

〈系统与amp;设计〉

中波红外光学系统无热化设计

刘秀军, 张金旺, 彭 垚

(四川长虹电子科技有限公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 介绍了无热化在红外光学系统中的作用和意义, 分析了温度对光学参量的影响, 探讨了无热化设计方法及光学被动式无热化基本原理。设计了一种用于 320×256 制冷型探测器光学被动式无热化中波红外光学系统, 镜筒材料采用钛合金, 光学材料为硅、锗和硒化锌组合消热差。该系统在-50~70℃温度范围内, 最大离焦量小于1倍焦深, 空间分辨率17 lp/mm处, 光学调制传递函数(MTF)值大于0.7, 比较接近衍射极限, 探测器单像元内能量集中度大于84%。分析结果表明: 该系统具有良好的成像质量和无热效果。

关键词: 中波红外; 光学设计; 无热化设计; 二次成像

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2012)10-0602-06

Athermal Design of a MWIR Optical System

LIU Xiu-jun, ZHANG Jin-wang, PENG Yao

(Sichuan Changhong Electronics Technology Development Co., Ltd, Mianyang 621000, China)

Abstract: The function and meaning of athermalization in infrared optical system was introduced. The influence of temperature on the optical parameters was analyzed. The athermal design methods and the principle of optical passive thermalisation were discussed. A midwave infrared optical system for 320×256 cooled detector was designed, in which the optical passive athermalisation was applied using optical material Si Ge and ZnSe with mechanical material titanium alloy in the optical system. The MTF is greater than 0.7, which close to diffraction limit in the spatial frequency 17 lp/mm, and more than 84% of the diffraction energy was focused in single pixel within -50~70℃. Those results show that the optical system has good image quality and athermal effect.

Key words: MWIR, optical design, athermal design, re-imaging

0 引言

通常设计的光学系统, 都是考虑在常温或温度变化不大条件下使用, 光学结构参数一经设计完成, 就基本固定不变, 成像质量较为稳定。而军用光学仪器的工作温度范围较宽, 光学系统所承受的温度变化极大, 光学材料的折射率、厚度、曲率半径等参数都随温度的变化而发生变化, 从而引起成像质量的降低。所以, 光学设计者必须探索在较大温度范围内光学系统性能指标的变化, 采取措施防止性能衰减。为了消除或降低温度效应带来成像质量的降低, 通常需要采用一定的补偿技术, 使得光学系统在一个较大温度

范围内保持良好的成像质量, 这种消除或降低温度变化对光学系统成像质量影响的技术被称为无热化技术^[1-3]。随着红外技术的发展, 特别是军用红外光学仪器的广泛应用, 对红外光学系统性能要求也越来越高, 这使红外光学系统的无热化设计显得尤为重要。

1 温度对光学参量的影响

温度变化使光学参量如材料折射率、镜片厚度、曲率半径、非球面系数、镜片间隔等发生变化, 从而导致光学系统性能的降低, 光学参量随温度的变化关系如表1所示^[4,5]。

收稿日期: 2012-9-2.

作者简介: 刘秀军(1980-), 男, 黑龙江绥化人, 硕士, 工程师, 主要从事红外光学系统设计及整机评价方面工作。

下面对表1所列非球面系数随温度的变化关系做简要分析证明，其过程如下^[5]。

高次非球面方程为：

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + A_1r^1 + A_2r^2 + A_3r^3 + A_4r^4 + \dots \quad (1)$$

式中： z 是轴向坐标； c 是曲率； r 是径向坐标； k 是圆锥系数。当温度从 T 变为 $T + dT$ 时， $z' = z \cdot (1 + \alpha_0 \cdot dT)$ 、 $r' = r \cdot (1 + \alpha_0 \cdot dT)$ ，设 $\alpha = 1 + \alpha_0 \cdot dT$ ，将 $z = z'/\alpha$ 、 $r = r'/\alpha$ 带入公式(1)，令 $c' = c/\alpha$ ，整理可得到方程：

$$z' = \frac{c'r'^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c'^2r'^2}} + A_1r'^1 + \frac{A_2}{\alpha}r'^2 + \frac{A_3}{\alpha^2}r'^3 + \frac{A_4}{\alpha^3}r'^4 + \dots \quad (2)$$

