

基于二元衍射面的长波无热化光学系统设计

张发平, 张华卫

(四川长虹电子科技有限公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 仅用3片透镜, 设计了一款匹配640×512氧化钒非制冷长波焦平面探测器的红外系统。该系统焦距为100 mm, F数为1.1, 总长为107 mm, 工作波段范围为8~12 μm, 引入一片二元衍射面实现无热化温度补偿功能。利用ZEMAX进行仿真设计, 结果表明: 在-40℃~+60℃温度范围内, 系统奈奎斯特频率(30 lp/mm)处MTF均达到0.49, 接近衍射极限。该系统具有焦距较长, 相对孔径大、全视场像质优良、温度适应良好、二元面衍射效率高、易于加工和结构紧凑的特点。

关键词: 二元衍射面; 无热化; 红外系统; 结构紧凑

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2020)01-0025-05

Design of Long-wave Athermal Optical System Based on Binary Diffraction Surface

ZHANG Faping, ZHANG Huawei

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

Abstract: Using only three lenses, an infrared system matching 640×512 uncooled vanadium oxide long-wave focal plane detector was designed. The system has a focal length of 100 mm, an F-number of 1.1, a total length of 107 mm, and a working band range of 8-12 μm. A binary diffraction surface was introduced to realize the non-thermal temperature compensation function. The simulation design using Zemax shows that the modulation transfer function (MTF) value at the Nyquist frequency (30 lp/mm) of the system reached 0.49 in the temperature range of -40℃~+60℃, which is close to the diffraction limit. The system has the characteristics of a long focal length, large relative aperture, good image quality in the full field of view, suitable temperature adaptation, high binary diffraction efficiency, easy processing, and compact structure.

Key words: binary diffraction surface, athermalization, infrared system, compact structure

0 引言

在红外相机实际使用过程中, 当环境温度变化时, 由于热胀冷缩和折射率温变等因素, 透镜的折射率、曲率半径、轴向尺寸、径向半径以及镜筒尺寸等都会发生相应变化, 从而导致系统出现严重的像差和离焦现象, 影响红外相机成像质量。因此, 必须采用温度补偿措施来适应宽温度范围的环境使用条件。概括来说, 温度补偿主要有两种方式: 一种是调焦式温度补偿, 包括电子主动和机械被动式调焦。即当环境温度发生变化时, 采用人眼观察或温度传感器反馈的方式, 手动或自动调节某组镜片轴向位置, 实现温度补偿; 另外一种就是光学被动无热化温度补偿。该方式利用不同热系数材质的透镜和镜筒进行综合设计, 保证在宽范围温度环境下, 免调焦而不影响成像质

量。显然, 由于要增加调节机构, 采用调焦温度补偿这种方式会导致系统重量和尺寸增加。并且, 在低温差(目标/背景)条件下, 自动调焦速度会变得十分缓慢, 调焦时间长, 甚至出现调焦不准的情况, 严重影响实际使用效果, 所以光学无热化镜头设计成为了光学系统研究的重要方向。

光学无热化设计除了采用多种材料组合消除低温带来的像差和离焦影响外, 还可以采用二元衍射面消除热差。二元衍射元件具有独特的温度特性, 在合理光焦度分配下, 可以用较为简单的结构实现温度自动补偿^[1]。所以, 随着衍射面加工工艺技术的发展, 采用二元衍射面消热差的设计也变得十分常见。另外, 随着长波非制冷探测器国产化, 相应非制冷红外镜头的需求也变得越来越旺盛, 但市面上长波非制冷光学无热化镜头产品却仍然较少, 特别是焦距较长的

收稿日期: 2019-04-02; 修订日期: 2020-01-06

作者简介: 张发平(1980-), 男, 四川乐至人, 硕士, 研究方向为红外光学系统设计和装调。E-mail: 420200590@qq.com。

基金项目: 四川省军民融合产业发展专项资金项目(D18/69-01004)。

无热化镜头比较稀缺。相关文献表明^[2-5]：目前长波无热化镜头焦距一般不到 100 mm，总长/焦距比大，镜片数较多。为此，本文基于二元衍射面消热差原理，针对市面典型的 640×512 非制冷面阵探测器，仅使用 3 片透镜，设计了 100 mm 焦距，总长仅 107 mm 的紧凑型、大相对孔径长波无热化系统。同时，分析了衍射面的参数和衍射效率，为实际加工提供数据参考。

