

基于模糊预测的 MOCVD 温度控制方法

过润秋, 赵恒, 杜凯

(西安电子科技大学 机电工程学院 陕西 西安 710071)

摘要:为解决金属有机化合物化学气相淀积(MOCVD)设备温度控制的非线性、时变性以及大滞后等问题,给出了一种用模糊控制和预测控制相结合的复合控制方法.该模糊预测控制在模糊控制的基础上加入预测环节,通过增加相位超前减少时间滞后所带来的影响,准确预测温度变化趋势.与传统的控制方法相比较,具有算法简单、鲁棒性好的特点.仿真和试验表明,该方法有着较高的稳态精度和动态特性,在整个温度控制范围基本误差可达到 $1\% \text{ } ^\circ\text{C}$,有效改善了MOCVD系统温度的控制性能,对实际温度控制具有较好的指导意义.

关键词:金属有机化合物化学气相淀积;模糊预测控制;温度控制;控制算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-240X(2006)02-0268-05

The research on MOCVD temperature control based on the fuzzy predictive mechanism

GUO Run-qiu, ZHAO Heng, DU Kai

(School of Mechano-electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: This paper presents a new fuzzy predictive control method for the MOCVD device control system set to handle the non-linearity, time variability and large delay of plant controls. The designed controller consists of a fuzzy part and a predictor. The dynamics of the prediction term is adaptive to the system's time delay. Simulation results illustrate that this method is well adaptive to the alteration and improves the static precise and dynamic performance of the system, compared with its conventional counterpart. In addition, the basic error can reach $1\% \text{ } ^\circ\text{C}$ referred to input range.

Key Words: MOCVD; fuzzy predictive control; temperature control; control algorithm

金属有机化合物化学气相淀积(MOCVD)采用III、II族元素有机化合物和V族、VI族元素氢化物等作为生长源材料,以热分解反应在衬底上进行气相外延,生长III-V族,II-VI族化合物半导体及其多元固溶体的薄层单层.MOCVD技术是半导体物理、物理化学、光学、流体力学、热力学等学科交叉的一门新兴技术,主要应用于半导体材料、纳米材料等材料生长领域.

温度控制是MOCVD控制系统中很重要的一部分,直接影响材料生长的质量.在材料生长的整个过程中,始终需要对反应室的温度进行精确控制^[1].因此,研究MOCVD系统的温度控制方法及控制算法是十分重要的.

1 MOCVD 温度控制系统特点

MOCVD温度控制系统主要是控制材料生长反应室的温度.反应室内升降温的快慢、温度的高低及恒温时间的长短等都对材料生长质量有影响.由于温度控制系统温度控制范围大,在 $400 \sim 1200^\circ\text{C}$ 的温度范围内都进

行精确控制 并且要求稳定时温度波动范围小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$. 因此 对 MOCVD 设备的温度控制提出了很高的要求.

MOCVD 设备温度控制对象的特点为 材料生长过程中 石墨基座处于旋转状态 用来测温的热电偶不随之旋转. 在实际材料生长过程中 反应室密封 测温热电偶测得的温度与石墨基座下面的实际温度有一定“延迟”. 热电偶上端与石墨基座的下表面之间存在一段“空气”间隙 涉及到的“散热”是充斥其间的气体辐射散热. 用于生长材料的蓝宝石衬底放在石墨基座上 由于石墨是热的不良导体 所以基座下表面的温度相对于上表面的温度也有一定的“延迟”. 在实际材料生长过程中 密封反应室内部在不同阶段有不同浓度、不同种类的载流气体流过 上述两种影响较大的“延迟”特性的精确物理模型难以得到.

由此可见“大滞后”“非线性”“参数时变”是 MOCVD 温度控制系统的主要特点. 基于以上诸多因素, MOCVD 温度控制系统难以得到较为精确的物理模型 采用常规控制手段无法满足系统的控制要求.

2 模糊预测控制算法

在工业控制系统中 比例-积分-微分(PID)控制由于其算法简单、可靠性高等特点 是当前最为普遍、应用最广泛的控制算法. 但是当被控对象具有明显的非线性时 常规 PID 控制就不能适应系统的动态变化 难以实现系统最优调节 无法满足控制系统鲁棒性的要求.