从(1)、(2)两式对比可以看出，当温度发生变化时，非球面的圆锥系数不变，高次方的系数分别变成 A_1 、 $A_2/(1 + \alpha_0 \cdot dT)$ 、 $A_3/(1 + \alpha_0 \cdot dT)^2$ 、 $A_4/(1 + \alpha_0 \cdot dT)^3 \dots$ ，即如表1所示。

表1 光学参量随温度的变化

Table 1 Optical parameters change with temperature

类别	温度 T	温度 $T+dT$
镜片	折射率 N	$N + (dN/dT)dT$
	厚度 D	$D(1 + \alpha_0 \cdot dT)$
	曲率半径 R	$R(1 + \alpha_0 \cdot dT)$
	圆锥系数 k	k
	一次项系数 A_1	A_1
	二次项系数 A_2	$A_2/(1 + \alpha_0 \cdot dT)$
	三次项系数 A_3	$A_3/(1 + \alpha_0 \cdot dT)^2$
非球面系数	四次项系数 A_4	$A_4/(1 + \alpha_0 \cdot dT)^3$
	\vdots	\vdots
	间隔	L

注： α_0 为光学材料的热膨胀系数； α_n 为间隔材料（镜筒）的热膨胀系数； dN/dT 为折射率温度梯度。

2 无热化设计方法

为了消除或降低温度效应对成像质量的影响，在设计过程中需要通过一定的补偿技术，使光学系统在一个比较大的温度范围内保持焦距不变或者变化很小，从而保持良好的成像质量。目前常采用的光学系统无热化设计方法大致有三种：第一种机械被动式，它是利用对温度敏感的机械材料或记忆合金，使一个或一组透镜产生轴向位移，从而补偿由于温度变化引起的像面位移。这种方法需要计算不同温度下最佳像面的位置，根据最佳像面的位移，

通过金属的不同伸缩量补偿像面的位移，此方法不能矫正热效应导致的像差失衡，即使能够补偿最佳像面位移，也很难维持原来的成像质量。另外，这种方法额外增加了机械补偿部件，使得系统的体积变大，质量增加。第二种电子主动式，它是利用温度传感器探测出温度的变化量，然后计算出温度变化引起的像面位移，借助电机驱动透镜产生轴向位移，以达到补偿效果。这种方法采用大量温度传感器，因此能处理系统温度的梯度变化，准确求解温度与像面位移的关系。这种方法同样不能维持原有的像差平衡，况且这种方法需要电源、电子线路、驱动电机等电子设备，导致系统的可靠性下降，并且电子设备和驱动部件还占用一定的空间，体积和重量较大。第三种光学被动式，它是利用光学材料热特性之间的差异，通过不同特性材料之间的合理组合以消除温度的影响，从而获得无热效果。这种方式具有机构相对简单、尺寸小、重量轻、不需供电、系统可靠性好的优点，其综合效率最高。

3 光学被动式无热化基本原理

由于光学材料的色散特性和热特性，首先引入色差系数 ν 和热差系数 χ 。设单透镜光焦度为 ϕ ，当温度改变 ΔT 时引起的光焦度变化设为 $\Delta\phi_T$ ，工作波段 $\Delta\lambda$ 引起的光焦度变化为 $\Delta\phi_\lambda$ ，那么：

$$\nu = \frac{\Delta\phi_\lambda}{\phi} = \frac{n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}}{n_{\lambda 0} - 1} \quad (3)$$

$$\chi = \frac{\Delta\phi_T}{\phi} = -\frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \frac{1}{n-1} \left(\frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right) - \alpha_g \quad (4)$$

式中： $n_{\lambda 0}$ 为中心波长的折射率； $n_{\lambda 1}$ 、 $n_{\lambda 2}$ 分别是波长为 λ_1 和 λ_2 时的折射率； α_g 是热膨胀系数。色差系数 ν 和热差系数 χ 与透镜材料有关， ν 和 χ 既是透镜成像质量的指标，又是材料的性能指标，不同材料具有不同的 ν 、 χ 值。以 ν 、 χ 为坐标轴的笛卡尔坐标系中，每一种材料对应一个点。如果选择得当，可使不同材料的热差和色差都能得到相互补偿，使得系统能够在消热差的同时消色差。