1 二元衍射面消热差原理

根据薄透镜模型，折射元件的光热膨胀系数 $x_{f,r}$ 可用下式表示^[6]：

$$x_{f,r} = a_g - \frac{1}{n - n_0} \left(\frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right) \quad (1)$$

式中： a_g 为材料线膨胀系数； n 、 n_0 分别为透镜材料和介质折射率； dn/dT 为透镜材料的折射率温度系数。

对于二元衍射面，其光热膨胀系数 $x_{f,d}$ 如下：

$$x_{f,d} = 2a_g - \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \quad (2)$$

由式(2)可知，二元衍射面的光热膨胀系数只与材料线膨胀系数和介质折射率有关，与材料的折射率无关。一般来说，红外材料的 dn/dT 都很大，其光热膨胀系数 $x_{f,r}$ 为负，而二元衍射面光热膨胀系数 $x_{f,d}$ 始终为正^[7]。因此，通过合理组合，可以保证系统消热差。

目前常见的长波材料温度特性和光学特性如表 1 所示^[8]。

表 1 长波材料温度和光学特性

Table 1 Optical and thermal parameters of long-wave infrared material

Material	n (@10 μm)	dn/dt (10 ⁻⁶ /K)	a_0 (10 ⁻⁶ /K)
Ge	4.0032	396	5.8
Znse	2.4065	100	8.54
Zns	2.1986	43.3	6.6
IG5	2.6051	70	14
IG6	2.7777	41	21.2

在实际设计过程中，往往根据系统特点选择适当的材料组合来达到消热差的目的。一般情况下，至少采用两种材料组合才能达到设计要求。

2 光学系统无热化方程

无热化光学系统设计要满足光焦度分配、消色差和消热差 3 个方程，分别如下^[9]：

$$\sum_{i=1}^j h_i \phi_i = \phi \quad (3)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 \phi_i \theta_i = 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 \phi_i \chi_i = \sum_{i=1}^j a_i L_i \quad (5)$$

式中： h_i 、 ϕ_i 、 θ_i 和 χ_i 分别为各透镜组近轴光线高度、光焦度、色差系数和热差系数； h_1 为第一个透镜近轴光线高度； ϕ 为系统总光焦度； a_i 为各部分镜筒材料的线膨胀系数； L_i 为各部分镜筒长度。

3 设计实例

3.1 设计参数

针对国内典型的 640×512 氧化钒非制冷探测器，设计一款紧凑型较长焦距的长波无热化红外系统，具体参数如表 2 所示。

表 2 光学系统参数

Wavelength band	8~12 μm
Detector resolution	640×512
Pixel size	17 μm
Focal length	100 mm
Overall length	107 mm
F numbers	1.1
Optical transmissivity	≥80%
Working temperature	-40℃~+60℃

3.2 设计结果

首先根据式(3)~(5)计算出理想透镜的光焦度分配，然后将理想透镜换成实际材料的厚透镜后再利用光学设计软件优化像差和消热差，最终设计得到的系统仅由两个镜组，共 3 片透镜组成。前后两个透镜组采用“正+负”光焦度分配方式，并将入瞳设计在第一个面，以减少系统口径。综合考虑常见长波材料的温度和色散特性，系统前组采用折射率最高、消色差能力强的单晶锗与低折射率的 IG6 两种材料相配合消色差。由于单晶锗折射率温度系数 ($396 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 较大，因此，在前组单晶锗镜片上引入一个二元衍射面，既可以提升色差消除效果，又可以有效消除宽温差带来的离焦影响。镜筒材料选择常见的铝合金，其热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ，与透镜配合实现光学被动无热化。另外，在后组单晶锗透镜上采用一个偶次非球面校正剩余像差，以保证系统成像质量。尽量优化系统结构参数，使得整个光学系统总尺寸不超过

