

基于灰色辨识的光刻机恒温控制系统建模*

聂宏飞 李小平

(华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074)

摘要: 针对光刻机媒质远传温控系统的大惯性、多重时滞和多重扰动特点,采用理论建模与系统辨识相结合的建模方法,运用大系统解耦理论实现高阶模型的降阶分解,设计多态抗失真试验采集输出数据序列,采用系统辨识方法估计数学模型参数,建立分散时滞、扰动的温控系统动态数学模型。此模型已被成功运用于光刻机投影物镜高精度恒温控制系统中,达到了0.006 °C的温度稳定度,并表现出较强的鲁棒性和自适应性。

关键词: 系统建模 温度控制 灰色辨识

中图分类号: TP273

Modeling for Lithography Temperature Control System Based on Gray Identification

NIE Hongfei LI Xiaoping

(State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment & Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: In view of the characteristic of the temperature control system, which is subsystem of the lithography tools, with big inertia, multiple time-delay and multiple perturbation, a dynamical mathematical model of the temperature control system is presented by using theory modeling and system identification technology. High dimensional model is decoupled by using large-scale system decoupling theory, and the model parameters are estimated by using system identification method. This model is used in the temperature control system of lithography tools. The experiment shows that the model is strong robust and self-adaptive. The temperature of the lithography tools can be achieved very high temperature stability within ± 0.006 °C by using this model.

Key words: System modeling Temperature control Gray identification

0 前言

光学投影光刻机不断提高分辨率以满足集成电路芯片特征线宽逐渐缩小的需求,给成像质量控制带来了巨大挑战。光刻机内部以及关键部件的温度、压力和湿度等微环境参数的波动已成为影响成像质量的重要因素^[1],尤其是投影物镜,其温度波动将直接引起焦面位置漂移和成像畸变,因此,高稳定度的恒温控制成为光刻机成像质量控制的必需。

受光刻机曝光过程对运行环境振动和洁净度的高要求限制,投影物镜温度一般通过媒质远传回路进行控制^[2]。而且投影物镜本身结构复杂、体积庞大,其温控系统为一个复杂大系统。系统内部结构的复杂性和热传导的多样性决定了采用理论建模十

分困难,而且过多的简化会导致模型失真^[3]。如果对描述复杂系统的高阶模型直接采用系统辨识技术,需要辨识的参数过多^[4],而且多重时滞和多重扰动导致的输出波动将增加参数估计的难度。鉴于此,本文采用将理论建模与系统辨识相结合的灰色辨识建模方法建立光刻机媒质远传温控系统的动态数学模型。

1 温控对象分析

光刻机媒质远传温控系统原理为:将近端由温度控制单元(Temperature control unit, TCU)进行加热、制冷控制的流体媒质,采用液压泵经远传回路输送到光刻机内部的分流板,分流到需要精确温控的光刻机各部件,通过与这些部件的热交换控制其温度,流体媒质换热后又经过集流板流回TCU,如图1所示。

* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 2002AA4Z3000)。20070326 收到初稿, 20070910 收到修改稿

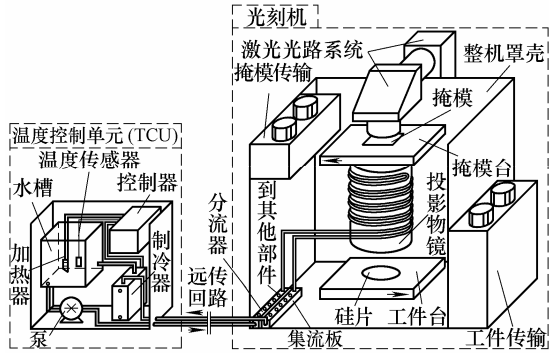


图1 光刻机媒质远传温控系统

光刻机中对温度稳定性要求最高的部件为投影物镜，其温度影响因素主要来自媒质的温度波动和光刻机的内部换热。而且光刻机复杂的内部结构使换热不均匀，投影物镜的大体积限制了换热速率，长的传输回路引起加热制冷量到达投影物镜的延时。