模糊控制器^[2]与常规的 PID 控制器相比具有无须建立被控对象的数学模型 对被控对象的时滞、非线性和时变性具有一定的适应能力等优点. 同时 对噪声也具有较强的抑制能力 即鲁棒性较好 但也有些需要进一步改进和提高的地方.

模糊预测控制是一种新兴控制手段^[3] 它充分利用预测控制对模型的不敏感性和模糊控制的人工智能特性. 预测控制是以计算机为实现手段的 因此其算法一般应为采样控制算法而不是连续控制算法 且包含有预测的原理. 其基本思想是用常规方法得到一控制对象的输出预测值 以此预测值为基础 得到预测误差 然后通过操作人员的经验来自动修正采用的控制策略 用以减小目标偏差到容许的范围. 其核心是在线误差预测及模糊决策 前者是需要一个预测模型 并能在线修正 而后者是构造出合适的模糊控制表 来修正原控制输入.

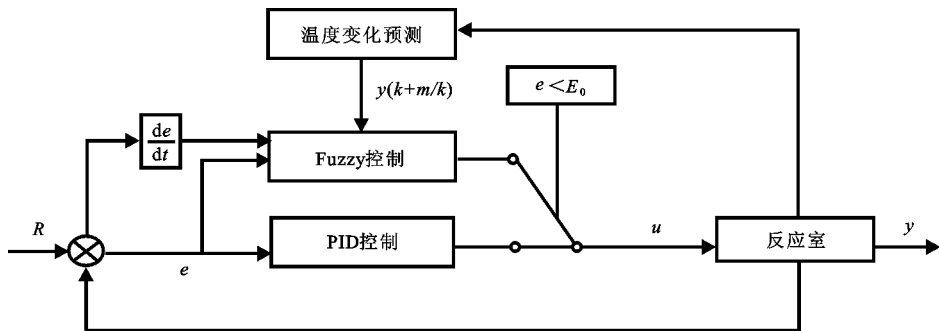


图 1 模糊预测控制结构框图

2.1 系统结构

模糊预测控制结构如图 1 所示,基本控制思想为,总结操作经验,从较好的手动操作中提取输入输出数据对. 相应地,在材料生长处于升温阶段时 根据手动操作经验,当误差大于设定值的 20% 时,采用常规 PID 控制,而在误差小于或等于设定值的 20% 时采用模糊控制,这样的控制策略既保证快速性又有效抑制系统超调. 其次再根据模糊数学的理论和方法,将操作人员的调整经验和知识总结成为 IF(条件)THEN(结果)形式的模糊规则,并把这些模糊规则及相关信息(如初始 PID 参数)存入计算机中. 根

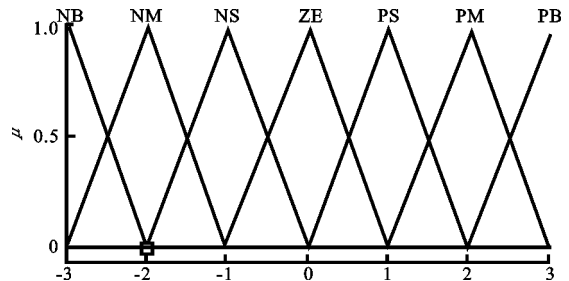


图 2 E 或 E_c 的隶属函数图

据反应室的响应情况,计算出采样时刻的偏差 E 及偏差变化率 E_c ,输入控制器,运用模糊推理,进行模糊运算,即可得到该时刻的比例参数 K_p ,积分参数 K_I 和微分参数 K_D ,实现对反应室温度进行 PID 参数的最佳调整.模糊控制部分主要由模糊化、模糊推理、去模糊化 3 部分组成.最后在控制器中设计一个预测项,通过增加相位超前来减少时间滞后所带来的影响,准确预测温度变化的趋势和大小,有助于合理施加控制量,提高控制精度,缩短调整时间,加快系统反应时间.

