

•光学设计•

## 光学温度补偿红外长波远摄型物镜设计

张黎黎, 徐熙平, 乔 扬, 王 宇

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130021)

**摘 要:** 环境温度变化导致红外光学系统成像质量变差, 利用光学材料热特性之间存在的差异, 研究了一种光学温度补偿红外长波远摄型物镜设计方法。首先, 根据远摄物镜基本结构及远摄比建立含参方程; 其次, 结合不同材料组合及消热差和消色差方程将前组复杂化, 获得初始的光焦度分配。最后, 利用ZEMAX光学设计软件进行优化、像差校正, 设计实例焦距为100 mm,  $F$ 数为2.0, 远摄比达到0.8, 全视场角 $6^\circ$ 。设计结果在 $-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 范围内, 成像质量稳定, 焦距变化量小于系统最小焦深, 成像质量接近衍射极限。

**关键词:** 光学设计; 红外光学系统; 远摄物镜; 温度补偿

中图分类号: TN214

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-03-0008-05

## Design of Long-wavelength Infrared Telephoto Objective with Optical Temperature Compensation

ZHANG Li-li, XU Xi-ping, QIAO Yang, WANG Yu

(Changchun University of Science and Technology, School of Electro-optical Engineering, Changchun 130021, China)

**Abstract:** The degradation of imaging quality of an infrared optical system is caused by the changing of environment temperature. Based on the differences in optical material thermal characteristics, a design method of long-wavelength infrared telephoto objective with optical temperature compensation is researched. Firstly, equations containing parameters are established according to the basic structure of telephoto objective and telephoto ratio. And then, the former group is complicated with different material combinations and the equations of athermal and achromatic to obtain initial optical power distribution. Finally, ZEMAX optical design software is used to optimize and correct aberration. Parameters of the design example are obtained such as 100 mm focal length, 2.0  $F$  number, 0.8 telephoto ratio and  $6^\circ$  field of view (FOV). The result shows that the system has stable imaging quality in  $-40\sim 60^\circ\text{C}$  operation temperature range, focal length variation is less than minimum depth of focus of the system and imaging quality approaches diffraction limit.

**Key words:** optical design; infrared optical system; telephoto objective; temperature compensation

随着红外成像系统在航空航天、安防搜救、工业生产等领域的应用不断深入, 对红外成像系统的成像质量以及环境适应性提出了越来越高的要求<sup>[1]</sup>。由于红外光学材料的折射率温度系数 $dn/dT$ 较大, 环境温度变化将引起红外物镜严重的离焦, 导致系统成像质量大幅降低<sup>[2]</sup>。

光学系统的消热差设计是通过一定的补偿技术, 使光学系统在一个较宽的温度范围内保持成像质量不变, 通常有三种方法<sup>[3]</sup>: 机械被动式、机械(电子)主动式、光学被动式。与机械式无热技术相比, 光学被动式无热化技术通过匹配光学材料的温度折射率系数、线膨胀系数等, 使光学系统在工作环

收稿日期: 2014-04-30

**作者简介:** 张黎黎(1982-), 女, 吉林蛟河人, 硕士研究生, 主要从事光学设计与光学仪器等方面的研究; 徐熙平(1969-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事光学设计与光学仪器等方面的研究。

境温度范围内的温度焦移相互补偿或抵消,从而保持良好的成像质量,具有质量轻、体积小、无需供电、性能可靠和可维护性好等优点。

常规的光学消热差包括利用消热图指导多透镜系统的消热差设计<sup>[4]</sup>,利用衍射元件具有更大的设计自由度和独特的温度特性的折射与衍射混合消热差方法<sup>[5]</sup>,采用谐衍射元件设计了红外双波段消热差光学系统,受衍射效率的限制,使用波段较窄<sup>[6]</sup>。消热差设计往往使物镜的总长焦距比大于1,不利于系统小型化。而远摄型物镜采用正负光焦度分离的结构,前组为正,后组为负,后主面向前移出光学系统之外,使得总长焦距比小于1,大幅度地缩短了物镜长度,广泛应用于紧凑结构的长焦距系统中<sup>[7]</sup>。

