

文章编号 1004-924X(2013)11-2829-07

热扰动条件下投影物镜温度响应的高精度建模

秦 硕^{1,2,*}, 巩 岩¹, 于新峰¹, 袁文全¹, 彭海峰¹, 杨怀江¹
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021;
空军航空大学, 吉林 长春 130021)

摘要:针对投影物镜温度控制系统具有多重扰、多时滞和时间常数较大等问题,搭建了投影物镜温控实验平台;研究了实验平台的结构、激励信号设计、数据预处理方法和建模算法,建立了超高精度温度响应模型。首先,考虑光刻机对震动和洁净度的严格要求,设计了远距离串级水冷控制系统;进行了物镜温度的阶跃响应实验,采用两点法建立了物镜的温度响应传递函数(粗建模)。然后,根据获得的物镜阶跃响应传递函数,设计二位式伪随机辨识输入信号的参数,并采用分段线性化方法对输入输出数据进行预处理。最后,设计迭代最小二乘算法,辨识得到物镜的 ARMAX 温度响应模型(精建模)。基于该模型的物镜温控实验结果表明:在环境温度波动幅值达 0.6 °C 并加入 3 W 的热扰动条件下,物镜温度稳态误差控制在 ±0.001 °C 以内,满足光刻机对投影物镜的超高精度温度控制要求。

关键词:投影物镜;热扰动;伪随机信号;系统辨识;温度控制

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132111.2829

High accuracy temperature response modeling of projection lens under thermal disturbance

QIN Shuo^{1,2,*}, GONG Yan¹, YU Xin-feng¹, YUAN Wen-quan¹, PENG Hai-feng¹, YANG Huai-jiang¹

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,
Changchun Institute of Optics, Fine
Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China;
Aviation University of Air force, Changchun 130021, China)
* Corresponding author, E-mail: qinshuo666@163.com

Abstract: In consideration of the repetitive disturbance, time lag and a larger time constant in a temperature control system for the projection lens, a temperature control experimental platform of projection lens was built. The structures, data preprocessing method and modeling algorithm for the experimental platform were researched, and a high precision temperature response model was established. Firstly, Taking into account the request of a lithographic machine for stringent vibration and cleanliness, the long-distance range cascade water cooling control system was designed. Then, the step response experiment of projection lens on the temperature was carried on, and the temperature response transfer function of projection lens was established with the two-point method(coarse model). Furthermore, pseudo random input signal was designed on the basis of the transfer function, and the in-

收稿日期:2013-07-05;修订日期:2013-09-10.

基金项目:国家 02 专项基金资助项目(No. 2009ZX02005)

put and output data were preprocessed by using the piecewise linear method. Finally, the iteration least square algorithm was designed to obtain the ARMAX temperature response model of projection lens. The temperature control experiment based on the model show that the temperature stability of the projection lens achieves $\pm 0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ in environment temperature with a fluctuation amplitudes up to $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ and thermal disturbance of 3 W , which meets the requirements of projection lens of lithography for ultra-high-precision temperature control.

Key words: projection lens; thermed disturbance; pseudo-random signal; system identification; temperature control

1 引言

投影物镜是光刻机的核心部件。在曝光过程中,物镜温度的波动及不均匀分布会导致光学系统焦面漂移和成像畸变^[1]。因此,在热扰动条件下,对投影物镜温度响应进行精确建模与控制是提高光刻机性能和保障其可靠性的关键。

为消除温度波动对光学性能的影响,目前,国际上主要采用集成化分析方法进行光学系统的光机热一体化设计^[2]。M. Soukieh 等研究了在给定热边界条件下光学系统温度场的分布规律^[3]; Victor L G 等研究了环境温度对 Fizeau 干涉仪主机结构不稳定的影响^[4]。国内清华大学、北京空间机电研究所、中科院长春光机所和国防科技大学对光机热集成分析法进行了系统研究,并在航天相机和空间遥感器的热控和结构设计中获得成功应用^[5-13]。但是,对于由几十片光学元件组成的投影物镜,要实现纳米量级的曝光分辨率,需要将光刻物镜的温度稳态误差控制在 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内^[14],仅仅采用基于集成分析理论的热控技术难以实现这个目标。因此,在光刻领域,投影物镜还采取风冷或水冷的方式进行直接温度控制,目前尚未见有国外文献在这些方面进行过系统报道。

