

文章编号 1004-924X(2013)01-0108-07

# 大时间热响应常数投影物镜的超高精度温度控制

秦 硕<sup>1,2\*</sup>, 巩 岩<sup>1</sup>, 袁文全<sup>1</sup>, 杨怀江<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;

2. 空军航空大学, 吉林 长春 130021)

**摘要:**为满足高分辨率光刻机控制大时间热响应常数投影物镜温度时响应速度和超高精度的要求,设计了前馈——串级水冷投影物镜温控系统。该系统以物镜为主控对象、冷却循环水为副控对象。针对物镜的慢动态温度变化特征,采用模型预测控制作为外环主控制算法;针对冷却水远传回路的纯时滞特性,采用带 Smith 预估器的 PID 控制作为内环副控制算法;为解决光刻机在不同工况下激光光路对物镜温度的严重扰动,引入前馈补偿控制激光热扰动。最后,在不同控制结构和热干扰条件下,进行了模拟物镜温度控制实验。结果显示,物镜温度稳态误差曲线在 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内波动。实验证明该系统极大地提高了物镜的温度收敛速度,具有较强的抗干扰能力,能满足物镜的超高精度温度控制要求。

**关键词:**投影物镜;温度控制;串级控制;大时滞;模型预测;前馈补偿

**中图分类号:** TN305.7; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132101.0108

## High precision temperature control for projection lens with long time thermal response constant

QIN Shuo<sup>1,2\*</sup>, GONG Yan<sup>1</sup>, YUAN Wen-quan<sup>1</sup>, YANG Huai-jiang<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academ of Sciences, Changchun 130022, China; Aviation University of Air Force, Changchun 130021, China)

\* Corresponding author, E-mail: qinshuo666@163.com

**Abstract:** A feedforward-cascade water cooling control system is presented to meet the requirements of a projection lens in a high-resolution optical lithography for the fast convergence and high performance temperature control. The system takes an objective as the primary control object and the cooling water as a secondary control object. According to the slow dynamic temperature response characteristics of the projection lens, model predictive control is adopted as the outer loop main control algorithm. On the basis of the large time-delay problems of a cooling water circuit, the PID control with a Smith predictor is used as the inner loop auxiliary control algorithm. To overcome the serious disturbance in optical lithography at different operating status, the feedforward compensation is introduced to control the laser thermal interference. Finally, the temperature control experiment for the objective is simulated under the conditions of different control structures and thermal interferences. The results show that the stable-state error curve of the objective is in the  $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The control experimental results demonstrate that the method has fast convergence and strong anti-interference, and meets the requirements of the projection lens for ultra-precision temperature control.

收稿日期:2012-08-12;修订日期:2012-10-29.

基金项目:国家 02 专项基金资助项目(No. 2009ZX02005)

**Key words:** projection lens; temperature control; cascade control; long time delay; model prediction; feedforward compensation

## 1 引言

要实现曝光分辨率 90 nm 的目标,必须考虑光刻机投影物镜内部温度微小波动引起的玻璃折射率和镜片面形的变化,因为这些变化会导致焦面位置漂移和成像畸变。为降低热对成像质量的影响,一方面需要在设计镜头结构时实现镜片的热膨胀无约束支撑,使镜片的热膨胀不产生高阶像差;另一方面是要对物镜进行超高精度恒温控制,使物镜温度稳态误差控制在  $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。然而,投影物镜由数十块大小不一的镜片及复杂的支撑结构组成,热响应时间常数大(通常 8 小时以上),内部热分布不均匀,并和外界发生着不确定的热交换,很难准确建立物镜的热响应数学模型;另外,为最大限度地提高光刻机产能,物镜温度需要以最快的速度收敛。这些因素和要求,对物镜超高精度的温度控制提出了巨大的挑战。

目前,国内外一般采用自适应控制、智能控制和 PID 控制相结合的方法来研究多时滞、大时间热响应常数被控对象的温度控制问题<sup>[2-4]</sup>。但投影物镜的超高精度温度控制作为光刻机的关键技术之一,国外除少量专利简单涉及到物镜温控系统的基本结构外,未见有其它详细阐述光刻物镜温度控制算法的相关文献。国内成都光电技术研究所研究了投影物镜的模糊 PID 温度控制算法, SIMULINK 仿真结果表明该算法使亚半微米物镜的温度控制精度达到  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[5]</sup>;华中科技大学研究了智能决策和非线性 PI 控制相结合的温控方法,并将其用在小型模拟物镜的温控实验中,取得了较好的效果<sup>[6]</sup>,上述研究虽然取得了较好的成果,但还处于仿真或实验室模型验证阶段。

