

激光与光电子学进展

精密透镜系统的模型预测热控方法

秦硕^{1,2*}¹空军航空维修技术学院航空电子系, 湖南 长沙 410200;²湖南省飞机维修工程技术研究中心系统维修研究室, 湖南 长沙 410200

摘要 针对半导体光刻领域的超高精度热控需求,提出一种基于模型预测的热控方法。生成透镜系统的阶跃和伪随机热扰动输入信号。采用高精度测温系统测量透镜系统的温度响应数据,运用模型辨识方法获得透镜系统的热响应模型。通过滚动优化策略推导模型预测热控制律,并建立精密透镜系统的热控实验平台。热控实验结果表明,该热控方法具有收敛速度快、抗干扰能力强、精度高的优点,温控误差可控制在 ± 8 mK内。热相差测试结果表明,该控制方法可抑制透镜系统的焦面漂移,适合应用在对温控精度要求较高的装备领域。

关键词 光学设计; 模型辨识; 模型预测控制; 精密透镜系统

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1722006

Model Predictive Thermal Control Method for Precision Lens System

Qin Shuo^{1,2*}¹Department of Avionics, Air Force Aviation Maintenance Technical College, Changsha 410200, Hunan, China;²Aviation Electronic Maintenance Laboratory, Aircraft Maintenance Engineering Technology Research Center of Hunan Province, Changsha 410200, Hunan, China

Abstract To mitigate the demand for ultrahigh precision thermal control in the field of semiconductor lithography, a thermal control method based on model prediction is proposed in this paper. The step and pseudorandom thermal disturbance input signals of a lens system are generated. The temperature response data of the lens system are obtained using a high precision temperature-measurement system, and the thermal response model of the lens system is obtained via the model identification method. The rolling optimization strategy is used to derive the model's predictive thermal control law, and the precision lens system's thermal control experimental platform is established. The thermal control experiment results show that the thermal control method has a fast convergence speed, strong anti-interference ability, high precision, and the temperature control error is controlled within ± 8 mK. The thermal-phase-difference test results show that the control method successfully suppresses the lens system's focal plane drift. Further, the method is suitable for application in the field of high-end equipment with strict temperature control accuracy requirements.

Key words optical design; model identification; model predictive control; precision lens system

1 引言

大型精密透镜系统,如光刻机投影物镜、空间相机和大功率激光系统对温度的控制精度要求越来越高^[1-3]。在半导体光刻领域,随着光刻机曝光分辨率的提高,为防止温度波动对成像质量的影响,高性能光刻机的投影精密透镜系统温度波动不能超过设定值的 ± 10 mK^[4]。光学系统的热控方法研究主要集中在半导体制冷器(TEC)、相变制冷、微通道散热等领域,

控制算法一般采用比例、积分以及微分(PID)控制。如:Datta等^[5-7]研究了激光器的微通道散热方法;张安迪等^[8]采用半导体加热制冷的的方式,运用模糊PID控制算法使半导体激光器的温控精度达到了 ± 0.1 °C;朱均超等^[9]为解决固体激光器光学晶体产生的热沉积问题,提出了一种基于TEC的高控温精度、大控温范围光学晶体温度控制方案,确保了光学晶体工作的稳定性;周根弟^[10]通过研究神经网络整定PID参数,提高了系统的温度控制精度、半导体激光器的工作温度稳

收稿日期: 2021-12-15; 修回日期: 2022-02-16; 录用日期: 2022-04-07

基金项目: 湖南省自然科学基金(2019JJ70021)

通信作者: *qinshuo666@163.com

定性以及输出光功率的稳定性;曾强辉^[11]采用主、副 PID 控制的串级控制结构设计了浸没式光刻机浸没单元恒温微环境控制器。

本文针对大型精密透镜系统热响应时间常数大,对热控精度和均匀性要求高的问题,提出了一种超高精度的热控方法。首先,采用伪随机信号输入的方法建立大型精密透镜系统的高精度热响应模型。然后,设计了基于模型预测的热控算法以及冷却水套和高精度测温系统。最后,搭建了多级液冷热控实验平台,并通过干涉仪测量透镜系统随温度变化的焦面漂移情况。

