

极光成像仪滤光片高精度温度控制系统设计

张佩杰, 宋克非

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对广角极光成像仪滤光片组件的温度控制需求,设计了一种高精度温度控制系统。使用铂电阻作为测温传感器,测温电路可以达到 0.05 °C 的温度采集精度;使用 DSP 作为主控制器,实现了滤光片温度的全数字控制;使用恒流源电路作为加热片的驱动控制电路,实现了加热功率的高精度、低噪声控制;建立了滤光片组件温度控制系统的数学模型,结合实际系统的阶跃响应曲线辨识得到系统模型参数,设计了系统的控制器,进行了仿真,给出了控制器的性能曲线;通过滤光片组件温度控制系统实验对控制器参数进行了整定,得到了优化的控制器参数。最后,给出了系统的实际温度控制结果,表明系统能够实现滤光片的高精度温度控制。

关键词: 极光成像仪; 滤光片; 温度控制

中图分类号: V447 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)S-0177-06

Design of high accuracy temperature control system of auroral imager light filter system

Zhang Peijie, Song Kefei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A high-accuracy temperature control system for light filter of auroral imager was proposed in the paper. Platinum resistance was used as the temperature sensor, and the temperature measuring circuit can collect the temperature with an accuracy of 0.05 °C. A DSP was used as the main control unit, which implemented a full digital control system. The heater plate used constant current source circuit as its driving circuit, implementing the high precision and low noise heating power control. The mathematical model of the system was established, and the key parameters were identified from step response curves of the practical light filter system. The controller was designed based on the identified model and simulation results show the performance of the designed controller. Then, the parameters of the controller were tuned in experiments and experiment results show that better performance is obtained using optimized controller. At last, experiments results were discussed and show that high accuracy temperature control of the light filter system was implemented.

Key words: auroral imager; light filter; temperature control

收稿日期: 2014-10-15; 修订日期: 2014-11-20

作者简介: 张佩杰(1982-),男,副研究员,博士,主要研究方向为航天遥感器电子学系统设计、复杂系统建模与控制。

Email: zhangpj@ciomp.ac.cn

0 引言

极光是地球空间重要的自然发光现象,主要发生在高纬地区,是由于太阳风和磁尾带电粒子体进入近地空间和大气中的分子原子相互作用激发产生的。整个极光光谱覆盖了从极紫外到红外的广阔波段,其特性与太阳活动周期、地磁活动强度以及高层大气、电离层的状态密切相关,是近地空间大气中间层、低热层、电离层物理化学过程信息的重要来源。另外,极光作为重要的地球辐射背景,对空间目标识别和监视也有着重要意义^[1]。

极光光谱中,远紫外辐射信息几乎不受地表及边界层大气复杂背景影响,是磁层、电离层参量日常监测的重要手段^[2]。对极光的远紫外发射光谱进行探测,能够获得中高层大气粒子组成及密度等信息,从而有效地监视地球磁层与太阳风的相互作用过程^[3]。

对极光的空间探测,主要代表仪器有搭载于 DE-1 卫星上的 SAI (The Spin-Scan Auroral Imager, 1981 年)^[4],用于可见和 FUV 波段的全球极光成像;搭载于 Viking 极轨卫星上的紫外极光成像仪(UAI),可分别对 134~180 nm 和 123.5~160 nm 波段进行成像,实现了对极光形态的可视化探测^[5-6]。

极光探测仪器中,普遍采用光窗对进入成像系统的光的频率范围进行限制。常用的真空紫外波段光学材料是氟化物晶体,主要包括 LiF₂, MgF₂, CaF₂, BaF₂ 等,利用其短波截止特性可获得短波截止效果。例如,SAI 的光窗采用了 MgF₂ 材料,UAI 上的两个相机则分别采用了 BaF₂ 和 CaF₂ 作为光窗的材料。其中,氟化钡(BaF₂)在 200~9500 nm 光谱范围内有接近 90% 的光学透过率,同时,具有良好的环境稳定性,是用于真空紫外波段空间光学遥感的主要光学晶体之一。