为了使系统能够满足光焦度、消热差以及消色差的要求，则应该满足以下三个方程^[6]：

光焦度分配要求：

$$\sum_{i=1}^n h_i \phi_i = \phi \quad (5)$$

消轴向色差要求：

$$\Delta f_b^T = \left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^n (h_i^2 \nu_i \phi_i) = 0 \quad (6)$$

消热差要求:

$$df_b^T / dT = \left(\frac{1}{h_i \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^n (h_i^2 \chi_i \phi_i) = \alpha_h L \quad (7)$$

式中: h_i 为第一近轴光线在各透镜的投射高度; ϕ_i 为各透镜的光焦度; ϕ 为系统总光焦度; v_i 为各透镜的色差系数; χ_i 为热差系数; α_h 为机械结构的线膨胀系数; L 为机械结构件长度。

4 光学设计

4.1 主要技术指标

按照系统要求, 该中波红外光学系统的主要设计指标如表2所示。

表2 系统设计参数

工作波段/ μm	3.7~4.8
焦距/mm	100
视场角/ $^\circ$	5.48×4.39
F/#	2
工作温度/ $^\circ\text{C}$	-50~70
探测器	制冷型, 320×256 像元, 单像元 30 μm ×30 μm

4.2 设计思路

设计思路大致可分为三步: 第一步, 找到常温(20 $^\circ\text{C}$)条件下像质较好的初始结构; 第二步, 根据系统要求的温度范围, 利用自动热分析功能, 在初始结构的基础上, 增加其他具有代表性的温度结构, 将空气栏对应的温度膨胀系数改成镜筒材料的温度膨胀系数, 分析各温度下系统焦距变化和像面位移情况; 第三步, 采取一定的无热技术, 补偿温度效应产生的影响, 进行相差平衡, 使系统在要求的温度范围内保持良好的成像质量。

4.2.1 光学结构的选择

因探测器为制冷型, 光学系统要与探测器匹配, 为此在光学设计中需将探测器的冷阑作为系统孔径光阑。一次成像光学结构如考虑冷阑匹配, 为消除

渐晕会使系统入瞳口径加大, 导致前端透镜口径增大, 致使光学系统的径向尺寸明显加大^[7]。二次成像光学结构在实现与探测器冷阑匹配的同时可减小前段透镜口径, 但会增加系统轴向尺寸和镜片数量。因本成像系统需与前端望远系统配合, 入瞳口径受到限制, 所以选用二次成像光学结构。

4.2.2 无热技术的使用

镜筒材料选择热膨胀系数较小的钛合金TC4(线膨胀系数 $\alpha_h=8.8\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), 镜片使用硅、锗、硒化锌三种常用红外光学材料, 三种材料在3~5 μm 的相关特性参数见表3。为消除系统热差, 选用了折射率温度系数较大的锗做负透镜, 折射率温度系数较小的硅、硒化锌做正透镜。为了更好地校正系统像差特别是色差, 较多的使用了硅材料且使用了非球面技术。偶次非球面的使用对系统像差校正的贡献较大。

4.3 设计结果

设计完成的光学系统外形图和设计数据如图1、图2所示。

非球面系数: Surface1: $k=-0.1$; Surface 6: $k=-0.06$, $A_1=1.763762\text{e}-4$, $A_2=1.017037\text{e}-6$, $A_3=1.612934\text{e}-9$, $A_4=-8.662724\text{e}-13$, $A_5=1.881452\text{e}-15$, Surface 9: $k=-1.84$, $A_1=1.619883\text{e}-5$, $A_2=1.224365\text{e}-5$, $A_3=3.082268\text{e}-10$, $A_4=-6.842897\text{e}-12$, $A_5=4.642347\text{e}-14$ 。

5 设计结果分析

5.1 离焦量分析

经光学补偿后, 光学系统的离焦量如表4所示。

该光学系统的焦深是: $\pm 2\lambda(f/\#)^2 = \pm 32\ \mu\text{m}$, 从表4可以看出: 无热化设计后的光学系统在-50~70 $^\circ\text{C}$ 温度范围内, 离焦量在1倍焦深范围内, 满足无热化设计要求。