2 模型预测控制

模型预测控制以预测模型为基础,采用二次在线滚动优化性能指标和反馈校正的策略克服被控对象在结构、参数、环境和建模误差等方面的不确定性,非常适合大采样周期、慢动态过程的控制,是解决热控问题的有效方法^[12-14],在高精度驱动控制、液体循环粘度控制等工业控制领域得到广泛应用^[15]。模型预测控制器的基本结构包括反馈校正、滚动优化和预测模型三大部分,如图 1 所示。其中:参考轨迹能使参考信号按一定规律变化,防止设定值出现突变引起的系统调节较大问题;预测模型是一个经辨识后给定的模型初始值,经反馈校正和滚动优化算法不断调整,最终使透镜系统的温度输出和预测模型的输出基本一致,从而实现控制指令的寻优,该方法特别适用于热响应时间常数很大的透镜系统热控方法。

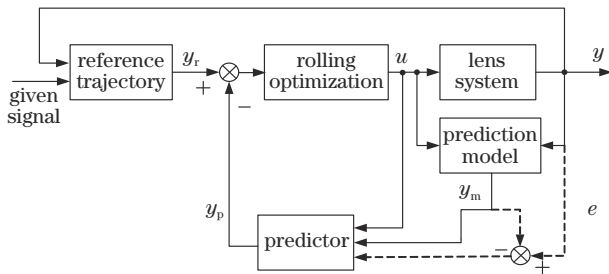


图 1 模型预测控制器的基本结构

Fig. 1 Basic structure of the model predictive controller

3 透镜系统热响应预测模型的建立

模型预测控制的第一步是获得被控对象的初始预测模型。为了获得精密透镜系统较为精确的数学模型,基于伪随机输入信号建立被控对象的带外部干扰自回归移动平均(ARMAX)模型^[16]。设计合适的输入信号是获得良好辨识结果的关键,因此,选择具有近似白噪声性质的二位数伪随机信号作为辨识输入信号,该信号的输入扰动小,且单位时间、幅值和周期等参数均可通过编程实现。通过精密设计伪随机输入信号的单位时间、信号幅度和信号周期等参数^[17],获得精密透镜系统的伪随机热扰动输入信号,采用高精度测温系统测量精

密透镜系统的温度响应,获得的输入输出信号如图 2 所示。其中, T 为温度, t 为时间,方波为伪随机输入信号,该信号的中值为 $22\text{ }^\circ\text{C}$,其幅值在 $21\sim 23\text{ }^\circ\text{C}$ 之间以伪随机形式变化,曲线为透镜的温度响应信号。可以发现,透镜系统的热响应时间常数较大,热扰动输入(方波)后约 10 min 透镜系统的温度才逐渐开始变化。

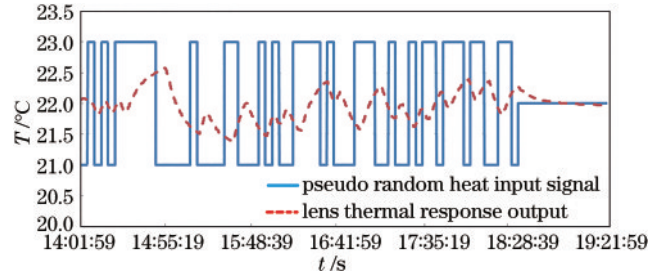


图 2 精密透镜系统的伪随机建模输入输出信号

Fig. 2 Pseudo random input and output signal of precision lens system

对伪随机热扰动输入信号进行自相关分析,得到该信号的白噪声特性如图 3 所示。其中, τ 为延迟时间, $R_x(\tau)$ 为信号延迟 τ 后的相似性。可以发现,精密透镜系统产生的伪随机信号具有较好的白噪声特性,满足系统建模输入信号的要求。为实现对参数的无偏估计,透镜系统热响应模型采用 ARMAX 模型,通过对实验数据进行数据重采样、高频滤波和去除稳态值等预处理,采用迭代最小二乘算法估计 ARMAX 模型中的参数值,最终获得的透镜系统热响应模型为

$$(1 - 1.824q^{-1} + 0.72q^{-2})y(k) = q^{-1}(-0.000468 + 0.00039q^{-1} + 0.00042q^{-2})u(k) + (1 - 0.98q^{-1})e(k), \quad (1)$$