广角极光成像是 FY-3 卫星上的一个重要载荷,用于对极光的形态进行探测。滤光片是广角极光成像仪光学系统的一个重要元件,作为短波截止器件,用于消除短波方向的杂散光。滤光片采用 BaF₂ 晶体作为光窗的材料。BaF₂ 晶体氟化物晶体的透过率与温度有关,当温度升高时,BaF₂ 晶体的短波截止波长(透过率大于 5%)会向长波方向偏移^[7]。因此,温度控制是广角极光成像仪滤光片组件设计的一项重要内容,以满足广角极光成像仪在远紫外波段具有

较高量子效率的需求。

文中针对广角极光成像仪滤光片组件的温度控制要求,设计了高精度温度控制系统。在对滤光片工作的温度控制需求进行分析的基础上,设计了高精度温度采集电路,低噪声热控驱动电路以及高精度控制算法,实现了滤光片温度的全数字控制。分析了滤光片组件的数学模型,进行了仿真,对控制系统参数进行了初步设计,结合滤光片组件的实际热控实验,对控制器的参数进行了整定。最后,给出了滤光片组件温度控制的实验曲线,表明滤光片组件的温度控制系统实现了高精度的温度控制,稳态误差小于 0.1℃。

1 系统组成

广角极光成像仪上,滤光片的工作温度范围为 100~140℃,远高于环境温度。在轨工作时,滤光片要受到外界辐射热流、深冷空间热辐射、探测器工作散发的热量等因素的影响。滤光片组件温度控制系统的设计要达到要求的精度,首先要考虑最大限度地降低外界干扰的影响,同时还要保证滤光片加热片本身的温度不会影响探测器的工作。

1.1 滤光片温控系统总体结构

滤光片的温度控制系统设计为以 CPU 为主控制器的数字控制系统。温度控制算法由 CPU 实现,与由模拟电路组成的模拟控制系统相比,数字控制系统具有设计灵活、调试方便、适应性强、可靠性高的优点。

滤光片温度控制系统从功能上可以划分为 3 个部分,分别是高精度测温电路、CPU 主控制器、恒流源加热片驱动电路,如图 1 所示。CPU 主控制器按照一定的采样周期,采集温度采集电路的输出电压,经过运算后,计算出该控制周期的加热片驱动电流,并输出到加热片驱动电路。

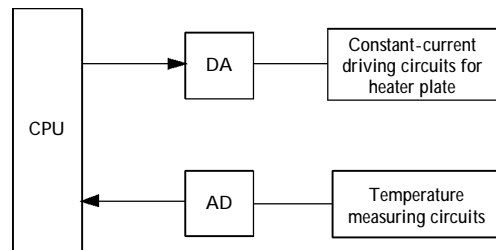


图 1 滤光片温度控制系统结构图

Fig.1 System structure of temperature control system for light filter

1.2 滤光片加热区域设置

滤光片的温度控制系统设计既要保证滤光片能

够加热到所需的工作温度, 还需保证滤光片工作窗口内的温度水平分布和梯度。由于滤光片为透射式光学元件, 不能够采用整体贴装加热片加热的方式来控制温度。设计中, 采用部分加热的方式, 在窗口区域外直接贴装加热片, 如图 2 所示, 靠热传导保证滤光片的温度。整体采取热包覆(除窗口区域), 以减小滤光片与外界的热交换。

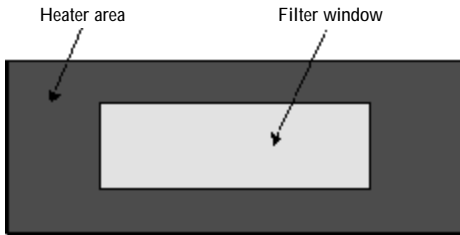


图 2 滤光片结构图

Fig.2 Structure of light filter and heater plate

1.3 温度采集电路

由于滤光片的工作温度较高, 同时要求具有较高的控温精度, 系统使用铂电阻作为温度传感器。铂电阻温度传感器因为具有稳定性高、精度高、响应快等诸多优点, 是精密温度测控系统中广泛使用的一种测温元件^[8]。高精度测温电路将铂电阻的阻值随温度的变化量转换为电压信号, 经放大后由模-数转换将放大后的模拟电压信号转换为数字信号, 放大电路及模-数转换的精度, 共同决定了铂电阻测温电路的测温精度。