2 模型建立与简化

2.1 模型建立

从上述温控对象分析可归纳出投影物镜温控系统的特性：加热、致冷的频繁切换带来间隙非线性，缓慢的立体换热、大热容以及长传输回路导致系统的多重时滞，环境参数突变、换热的不均匀引起一系列分布式扰动和参数不确定。可以采用下式的高阶微分方程描述该温控系统^[5]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [A + \Delta A(t)]x(t) + Bu(t - \tau) + Dv(t - \tau) + Ff(x(t)) \\ y(t) = Cx(t) + Gw(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $x(t)$ ——状态
 $y(t)$ ——测量输出
 $u(t)$ ——系统输入
 $w(t)$ ——输出有界扰动
 $v(t)$ ——输入有界扰动
 $f(x(t))$ ——未知的非线性矢量函数
 τ ——时滞常数， $\tau > 0$

A, B, C, D, F, G ——常值矩阵
 $\Delta A(t)$ ——反映系统模型参数不确定性的实变矩阵

式(1)的高阶微分方程中过多的模型参数增加了辨识的难度，因此，有必要采用大系统解耦理论将整个投影物镜媒质远传温控系统分成多个耦合度尽可能小的子系统 $G_i(s) (i=1 \sim N, N$ 为子系统个数)^[6]。依据控制对象、时滞和空间分布，将整个系统初步

划分为近端流体介质、远传回路和投影物镜三个子系统(即 $N=3$)。分解后的子系统状态微分方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = [A_i + \Delta A_i(t)]x_i(t) + B_i u_i(t - \tau_i) + D_i v_i(t - \tau_i) + F_i f_i(x(t)) \\ y_i(t) = C_i x_i(t) + G_i w_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

近端流体介质采用已有的温控范围为 $18 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$ 、控制精度为 $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高精度温度控制单元(TCU)就能实现其温度控制，这里对其模型结构不作研究。

2.2 模型简化

TCU 的采用将远传回路的输入限定在 $18 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内，所以远传回路内部温度场的不确定性和非线性特性可以忽略，则状态微分方程简化为

$$\begin{cases} \dot{x}_2(t) = A_2 x_2(t) + B_2 u_2(t - \tau_2) + D_2 v_2(t - \tau_2) \\ y_2(t) = C_2 x_2(t) + G_2 w_2(t) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)主要考虑了扰动和时滞特性，扰动作为输入输出信号与系统的线性传递函数无关，考虑到远传回路的复杂性，采用延时的2阶惯性环节描述^[7]，式(3)可进一步简化为

$$G_2(s) = \frac{a_1 s + a_0}{s^2 + b_1 s + b_0} \exp(-\tau s) \quad (4)$$

式中， $G_2(s)$ 为远传回路传递函数； s 为复变量； a_1, a_0, b_1, b_0 为递函数系数； τ 为远传回路时滞常数， $\tau > 0$ 。

投影物镜作为大惯性温控对象，由于输入信号的范围小($18 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$)，内部温度场的不确定性和非线性特性可以忽略，则状态微分方程简化为

$$\begin{cases} \dot{x}_3(t) = A_3 x_3(t) + B_3 u_3(t) + D_3 v_3(t) \\ y_3(t) = C_3 x_3(t) + G_3 w_3(t) \end{cases} \quad (5)$$

现有理论建模方法认为温控对象为一阶系统^[7]，式(5)可以进一步简化，采用传递函数描述的投影物镜单输入单输出系统为

$$G_3(s) = \frac{k_3}{s + c_0} \quad (6)$$

式中， $G_3(s)$ 为投影物镜传递函数； s 为复变量； k_3, c_0 为传递函数系数。

3 模型参数辨识

3.1 参数辨识实验测试

设计了如图2所示的开环回路装置进行系统辨识以获得实际系统的输入输出时域数据。由主控制器产生的输入信号 θ_i 经 I/O 口输送到具有加热制冷

调节能力的温度控制单元(TCU)，温度控制单元将温度受控的流体媒质输送到光刻机内部的投影物镜，在系统不同部位布置三个高精度的温度传感器分别采集温度：远传回路媒质温度 θ_3 ，投影物镜温度 θ_2 ，周围环境温度 θ_4 ，输出数据经测量电路处理后传入主控制器。 θ_4 用于验证环境温度对辨识结果的影响。