式中: k 为采样次数; q 为后向移位算子; $e(k)$ 为随机噪声序列; $y(k)$ 为透镜系统的温度; $u(k)$ 为系统的输入。可以发现,透镜系统的热响应模型是一个具有纯延迟环节和噪声的 2 阶模型。

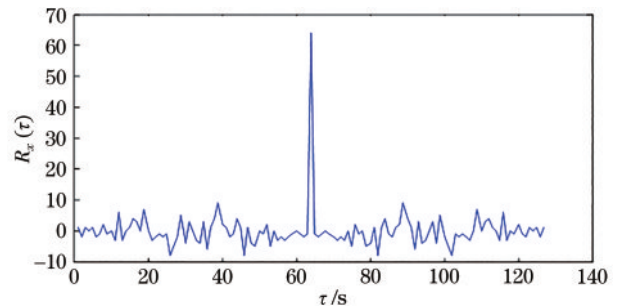


图 3 伪随机热扰动输入信号的自相关分析曲线

Fig. 3 Autocorrelation analysis curve of pseudo random thermal disturbance input signal

4 模型预测热控制律的设计

对式(1)进行 Diophantine 方程^[18-20]变换,得到设

计透镜系统的温度变化预测模型为

$$Y = G\Delta U_1 + f, \quad (2)$$

式中: Y 为输出向量; ΔU_1 为控制输入列向量; f 为已知输出列向量; G 为系数矩阵。代价函数可表示为

$$J(k) = \|Y(k) - W(k)\|_Q^2 + \|\Delta U_1(k)\|_\lambda^2, \quad (3)$$

式中: $W(k)$ 为参考轨迹; Q 为误差系数对角阵; λ 为控制系数对角阵, 可表示为

$$Q = \text{diag}[q_1, \dots, q_n], \lambda = \text{diag}[\lambda_1, \dots, \lambda_m], \quad (4)$$

$$W(k) = [\omega(k+1), \dots, \omega(k+n)]^T. \quad (5)$$

对代价函数求控制输入的偏导数, 并使其等于 0, 得到的最终模型预测控制律为

$$u_1(k) = u_1(k-1) + g^T(W - f), \quad (6)$$

式中, g^T 为 $(G^T G + M)^{-1} G^T$ 的第 1 行。

5 热控实验平台设计

热控实验平台由主控中心、水温控制单元(TCU)、流量控制系统、高精度测温仪、传输管路、冷却水套和干涉仪等组成, 实验系统结构如图 4 所示。其中: 测温仪测量透镜系统温度梯度和温控点的温度, 并将透镜系统的温度值发送给主控中心; 主控中心运行模型预测热控算法生成水温调节指令并发送给 TCU; TCU 和流量控制系统通过远传管路向冷却水套传输冷却水调节精密透镜系统的温度, 最后通过干涉仪测量不同热控条件下透镜系统的焦面漂移, 以验证热控效果。

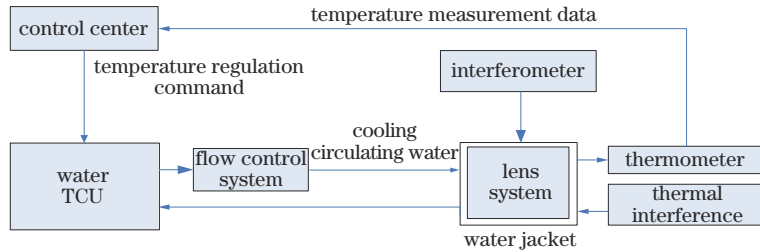


图 4 热控实验平台的结构

Fig. 4 Structure of the thermal control experimental platform

主控中心由工控机、流量控制系统、控制面板等组成。控制面板上安装有启动电门和各种通讯电缆, 接通启动电门后, 工控机运行热控程序并向水温控制单元发送水温控制指令; 水温控制单元负责调节冷却水的温度, 冷却水通过传输管道与换热水套的进出水口相连, 主控中心的工控机运行热控算法程序, 产生水温调节控制指令, 通过设定水温值调节透镜系统的温度。主控中心和水温控制单元的实物如图 5 所示。