表3 红外光学材料的光学特性和热特性

Table 3 Optical and thermal properties of infrared material

材料	折射率(4 μm)	折射率温度系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	热膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	色差系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	热差系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$
硅	3.4253	51×10^{-6}	2.56×10^{-6}	1.71×10^{-3}	7.03×10^{-5}
锗	4.0247	396×10^{-6}	6.0×10^{-6}	4.04×10^{-3}	12.5×10^{-5}
硒化锌	2.4332	60×10^{-6}	7.57×10^{-6}	2.86×10^{-3}	3.42×10^{-5}

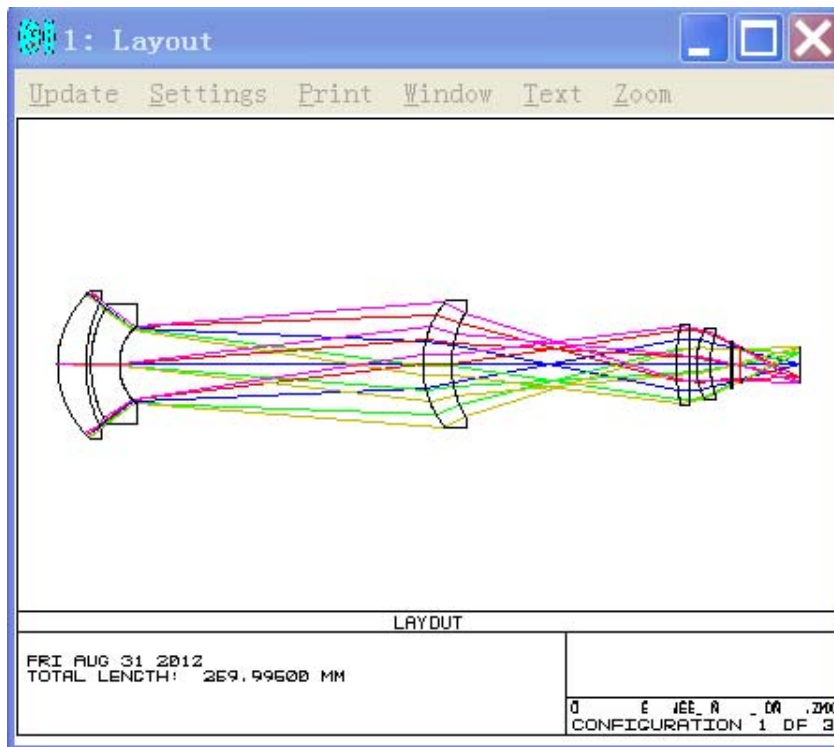


图1 光学系统外形图

Fig.1 Optical system layout

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
1*	Standard		34.480000	10.000000	SILICON	26.040000	-0.100000
2*	Standard		50.560000	1.670000		23.290000	0.000000
3*	Standard		40.760000	10.000000	GERMANIUM	21.000000	0.000000
4*	Standard		18.600000	106.470000		13.670000	0.000000
5*	Standard		35.220000	10.000000	SILICON	22.390000	0.000000
6*	Even Asphere		37.600000	78.760000		18.480000	-0.060000
7*	Standard		62.820000	4.960000	ZNSE	13.640000	0.000000
8*	Standard		9086.000000	2.130000		14.120000	0.000000
9*	Even Asphere		26.150000	4.830000	SILICON	12.510000	-1.840000
10*	Standard		32.290000	7.000000		10.870000	0.000000
11*	Standard		Infinity	1.000000	SILICON	8.000000	0.000000
12*	Standard		Infinity	2.175000		8.000000	0.000000
13*	Standard		Infinity	0.300000	GERMANIUM	6.000000	0.000000
14*	Standard		Infinity	0.700000		6.000000	0.000000
STO	Standard		Infinity	20.000000		5.200000	0.000000
IMA	Standard		Infinity	-		6.264999	0.000000