对被控对象进行辨识建模是实现精密控制的前提和基础^[15]。针对物镜温度控制系统存在多时滞、多重扰和大时间常数的特征,本文首先采用阶跃响应方法对物镜温度响应进行粗建模,再根据获得的物镜温度响应的传递函数,设计二位式伪随机辨识信号的参数,通过对模型参数和建模方法的不断修正与评价,获得投影物镜在伪随机热扰动条件下温度响应的精确 ARMAX 数学模型,最后采用循环水冷的的方式对模拟物镜进行直接温度控制实验,验证了模型的准确性和控制系

统的鲁棒性,为实现物镜的高精度温控打下了坚实的基础。

2 物镜温度响应建模实验平台设计

为保证建模的准确性,物镜温度响应建模实验的系统结构严格按照光刻机对物镜温控的要求设计,物镜的温度控制系统结构如图 1 所示。

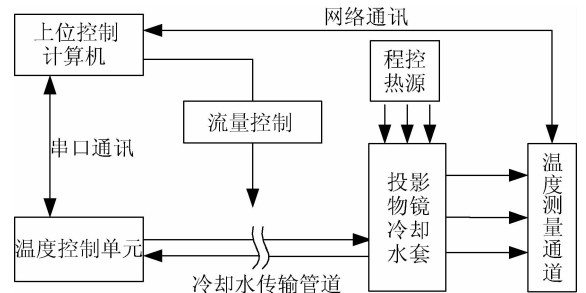


图 1 投影物镜温度控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of projection lens temperature control system

投影物镜温控系统由上位控制计算机、温度控制单元、冷却水传输管道、冷却水流量控制、模拟物镜、热源和温度测量通道组成。上位控制计算机通过网络通信和温度测量通道通信,获得物镜的实时温度;向温度控制单元发送冷却水温调节指令,通过冷却水传输管道和冷却水套调节物镜的温度。

3 投影物镜温度响应建模方法

投影物镜的精确数学建模是实现物镜超高精度温度控制的基础。从图 1 可以看出物镜温控系统存在诸多热扰动,如物镜与冷却水套之间存在不均匀的立体热交换;净化氮气、周围空气和支撑法兰与物镜之间存在对流、辐射和传导换热;冷却

水传输回路与周围空气和接触面存在对流换热和传导换热;另外,物镜自身内部热分布不均匀、热容量大。因此,从理论上建立物镜温控系统的数学模型很有难度。本文采用粗精两级实验建模的方法建立循环冷却水温与物镜温度响应的高精度控制模型。首先对物镜温度进行阶跃响应实验,采用二点建模法获得物镜的阶跃响应模型,然后在此基础上确立伪随机信号建模的基本参数,最终实现物镜温度响应的精确建模。

3.1 物镜温度响应的粗建模

物镜温度响应的粗建模采用阶跃响应方法来实现。阶跃响应建模法是一种非参数模型辨识方法,其基本思想是通过实验来测取物镜温度的阶跃响应曲线,再由该曲线计算出物镜温度响应的传递函数,通过曲线拟合的方式对实验模型进行验证与调整,以减小实验建模误差。

3.1.1 阶跃输入信号的选取

通过计算机有限元仿真计算发现,曝光过程的热负荷扰动将使物镜的温度上升值达 1°C 左右,阶跃信号幅值低于 0.5°C 时,信噪比过低,为提高信噪比,同时满足非线性系统的线性化要求,设定物镜温度阶跃变化的幅值为 1°C 。

3.1.2 阶跃建模方法

阶跃建模过程如下:在精密环控实验室内,温度控制单元(TCU)采用内循环的模式先将内部水温和物镜温度调节到 $(22 \pm 0.1)^{\circ}\text{C}$,然后上位控制计算机发送 23°C 水温调节指令,采用高精度测温仪采集物镜温度的变化,获得物镜的温度阶跃响应曲线如图 2 所示。