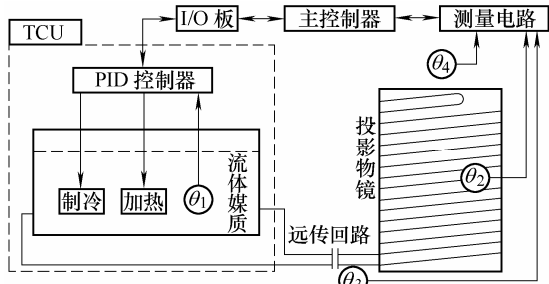


图 2 输入输出数据采集系统

式(4)中参数由输入信号 θ_t 与输出响应 θ_2 确定，式(6)中参数由输入信号 θ_t 与输出响应 θ_3 确定。测试设计针对三种不同条件：不同温度大小、不同温度变化方向、不同时间长短。按照下面步骤测量：3 个 τ 、2 个 2τ 、1 个 3τ 和 1 个 4τ ，这里 τ 是最大的子系统时间常数。测试的阶跃信号通过软件编程产生，程序置于主控制器。由于系统时间常数为数小时，所以选择采样周期为 2 min。时间常数 τ 也需要通过试验获得，试验针对正负初始温度条件分 2 次进行。输入信号 $\theta_t=22.3\text{ }^\circ\text{C}\pm 0.8\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内选择，选择 $22.3\text{ }^\circ\text{C}$ 的设定值是出于本试验环境温度低于 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 的考虑。

3.2 测试结果

对于一阶系统的单位阶跃响应，有下列关系：在 $t=\tau$ 时刻，系统的输出为 0.632。根据这一关系，可以确定正负初始温度条件下各自的时间常数，再将 2 次测量结果取平均，就可粗略获得时间常数 τ ，确定时间常数 τ 的试验结果如图 3 所示。经计算，投影物镜大致的时间常数 $\tau=4\text{ h}$ 。

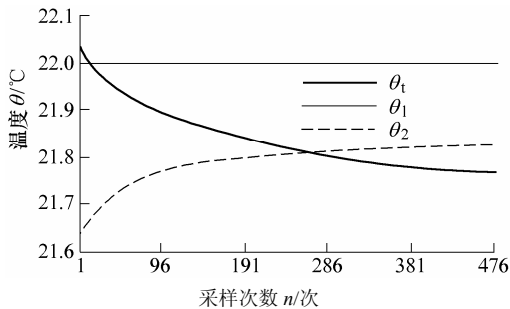


图 3 正负初始温度条件采样数据

获得最大时间常数 τ 以后，就可得到如图 4 所示的测试流程。

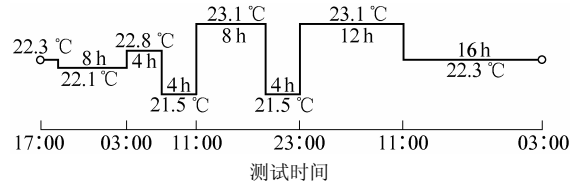


图 4 系统辨识测试流程

根据以上 θ_t 的阶跃输入得到的投影物镜、远传回路的输出响应曲线如图 5 所示，其中 θ_w 为远传回路媒质温度 θ_3 、 θ_t 为投影物镜温度 θ_2 、 θ_a 为周围环境温度 θ_4 。