图2 光学系统设计数据

Fig.2 Optical system design data

表4 光学系统离焦量表

Table 4 Optical system defocus value

温度/°C	后焦距/mm	离焦量/ μm	备注
20	20.72947	0	标准温度
-50	20.7364	6.93	最低温度
-20	20.73262	3.15	
0	20.73088	1.41	
50	20.72761	-1.86	
70	20.72634	-3.13	最高温度

5.2 像质评价

本文利用光学调制传递函数(MTF)和能量集中度(Enc)两个综合性指标对成像质量进行评价。图3、图4、图5分别为20℃、-50℃、70℃时系

统的光学调制传递函数和衍射能量分布图。

从分析结果可以看出:系统在一50~70℃温度范围内,最大离焦量小于1倍焦深,温度变化光学系统的传函没有明显的降低,空间分辨率17lp/mm处,

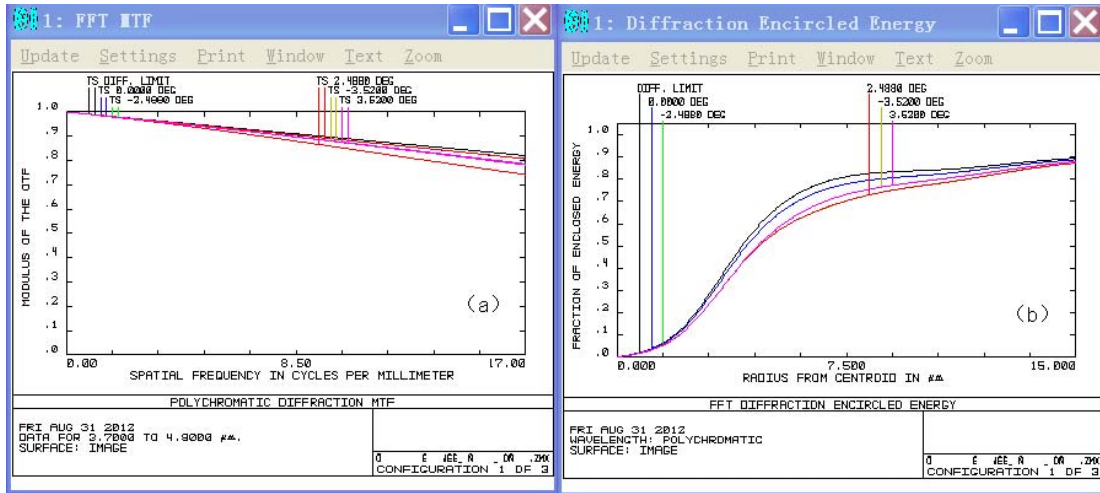


图3 20℃时系统传函(a)和能量分布(b) Fig.3 MTF(a) and Enc(b) at 20℃

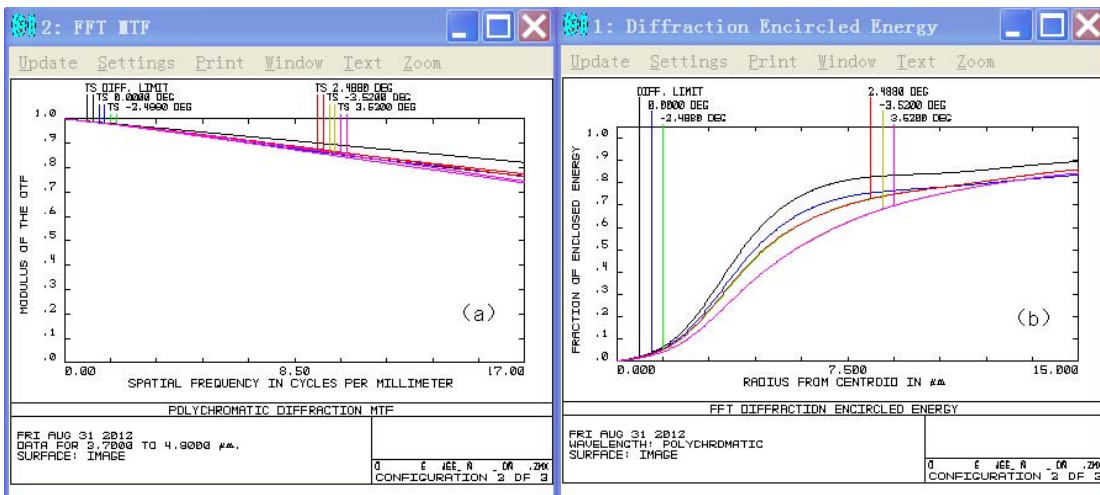


图4 -50℃时系统传函(a)和能量分布(b) Fig.4 MTF(a) and Enc(b) at -50℃

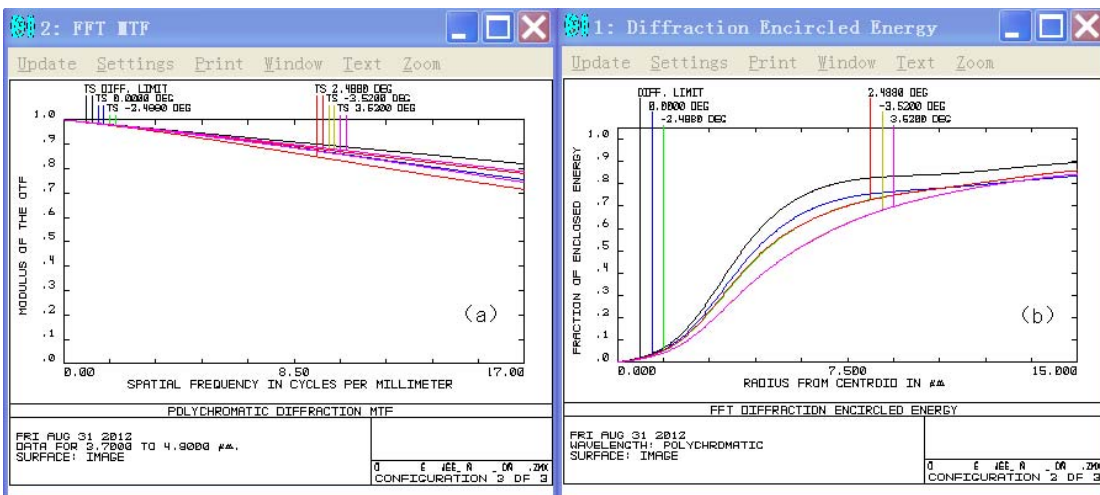


图5 70℃时系统传函(a)和衍射能量分布(b) Fig.5 MTF(a) and Enc(b) at 70℃

MTF 值均大于 0.7, 比较接近衍射极限, 探测器单像元内能量集中度均大于 84%。因此可以说该系统消除了温度效应对成像质量的影响, 在 $-50\sim 70^{\circ}\text{C}$ 温度范围内具有良好的成像质量和无热效果。

6 结论