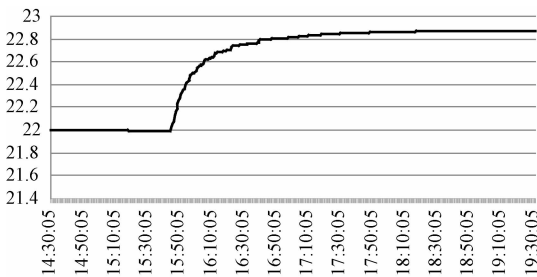


图 2 物镜温度阶跃响应曲线

Fig. 2 Step response curve of projection lens temperature

根据物镜温度的阶跃响应曲线,采用两点法获得系统传递函数,将该传递函数与实测数据进行拟合,并以相关系数最大、拟合误差最小的原则,对两点法建立的传函进行修正,设 T_1 、 T_2 分

别为物镜的实际测量值和传递函数输出值,那么 T_1 与 T_2 的相关系数 $r_{T_1 T_2}$ 和拟合误差 v 为:

$$r_{T_1 T_2} = \frac{n \sum_{i=1}^n T_{1i} T_{2i} - \sum_{i=1}^n T_{1i} \sum_{i=1}^n T_{2i}}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n T_{1i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n T_{1i} \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n T_{2i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n T_{2i} \right)^2 \right]}} \quad (1)$$

$$v = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{1i} - T_{2i})^2}}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

通过不断修正,最终得到系统的阶跃响应传递函数如式(3),其拟合误差为 0.018 6,相关系数为 0.984。

$$G(s) = \frac{0.876}{(1 + 1159s)(1 + 312s)} \quad (3)$$

3.2 物镜温度响应的精建模

在获得物镜温度阶跃响应传递函数的基础上,设计符合系统要求的伪随机辨识输入信号,使冷却水的温度按该信号规律变化,对获得的输入输出实验数据进行预处理后,采用迭代最小二乘法建立物镜的 ARMAX 模型。

3.2.1 二位式伪随机输入信号参数设计

设计合适的输入信号是获得良好辨识结果的关键。理论上,白噪声是良好的辨识信号,然而在工程中不易实现。本文选择具有近似白噪声性质的二位式伪随机信号作为辨识输入信号,该信号输入扰动小,单位时间、幅值和周期等参数可通过编程等手段实现,作为物镜辨识的二位式伪随机输入信号,结合物镜温控实验系统的实际工况,其 3 个核心参数的确定方法为:

(1)单位时间 Δt :为充分激励物镜温控系统的重要模态,二位式伪随机信号的频带需要覆盖温控系统的主要工作频段。单位时间选择过大,则无法充分激励系统的高频特性,选择过小,将减弱温控系统在重要频段的有效激励功率。在此选择 $\Delta t = 2\pi / (3\omega_{\max})$,其中 ω_{\max} 为温控系统的截止频率,通过上节获得的阶跃响应模型(3)在 MATLAB 环境下仿真确定为 0.008,因此取单位时间 $\Delta t = 262 \text{ s}$ 。

(2)信号幅度 a :信号幅度取值越大,信噪比就越大,辨识精度也将越高,但是考虑到系统的线性范围要求,一般信号幅值取额定值的 $3\% \sim$

5%, 考虑到物镜温控系统扰动因素多, 在此取额定值的 10%。

(3) 信号周期 T : 伪随机信号周期需要大于脉冲响应时间 t_M , 一般选择 $T=1.2 \times t_M$, 从上节物镜温度阶跃响应实验获得 t_M 值为 10 800 s, 因此信号周期取 12 960 s。

二式伪随机信号实现: 根据确定的信号周期 T 和单位时间 Δt , 由 $(N-1)\Delta t \geq T$, 得到 $N=51$, 从而取伪随机信号的级数为 6 级, 采用移位寄存器的方式, 可以得到理想的二式伪随机信号。

3.2.2 数据预处理与建模算法

在获得伪随机信号辨识试验过程中的水套温度与物镜温度的实际测量值后, 还需要对实验数据进行数据预处理, 包括数据重采样、高频滤波和去除稳态值等, 预处理后的数据才能用于系统辨识与建模。