由于电路中干扰、噪声等因素会直接影响温度测量精度, 因此, CPU 主控制器在采集模-数转换电路的数字温度值后, 首先进行了数字滤波处理, 采用多次连续采样求均值、剔除错误读数等方法提高温度测量的精度。经过对测温电路的优化及数字滤波, 测温电路的误差小于 0.05 °C(图 3)。

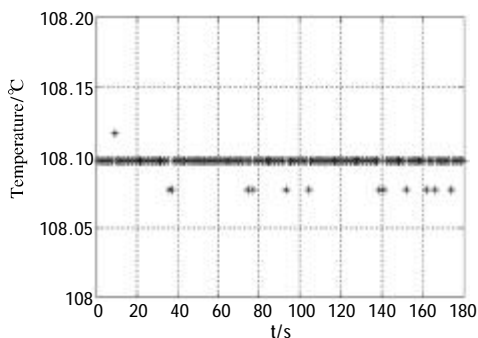


图 3 滤光片温度采集电路读数

Fig.3 Acquired data of temperature measuring circuits

1.4 加热片驱动电路

加热片的驱动电路通常采用 PWM 电路和恒电流源电路两种形式。其中, PWM 方法效率高, 但是功率开关高频切换及脉动电流的存在, 会给系统带来较大的噪声, 同时, 电路实现方式也比较复杂^[9]。恒电流源电路采用压控器件直接控制加热片的电流, 不存在高频开关, 不会带来额外的电磁干扰, 电流控制精度高, 电路实现也比较简单, 可靠性高, 但是效率相对较低。

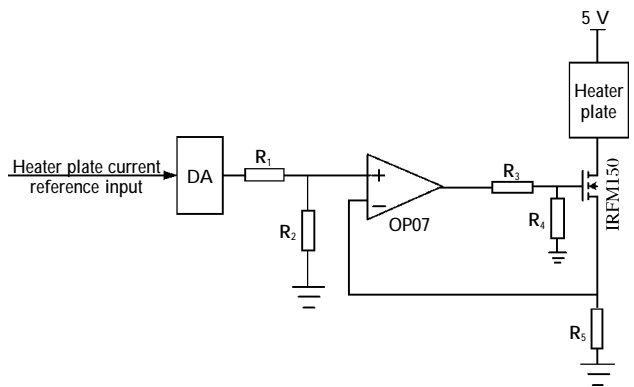


图 4 加热片驱动恒流源电路

Fig.4 Constant current source circuit for heater plate driving

滤光片属于精密光学元件, 对温度冲击比较敏感, 过大的加热功率输入会造成滤光片的损伤。由于滤光片温度控制加热片的功率较小, 且光子探测器对电磁干扰比较敏感, 采用恒流源作为滤光片的驱动电路。所采用的恒流源电路由运算放大器 OP07 和场效应管 IRFM150 组成, 电流的大小由 DSP 设置, 通过 DA 转换芯片实现对恒流源电路的控制。

2 系统模型与算法设计

同其他温度控制系统一样, 滤光片温度控制具有升温单向性、大惯性、大滞后的特点^[10-11]。滤光片单元组件进行热包覆后隔热安装, 升温单向性是由于滤光片升温依靠加热片加热, 而降温则只能依靠自身热传导、热辐射进行散热。但是滤光片的材料为 BaF₂ 晶体, 导热性能差, 质地较脆, 不能够承受较大的温度冲击, 因此加热片的功率相对较小; 温度控制过程中被控对象导热性能及对加热功率的限制会导致控制速度慢、热惯性大、易发生超调等现象。因此, 温度控制过程中, 一旦产生超调, 系统需要较长的时间才能重新回到稳态。另外, 仪器工作过程中, 吸收

外界辐射热流、光子探测器工作产生热量,从而影响滤光片自身的温度。上述因素给温度控制系统及算法的设计带来了较大的挑战。

2.1 滤光片组件建模

准确的数学模型是控制算法设计的基础。根据物理学定律,滤光片向四周散发的热量 Q_0 可以表示为:

$$Q_0 = K_r A (T - T_c) \quad (1)$$

式中: A 为散热表面积; K_r 为热传导系数; T_c 为滤光片周围环境温度; T 为滤光片温度。

根据能量平衡关系,建立滤光片温度控制系统的微分方程,即在单位时间内,滤光片组件吸收的能量(加热片的热量、外界辐射热流)与散发的热量之差,等于滤光片组件存储热量的变化率,因此:

$$Q_i - K_r A (T - T_c) = C \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