光学被动式无热化方法, 利用光学材料和镜筒材料的合理组合搭配, 在消热差同时进行像差平衡, 使系统在较大的温度范围内保持稳定的成像质量。因不需要机械补偿部件和移动组元就可实现消热差功能, 因此系统比较简单、体积及重量小、稳定性和可靠性高。本文利用光学被动式无热化方法, 设计了一种结构简单、成像质量良好、适应温度范围较宽的中波红外无热化光学系统, 设计结果达到技术指标要求。

参考文献:

- [1] 陈吕吉, 李萍, 冯生荣, 等. 中波红外消热差双视场光学系统设计[J]. 红外技术, 2011, **33**(1): 1-3.
- [2] 于洋, 金亚平, 潘兆鑫, 等. 长波红外制冷型光学系统超宽温消热差设计[J]. 红外技术, 2011, **33**(10): 585-587.
- [3] Povey V. Athermalisation techniques in infra red systems[J]. *SPIE*, 1986, **655**: 142-153.
- [4] 李荣刚, 刘琳, 张兴德, 等. 中波红外无热化镜头的设计与制造[J]. 激光与红外, 2010, **40**(6): 653-655.
- [5] 奚晓. 红外光学系统无热设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 15-20.
- [6] Kanagawa Y, Wakabayashi S, Tajime T, et al. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart[J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(10): 3001-3006.
- [7] Robert E-Fischer. 红外系统的光学设计[J]. 云光技术, 2000, **32**(6): 6-20.