2.2 误差及误差变化量模糊化处理

由图 1 模糊预测结构框图可见,该模糊系统^[4]是以偏差 E 和偏差变化率 E_c 为输入语言变量,以 K_p, K_I, K_D 作为输出语言变量的二输入三输出的模糊控制器.通过对误差和误差变化率进行处理,得到归一化的 PID 参数变化系数 K'_p, K'_I, K'_D .从系统的过程响应曲线可知,用偏差及偏差变化率可完全表示出系统的整个响应过程.而增加论域中元素个数,即把等级分得过细,对于模糊控制显得意义不大.

选择输入、输出变量的语言值均分为 7 个语言值: {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB},隶属函数采用灵敏性强的三角函数. E, E_c 的基本论域分别为 $[-210^\circ\text{C}, 210^\circ\text{C}], [-6, 6]$, K'_p, K'_I, K'_D 的基本论域均为 $[-1, 1]$.

2.3 参数整定规则的确定及规则推理

参数整定规则是控制器的核心,它是操作人员和专家经验知识的总结,规则编制如表 1~表 3 所示.

表 1 K'_p 的模糊控制表

K'_p	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	NB	PM	PS	PS	0
NM	PB	PB	NM	PM	PS	0	0
NS	PM	PM	NS	PS	0	NS	NM
E	ZE	PM	PS	0	0	NS	NM
	PS	PS	0	NS	NS	NM	NM
	PM	0	0	NS	NM	NM	NB
	PB	0	NS	NS	NM	NB	NB

表 2 K'_I 的模糊控制表

K'_I	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	0	0	NB	NM	NM	0	0
NM	0	0	NM	NM	NS	0	0
NS	0	0	NS	NS	0	0	0
E	ZE	0	0	NS	NM	PS	0
	PS	0	0	0	PS	PS	0
	PM	0	0	PS	PM	PM	0
	PB	0	0	NS	PM	PB	0

表 3 K'_D 的模糊控制表

K'_D	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	PS	0	0	0	PB	PB
NM	NS	NB	NS	NS	0	PS	PM
NS	NB	NB	NM	NS	0	PS	PM
E	ZE	NB	NM	NM	NS	0	PS
	PS	NB	NM	NS	NS	0	PS
	PM	NM	NS	NS	NS	0	PS
	PB	PS	0	0	0	PB	PB

2.4 输出量的去模糊化

经过上述模糊推理后, Fuzzy-PID 控制器整定的 3 个修正参数要进行去模糊化,取得精确量以计算输出控制量.解模糊的过程是把推理系统输出的模糊集合映射成精确输出,采用面积中心法进行解模糊.

$$K'_p = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i K'_{pi}}{\sum_{i=1}^m \mu_i} \quad (1)$$

$$K'_I = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i K'_{Ii}}{\sum_{i=1}^m \mu_i} \quad (2)$$

$$K'_D = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i K'_{Di}}{\sum_{i=1}^m \mu_i} \quad (3)$$

从而得出模糊判决后的清晰量即自整定后的修正参数比例因子为

$$K_u(K'_p) = 1/6, \quad K_u(K'_I) = 1/300, \quad K_u(K'_D) = 1/6.$$

输入到 PID 控制器的参数由下式计算得出:

$$K_p = K_{p \min} + (K_{p \max} - K_{p \min}) \times K'_p \quad (4)$$

$$K_I = K_{I \min} + (K_{I \max} - K_{I \min}) \times K'_I \quad (5)$$

$$K_D = K_{D \min} + (K_{D \max} - K_{D \min}) \times K'_D \quad (6)$$

其中 $[K_{p \min}, K_{p \max}], [K_{I \min}, K_{I \max}], [K_{D \min}, K_{D \max}]$ 分别 K_p, K_I, K_D 的变化范围.