$\phi 93\text{ mm} \times L107\text{ mm}$, 总长/焦距比仅为 1.07, 结构紧凑。结构布局如图 1 所示。

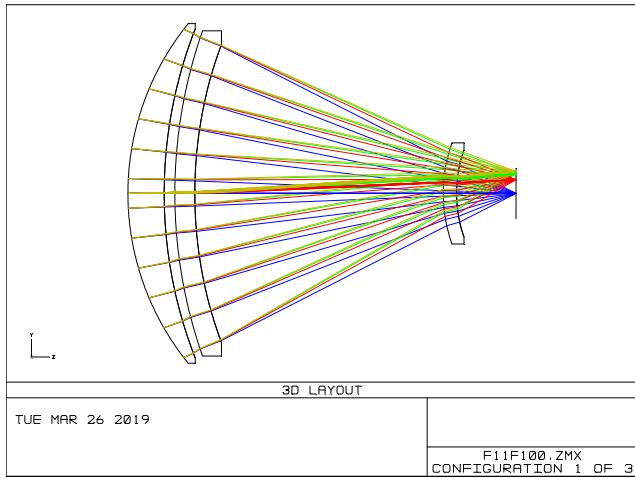


图 1 光学系统结构图

Fig.1 Schematic of optical system structure

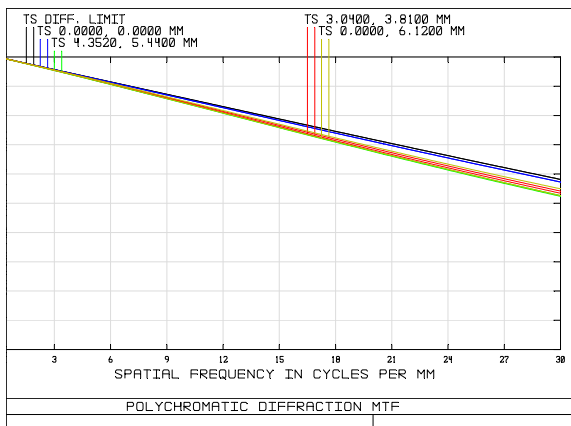
3.3 成像质量评价

调制传递函数 (MTF) 和弥散斑是衡量光学系统成像质量的重要指标, 由图 2、图 3 和表 3 可知, 在系统奈奎斯特频率 (30 lp/mm) 处各视场的 MTF 值均达到 0.49, 接近衍射极限; 弥散斑均方根半径都小于艾利斑半径 $13.4\ \mu\text{m}$; 最大场曲小于 $0.1\ \text{mm}$, 最大畸变小于 1.6% ; 最大离焦量为 $13.54\ \mu\text{m}$, 小于系统焦深 $24.2\ \mu\text{m}$ 。综上, 表明该系统在 $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 范围内成像质量优异, 无热化效果良好。

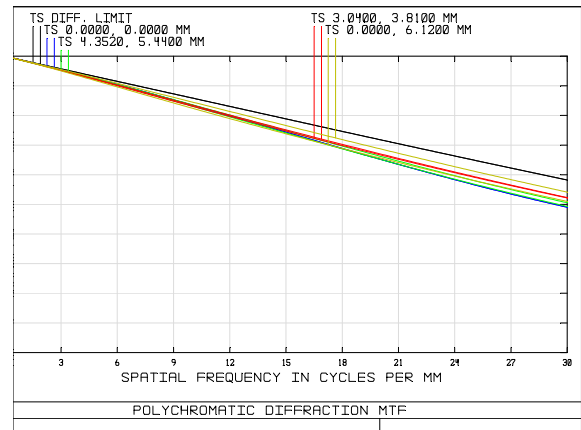
3.4 衍射面加工参数

受限于车床加工技术, 二元衍射面面型结构的复杂程度对加工可行性及成本起着决定性的影响。因此, 在利用光学软件仿真完衍射面相位函数后, 需要重点分析该二元衍射面的加工难易程度。考虑加工因素和衍射效率, 取位相函数阶数为 3, 衍射级次为 1, 则位相函数可具体表达为式如下^[10]:

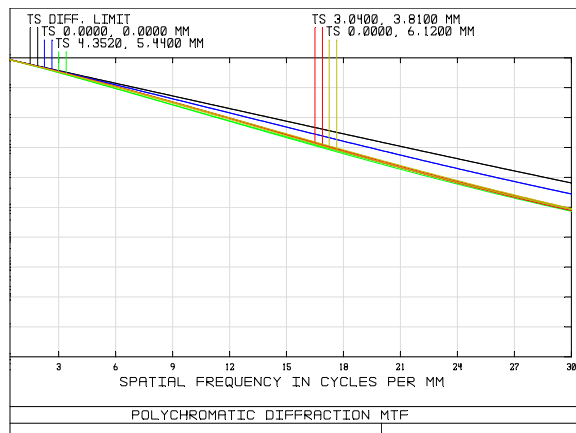
$$|A_1\rho^2 + A_2\rho^4 + A_3\rho^6| = 2n_r\pi \quad (n_r=1,2,3,\dots) \quad (6)$$



(a) $+20^\circ\text{C}$ MTF



(b) -40°C MTF



(c) $+60^\circ\text{C}$ MTF

图 2 系统在 $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 范围 MTF

Fig.2 System MTF curves in the range of $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$

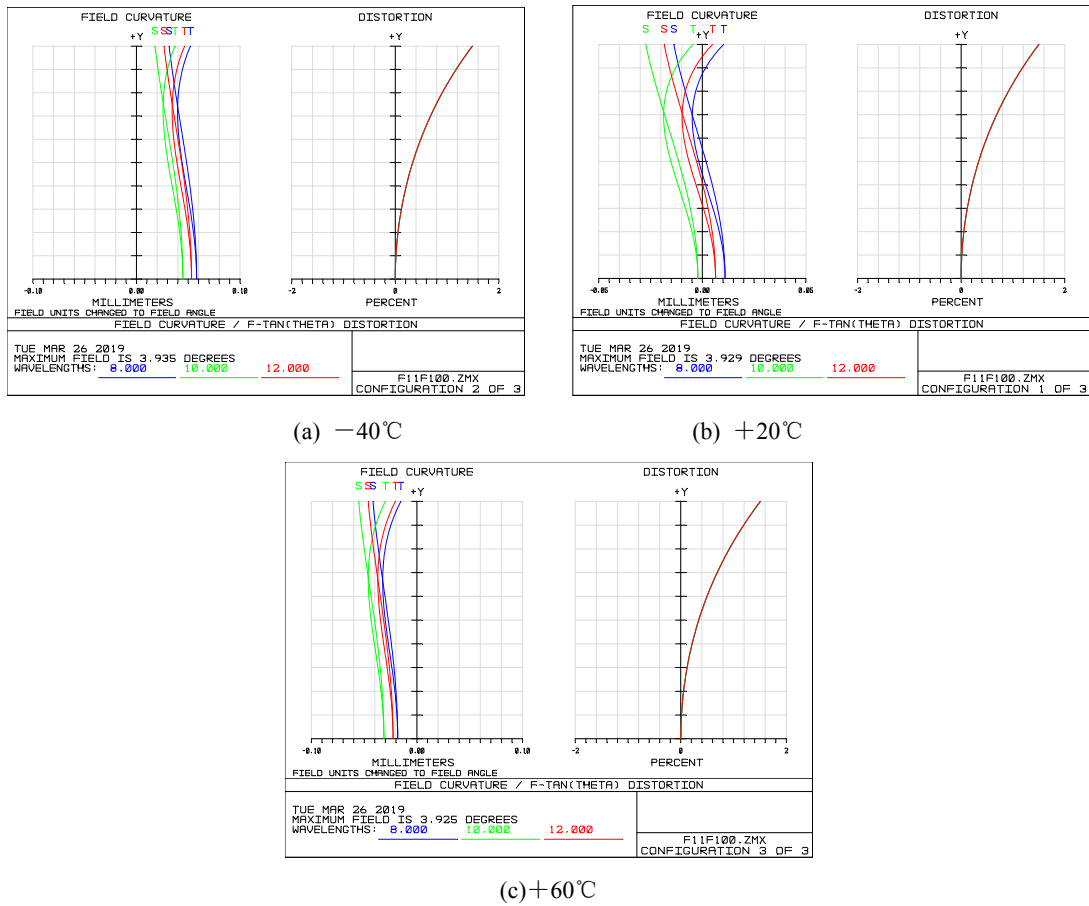


图3 系统在-40℃~+60℃场曲和畸变

Fig.3 System dist and field curves in the range of -40℃~+60℃

表3 系统在-40℃~+60℃范围弥散斑

Table 3 System spot diagram in the range of -40℃-+60℃

Spot diagram /μm	Temperature		
	-40℃	+20℃	+60℃
0 field	9.386	2.492	6.675
0.7 field	11.906	4.758	7.409
1.0 field	8.487	6.268	12.996