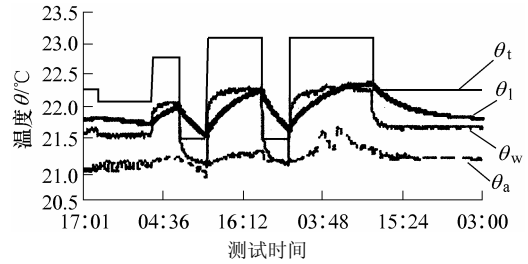


图 5 投影物镜和远传回路阶跃响应曲线

3.3 模型参数估计

根据上述得到的 θ_w 、 θ_t 采样数据，系统参数式模型通过 Matlab 的系统辨识工具条 ident 容易实现^[4]。由 Import data 导入数据、Import models 选择模型、Estimate 估计参数、Model views 输出参数。导入数据分两组：输入 θ_t 、输出 θ_w 和输入 θ_t 、输出 θ_1 。由于系统无法达到零初始条件，将影响系统的辨识结果，故舍去初始部分的采样序列。求得的 TCU 水温设定值 θ_t 与远传回路媒质温度 θ_w 的近似传递函数为

$$G_2(s) = \frac{0.074s + 1.307 \times 10^{-5}}{s^2 + 0.104s + 1.35 \times 10^{-5}} \exp(-s) \quad (7)$$

TCU 水温设定值 θ_t 与投影物镜温度 θ_1 的近似传递函数为

$$G_3(s) = \frac{0.0057}{s + 0.0059} \quad (8)$$

4 模型试验验证

建立由模拟投影物镜、温度传感器、高精度测温系统、TCU、工控机、隔热小室和模拟光源等组成的投影物镜恒温控制实验装置来验证模型，如图 6 所示。试验采用与投影物镜大小、结构相同的模拟投影物镜模拟其热特性，隔热小室模拟光刻机整机罩壳的隔热功能，功率为 20 W 的白炽灯模拟曝光光源，媒质选用去离子水。三支温度传感器选用 $\pm 0.001\text{ }^\circ\text{C}$ 标定精度的 HART5610 型高精度热敏电阻，用于测量投影物镜、去离子水和周围环境温度。测温系统选用 $\pm 0.001\text{ }^\circ\text{C}$ 分辨率的 HART1590 型高

精度电阻温度测量仪和多通道扫描仪，用于采集三路温度信号。温度控制单元采用±0.02 °C温控精度的 TEAM-3000 型温度控制单元。工控机运行温度控制算法软件，试验装置控制原理如图 7 所示。

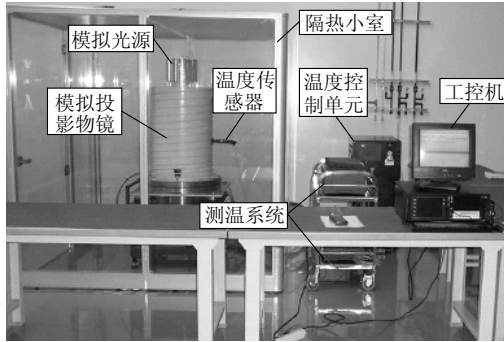


图 6 模型验证的试验装置

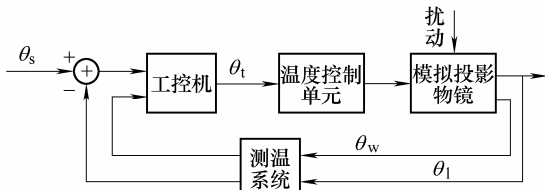


图 7 试验装置的控制原理图

将投影物镜的温度设定值 $\theta_s=22\text{ }^\circ\text{C}$ ，试验装置连续运行 48 h，模拟光源随机间歇启停，得到如图 8 所示的实时温控曲线和如图 9 所示的投影物镜温度偏差 θ_{id} 曲线。由图 8、9 可知，试验装置运行 4 h 后的 44 h 内，当环境温度波动在±0.5 °C 范围内，远传回路水温 $\theta_w=22.66\text{ }^\circ\text{C}$ ，投影物镜内部温度稳定在 $22\text{ }^\circ\text{C}\pm 0.006\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内。