式中: C 为滤光片组件的热容。将上式中的各物理量用增量表示,并整理,

$$C \frac{d\Delta T}{dt} + K_r A \Delta T = \Delta Q_i + K_r A \Delta T_c \quad (3)$$

进行拉氏变换,并整理,得到,

$$T(S) = \frac{1}{CS + K_r A} Q_i(S) + \frac{K_r A}{CS + K_r A} T_c(S) \quad (4)$$

忽略到环境温度变化的因素,滤光片温度 T 和输入热量的关系为:

$$T(S) = \frac{1}{CS + K_r A} Q_i(S) \quad (5)$$

滤光片组件的热传递过程比较复杂,加热片热量传递到滤光片,最终到测温传感器,具有一定的延时,因此该系统的传递函数为:

$$G(S) = \frac{T(S)}{Q_i(S)} = \frac{K}{T_0 S + 1} e^{-\tau s} \quad (6)$$

从公式(6)可以看出,滤光片组件热控系统的传递函数具有一阶惯性加滞后的特性。

2.2 模型参数的辨识

滤光片组件数学模型中,包括三个未知参数,分别是模型增益 K , 时间常数 T_0 以及滞后时间 τ 。对于温度控制系统,使用物理建模的方法很难得到模型参数的准确数值。因此,通过实际系统的时域响应曲线进行辨识计算,可以得到模型参数的具体数值。

对于公式(5)所示的模型,时域响应曲线辨识方

法包括切线法和两点法。对于滤光片组件来说,系统在阶跃特征输入下,需要较长的时间才能够达到稳态,完整的阶跃响应曲线难以获得。因此,两点法更适合于用来计算系统的模型参数。

公式(6)中, K 表示系统的增益,是系统输出变化量与输入变化量的比值,因此

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y(\infty)}{\Delta u} \quad (7)$$

在阶跃响应曲线 $y(t)$ 上选取两个点, $(t_1, y(t_1))$ 、 $(t_2, y(t_2))$ (图 5), 要求 $t_2 > t_1 > \tau$, 且应适当加大两个点的距离。

求解系统时域相应的表达式,可以得到:

$$\begin{aligned} y(t_1) &= K \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1 + \tau}{T}\right) \right) \\ y(t_2) &= K \left(1 - \exp\left(-\frac{t_2 + \tau}{T}\right) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

求解方程,

$$\begin{aligned} T &= \frac{t_2 - t_1}{\ln(1 - Y_1) - \ln(1 - Y_2)} \\ \tau &= \frac{t_2 \ln(1 - Y_1) - t_1 \ln(1 - Y_2)}{\ln(1 - Y_1) - \ln(1 - Y_2)} \end{aligned} \quad (9)$$

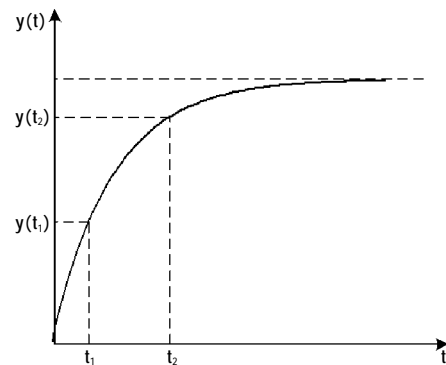


图 5 两点法时域模型辨识

Fig.5 Model identification using two points of time-domain response curve

图 6 所示为滤光片组件进行热控时的阶跃响应曲线(加热片电阻 2Ω , 电流 0.4 A , 加热功率 0.32 W)。由于滤光片对温变速率有着严格的要求,温度的突然变化会造成滤光片的损坏,测量系统响应曲线时加热功率远小于 1 W ,因此,模型参数辨识时,首先对系统响应曲线进行归一化,得到输入加热功率 1 W 时的响应曲线。使用两点法辨识系统模型参数,得到系统的模型参数为:

$$K = 14.8, T = 720 \text{ s} \quad (10)$$

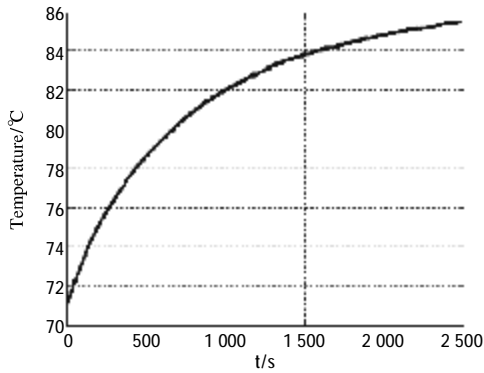


图 6 滤光片组件阶跃响应曲线

Fig.6 Step response curves of light filter temperature control system

将辨识得到的参数带入公式(6),通过仿真得到单位阶跃响应曲线,与实际系统归一化阶跃响应曲线的对比如图 7 所示。可以看出,辨识模型的响应曲线能够和实际系统的响应曲线较好的吻合,表明了辨识结果的准确性。

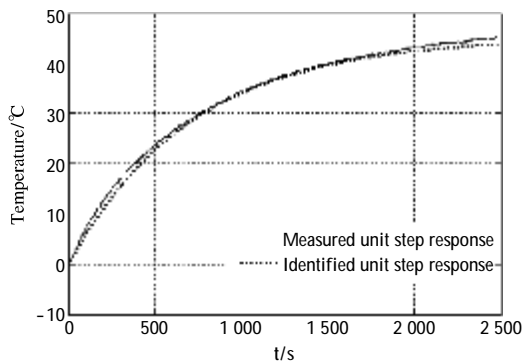


图 7 归一化响应曲线与辨识模型响应曲线对比图

Fig.7 Comparison of identified step response and practical step response

公式(9)可以求取系统的滞后时间常数,但是该方法计算复杂,且存在一定的误差。测量系统阶跃响应曲线时,对系统的输入控制量和系统输出进行同步采集,从施加控制输入(开始加热)到系统输出(温度)产生变化的时间间隔就是滞后时间常数 τ 。使用该方

$$\tau = 12 \text{ s} \quad (11)$$

2.3 控制算法设计

PID 控制器结构简单、鲁棒性强,广泛应用于过程控制^[12]。PID 控制器的控制规律为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分项比例系数; K_d 为微

分项比例系数。

利用辨识得到的系统模型,进行了仿真,并设计了控制器,将控制器设计为 PI 控制器, $K_p=0.6, K_i=0.004$, 闭环系统的阶跃响应曲线如图 8 所示。将设计的控制器进行离散化,设计数字化控制程序,下载到 DSP 中运行,就能够实现对滤光片组件温度的实时控制。

3 控制器参数整定与实验

3.1 控制算法设计

由于滤光片组件温度控制系统的非线性,理论设计的控制器参数很难得到最优的控制效果。因此,需要根据系统的实际响应,对控制器参数进行调整(也称为参数整定),以改善系统的动态和静态性能。调节器参数的工程整定方法有凑试法、临界比例法、经验法、衰减曲线法和响应曲线法等。滤光片组件温度控制系统的参数整定过程中,使用理论设计与仿真的结果作为指导,并根据系统的阶跃输入响应曲线的特性,逐步对参数进行微调,以得到满意的响应曲线。

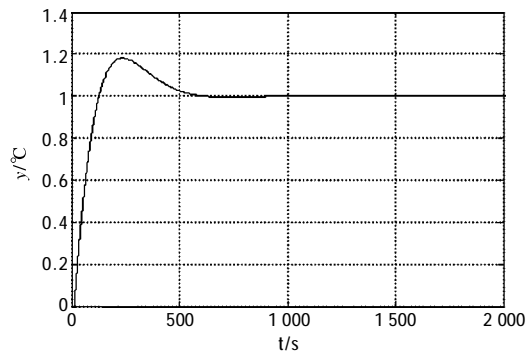


图 8 闭环系统阶跃响应曲线

Fig.8 Step response of closed-loop system

控制器参数调整的过程中,遵循先 P 再 I 后 D 的次序,将调节器参数调节到计算值上,如果系统响应不够理想,则需要进一步的调整。整定后,滤光片组件热控系统控制器的参数为:

$$K_p=0.205, K_i=0.004 \quad (13)$$

3.2 实验结果

对滤光片组件进行热包覆,并放置于密闭金属箱中,减小空气对流造成的热量散失,对滤光片组件温度控制系统进行了参数调试与实验。将目标温度设置为一个固定的温度值,得到了系统的阶跃响应