2.5 温度变化的预测

对于具有纯滞后和较大热惯性的温度控制对象,准确预测温度变化趋势和大小,有助于合理施加控制

量,提高控制精度,缩短调整时间^[5]。

设系统可用下面给出的非线性离散时间模型来预测 $\hat{y}(t+1)$:

$$\hat{y}(t+1) = f[y(t), \dots, y(t-n+1), u(t-d+1), \dots, u(t-d-m+1)] \quad (7)$$

其中 n 和 m 分别是输出 $y(t)$ 和输入 $u(t)$ 的阶次, d 是非线性系统的时滞。

利用上式进行递推可得到 d 步超前预测

$$\hat{y}(t+d) = f[\hat{y}(t+d-1), \dots, \hat{y}(t+d-n), \dots, u(t), \dots, u(t-m)] \quad (8)$$

上式使用了 t 时刻以后的预测值 $\hat{y}(t+i)$ $i=1, \dots, d-1$ 对 t 时刻和 t 时刻以前的预测值,显然可用其真实值代替,即 $\hat{y}(t+i-k) = y(t+i-k)$ $i-k \leq 0$ $k=1, \dots, n$ 。

设预测时域为 N , 则有

$$\hat{y}(t+i) = f[\hat{y}(t+i-1), \dots, \hat{y}(t+i-n), u(t+i-d), \dots, u(t+i-d-m)] \quad (10)$$

$$i=1, \dots, N$$

由于 $f(t)$ 很难预先求得,采用上式时,需要用递推最小二乘或其他方法在线辨识,因而计算复杂,运算量大,容易因干扰及环境和被控对象的时变性造成较大的辨识误差,甚至使预测完全失去意义。为此,这里提出以下计算方法。

考虑温度是一个连续缓变量,可在 t_k 点对 $y(t)$ 进行二阶 Taylor 展开:

$$\hat{y}(t) = y(k) + y'(k)(t-t_k) + \frac{1}{2}y''(k)(t-t_k)^2 + O(|t-t_k|^3) \quad (11)$$

其中 $O(|t-t_k|^3)$ 为 $|t-t_k|^3$ 的同阶小量, $y'(k)$ 、 $y''(k)$ 可用数值微分形式近似表示:

$$y'(k) \approx (y_k - y_{k-1})/y_0, \quad y''(k) \approx (y_k - 2y_{k-1} + y_{k-2})/y_0^2 \quad (12)$$

将 $y'(k)$ 、 $y''(k)$ 及 $y = y_k + m \cdot y_0$ 代入式(11)可得:

$$\hat{y}(k+m) = 1 + m + (m^2/2) \cdot y(k) - (1+m) \cdot m \cdot y(k-1) + (m^2/2) \cdot y(k-2) \quad (13)$$

对当前状态,在选定控制策略下,预测输出向量 $\hat{y}(k+m)$ 得到目标误差预测值 $\hat{E}(k)$:

$$\hat{E}(k) = y^*(k+m) - \hat{y}(k+m) \quad (14)$$

其中 $y^*(k+m)$ 是给定值, $\hat{y}(k+m)$ 由式(13)得出。

按预测的 $\hat{E}(k)$ 和操作人员经验,自动修正采用的控制策略以减小目标偏差到容许值范围,此修正量为

$$\Delta u(t) = F\{\hat{E}(k)\} \quad (15)$$

其中 $\Delta u(t)$ 为 r 维输入向量修正值, F 表示模糊校正关系。据此可得 $t+1$ 时刻的控制

$$u(t+1) = u(t) + \Delta u(t) \quad (16)$$

由此可见,该方法利用在线误差和模糊决策,前者需要一个预测模型,并能在线修正,后者构造合适的模糊推理方法,修正原控制输出^[6]。

3 仿真研究

采用曲线飞升法^[7]求得 MOCVD 温度控制对象的参数,增益约为 $3.2(^\circ\text{C}/0.1\text{V})$,对象纯滞后时间约为 150s ,过程惯性时间常数约为 200s ,即

$$G(s) = (3.2/(200s+1)) \cdot \exp(-150s) \quad (17)$$

首先用普通 PID 控制算法进行温度控制,而纯滞后补偿 Smith 预估算法是一种应用较为普遍的针对大时滞系统进行补偿的方法。建立 Smith 预估模型,把三者作对比参考。