利用光学被动式消热差原理,对长波红外远摄型物镜系统进行无热化研究。建立消热差方程式、消色差方程式、远摄模型并对之进行求解,通过具体光学系统设计,验证了该方法能使系统在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内成像质量稳定,调制传递函数(MTF)接近衍射极限,达到光学被动消热差的目的。

## 1 设计原理分析

### 1.1 远摄物镜的结构

远摄物镜是一种长焦距物镜,适用于大口径、长

焦距、短结构系统。远摄物镜可以是折射系统、反射系统或折反射系统,图1所示即为透射式远摄系统。当对远距离目标成像时使用该物镜可以得到放大、清晰的图像。远摄物镜一般由两个透镜组构成,一个为正透镜组;另一个为负透镜组。前正透镜组主要是对目标生成实像,负后透镜组的作用是加大整个系统的焦距。这种组合能够使等效系统的像方主面前移,增大系统的组合焦距,使整个光学系统长度 $L$ 小于焦距 $f'$ 。把二者之比 $L/f'$ 称为远摄比,远摄比一般在 $2/3\sim 3/4$ 之间。选择此结构利于减小光学系统的体积<sup>[8]</sup>。

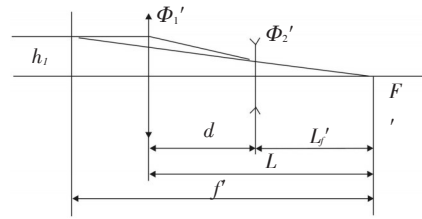


图1 远摄物镜光学原理图

### 1.2 长波红外材料特性

现在普遍使用的红外透射材料主要是晶体和玻璃两大类。与透可见光的光学玻璃相比,符合使用要求、具备理想的物理化学性能的红外材料种类非常有限。常用的长波红外材料参数如表1所示<sup>[9]</sup>。

表1 红外光学材料特性表

材料	折射率/ $\mu\text{m}$			$dn/dt/(\times 10^{-6})$	$a_g(20^{\circ}\text{C})/(\times 10^{-6})$	消热差系数 $T/(\times 10^{-6} \text{ K}^{-1})$	消色差系数 $C$
	8	10	12				
Ge	4.007	4.003	4.002	396	5.7	126	1.7E-03
ZnS	2.223	2.200	2.170	43.3	6.6	29.4	4.4E-02
ZnSe	2.417	2.406	2.393	100	8.5	63	1.7E-02
Amtir1	2.514	2.498	2.490	72	12.8	35	1.6E-02
GaAS	3.307	3.278	3.266	149	5.74	60	1.8E-02

红外材料消热差系数 $T$ 可由式(1)计算出

$$T = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_g \quad (1)$$

其中, $n$ 为透镜材料的折射率; $\alpha_g$ 为透镜介质的热膨胀系数。

消色差系数 $C$ 由式(2)计算,实际上 $C$ 为色散系数的倒数。

$$C = \frac{n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}}{n_{\lambda} - 1} \quad (2)$$

原则上,折射率 $n$ 值大的材料有利于校正像差,消

色差系数 $C$ 值大的材料组合有利于消热差,而消热差系数 $T$ 值像差较大的材料组合有利于消热差<sup>[10]</sup>。

### 1.3 设计原理

采用薄透镜模型时,单透镜的光焦度为

$$\Phi = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (3)$$

式中, $\Phi$ 为单透镜的光焦度; $r_1$ 和 $r_2$ 为单透镜第一面和第二面的曲率半径; $n$ 为透镜材料的折射率。

温度变化  $dt$  引起的单个薄透镜光焦距的变化为

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{dn}{dt} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + (n-1) \left( -\frac{1}{r_1^2} \frac{dr_1}{dt} + \frac{1}{r_2^2} \frac{dr_2}{dt} \right) \quad (4)$$

由于

$$\frac{1}{r_1} \frac{dr_1}{dt} = \frac{1}{r_2} \frac{dr_2}{dt} = \alpha_g \quad (5)$$

式(4)简化为

$$\frac{d\phi}{dt} = \phi \left( \frac{dn}{n dt} - \alpha_g \right) \quad (6)$$

定义归一化热差系数  $T$  为

$$T = \frac{d\phi}{\phi dt} \quad (7)$$

式中,  $T$  表示单位温度变化时透镜光焦距的相对变化量。

远摄式光学系统的远摄比定义为光学总长与焦距的比值, 归一化条件下,  $h_1=1, \Phi=1$ , 根据光组组合的正切计算公式如下

$$\Phi = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^k h_i \Phi_{s_i} = \Phi_{s_1} + h_{s_2} \Phi_{s_2} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{L}{f'} = L = d + l_f = \frac{1-h_2}{\Phi_{s_1}} + h_2 \quad (9)$$