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来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因素的影响,非常适合大采样周期慢动态过程的控制,是解决温度控制问题的有效方法<sup>[7-8]</sup>,近年来在高精密驱动控制<sup>[9]</sup>、液体循环环度控制<sup>[10]</sup>等工业过程控制领域得到了成功的应用,

为物镜的超高精度控制提供了一种新的解决方案。

本文以投影物镜为主控制对象,采用模型预测控制为主控制算法,以冷却循环水为副控对象,采用带 Smith 预估器的 PID 算法为副控制算法,建立了投影物镜的串级水冷温度控制系统;同时,对激光干扰源引入前馈补偿控制,一旦激光热干扰出现,立刻产生预调节作用,使物镜温度稳态误差控制在  $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内。

## 2 投影物镜温度控制系统结构

### 2.1 被控对象特性分析

为制定正确的控制策略,首先需要对被控对象的特性进行分析,以获得具体的特征参数。采用 UG NX Thermal / Flow 软件对某投影物镜进行建模分析,该模型仿真分析了物镜在工作状态下的实际温度分布,其热分布仿真结果如图 1 所示。

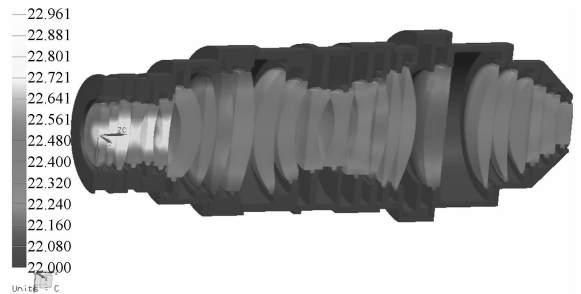


图 1 投影物镜结构及热分析图

Fig. 1 Projection lens structure and thermal analysis

从图 1 可以看出该型物镜内部温度分布不均匀,最大温度梯度达到  $0.961\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;其热响应时间常数很大,达到了 9.2 h。另外,在实际工作中,激光热源和环境温度的波动将对物镜的温度稳定性和均匀性形成干扰。因此,采用传统的 PID 控制方法难以实现投影物镜的超高精度温控目标。