精密透镜系统由 3 个高精度镜组级联而成, 包含壳体、镜片、支撑结构和法兰等结构。为提高换热能力、降低接触热阻和增强温控效率, 在透镜系统外部安装了导热率极高的冷却水套, 水套由铝合金壳体、紫铜水管和支持座等结构组成。为隔离外部的热干扰, 水套外部喷涂了厚度为 0.3 mm、热导率为 0.07 W/(m·K) 的隔热漆。冷却水从进水口进入水套, 与透镜系统换

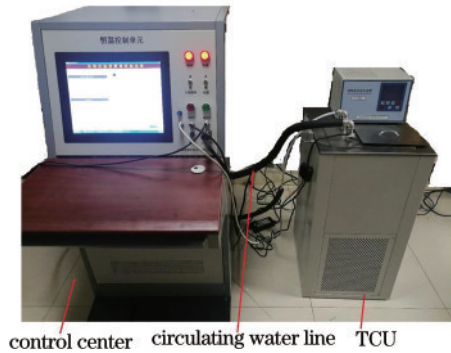


图 5 超高精度温控实验平台的实物图

Fig. 5 Physical map of the high precision temperature control experimental platform

热后从出水口流出水套。透镜系统和换热水套的结构如图 6 所示。

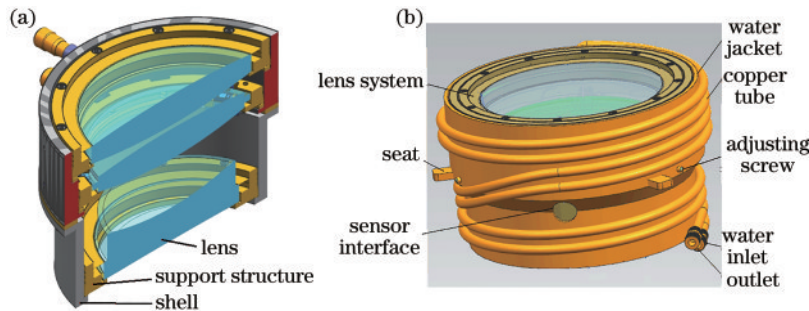


图 6 透镜系统和冷却水套的结构。(a)精密透镜系统的结构;(b)冷却水套的外观图

Fig. 6 Structure diagram of lens system and cooling water jacket. (a) Structure of precision lens system; (b) appearance drawing of the cooling water jacket

为实现对镜片温度的高精度测量, 超高精度测温系统由测温准确度为 $\pm 0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 FLUKE 的 5641 热敏电阻温度传感器、温度扫描器 HART 2590 和温度测量仪 HART 1594 构成。16 支温度传感器通过温度扫描器 HART 2590 和测温仪 HART 1594 连接, 并通过网口将温度数据发送至主控中心。温度传感器贴在镜

片的上下表面中心、边缘和镜框的上下表面, 传感器和加热片的分布如图 7(a) 所示。为减小外界气流对传感器的干扰, 对 5641 热敏电阻温度传感器进行了改装, 通过银盘适当增大了传感器与镜片和镜框表面的接触面积, 采用聚四氟乙烯 (PTFE) 隔离了外界空气对传感器的干扰, 改装后的传感器结构如图 7(b) 所示。