最大环带深度 h_{max} 由式(7)表示:

$$h_{max} = \frac{2\lambda_s \lambda_l}{(n_{mid} - 1)(\lambda_s + \lambda_l)} \quad (7)$$

式中: ρ 为衍射面的环带半径; n_r 为环带数; λ_s 、 λ_l 分别为衍射波长上限和下限; n_{mid} 为中心工作波长折射率。

衍射效率对于二元衍射面来说是比较重要的物理量,它直接关系到光学系统总透过率,影响系统总的接收能量及作用距离。衍射效率和加工水平与加工参数密切相关,目前主要采用超精密数控金刚石单点车削的方式加工二元衍射面。根据研究表明,采用车削的方式加工二元衍射面时,其衍射效率主要受如下3个方面的因素影响^[11]:一是车削面型环带过度处遮

挡效应导致的衍射效率损失 L_1 ;二是波段内平均衍射效率损失 L_2 ;三是表面粗糙程度造成 TIS 散射量的衍射效率损失 L_3 ,以上3个方面的影响因素可以分别由式(8)、(9)、(10)表示:

$$L_1 = \frac{4}{D} \sqrt{\frac{2h_{max} R_T}{n_{rtoal}}} \sum_1^{n_{rtoal}} n_r \quad (8)$$

$$L_2 = \left(\frac{\pi(\lambda_l - \lambda_s)}{6\lambda_{mid}} \right)^2 \quad (9)$$

$$L_3 = \left(\frac{4\pi \times 0.4 \times d^2}{8 \times R_T \times \lambda_{mid}} \right)^2 \quad (10)$$

式中: D 表示衍射面的有效通光口径; λ_{mid} 为工作中心波长; n_{rtoal} 为衍射元件总周期个数; R_T 为球形切削刀具刀尖半径; d 为车削刀给进量。因此,在二元衍射面的设计和加工过程中,不仅要考虑衍射面本身的参数,还要考虑采用合适的加工参数,以保证较大的衍射效率。

根据现有的金刚石单点车削加工水平和设计需

求, 本设计中衍射面各个参数的取值如表4所示。

表4 衍射面加工参数

Table 4 Machining parameters of diffractive surface

	Parameter	Value
Phase function coefficient	A_1	-0.071
	A_2	3.561×10^{-7}
	A_3	-6.834×10^{-11}
Wavelength band	Upper and lower limits	$\lambda_s = 8 \mu\text{m}$, $\lambda_l = 12 \mu\text{m}$
	Central working wavelength	$\lambda_{\text{mid}} = 10 \mu\text{m}$
Refractive index of central working wavelength		$n_{\text{mid}} = 4.0032$
Radius of spherical cutting edge		$R_T = 50 \mu\text{m}$
Feed size of turning tool		$d = 0.3 \mu\text{m}$

利用 Matlab 编程迭代求解方程(6)和(7), 得到最大环带周期数为 19 (环带周期见图4), 最大环带深度为 $3.33 \mu\text{m}$, 最小环带间隔为 1.106mm , 二元衍射面设计在单晶锗材料上, 加工难度较低。由式(8)~(10)估算总的衍射效率约为 92%, 衍射效率较高, 其余每个镜面透过率按 98%估算, 则整个系统透过率约为 83%, 符合设计要求。

