\text{C}$ ,探测器工作温度为  $77\text{K}$ ,透镜表面反射率为 1%。分析结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 中波红外冷反射分析结果

Tab.3 Narcissus analysis results of MWIR

Reflection surface	Clipping aperture	YNI	$I/i$	Narcissus intensity ratio
2	8(R)	-2.488 6	3.424	0.294 18
3	8(R)	-0.980 2	-2.981	3.087 47
4	8(R)	3.014 0	0.852	0.094 32
5	8(R)	-3.155 1	1.939	0.135 28
6	10(R)	-0.126 5	-5.202	4.509 07
7	10(F)	-0.012 1	-1.162	4.963 98
8	10(R)	3.735 4	-3.603	1.494 22
9	10(F)	1.142 5	2.598	4.963 98
10	10(F)	2.178 3	260.670	4.963 98
11	14(R)	5.164 3	-3.962	1.116 53
12	14(R)	6.730 0	-3.517	0.646 43

表 4 长波红外冷反射分析结果

Tab.4 Narcissus analysis results of LWIR

Reflection surface	Clipping aperture	YNI	$I/i$	Narcissus intensity ratio
2	7(R)	-0.921 3	-2.638	3.974 44
3	7(R)	1.113 3	-3.010	3.890 53
4	9(R)	-1.603 8	0.670	0.497 53
5	9(R)	-0.120 1	5.529	1.144 93
6	14(F)	0.041 5	-10.101	6.073 78
7	14(R)	2.442 5	-1.013	5.500 59
8	14(R)	-1.685 9	-3.417	1.539 54
9	14(R)	1.021 2	-0.754	0.343 97
10	14(F)	1.021 2	1.530	6.073 78
11	14(F)	1.628 3	3.108	6.073 78
12	14(F)	1.410 2	2.240	6.073 78

由表 3 可以看出,中波红外除了第 4 个表面(第 1 个面为光阑),其他各面  $I/i$  的比值均大于 1 或者小于 -1。第 4 个表面的  $I/i$  比值虽然小于 1,但其冷反射强度比仅为 0.094 32。所以,可以认为整个系统的

冷反射得到了很好的抑制。

同样,表 4 中第 4 和第 9 个表面的  $I/i$  比值也小于 1,其冷反射强度比也比较小,所以,系统的冷反射也得到了较好的抑制。

### 3.4 系统合成

对于分组拼接的光学系统,各个部分独立设计,当系统进行拼接时,应注意光瞳的匹配问题,即保证成像系统的入瞳与前置系统的出瞳重合。特别是对于摆扫系统和红外制冷系统,这样的要求显得尤为重要。前置无焦系统与后置的成像组合成以后,在根据系统结构和布局,将中波红外与长波红外集成在一个系统中。

中波红外、长波红外合成时,其在 X 方向视场均为  $-0.6^\circ \sim 0.6^\circ$ ,中波红外在 Y 方向视场为  $0.3^\circ \sim 0.6^\circ$ ,长波红外在 Y 方向视场为  $-0.3^\circ \sim -0.6^\circ$ 。通过相互对称的 Y 方向偏视场将中波红外与长波红外分离,合成系统如图 5 所示。

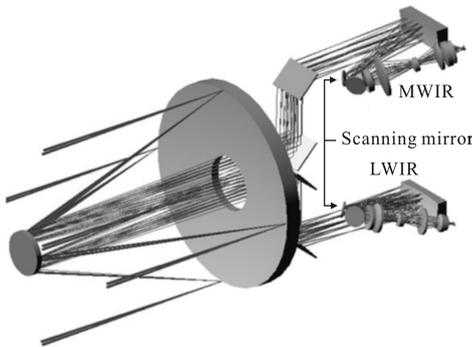


图 5 光学系统合成图

Fig.5 Integrative optical system

各系统的 MTF 如图 6 所示。

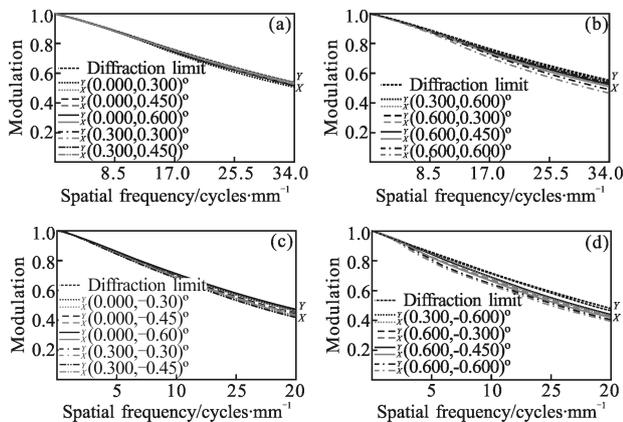


图 6 合成系统 MTF(上:中波红外;下:长波红外)