### 2.2 物镜温控系统结构设计

根据对物镜进行建模分析得出的结果并考虑光刻机内部对振动和洁净度的严格要求,采用多级水冷方式对物镜温度进行控制,冷却介质为去离子水,系统总体结构如图 2 所示。

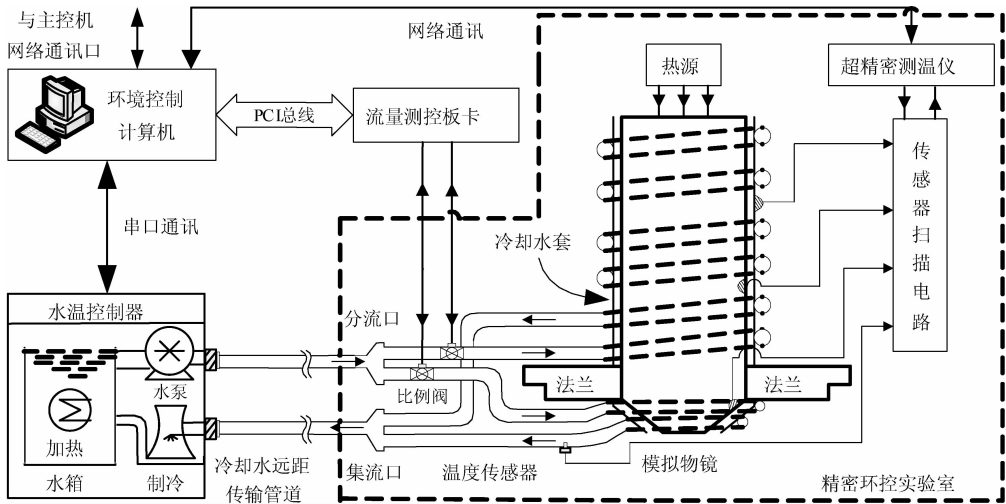


图 2 投影物镜温度控制系统结构图

Fig. 2 Temperature control system structure for projection lens

物镜温度控制系统由水温控制器、冷却水远距离传输管道、流量控制比例阀、冷却水套(上、下两部分)、温度传感器、传感器扫描测量电路、超精密测温仪和环境控制计算机等组成。考虑到光刻机对振动和洁净度的严格要求,分流集流管道、冷却水套、传感器扫描电路、超精密测温仪和物镜放置在精密环控实验室内,向外散发热量和振动的水温控制器、环境控制计算机安装在远离物镜隔振平台的精密环控实验室之外。环境控制计算机通过网口和超精密测温仪通讯,获得物镜、水套和集流口水温值,根据物镜的温度和光刻机的工况,计算冷却水的水温设定值,通过串口将水温设定值命令发至水温控制器,水温控制器作为控制执行机构,实现水温的快速调节,然后将冷却水通过远距离传

输管道送至上、下两个冷却水套,物镜通过和水套进行热交换,实现物镜的恒温控制,通过比例阀对上下两个水套的流量控制,实现物镜上下温度的均匀性控制。

### 3 物镜温度控制策略及算法设计

#### 3.1 物镜温度控制策略

针对投影物镜时间常数大、存在多重热扰动(包括外界环境对远传回路冷却水的传导和对流干扰,激光热源、净化气体、外界空气和接触法兰对物镜的直接热扰动)的特点,采用基于 MPC 的前馈—串级控制方法对物镜温度进行控制,系统原理如图 3 所示。

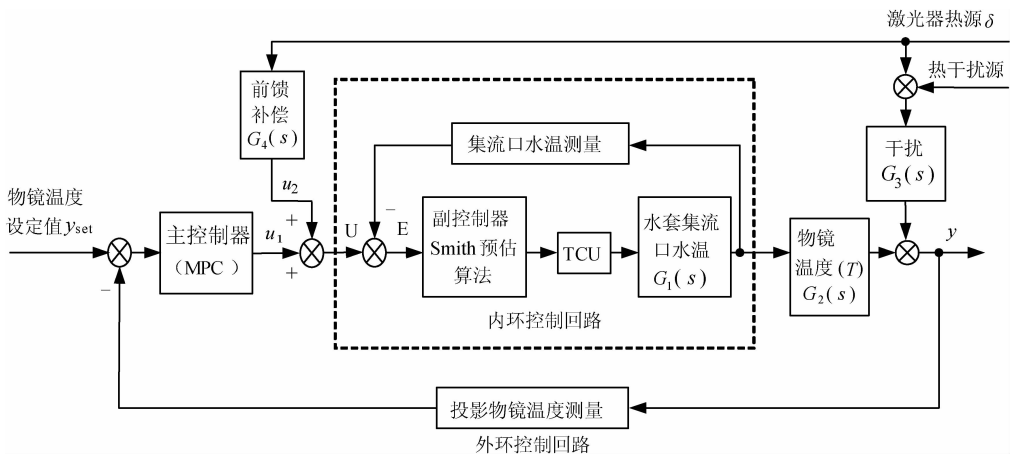


图 3 投影物镜温度控制原理框图

Fig. 3 Principle diagram of temperature control for projection lens

图3中,内环控制回路以水套集流口水温为被控对象,由副控制器、TCU、远传回路传递函数和水套集流口水温构成,采用带Smith预估器的PID控制算法。因为集流口水温的调节速度比物镜温度的调节速度快很多,故将内环控制回路作为随动系统,通过快速调节集流口水温而间接控制物镜的温度,并抑制外界对远传回路冷却水传导和对流换热的影响。

外环控制回路以物镜温度为直接控制对象,在内环控制回路的基础上,由物镜温度设定环节、主控制算法和投影物镜温度测量环节构成。针对物镜时间常数大的特性,主控制器采用适合慢动态过程的模型预测控制算法,并抑制外界直接作用在物镜上的各种热扰动。

在主控制回路中,引入激光器热源的前馈补偿控制。模型预测控制是一种基于反馈校正的控制方法,当发生干扰时,只要物镜温度没有发生变化,控制器就不产生作用,是一种滞后的通用偏差抑制方法。由于物镜热时间常数大,热干扰源对物镜的影响要通过较长时间才能体现在物镜温度的变化上,为尽量降低光刻机工况变换时物镜的温度波动,对激光器热源引入前馈补偿控制。