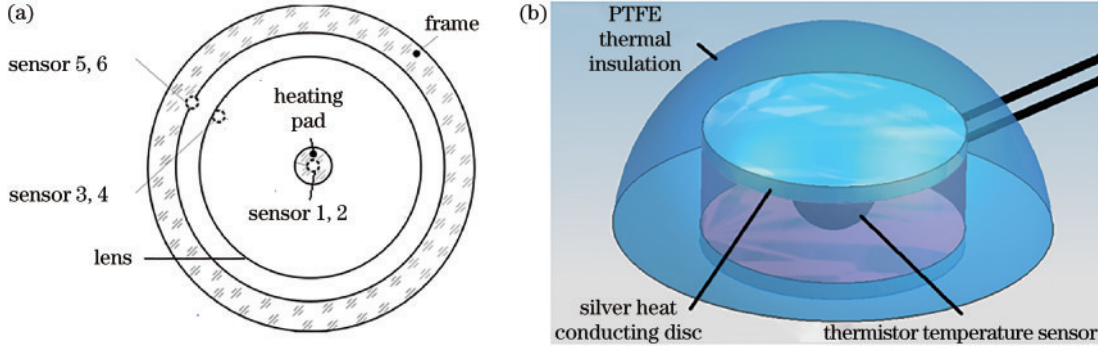


图 7 温度传感器的示意图。(a)传感器的安装位置;(b)传感器的安装方法

Fig. 7 Schematic diagram of the temperature sensor. (a) Installation position of the sensor; (b) installation method of the sensor

透镜系统及冷却水套通过安装支架固定在光学干涉仪的下方, 用热干扰源模拟系统工作时激光的热扰动^[21]。干涉仪、透镜系统、测温仪和干扰源的实验场景如图 8 所示。

算法, 实验 2 采用本模型中的预测热控算法, 均施加 15 W 的阶跃热扰动(通过电加热片实现), 加热片的输出功率为 15 W。在加热过程中利用干涉仪对透镜系统的成像质量进行测试, 以验证热控效果。实验 1 和实验 2 中透镜系统的温度响应曲线如图 9 所示。从图 9(a) 可以发现, 采用传统 PID 热控算法对透镜系统进行温度控制并加入热扰动后, 透镜系统温度快速上升, 最终热平衡稳定在 $22.027\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 温控误差不能满足 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的精度要求, 且透镜系统达到温度稳态的时间较长, 约需要 4.0 h。从图 9(b) 可以发现, 在相同的热扰动情况下, 采用模型预测控制算法及控制策略可将透镜的系统温度波动范围控制在 $(22 \pm 0.008)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 满足稳态误差优于 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的要求, 且只需 0.5 h 就能使透镜系统的温度进入稳态, 温度收敛速度较快, 优于传统的 PID 控制策略。

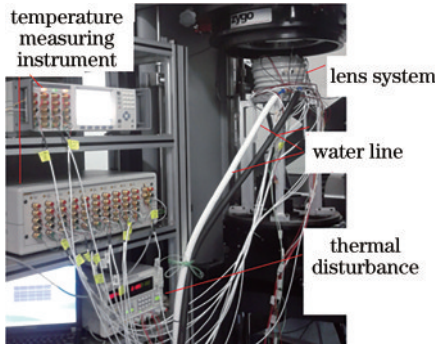


图 8 实验场景图

Fig. 8 Experimental scene diagram

6 实验结果及分析

热控实验分 2 组进行, 实验 1 采用传统的 PID 控制

对于实验采用的透镜系统, 温度变化对透镜系统焦面的影响最大, 可用干涉仪测量结果中 Fringe Zernike 的 Z_4 项系数表征焦面漂移的均方根误差 (RMS), 结果如图 10 所示。可以发现: 采用实验 1 的