Fig.6 MTF of the integrative system (top: MWIR; bottom: LWIR)

由图 6 可以看出,成像系统与前置无焦压缩系统合成后的系统成像质量良好,MTF 接近衍射极限,中波红外系统 MTF 在 34 lp/mm 处达到 0.4 以上,长波红外系统 MTF 在 20 lp/mm 处达到 0.4 以上,系统性能良好。

### 3.5 扫描成像仿真

红外光学系统使用面阵探测器,在  $1.2^\circ$  视场方向采用摆扫方式进行成像,即探测器在垂直轨道方向上按照图 2 所示的摆扫方式从视场  $-0.6^\circ$  向  $0.6^\circ$  往返扫描成像。为了保证系统的可靠性,需要对摆扫系统的性能进行仿真。成像系统中,边缘视场的像质一般比其他视场低,因此,选取边缘视场摆扫时的成像质量为参考。系统在  $1.2^\circ$  视场的方向对称,所以,只需要验证从  $-0.6^\circ$  视场摆扫到  $0.6^\circ$  视场的成像质量即可。物方摆扫成像时,摆镜摆扫角度为  $0.6^\circ$ ,系统缩放比例为 1:30,因此像方摆扫角度为  $18^\circ$ 。摆扫后的传递函数如图 7 所示。

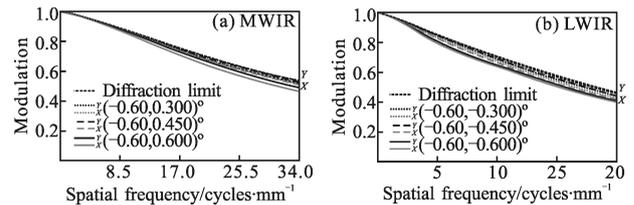


图 7 视场从  $-0.6^\circ$  摆扫到  $0.6^\circ$  后的 MTF

Fig.7 MTF after scan from field  $-0.6^\circ$  to  $0.6^\circ$

由图中可以看出,中波红外摆扫后的 MTF 在 34 lp/mm 处达到 0.4 以上;长波红外摆扫的 MTF 在 20 lp/mm 处达到 0.4 以上,系统性能良好。

## 4 结 论

针对目前大尺寸红外探测器拼接困难,且不易获得,文中提出了一种像方摆扫成像方式,使用成熟的常规尺寸面阵红外探测器来完成大幅宽光学系统的成像。

对于扫描光学系统中的无焦压缩系统,研究了无反无焦系统的设计方法,给出了初始结构的设计公式。并依此设计了一种大幅宽成像的大口径空间红外双波段光学系统,使用常用的两款面阵红外探测器,采用像方扫描方式成像,设计结果接近衍射极限,冷反射得到有效抑制,质量良好。

### 参考文献:

[1] Wang Xiaofei, Zhang Haiyan. Development of infrared focal

- plane array imaging guidance technology[J]. *Tactical Missile Technology July*, 2010(4): 120–123. (in Chinese)  
王晓飞, 张海燕. 红外焦平面阵列成像制导技术的发展[J]. 战术导弹技术, 2010(4): 120–123.
- [2] Cai Yi. The scanning and starring FPA in infrared systems [J]. *Infrared Technology*, 2001, 23(1): 3–7. (in Chinese)  
蔡毅. 红外系统中的扫描型和凝视型 FPA [J]. 红外技术, 2001, 23(1): 3–7.
- [3] Ming Ming, Yang Fei, Zhao Jinyu, et al. Catadioptric optical system with large aperture, wide field of view and broad waveband[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 41(1): 149–154. (in Chinese)  
明名, 杨飞, 赵金宇, 等. 折反式大口径、大视场、宽波段光学系统[J]. 红外与激光工程, 2010, 41(1): 149–154.
- [4] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of The Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. (in Chinese)  
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, 2004.
- [5] Pan Junhua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1475–1478. (in Chinese)  
潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计 [J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1475–1478.
- [6] Liu Xin, Pan Zhifeng. Analysis and quantitative calculating methods for Narcissus of infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1684–1689. (in Chinese)  
刘欣, 潘枝峰. 红外光学系统冷反射分析和定量计算方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1684–1689.
- [7] Wang Shanshan, Liang Yuhong, Xiang Yang. A inhibition of Narcissus based on optical optimization design[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2012, 35(3): 16–18. (in Chinese)  
王珊珊, 梁宇宏, 向阳. 一种基于光学优化设计的冷反射抑制[J]. 长春理工大学学报, 2012, 35(3): 16–18.