由于物镜温度是一个慢时态的变化过程, 本文采用分段线性化的方法去除测量过程中的稳态值, 数据预处理后的实验曲线如图 3 所示。

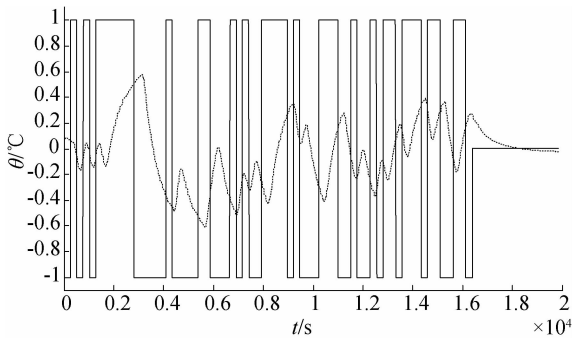


图 3 伪随机信号建模实验数据曲线

Fig. 3 Experimental data curves of pseudo-random signals

图 3 中, 实线和虚线分别是数据处理后的二式伪随机输入信号和物镜温度响应的实测信号。为实现对模型参数的无偏估计, 物镜温控系统模型采用 ARMAX 模型, 该模型考虑了系统的有色噪声, 抗噪性强, 其差分方程表达式为:

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-nk}B(q^{-1})u(k) + C(q^{-1})e(k), \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_nq^{-n}, \\ B(q^{-1}) &= b_1 + b_2q^{-1} + b_3q^{-2} + \dots + b_nq^{-n}, \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_nq^{-n}, \end{aligned}$$

式中: $u(k)$ 是输入数据序列, $y(k)$ 为输出数据序

列, $e(k)$ 为不相关随机噪声序列, na 和 nb 是模拟的阶次, nc 是噪声模型的阶次, nk 表示纯延迟。在进行辨识建模前, 先综合采用 FPE 定阶准则和拟合误差定阶准则确定 na 、 nb 、 nc 和 nk 的值。然后以图 3 中的数据作为输入输出数据, 采用迭代最小二乘算法准确估计 ARMAX 模型中的参数值, 最后获得物镜温度响应模型为:

$$\begin{aligned} (1 - 1.986q^{-1} + 0.9863q^{-2})y(k) = \\ q^{-1}(-0.0005777 + 0.0003427q^{-1} + \\ 0.0002703q^{-2})u(k) + (1 - 0.9234q^{-1})e(k). \end{aligned} \quad (5)$$

4 模型验证实验

通过实验获得物镜温度响应的精确数学模型后, 基于该模型设计物镜温度响应的控制算法, 并通过物镜的温度控制实验来验证模型的有效性和准确性。按图 1 所示原理框图建立的物镜高精度温控实验系统如图 4 所示。

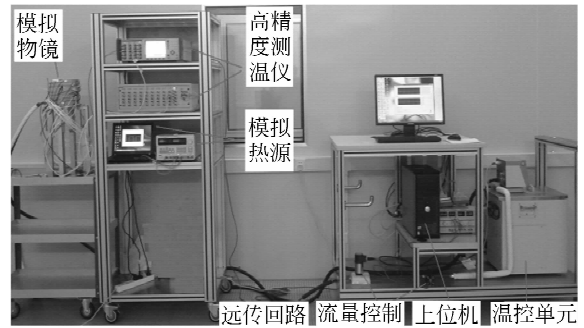


图 4 模拟物镜温控实验平台

Fig. 4 Temperature control experimental platform for projection lens

图 4 中, 从右至左依次为温度控制单元、上位控制计算机、流量控制系统、高精度测温系统、程控热扰动源, 以及与物镜结构相同的模拟投影光刻物镜。上位控制计算机运行温控软件, 通过网络通信从高精度测温仪获得物镜、镜片和环境的温度数据, 再依据基于物镜温度响应模型的控制算法, 向温度控制单元发送冷却水温度调节的控制指令, 并通过远距离传输管路实现从温度控制单元至模拟物镜冷却水套的循环回路, 模拟热源按照光刻机照明系统的实际工况, 向物镜施加热扰动。

实验过程如下: 在无热扰动条件下, 温控系统

先将投影物镜温度严格稳定在 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近。约 1 h 后,模拟热源开始向物镜施加方波热扰动,方波幅值为 3 W ,为模拟光刻机照明系统的实际曝光频率,设计热扰动方波周期为 30 s , 20 s 加热 10 s 停止加热。另外,考虑到物镜温度响应的时间常数较大,温度测量系统的采样频率设为 10 s 。实验数据如图 5~7 所示。