曲线。

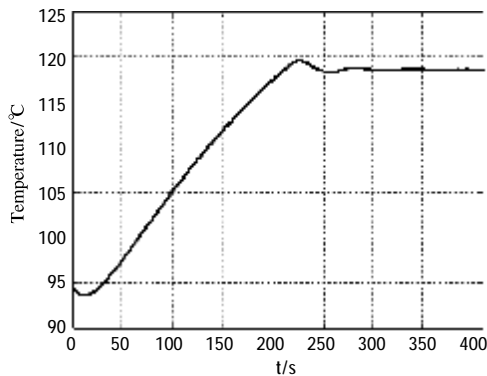


图 9 滤光片组件温度控制阶跃响应曲线

Fig.9 Step response curve of practical light filter temperature control experiment

在滤光片组件温度为 95 °C 时, 设定目标温度为 118.6 °C。由于滤光片组件初始温度高于环境温度, 受热传导滞后的影响, 滤光片组件温度首先下降。从曲线上, 可以测量得到滞后时间, 其数值为 12 s。系统的稳定时间约为 200 s, 稳态误差小于 0.1 °C。

4 结 论

滤光片是广角极光成像仪的一个重要光学元件。设计了滤光片的高精度温度控制系统, 采用铂电阻作为温度传感器, 高精度测温电路能够达到 0.05 °C 的测温精度, 采用高精度恒流源作为加热器的驱动电路, 使用 CPU 作为主控制器, 实现了滤光片温度的数字控制。设计的滤光片温度控制系统可以达到 0.1 °C 的控温精度, 能够实现对紫外光透过率的准确控制。

参考文献:

- [1] Wang Yongmei, Fu Liping, Wang Yingjian. Review of space-based FUV aurora/airglow observations[J]. Process in Geophysics, 2008, 23(5): 1474-1479. (in Chinese)
- [2] Wu Yan, Tang Yi, Liu Jianpeng, et al. Optics design of far ultraviolet imaging spectrometer for ionosphere remote sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 1-6. (in Chinese)
- [3] Yu Lei, Wang Shurong, Lin Guanyu. Review of space-based imaging spectrum technique development for Ionosphere observations [J]. Process in Geophys, 2012, 27 (6): 2308-2315. (in Chinese)
- [4] Frank L A, Craven J D. Imaging results from dynamics explorer[J]. I Rev Geophys, 1988, 26: 249-252.
- [5] Cogger L L, M urphree J S, Elphinstone R D, et al. The UV imager experiment on the swedish viking satellite: contributions to auroral physics [J]. Can J Phys, 1991, 69: 1032-1039.
- [6] Adema J. Development of an ultraviolet auroral imager[C]// SPIE, 1999, 1344: 165-174.
- [7] Peng Ruyi, Fu Liping, Tao Ye. Study on the vacuum ultraviolet transmittance of barium fluoride crystals at different temperature [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(3): 713-716. (in Chinese)
- [8] Zhou Zhen, Qi Zhongliang, Qin Yong, et al. Research on high-precision temperature measurement of constant temperature control system of semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2012, 19(3): 221-235. (in Chinese)
- [9] Li Lijing, Yang Hui, Ma Yingjian, et al. Research on the pulse-width modulation working mode and spectrum-related issues of high-precision temperature control[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(6): 1588-1592. (in Chinese)
- [10] Yu Tao, Xu Shuyan, Song Kefei. Auto-focusing system based on temperature for space camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2085-2089. (in Chinese)
- [11] Li Yanwei, Yang Hongbo, Cheng Zhifeng, et al. Thermal/structural/optical integrated design for optical window in aerial remote sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2102-2106. (in Chinese)
- [12] Dai Junke, Jiang Haiming, Zhong Qirun, et al. LD temperature control system based on self-tuning fuzzy PID algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43 (10): 3287-3291. (in Chinese)