式中,  $\alpha$  为远摄比;  $h_2$  为后组的归一化入射高度, 在数值上等于后工作距。

当远摄比  $\alpha$  确定时,  $\Phi_{s_1}$  与  $\Phi_{s_2}$  依赖于  $h_2$  的取值。  $h_2$  的取值决定了远摄系统的结构布局, 既要保证足够的后工作距, 也要获得前后组的合理光焦度分配, 即二者的光焦度都不太大, 以利于像差校正。在远摄比为 0.8 情况下, 合理的  $h_2$  取值范围约为 0.2~0.6。  $\Phi_{s_1}, \Phi_{s_2}$  与  $h_2$  的关系如图 2 所示。

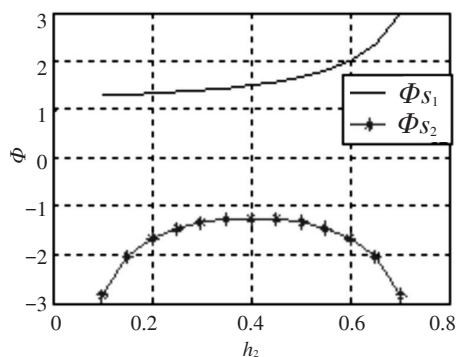


图2  $\Phi_{s_1}, \Phi_{s_2}$  与  $h_2$  的关系图

$h_2, \Phi_{s_1}$  与  $\Phi_{s_2}$  确定后, 根据消热差公式

$$\sum_{i=1}^n h_i^2 \Phi_{s_i} T_{s_i} = 0 \quad (10)$$

该消热差方程表示: 多个密接透镜组相互补偿

各自的剩余热差, 使系统总热差为零。

红外系统光学材料的折射率大、色散小, 有利于系统像差的校正, 因而通常利用两组式光学结构已经获得足够优良像质, 消热差公式可写为

$$\Phi_{s_1} T_{s_1} + h_2^2 \Phi_{s_2} T_{s_2} = 0 \quad (11)$$

根据公式, 前后两个光组选择不同的透镜数量、透镜材料和透镜光焦度, 可以获得大小和符号不同的  $\Phi_{s_1}, T_1, \Phi_{s_2}, T_2$  组合。通过合理选择每组透镜的数量、材料搭配, 使  $\Phi_{s_1}$  为正,  $\Phi_{s_2}$  为负, 且  $T_1$  和  $T_2$  符号相同, 即可构成远摄型光学结构, 能够大幅度减小光学系统长度。

光焦度分配还要满足消色差方程, 即

$$\sum_{i=1}^n h_i^2 C_i \Phi_i = 0 \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可知,  $T$  取决于光组内部的材料搭配和光焦度分配, 选择材料时应优先采用  $C$  值大而  $T$  值小的材料与  $C$  值小而  $T$  值大的材料相结合, 有利于校正系统的热差和色差。

## 2 基于 Zemax 无热化设计

Zemax 是一套综合性的光学设计仿真软件, 包括光学设计需要的所有功能, 可以在实践中对所有光学系统进行设计、优化、分析, 并具有容差能力。Zemax 光学设计软件包可实现序列和非序列分析, 用于光学组件设计及照明系统的照度分析, 也可建立反射、折射、绕射等光学模型。其简单易学, 更是全功能的光学设计分析软件, 具有直观、功能强大、灵活、快速等优点, 在国内用得比较广泛。

### 2.1 基于 Zemax 无热化设计原理

环境温度变化会使光学系统几何参数发生变化, 主要表现在以下三个方面。第一, 玻璃的折射率变化, 玻璃的折射率依赖于温度和波长; 第二, 镜头的半径和厚度变化, 玻璃随着温度的变化而膨胀和收缩; 第三, 透镜间距  $d$  变化, 镜头元件之间的间隔会由于使用材料的热胀冷缩而改变。