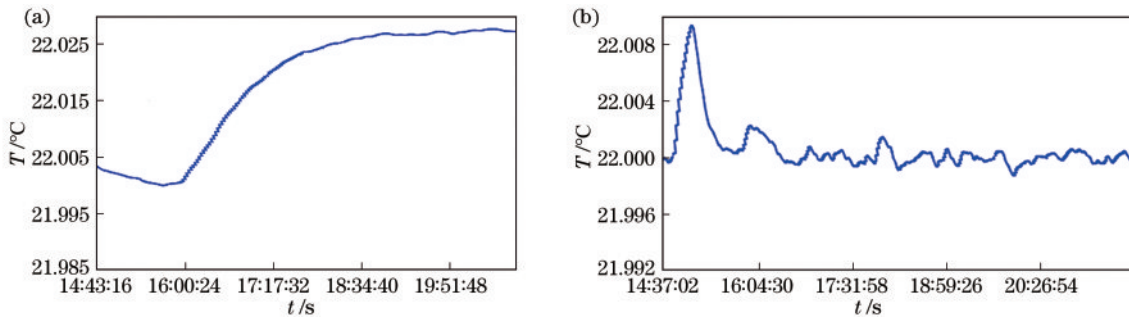


图 9 透镜系统温控点的温度曲线。(a)实验 1;(b)实验 2

Fig. 9 Temperature curve of the temperature control point of the lens system. (a) Experiment 1; (b) experiment 2

温控方法时,透镜系统整体温升在增加,导致系统的焦面漂移一直在增加,波像差中的 Z_4 项系数约从 11 nm 增加到 43 nm;采用模型预测温控算法时,在施加热载的过程中,透镜系统整体温升被严格控制在(22±

0.01) °C 内,刚开始加热时透镜系统波像差中 Z_4 项系数增加到约 19 nm,随着透镜系统温度回调,波像差的 Z_4 项系数约减小到 12 nm,这表明该热控方法使透镜系统的焦面漂移变化很小。

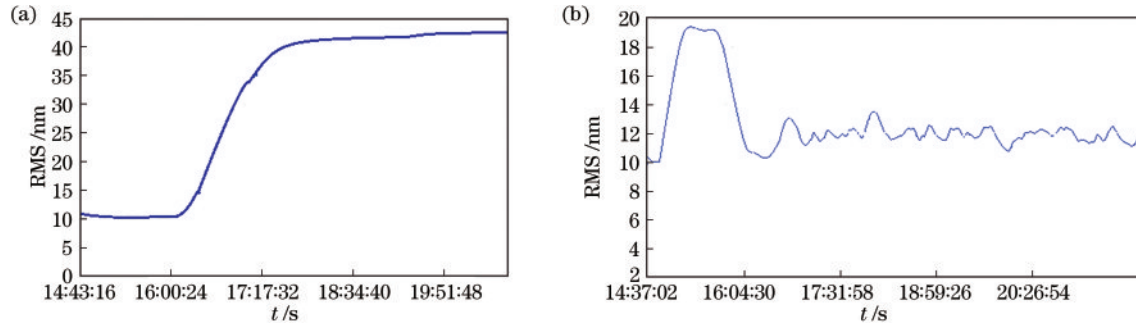


图 10 透镜系统波像差中 Z_4 的变化趋势。(a)实验 1;(b)实验 2

Fig. 10 Variation trend of Z_4 in the wave aberration of the lens system. (a) Experiment 1; (b) experiment 2

7 结 论

将模型预测控制用于大时间热响应常数精密透镜系统的热控研究,先通过伪随机信号建模方法获得被控对象较为精确的热响应预测模型,对该模型进行 Diophantine 方程变换,选择合适的参考轨迹和代价函数,最终获得了水温调节控制规律。热控实验结果表明,基于模型预测的热控方法使透镜系统的温度瞬态误差、稳态误差和收敛速度等方面均优于传统的 PID 控制方法,透镜系统的温度稳态误差控制在±8 mK 以内,有效降低了透镜系统成像的焦面漂移,大幅缩短了透镜系统温度波动的时间,能满足半导体光刻领域精密透镜系统严苛的热控需求。