通过前馈-串级控制结构,基本上可针对主干扰源和各级扰动进行有效抑制和控制,实现大时间常数、多时滞和多重扰动物镜温度的快速收敛和高精度稳定。

### 3.2 基于MPC的前馈-串级控制算法

#### 3.2.1 系统建模

根据图3控制原理框图,需要建立激光能量与物镜温度响应之间的扰动模型 $G_3(s)$ ,TCU冷却水温与物镜温度响应之间数学模型 $G_2(s)$ ,TCU内冷却水温与水套集流口水温之间的数学模型 $G_1(s)$ 。为最大限度地获得被控对象精确的数学模型,采用粗精两级模型辨识的步骤进行系统建模。采用系统阶跃响应和曲线拟合的方法进行系统粗辨识,在获得系统初步模型的基础上,采用伪随机输入信号和最小二乘法的方法获得系统较精确的模型<sup>[11]</sup>。 $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 传递函数模型为:

$$G_1(s) = \frac{0.0864s + 0.0000248}{s^2 + 0.24s + 0.000027} e^{-25s}, \quad (1)$$

式(1)表明,远传回路使得TCU水温与水套集流口水温之间有25s左右的纯时滞。

$$G_2(s) = \frac{0.000032}{s + 0.0000034}. \quad (2)$$

由式(2)可以算出,物镜的温度响应时间常数很大,约为9.2h。

#### 3.2.2 主控制器MPC控制算法

将模拟物镜的温度响应模型 $G_2(s)$ 通过双线性Z变换,取外环控制回路采样周期为120s(以内环响应周期为确定依据,见图4),获得被控对象的CARIMA模型为:

$$(1 - 0.9959z^{-1})y(k) = (0.00192 + 0.0019z^{-1})u_1(k-1) + \xi(k), \quad (3)$$

式中: $y(k)$ 表示物镜温度输出, $u_1(k)$ 表示命令输入,差分因子 $\Delta = 1 - z^{-1}$ , $\xi(k)$ 表示零均值随机噪声序列。通过引入丢番图Dioaphantine方程<sup>[12]</sup>,得到预测模型:

$$\hat{Y} = \mathbf{G}\Delta\mathbf{U}_1 + \mathbf{f}, \quad (4)$$

式中: $\hat{Y}$ 为预测模型输出列向量, $\Delta\mathbf{U}_1$ 为模型预测主控制变化量的列向量, $\mathbf{f}$ 为已知输出列向量, $\mathbf{G}$ 为矩阵。各项表达式如下:

$$\begin{aligned} \hat{Y} &= [\hat{y}(k+1), \hat{y}(k+1), \dots, \hat{y}(k+n)]^T \\ \Delta\mathbf{U}_1 &= [\Delta u_1(k), \Delta u_1(k+1), \dots, \Delta u_1(k+m-1)]^T \\ \mathbf{f} &= [f(k+1), f(k+2), \dots, f(k+n)]^T \end{aligned}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_0 & & & 0 \\ g_1 & g_0 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ g_{n-1} & g_{n-2} & \dots & g_0 \end{bmatrix}$$

选择代价函数为:

$$j(k) = \|\hat{\mathbf{Y}}(K) - \mathbf{W}(K)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\Delta\mathbf{U}_1(K)\|_{\lambda}^2, \quad (5)$$

式中: $\mathbf{Q}$ 表示误差系数对角阵, $\lambda$ 表示控制系数对角阵, $\mathbf{W}(K)$ 为指定的平滑参考轨迹。

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[q_1 q_2 \dots q_n], \lambda = \text{diag}[\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_m]$$

$$\mathbf{W}(K) = [\omega(k+1), \omega(k+2), \dots, \omega(k+n)]^T$$

通过对 $J$ 求 $\Delta\mathbf{U}$ 偏导数,并使其等于0,求得控制量变化 $\Delta\mathbf{U}_1$ 的表达式:

$$\Delta\mathbf{U}_1 = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{W} - \mathbf{f})$$

实际控制时,每次仅将 $\Delta\mathbf{U}_1$ 的第一个分量 $u_1$ 加入系统,因此每一步模型预测控制器输出的实际控制信号为:

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

式中: $g^T$ 为 $(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T$ 的第一行。

#### 3.2.3 前馈补偿算法

激光器的开关状态、各种照明模式的切换以及

掩模板的变化,都将使进入物镜的热量产生变化,并缓慢地引起物镜温度的变化,而模型预测的反馈校正只有当物镜的温度发生了改变时,才能起到校正作用,控制量的变化滞后于物镜温度的变化,为使物镜的温度不生长时间漂移,在模型预测的基础上,对物镜主要的热干扰源——激光器热源引入前馈补偿控制。

建立激光器能量与物镜温度之间的传函  $G_3(s)$ ,考虑内环随动系统响应频率远远高于物镜响应频率,可得前馈补偿控制律  $u_2(z)$  为:

$$u_2(z) = G_4(z)\delta(z) = -\frac{G_3(z)}{G_2(z)}\delta(z), \quad (7)$$

式中: $\delta(z)$ 为激光器热源干扰信号。令  $u_2(k)$  为前馈补偿器的差分输出信号,则内环控制回路的给定信号  $U(k)$  为主控制器和扰动前馈补偿控制的综合信号:

$$U(k) = u_1(k) + u_2(k), \quad (8)$$

式(8)为每一步内环副控制器的给定信号。

### 3.2.4 内环 Smith 预估控制算法

由于水温控制单元(TCU)的泵和空压机产生振动,并对外散发热量,因此温控单元和光刻机需要远距离分开放置,本实验中,从温度控制单元至投影物镜水套的冷却水远传回路有 10 余米,因此  $G_1(s)$  是一个具有纯滞后环节的三阶系统,其滞后时间  $\tau=25$  s。采用常规的 PID 控制方法,很难对集流口水温取得良好的控制效果<sup>[13]</sup>。内环串级控制算法在 PID 的基础上,采用 Smith 预估算法预先估计冷却水传输滞后的大小,并在反馈回路给予补偿,使总的等效值不含滞后效应。

设内环采样周期  $T$  为 2.5 s,纯滞后周期数  $d = \tau/T = 25/2.5 = 10$ ,  $D(z)$  为无滞后集流口水温的

PI 控制律,  $\hat{G}_1(z)$  是  $G_1(s)$  引入 20% 参数摄动后的 Z 变换预估模型,得到内环 Smith 预估控制律为:

$$\frac{I(z)}{E(z)} = \frac{D(z)}{1 + D(z)\hat{G}_1(z)(1 - z^{-10})} = \frac{2.643 - 6.0152z^{-1} + 4.4356z^{-2} - 1.0634z^{-3}}{(1 - 2.2438z^{-1} + 1.5983z^{-2} - 0.3545z^{-3})(1 - z^{-10})}, \quad (9)$$

式中: $E(z)$ 表示副控制器输入信号, $I(z)$ 表示控制器输出信号。采用 Smith 预估控制算法对内环控制系统进行仿真分析,使集流口水温由 21 °C 上升至 22 °C,集流口水温响应曲线如图 4 所示。

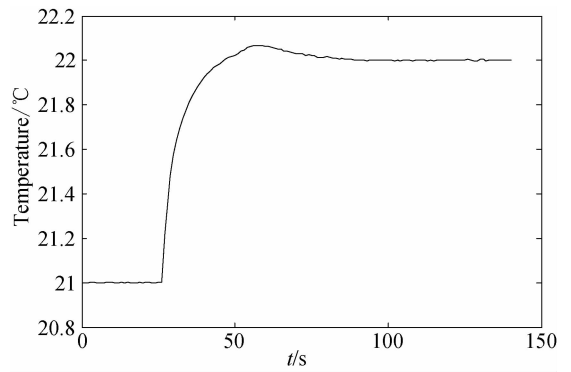


图 4 集流口水温阶跃响应曲线

Fig. 4 Temperature step response curve of collection water

图 4 表明,在纯时滞 25 s 后,内环水温在 100 s 左右达到稳态,控制效果良好。内环响应频率高于外环,以内环响应达到稳定的时间作为外环采样周期,因此外环采样周期选择 120 s 是合适的。