热分析仪对 Zemax 的工程版本有效, Zemax 的热分析特性可以模拟上述所有变化。它可以在某一特殊温度或者一个温度范围内分析和优化一个光学设计。在一个较宽的温度范围分析和优化一个镜头时, Zemax 热分析特性的真正能力才得以发挥。

多个温度环境下镜头系统设计。首先, 要提供

常温常压下测定的光学系统的半径和厚度数值;其次,需要给出由于环境温度变化而导致的光学系统折射率、半径、厚度的变化量;最后,需要考虑元件使用材料的热影响。

Zemax将在所有细节中考虑上述问题。多个温度环境下镜头系统设计的基本方法是:镜头数据编辑器(lens date editor)中定义在正常温度和压力条件下的光学系统所有的半径和厚度数据。使用多重结构编辑器(multi-configuration editor)定义附加结构。在附加结构中,用多重结构操作数CRVT、THIC指定半径和厚度,以及一个称为“热拾取求解”(thermal pickup)的特殊求解方式来调整每个附加结构的半径和厚度数据。控制温度的多重结构操作数是TEMP。Zemax中TCE栏中输入支撑材料的热膨胀系数,单位是 $10^{-6}$ 。

### 2.2 基于Zemax无热化设计流程

利用Zemax软件进行无热化设计,其过程大致可分成如下步骤:(1)在常温条件下设计出一个像质较好的系统;(2)让温度发生变化,一般是在要求的温度范围内取几个温度控制点,建立多重结构,分析系统像质变化情况;(3)采用一定的无热技术,优化光学系统,使其成像质量在各个控制温度条件下都能满足要求,即可认为该系统在要求的温度范围内能保持良好的成像质量。流程如图3所示。

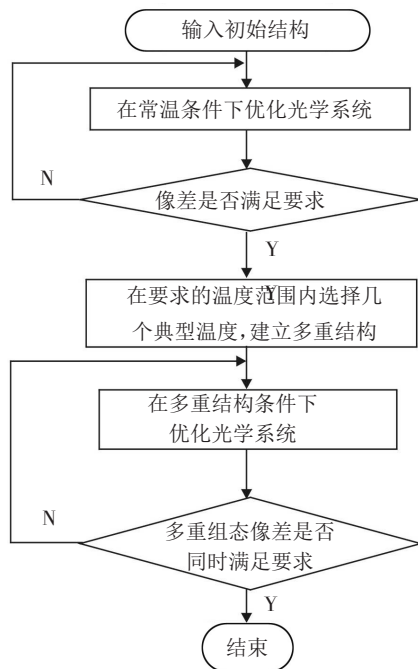


图3 无热化设计流程

## 3 基于Zemax无热化设计实例

### 3.1 远摄物镜技术指标

长波红外系统选用非制冷焦平面阵列,像元尺寸为 $30\mu m \times 30\mu m$ ,光学设计指标如表2所示。

表2 光学系统设计参数

波长范围	8~12 $\mu m$
焦距	100 mm
F/#	2
视场角 $2w$	$6^\circ$
远摄比	0.8
温度范围	$-40\text{ }^\circ\text{C} \sim 60\text{ }^\circ\text{C}$
MTF要求	$MTF \geq 0.4 @ 17\text{ lp/mm}$

(1)根据传递函数的截止频率,可以确定像元尺寸为 $30\mu m$ 。

$$\frac{1000}{2 \times \text{pixel}} = \frac{1000}{2 \times 17} = 30\mu m \quad (13)$$

(2)根据物像关系,可求得像高为

$$y' = f' \times \tan w = 100 \times \tan 3^\circ = 5.24\text{ mm} \quad (14)$$

$$2y' = 10.48\text{ mm}$$

(3)根据焦距和F/#可以求出系统的通光口径为

$$D = \frac{f'}{F/\#} = 100/2 = 50\text{ mm} \quad (15)$$

(4)由远摄比和焦距计算光学总长为

$$L = \alpha \times f' = 0.8 \times 100 = 80\text{ mm} \quad (16)$$

### 3.2 初始结构

根据式(8)、式(9),取 $h_2=0.5$ ,得到 $\Phi_{S1}=1.67$ , $\Phi_{S2}=-1.34$ ,再根据总光焦度公式,消热差、消色差公式得到如下方程