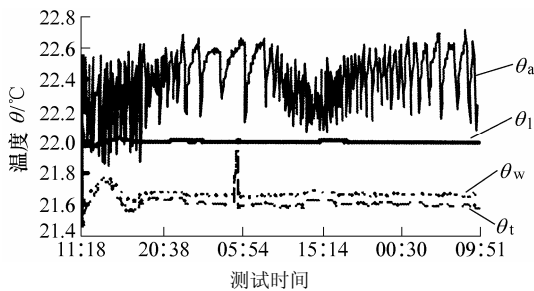


图 8 温度控制实时曲线图

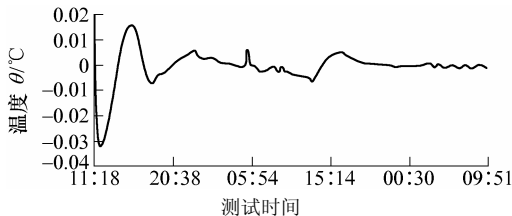


图 9 投影物镜温度偏差

投影物镜 $22\text{ }^\circ\text{C}\pm 0.006\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度稳定度表明所建模型与实际模型具有较高的匹配度；两个子系统不同的局部稳定温度和整个系统的全局稳定，验证了子系统分解的合理性。

5 结论

针对光刻机媒质远传温控复杂大系统，采用理论建模与系统辨识相结合的灰色辨识建模方法，分解获得了近端流体媒质、远传回路和投影物镜三个子系统，并分别建立了远传回路和投影物镜两个子系统的动态数学模型。基于所得模型建立的投影物镜温度控制系统不仅响应速度快，而且表现出较强的鲁棒稳定性和自适应性，即使在环境温度±0.5 °C 波动和模拟光源随机间歇启停的外部扰动下，仍能保证投影物镜长时间 $0.006\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度稳定性。建模过程和试验结果表明：该方法通过系统分解，分散了系统的扰动和时滞，避免了大量数学推导，明显降低了建模难度；所建模型简单有效，有利于根据各子系统自身特性、扰动量和扰动方式设计更加合理的局部最优控制器；具有较高的通用性和工程应用价值，适于其他媒质远传温控系统。

参 考 文 献

- [1] CHRIS A M. Understanding focus effects in submicron optical lithography, parts: methods for depth-of-focus improvement[J]. SPIE Optical/Laser Microlithography, 1992, 1 674(274): 1-2.
- [2] 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.
- [3] ZHANG Jin, YAO Hanmin, CHEN Xunan, et al. Control and algorithm investigation on temperature compensation of sub-micron projection lithography objective [J]. Microfabrication Technology, 1999(2): 71-78.
- [4] 韩志刚. 无模型控制器的设计问题[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 19-22.
- [5] HAN Zhigang. Designing problem of model free controller [J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 19-22.
- [6] LING L. System identification-theory for the user[M]. 2nd edition. 2002.
- [7] MA Xinjun, XU Bugong. Delay-dependent robust stability of uncertain systems with multiple time-delays and nonlinear perturbations[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(10): 36-40.
- [8] 郝宁湘. 大系统理论及其思想、方法与应用[J]. 系统辩证学学报, 1998, 6(1): 18-21.
- [9] HAO Ningxiang. On the idea, method and application of large system theory [J]. Journal of Systemic Dialectics, 1998, 6(1): 18-21.
- [10] 张秀玲. 大林算法在电阻炉温度控制系统中的应用 [J]. 基础自动化, 2000, 7(3): 9-11.
- [11] ZHANG Xiuling. Application of dalin algorithm in resistance furnace's temperature computer control system [J]. Basic Automation, 2000, 7(3): 9-11.

作者简介：聂宏飞，男，1978 年出生，博士研究生。主要研究方向为高精度温度控制。

E-mail: niehf2003@163.com