## 4 系统实验

按图 2 搭建模拟物镜温控实验平台,水温控制器选择 Julabo 公司的 FP50-HL,其温度稳定性达到设定值的  $\pm 0.01$  °C。温度测量回路由精度达到 0.001 °C 的 FLUKE5611 热敏电阻传感器、2590 多路扫描器和 1594 精密电阻测温仪组成。采用串级控制结构,对提出的基于 MPC 的前馈-串级控制算法进行验证。

实验目标是使模拟物镜的温度从 21 °C 上升并最终稳定在 22 °C。在 3 种实验情况下,物镜温度响应曲线、误差曲线和集流口水温曲线分别如图 5、图 6 和图 7 所示。

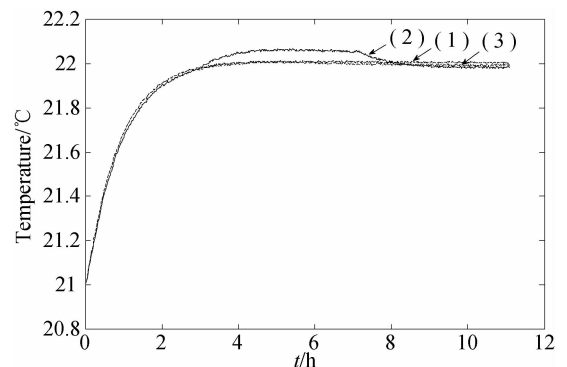


图 5 物镜温度响应曲线

Fig. 5 Temperature response curve of projection lens

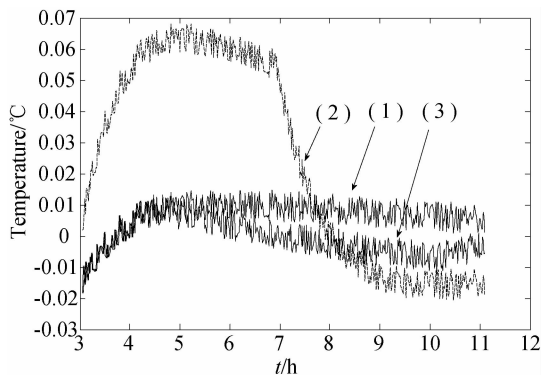


图6 物镜温度误差曲线

Fig. 6 Temperature error curve of projection lens

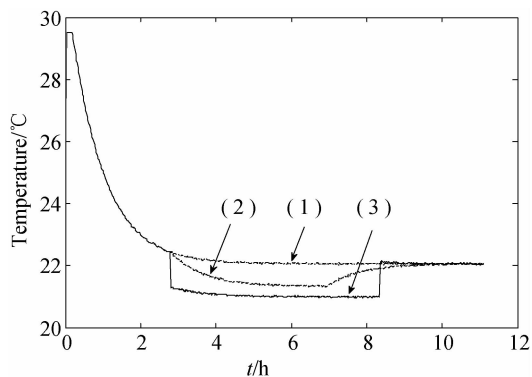


图7 集流口水温变化曲线

Fig. 7 Temperature variation curve of collection water

图5中的曲线(1)是采用MPC主控算法和内环Smith预估算法,不引入激光器热源干扰和前馈控制的情况下物镜温度的响应曲线,从图6的曲线(1)可以看出,在3.2 h左右,时间常数约为9.2 h的模拟物镜,其温度从21 °C上升到22 °C,稳定性达到 $\pm 0.01$  °C,表明基于MPC的串级控制结构和算法极大提高了物镜的温度响应速度,在没有干扰的情况下,能使物镜实现超高精度稳定。

图5中的曲线(2)是引入激光器热源干扰(模拟照明系统开机和关机的工况),而没有引入前馈补偿的物镜温度响应曲线,从图6的曲线(2)可以看出,在2.7 h时刻,引入周期为4 h的恒值热源干扰后,仅靠模型预测控制,模拟物镜温度误差逐步增大,最高达到了22.07 °C,然后缓慢回落,但是在干扰施加的4 h内,远不能达到稳态值并稳定在 $(22 \pm 0.01)$  °C以内。以上情况表明,基于反馈校正的MPC控制通过物镜温度的偏差消除偏差,对主干扰的反应滞后,不能及时消除系统误差。