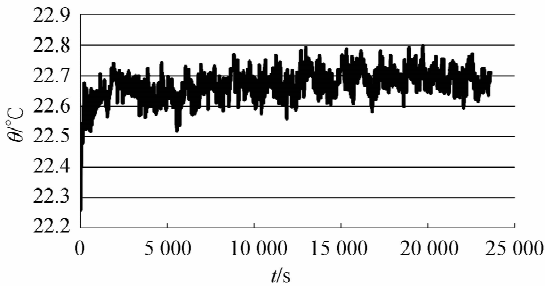


图 5 环境温度变化曲线

Fig. 5 Variation curve of environmental temperature

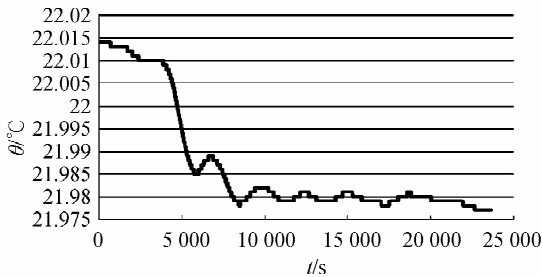


图 6 上位机水温调节指令

Fig. 6 Water temperature adjusting instruction of host computer

实验结果曲线表明,环境温度在 $22.2\sim 22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 波动(见图 5)的条件下,加入热扰动后,物镜温度开始上升至约 $22.004\text{ }^{\circ}\text{C}$ (见图 7)。与此同时,上位控制计算机从网口获得来自高精度温度测量系统的物镜温度值,并根据基于模型的控制律解算

得到温度控制单元的水温调节指令(见图 6),迅速地给物镜降温,使物镜温度的瞬态变化控制在 $(22\pm 0.01)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,而稳态值控制在 $(22\pm 0.001)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

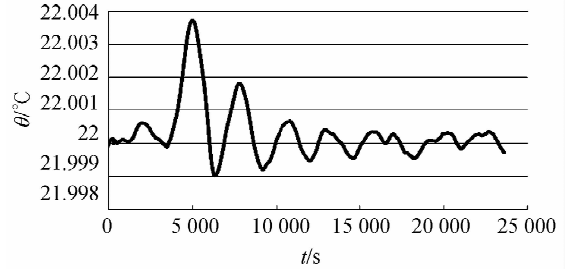


图 7 物镜温度响应曲线

Fig. 7 Temperature response curve of projection lens

5 结 论

针对投影物镜温度控制系统具有多重扰、多时滞和时间常数较大,难以采用理论精确建模的特征,按光刻机整机要求的指标建立了物镜温控实验系统,准确模拟物镜的实际工况。采用粗精两级实验建模的方法,在物镜阶跃响应建模的基础上设计伪随机响应建模实验,从而获得物镜精确的 ARMAX 数学模型。基于该模型建立的物镜温度控制系统具有很高的控制准确性和较强的鲁棒性,在环境温度大幅波动和模拟热源的间歇扰动下,物镜温度稳态误差达到了 $\pm 0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。建模过程和基于模型的温控实验结果表明,在准确模拟光刻机实际工况条件下的粗精两级实验建模方法,避免了复杂的理论推导,降低了建模难度,得到的模型实用性强,该建模方法具有较高的工程应用价值,对其他大时间常数被控对象的控制也具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] SOICHI O, HIROYUKI N, YUUKI I, *et al.*. Full-field exposure tools for immersion lithography [J]. *SPIE*, 2010 (34):164-170.
- [2] CULLIMORE B, PANCZAK T, BAUMANN J. Integrated analysis of thermal/structural/optical systems [J]. *SAE*, 2002(2444):1-8.