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = \Phi_{s1} \quad (17)$$

$$\varphi_1 T_1 + \varphi_2 T_2 + \varphi_3 T_3 + h_2^2 \Phi_{s2} T_2 = 0 \quad (18)$$

$$C_1 \varphi_1 + C_2 \varphi_2 + C_3 \varphi_3 + h_2^2 C_2 \Phi_{s2} = 0 \quad (19)$$

前组由三个密接的薄透镜组成,材料分别是Amtir1, Germanium, Zns\_broad,后组材料 Germanium。此处假设前组的透射高度在归一化条件下均等于1。式(17)~式(19)联立解方程组得 $\varphi_1=3.0889$ , $\varphi_2=-0.3210$ , $\varphi_3=-1.0979$ 。显然,这里得到的唯一解是病态的,这是因为此处的简化模型与实

实际情况还是有一定差距的。首先,假设的三个密接薄透镜是理想情况,实际上透镜间有空气间隔;其次,前组的三个透镜透射高度相近但不可能相同且都为1;最后,实际中热差和色差很小但不为零。综上,给出一个 $h_2$ ,方程组就有唯一解与之相对应, $h_2$ 的选择是一个范围,即光焦度的分配方案有无穷多个。选择合理的一组解作为初始结构输入Zemax,在此基础上进行分析、优化、像差校正。

### 3.3 设计结果

最终设计结果数据如表3所示,结构图如图4所示。材料依次采用Amir1(+),Germanium(-)Zns\_broad(-)Germanium(-)Znse(平行平板),光阑与第一个面入瞳重合。选择铝作为机械结构材料,热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6}$ 。

表3 光学系统结构参量

	$r$	$d$	glass
STO	38.823	8	AMTIR1
2	87.724	1	
3	87.724	4	GERMANIUM
4	75.334	2	
5	85.621	4	ZNS_BROAD
6	51.848	10.328	
7	20.691	3	GERMANIUM
8	16.859	41.22	
9	Infinity	1.5	ZNSE
10	Infinity	4.955	

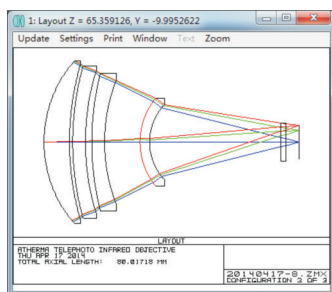
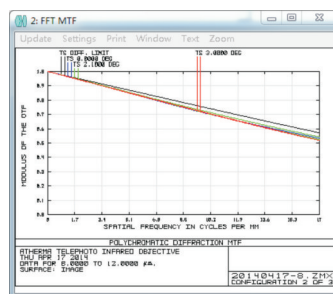


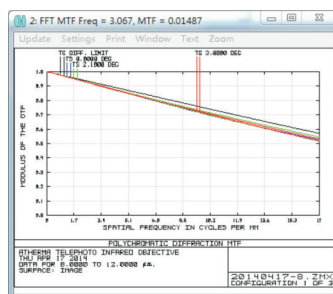
图4 光学系统光路图

设计加入1.5 mm厚的平行平板,是考虑到传感器保护玻璃的厚度对像差的影响。为了校正轴外像差,在第7个表面引入非球面。非球面的使用,给整个光学系统引入多个自由度,能够更好地减小和

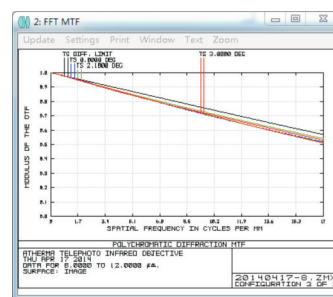
平衡像差。如图5所示,最终设计结果光学传递函数在截止频率17 lp/mm处均大于0.4,点列图的几何半径均在一个像元 $30 \mu\text{m}$ 以内,且能量集中度高。光学总长80 mm,实现远摄比 $\alpha=0.8$ ,满足设计要求。



(a)  $-40^\circ\text{C}$ 的MTF曲线



(b)  $20^\circ\text{C}$ 的MTF曲线



(c)  $60^\circ\text{C}$ 的MTF曲线

图5 不同温度下的传递函数曲线

### 3.4 结果评价

当实际波面与理想波面的最大差值不超过 $\lambda/4$ 时,此波面可看作是无缺陷的,说明该系统满足“瑞利判据”,为可用系统。

$$\text{根据波像差与离焦量的关系} \quad \pm 2\lambda F\#^2 = \pm 2 \times 10 \times 2^2 = 80 \mu\text{m} \quad (20)$$