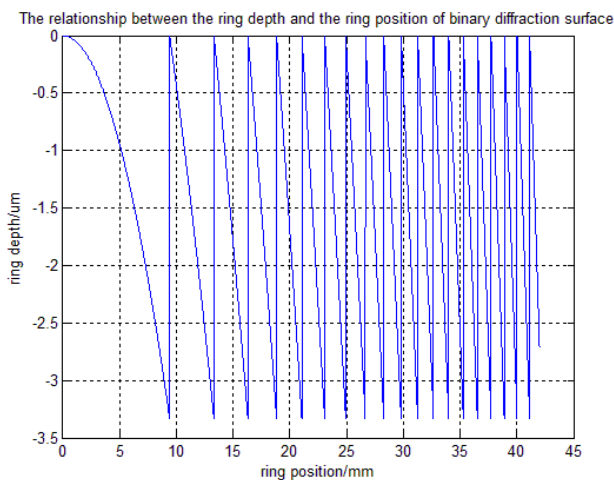


图4 二元衍射面的环带周期

Fig.4 Ring periods of binary diffraction surface

4 结语

本文根据二元衍射面消热差理论, 基于 640×512 焦平面长波非制冷探测器, 设计出一种大相对孔径、较长焦距、低总长/焦距比的光学无热化红外系统。该系统在 $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 范围内, MTF 值接近衍射极限, 像质优良, 温度适应性好。通过 Matlab 仿真计算, 所采用的二元衍射面具有环带数较少, 环带间隔大, 衍射效率高, 易加工的特点。由于衍射面的引入, 克服了紧凑型、大相对孔径、较长焦距光学系统难以实

现光学无热化的难点, 为红外监控、警戒的非制冷光学系统设计提供一个参考。

参考文献:

- [1] Behrmann G P, Bo Wen J P. Influence of temperature on diffractive lens performance[J]. *App. Opt.*, 1993, **32**(14): 2583-2489.
- [2] 王远方舟, 白玉琢, 贾钰超, 等. 一种长波红外光学消热差系统设计[J]. *红外技术*, 2012, **34**(9): 531-534.
WANG Yuanfangzhou, BAI Yuzhuo, JIA Yuchao, et al. A design of FIR athermal system[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(9): 531-534..
- [3] 陈潇. 大面阵长波红外光学无热化镜头的设计[J]. *红外技术*, 2018, **40**(11): 1061-1064.
CHEN Xiao. Design of long-wavelength infrared athermalization lens for large-array detector[J]. *Infrared Technology*, 2018, **40**(11): 1061-1064.
- [4] 史浩东, 张新, 曲贺盟, 等. 基于硫系玻璃的大相对孔径红外消热差光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, **35**(6): 0622002.1-0622002.7.
SHI Haodong, ZHANG Xin, QU Hemeng, et al. Design of large relative aperture Infrared athermalized optical system with chalcogenide glasses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(6): 0622002.1-0622002.7.
- [5] 张婉怡. 红外折衍混合摄远光学系统无热化设计[J]. *应用光学*, 2017, **38**(1): 12-18.
ZHANG Wanyi. Athermalization design of infrared refractive diffractive telephoto objective[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, **38**(1): 12-18.
- [6] 白瑜, 杨建峰, 马小龙, 等. 长波红外光学系统无热化设计[J]. *红外技术*, 2008, **30**(10): 583-585.
BAI Yu, YANG Jianfeng, MA Xiaolong, et al. Athermalization of long-wavelength infrared optical system[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(10): 583-585.
- [7] 徐大维, 向阳, 王建, 等. 折衍混合车载红外镜头无热化设计[J]. *红外技术*, 2011, **33**(8): 461.
XU Daxiong, XIANG Yang, WANG Jian, et al. Design on athermal refractive-diffractive hybrid vehicular infraredlens[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(8): 461.
- [8] 孙爱平, 龚杨云, 陈忠, 等. 大孔径、大视场辅助驾驶仪红外镜头无热化设计[J]. *红外技术*, 2013, **35**(10): 618.
SUN Aiping, GONG Yangyun, CHEN Zhong, et al. Athermal design of a large-aperture, wide-field assisting pilot infrared lens[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(10): 618.
- [9] HUANG Qiu, CHEN Yiqing, GAO Zhifeng, et al. Athermalization and test validation of infrared imaging system[C]//*SPIE*, 2009, **7383**: 73830P.
- [10] 农文捷, 金宁. 二元光学工艺参数计算[J]. *红外技术*, 2004, **26**(6): 13-16.
NONG Wenjie, JIN Ning. Evaluation of binary optics manufacturing parameters[J]. *Infrared Technology*, 2004, **26**(6): 13-16.
- [11] 王鹏. 衍射光学元件设计及金刚石单点车削技术的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2006: 23-30.
WANG Peng. Research on design and process parameters of diamond turning of diffractive optical[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology Optical engineering, 2006: 23-30.