参 考 文 献

- [1] 于德洋. 中红外全固态激光器热电控制关键技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019.
Yu D Y. Research on the key technologies of thermal and electrical control in mid-infrared all-solid-state laser[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [2] 周泽鑫, 孙志强, 徐冰, 等. 空间光学遥感器真空热试验工装模块化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(8): 1544-1551.
Zhou Z X, Sun Z Q, Xu B, et al. Modularization design of vacuum thermal test frock for space optical remote sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(8): 1544-1551.
- [3] 刘绍然, 刘百麟, 张文睿, 等. 地球同步轨道星载光电设备热控系统热设计[J]. 激光与红外, 2018, 48(11): 1404-1410.
Liu S R, Liu B L, Zhang W R, et al. Thermal control system design of the geostationary orbitsatellite-borne optical-electro-mechanical instrument[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(11): 1404-1410.
- [4] 彭海峰, 于新峰, 秦硕. 光刻投影物镜恒温水套小比例模型的设计与性能测试[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 081201.
Peng H F, Yu X F, Qin S. Design and performance testing of constant-temperature water jacket small-scale model of lithographic projection lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 081201.
- [5] Datta M, Choi H W. Microheat exchanger for cooling high power laser diodes[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90: 266-273.
- [6] Wang J R, Min J C, Song Y Z. Forced convective cooling of a high-power solid-state laser slab[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(5/6): 549-558.
- [7] Jia G N, Qiu Y T, Yan A R, et al. Laser three-dimensional printing microchannel heat sink for high-power diode laser array[J]. Optical Engineering, 2016, 55(9): 096105.
- [8] 张安迪, 张艳荣, 李涛. 论域可变的模糊 PID 控制在半导体激光器温度控制系统中的应用[J]. 光学学报, 2021(12): 1214003.
Zhang A D, Zhang Y R, Li T. Application of variable domain fuzzy PID control in semiconductor laser temperature control system[J]. Acta Optica Sinica, 2021(12): 1214003.
- [9] 朱均超, 豆梓文, 李嘉强, 等. 高精度大范围的光学晶体温度控制系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(7): 1604-1611.
Zhu J C, Dou Z W, Li J Q, et al. High-precision and wide-range optical crystal temperature control system[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(7): 1604-1611.
- [10] 周根弟. 高稳定度激光光源温度控制算法研究和实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
Zhou G D. Research and application of temperature control system for high stability laser source[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [11] 曾强辉. 浸没式光刻机浸没单元微环境恒温气浴技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

- Zeng Q H. Research of airshowering for the unit of the immersion lithography[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [12] Kumar R, Wenzel M J, ElBsat M N, et al. Stochastic model predictive control for central HVAC plants[J]. *Journal of Process Control*, 2020, 90: 1-17.
- [13] Broomhead T, Manzie C, Hield P, et al. Economic model predictive control and applications for diesel generators[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(2): 388-400.
- [14] Li X M, Ahmed Q, Rizzoni G. Nonlinear robust control of marine diesel engine[J]. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2017, 16(1): 1-10.
- [15] Shalmani R A, Rahmani M, Bigdeli N. Nash-based robust distributed model predictive control for large-scale systems[J]. *Journal of Process Control*, 2020, 88: 43-53.
- [16] Simms L E, Engebretson M J, Rodger C J, et al. Predicting lower band chorus with autoregressive-moving average transfer function (ARMAX) models[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, 124(7): 5692-5708.
- [17] 秦硕, 巩岩, 于新峰, 等. 热扰动条件下投影物镜温度响应的高精度建模[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2829-2835.
- Qin S, Gong Y, Yu X F, et al. High accuracy temperature response modeling of projection lens under thermal disturbance[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2829-2835.
- [18] Viljoen J H, Muller C J, Craig I K. Hybrid nonlinear model predictive control of a cooling water network[J]. *Control Engineering Practice*, 2020, 97: 104319.
- [19] 秦硕, 巩岩, 袁文全, 等. 大时间热响应常数投影物镜的超高精度温度控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 108-114.
- Qin S, Gong Y, Yuan W Q, et al. High precision temperature control for projection lens with long time thermal response constant[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 108-114.
- [20] Bella S, Houari A, Djerioui A, et al. Robust model predictive control (MPC) for large-scale PV plant based on paralleled three-phase inverters[J]. *Solar Energy*, 2020, 202: 409-419.
- [21] 徐加超, 夏志新, 陈鹏, 等. 中空环形激光热源建模及温度场有限元模拟[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1701003.
- Xu J C, Xia Z X, Chen P, et al. Modeling of hollow ring laser heat source and finite element simulation of temperature field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1701003.