该光学系统在 $-40^\circ\text{C}$ ~ $60^\circ\text{C}$ 的最大离焦量为  
(下转第47页)

时分析处理,获取数据内在关系,在开发TP测试时,采用Visual C++编写数据分析模块,为TP提供数据分析接口函数,实现对采样频率高达20 MHz的脉冲数据的分析处理,极大地降低TP的运行时间,提高了系统故障检测效率。

## 4 结 论

从硬件和软件方面描述了基于PXI总线的自动测试系统的设计与实现,满足设备自动化测试的需求,成功应用于多种设备的测试,具有较高的测试故障定位准确度和可靠性。该测试系统的突出特点是实现了平台物理资源复用,测试程序与硬件无关,在不增加其他资源的前提下,用户只要重新开发TPS,即可完成对其他设备的检测,并且新开发的TPS可大量借鉴前期已开发的TPS技术。采用标准化、模块化和开放式结构,运行安全可靠,具有良好的可维护性、可扩展性。

(上接第12页)

56.5  $\mu\text{m}$ ,小于系统焦深80  $\mu\text{m}$ ,所以该设计在所要求温度范围内,像面稳定,成像质量良好。

## 4 结 论

利用光学被动式消热差原理,对长波红外望远型物镜系统进行无热化研究。建立望远模型得到初始的前后组光焦度分配,再根据消热差方程式、消色差方程式,利用不同材料之间热特性之间的差异对前组进行复杂化,得到初始结构,将其输入Zemax光学辅助设计软件,使用其热分析模块,进行分析、优化、像差校正。验证了该方法能使系统在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内成像质量稳定,调制传递函数(MTF)接近衍射极限,不同温度下系统焦距的变化不影响成像质量和性能,达到光学被动消热差的目的。

### 参考文献

- [1] 张春艳,沈为民.中波和长波红外双波段消热差光学系统设计[J].红外与激光工程,2012,41(5):1323-1328.
- [2] 孟庆超,潘国庆,张运强,等.红外光学系统的无热化设计[J].红外与激光工程,2008,37(6):723-727.
- [3] 刘莹莹,庞博.红外无热化望远物镜设计[J].光电技术应

### 参考文献

- [1] 彭顺堂,耿向卫,倪发军,等.基于PXI总线的某设备自动测试系统[J].兵工学报,2008(5):83-85.
- [2] 戴鹏飞.测试工程与LabVIEW应用[M].北京:电子工业出版社,2006.
- [3] 陈锡辉,张银鸿.LabVIEW 8.2 程序设计从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [4] 张茜萍,万明杰,张斌.VXI总线在军事设备精度检定中的应用与研究[J].火箭与制导学报,2010,3(1).
- [5] 曹成俊,张宏伟.自动测试系统的总线技术[J].现代电子技术,2008(14).
- [6] 李云松,任艳君.智能诊断技术发展综述[J].兵工学报,2010,4(31):122-125.
- [7] 张鸿雁,李言俊,张科.航空电子通用自动检测系统的设计与实现[J].计算机测量与控制,2009(17):255-257.
- [8] 孙健,张建民.电流输出控制设备在ATE上的TPS开发设计[J].光电技术应用,2012,27(1):71-75.
- [9] 孙强,王肇圻,李凤友,等.红外3.2~4.5  $\mu\text{m}$ 波段折射/衍射光学系统的减热差设计[J].光学精密工程,2002,10(4):121-125.
- [10] 白瑜,杨建峰.长波红外光学系统无热化设计[J].红外技术,2008,30(10):583-585.
- [11] 牟达,董家宁.基于联合变换相关器的红外望远光学系统设计[J].四川兵工学报,2012,16(3):8-85.
- [12] 孙强,王肇圻,李凤友,等.红外3.2~4.5  $\mu\text{m}$ 波段折射/衍射光学系统的减热差设计[J].光学精密工程,2002,10(4):121-125.
- [13] Jamleson T H. Thermal effects in optical systems[J]. Opt. Eng., 1981, 28(2): 156-160.