- [3] SOUKIEH M, ABDUL G B, HAMMADI M. Numerical calculations of temperature distribution of double layer metallic surface treated by laser beams [J]. *Optics & Laser Technology*, 2004(36):523-528.
- [4] VICTOR L G, KEITH B D, GREGORY J M. Optical performance as a function dynamic mechanical loading [J]. *SPIE*, 2008, 5178(4):1-6.
- [5] 王平,王汝冬,田伟,等. Fizeau 干涉仪主机的热稳定

- 性设计与分析[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(9): 2100-2107.
- WANG P, WANG R D, TIAN W, *et al.*. Design and analysis of thermal stability for main frame in Fizeau interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2100-2107. (in Chinese)
- [6] 杨献伟, 吴清文, 李书胜, 等. 空间光学遥感器热设计[J]. 中国光学, 2011, 4(2): 139-146.
- YANG X W, WU Q W, LI S S, *et al.*. Thermal design of space optical remote sensor [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 139-146. (in Chinese)
- [7] 张晓龙, 刘英, 孙强. 高精度非制冷长波红外热像仪的辐射标定[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 235-241.
- ZHANG X L, LIU Y, SUN Q, *et al.*. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 235-241. (in Chinese)
- [8] 顾国超, 王丽, 刘洪波, 高雁, 陈家琦. 瞬态热量标定系统的太阳模拟器光学系统设计[J]. 中国光学, 2012, 5(6): 630-639.
- GU G C, WANG L, LIU H B, *et al.*. Optical design of solar simulator used for transient calorimeter calibration system[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 630-639. (in Chinese)
- [9] 郭亮, 吴清文, 曹启鹏, 等. 空间相机电控机箱的热设计及仿真分析[J]. 中国光学, 2011, 4(2): 129-138.
- GUO L, WU Q W, CAO Q P, *et al.*. Thermal design and simulation analysis of electronic controlling cabinet in space camera[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 129-138. (in Chinese)
- [10] 叶伟楠, 董吉洪. 大口径主镜轻量化结构参数的优化设计[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 222-228.
- YE W N, DONG J H. Optimized design of light-weight structural parameters for large-aperture primary mirror[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 222-228. (in Chinese)
- [11] 李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2485-2490.
- LI ZH L, XUE D L, ZHANG X J. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2485-2490. (in Chinese)
- [12] 刘海波, 谭吉春, 沈本剑. 星敏感器光学系统的热/结构/光分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 875-879.
- LIU H B, TAN J CH, SHEN B J. Thermal/Structural/Optical analysis of optical system of star sensor[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3): 875-879. (in Chinese)
- [13] 郭亮, 吴清文, 颜昌翔. 空间光谱成像仪热设计参数的灵敏度[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(6): 1208-1217.
- GUO L, WU Q W, YAN CH X. Sensitivity of thermal design parameters for space spectral imaging apparatus [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1208-1217. (in Chinese)
- [14] EDESON R L, SHAUGHNESSY B M, WHALLEY M S. The mechanical and thermal design and analysis of the VISTA infrared camera[J]. *SPIE*, 2004, 5497: 508-519.
- [15] ZHAO Y, DAVID L T, RALF K H, *et al.*. Optimization and temperature mapping of an ultra-high thermal stability environmental enclosure [J]. *Precision Engineering*, 2010(34): 164-170.

作者简介:



秦 硕(1979—),男,湖南长沙人,博士,讲师,2005年、2008年于空军工程大学分别获得硕士、博士学位,主要从事自动控制方面的研究。E-mail: qinshuo666@163.com



巩 岩(1968—),男,吉林梅河口人,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为短波光学、光学系统光机集成设计、高精度光学系统装调技术。E-mail: gongyi@sklao.ac.cn



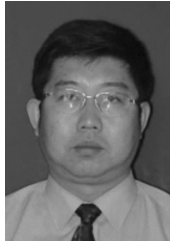
于新峰(1987—),男,内蒙古奈曼人,硕士,研究实习员,2009年、2011年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光机结构设计及分析方面的研究。E-mail: yu_xfeng@126.com



彭海峰(1986—)男,黑龙江尚志人,硕士,研究实习员,2008年、2011年于中国科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事精密光机系统设计方面的研究。E-mail: penghf@ciomp.ac.cn



袁文全(1982—),男,河南新乡人,硕士,助理研究员,2003年于四川大学获得学士学位,2009年于中国科学院力学研究所获得硕士学位,主要从事精密光机结构设计与分析。E-mail: yuanwenquan@tom.com



杨怀江(1966—),男,辽宁丹东人,研究员,博士生导师,主要从事信息安全、光学信息融合及深紫外光刻技术研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)