分别采用普通 PID 控制,Smith 预估控制和模糊预测控制,对 MOCVD 温度控制系统进行仿真测试。

表 4 为仿真结果的几项数据对比,其中 Y_{os} 为最大超调的百分比, T_s 代表稳定时间,绝对误差积分 (IAE) 为 $\int_0^\infty |e(t)| dt$,平方误差积分 (ISE) 为 $\int_0^\infty e^2(t) dt$ 。

由图 3 和表 4 可知,这里所述的模糊预测控制在 Y_{os} 、 T_s 、IAE、ISE 4 项指标上,性能均优于普通 PID 控

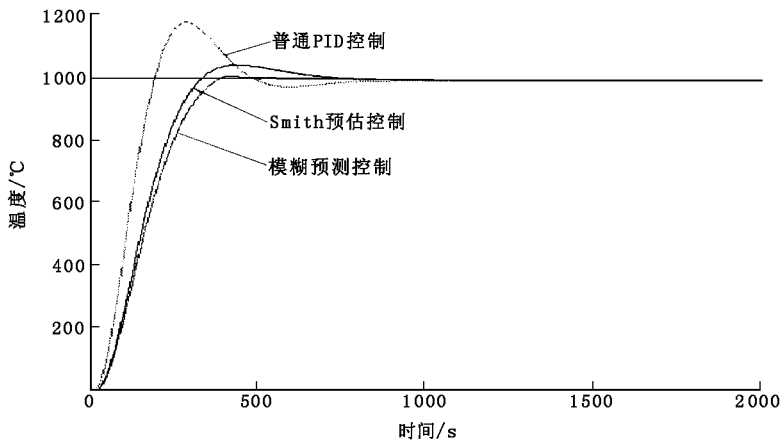


图 3 3 种控制仿真曲线图

制算法和 Smith 预估控制算法,最大超调的百分比为 1.31%,在整个温度控制范围基本误差可达到 1‰,控制品质是满意的。

表 4 仿真结果数据表

	Yos/%	Ts/s	IAE $\times 10^5$	ISE $\times 10^8$
普通 PID	18.94	735	4.563	2.714
Smith 预估	2.17	549	2.339	1.440
模糊预测	1.31	353	2.016	1.348

4 结束语

研究了针对实际 MOCVD 系统温度的控制策略,而控制策略的好坏直接影响半导体材料生长的质量,是整个控制系统的关键问题,因此解决该问题具有重大的理论意义和实际价值.文中构造了基于模糊预测的控制方法,经理论分析和仿真试验表明,该方法不仅有良好的动、静态品质,且具有较强的鲁棒性,实现简单,易于在线调整.尤其对于大滞后一类系统,其品质优于常规 PID 控制,适用于 MOCVD 控制系统的温度控制,对实际温度控制具有很好的指导意义.尽管文中的研究工作取得了一些有意义的研究成果,但是方法策略中还存在诸多不完善之处,尚有大量工作有待进一步的努力。

参考文献:

- [1] Warnick S C, Dahleh M A. Feedback Control of MOCVD Growth of Submicron Compound Semiconductor Films[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 1998, 6(1): 431-440.
- [2] 李士勇. 模糊控制神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.
- [3] Guo Runqiu, Wang Xiaohong. The Research on Temperature Autocontrol Based on the Immune Feedback Mechanism[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(6): 717-721.
- [4] Gao Z Q, Trautzsch T A, Dawson J G. A Stable Self-tuning Fuzzy Logic Control System for Industrial Temperature Regulation[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38(2): 97-112.
- [5] Ranganathan R S, Malki H A, Chen G. Fuzzy Predictive PI Control for Processes with Large Time Delays[J]. IEEE Trans on Expert Systems, 2002, 2(1): 21-32.
- [6] Jones D, Mansoor S. Predictive Feed Forward Control for a Hydroelectric Plant[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2004, 12(6): 956-965.
- [7] Zhao Z Y, Tomizuka M, Isaka S. Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(5): 1392-1398.

(编辑: 齐淑娟)