图5和图6中的曲线(3)是引入激光器热源干扰,并针对干扰引入前馈补偿后的实验曲线。图7是集流口水温变化曲线,比较图7的曲线(2)和(3)可以看出,引入恒值热源干扰后,前馈补偿及时发挥作用,使集流口水温迅速变化,从图6的曲线(3)可以看出,物镜的温度虽然较曲线(1)有所波动,但一直维持在 $(22 \pm 0.01)$  °C内,取得了良好的控制效果。

## 5 结 论

设计了采用模型预测控制为主控制算法,以带Smith预估器的PID算法为内环副控制算法的串级水冷投影物镜温度控制系统,针对光刻机不同工况条件下激光器的热干扰,引入前馈补偿控制,实现了对大时间常数、多时滞和多重扰动投影物镜温度的快速调节和高精度稳定,稳态误差在 $\pm 0.01$  °C内,满足90 nm曝光分辨率光刻机对产能和物镜超高精度稳定的严格要求。该方法也适用于有超洁净度、低震动和高精度控制要求的复杂温控对象或过程。

## 参考文献:

- [1] BARNEY M C, WAYNE G R, PAUL M. Dynamic in-situ temperature profile monitoring of a deep-UV post-exposure bake process[J]. *SPIE*, 2005, 4689: 1133-1142.
- [2] VALIGI P, FRAVOLINI M L, FICOLA A. Improved temperature control of a batch reactor with actuation constraints [J]. *Control Engineering Practice*, 2006, 14 (7):783-797.

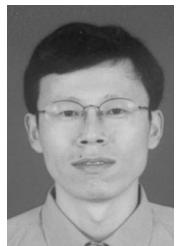
- [3] CHINGCH T, SHUICH, TAI-YUWANG, *et al.*. Stochastic model reference predictive temperature control with integral action for an industrial oil-cooling process [J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 07(9):302-310.
- [4] ZHAO Y, TRUMPER D L, HELIMANN R K. Optimization and temperature mapping of an ultra-high thermal stability environmental enclosure [J]. *Precision Engineering*, 2010, 34 (1):164-170.
- [5] 张津,姚汉民,陈旭南,等. 亚半微米光刻投影物镜

- 温度补偿控制及算法研究[J]. *微细加工技术*, 1999 (2):71-78.
- ZHANG J, YAO H M, CHENG X N, *et al.*. Control and algorithm investigation on temperature compensation of sub-micron projection lithography objective [J]. *Microfabrication Technology*, 1999 (2):71-78. (in Chinese)
- [6] 聂宏飞, 李小平, 张玲莉. 光刻机投影物镜的温度控制算法[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(10):1135-1139.
- NIE H F, LI X P, ZHANG L L. Temperature control algorithm for optical lithography projection lens [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19 (10):1135-1139. (in Chinese)
- [7] BRDYS M A, GROCHOWSKI M, GMINSKI, *et al.*. Hierarchical predictive control of integrated wastewater treatment systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(6), 751-767.
- [8] ANDREAS H, BART S, HANS H. Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits [J]. *Transportation Research Part C*, 2005, 13(3):185-209.
- [9] 李欣欣, 王文, 陈子辰. 超磁致伸缩致动器的广义预测—多模 PID 控制[J]. *光学精密工程*, 2010, 18 (2), 412-419.
- LI X X, WANG W, CHEN Z CH. Generalized predictive-multimode PID control for giant magnetostriuctive actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2), 412-419. (in Chinese)
- [10] 彭小强, 戴一帆, 唐宇. 基于灰色预测控制的磁流变抛光液循环控制系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1), 101-105.
- PENG X Q, DAI Y F, TANG Y. Circulatory system for MR fluid based on gray forecast control algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1), 101-105. (in Chinese)
- [11] SILVIO S, CESARE F. Dynamic system identification and model-based fault diagnosis of an industrial gas turbine prototype [J]. *Mechatronics*, 2006, 16(6) 341-363.
- [12] YAO K, GAO R, ALLGOWER F. Barrel temperature control during operation transition in injection molding [J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(11):1259-1264.
- [13] 张斌, 李洪文, 郭立红, 等. 变结构 PID 在大型望远镜速度控制中的应用[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7), 1613-1619.
- ZHANG B, LI H W, GUO L H, *et al.*. Application of variable structure PID in velocity control for large telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7), 1613-1619. (in Chinese)

#### 作者简介:



秦 硕(1979—),男,湖南长沙人,博士后,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,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



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方面的研究。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方面的研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn