

基于 Fuzzy-PID 的 MOCVD 温度控制方法

过润秋, 解宝辉

(西安电子科技大学 机电工程学院 陕西 西安 710071)

摘要: 针对 MOCVD 系统反应室温度的特性和对温度控制的要求, 提出了一种基于 Fuzzy-PID 的温度控制方案, 即利用模糊控制求得归一化的 PID 参数变化系数, 从而实现 PID 参数的在线自调整. 与 Smith 预估控制相比, Fuzzy-PID 具有更好的控制效果, 较好地解决了系统中存在的“非线性”、“大滞后”、“物理模型不精确”等问题, 满足 MOCVD 控制系统温度控制要求.

关键词: MOCVD 温度控制 模糊 PID 控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1001-240X(2005)04-0504-04

Research on MOCVD temperature control based on Fuzzy-PID

GUO Run-qiu, XIE Bao-hui

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

Abstract: According to the temperature characteristics of the reactor and the requirements for temperature control in the MOCVD system, a kind of Fuzzy-PID temperature controller is proposed. Fuzzy-PID can realize the PID parameters on-line self-regulation, normalizing varying PID parameter coefficients into the range between 0 and 1 by using fuzzy control. In addition, the corresponding simulation is given. The results indicate that the Fuzzy-PID controller has better control performance (such as non-linearity, hysteresis and unprecision physical model) than the Smith controller, and can meet the design requirements for the MOCVD temperature controller.

Key Words: MOCVD temperature control Fuzzy-PID control

MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) (金属有机化合物化学气相沉积) 是一种高质量半导体材料生长技术, 以 MO 化合物为材料源, 在合适的沉积温度下, 利用易挥发的 MO 化合物转移相对稳定的金属原子, 进行材料的沉积^[1]. MOCVD 技术主要应用于半导体材料、纳米材料等材料生长领域, 具有很高的应用价值及广阔的应用前景.

温度控制是 MOCVD 控制系统中的重要部分, 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 MOCVD 温度控制系统特点

MOCVD 系统中温度控制系统的特点为:

(1) 在材料生长的过程中, 石墨基座处于旋转状态, 用来测温的热电偶不随之旋转.

(2) 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”是充斥其间的气体的辐射散热.

(3) 在实际材料生长的过程中, 反应室密封, 测温热电偶测得的温度与石墨基座下表面的实际温度有一定“延迟”.

(4) 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”.

(5) 在实际材料生长的过程中, 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“延迟”的精确物理模型很难得到。

由此可见“大滞后”、“非线性”、“时变”与“难以得到较为精确的物理模型”是 MOCVD 温度控制系统的主要特点。

如果控制系统的鲁棒性比较好,可以较好地弥补系统中或者是系统外非线性、时变等因素对系统的影响。但是,MOCVD 温控系统存在大时滞现象,该类型系统一直都是工业控制界控制的一个难题。大量资料显示表明,若控制对象纯滞后时间常数 τ 与过程惯性时间常数 T 之比,即 $\tau/T \geq 0.3$,则一般的控制规则难以有较好的控制效果。在 MOCVD 温控系统中, τ/T 高达 0.75,所以采用常规控制器无法满足系统的控制要求。

2 PID 控制与模糊控制

2.1 PID 控制

PID 控制器将误差的比例 (P)、积分 (I)和微分 (D)通过线性组合构成控制量,对被控对象进行控制。

PID 控制器的数学模型表达式为

$$U(K) = K_p e(K) + K_i T_0 \sum_{i=1}^n e(i) + K_d \Delta e(K)/T_0 \quad (1)$$

式中 $U(K)$ 为系统控制信号, $e(K)$ 是系统参考值和系统实际输出之间的误差, $\Delta e(K) = e(K) - e(K - 1)$, T_0 为控制器采样周期。

PID 控制,根据被控对象的不同,适当调整 PID 参数,可以获得比较满意的控制效果。因为其算法简单,参数调整方便,稳定性好,可靠性高,实时性强等特点,所以成为当前最为普遍采用的控制算法。但是当被控对象具有明显的非线性或者负载发生变化时,固定参数的常规 PID 控制就不能适应系统的动态变化,其动态稳定性能难以对系统实现较优调节,因而影响系统的控制质量。

2.2 Fuzzy 控制

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种计算机数字控制。该方法的优点是无需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,同时鲁棒性较好。但是,模糊控制器本身消除系统稳态误差的性能比较差,难以达到较高的控制精度^[2]。

2.3 Fuzzy-PID 控制

Fuzzy-PID 控制,不仅保持了 PID 原有的结构,还增加了灵活性来应对复杂的情况^[3]。MOCVD 温度控制系统具有较大的滞后性、非线性、时变性,单纯采用 PID 控制或模糊控制都不能达到较好的控制效果。采用 Fuzzy-PID 复合控制方式控制温度,既可发挥模糊控制鲁棒性强、动态响应好、上升时间快、超调小的特点,又具有 PID 控制器的动态跟踪品质和稳态精度^[2]。所以此温度控制系统采用了模糊控制与 PID 控制相结合的方法,利用模糊控制器在线调整 PID 参数,实现对 MOCVD 温度控制系统的精确控制。

3 MOCVD 温度控制系统 Fuzzy-PID 算法设计

3.1 系统结构

通过对误差和误差变化率进行模糊处理,得到 0,1 间归一化的 PID 参数变化系数 K'_p, K'_i, K'_d ,根据公式 (2)~(4)在线实时求解 PID 参数 K_p, K_i, K_d 的值,然后对反应室温度进行 PID 调节。

$$K_p = K_{pmin} + (K_{pmax} - K_{pmin}) \times K'_p \quad (2)$$

$$K_i = K_{imin} + (K_{imax} - K_{imin}) \times K'_i \quad (3)$$

$$K_d = K_{dmin} + (K_{dmax} - K_{dmin}) \times K'_d \quad (4)$$

其中 $[K_{pmin}, K_{pmax}]$, $[K_{imin}, K_{imax}]$, $[K_{dmin}, K_{dmax}]$ 分别为 K_p, K_i, K_d 的变化范围。

3.2 模糊化

选择误差 $e(K)$ 和误差变化率 $\Delta e(K)$ 作为语言输入变量,其隶属函数如图 2 所示。语言输出变量 K'_p, K'_d 的隶属函数如图 3 所示,图中采用公式 (5)所述的非线性隶属函数高斯曲线函数 (Gaussmf),该曲线具有很好的光滑性,图形没有零点而且具有比较清晰的物理意义,更

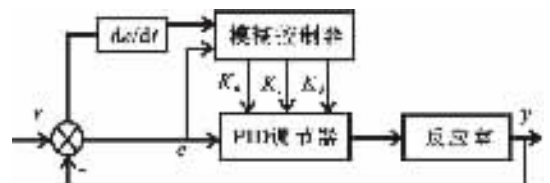


图 1 MOCVD 温度控制系统结构图

能够准确的反映控制系统的实际情况,提高控制精度^[4].

$$\mu = \exp(- (x - c)^2 / (2\sigma^2)) \quad , \quad (5)$$

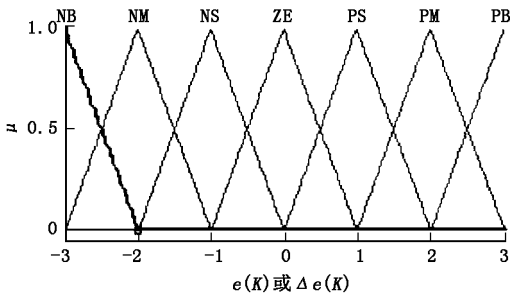


图 2 $e(K)$ 或 $\Delta e(K)$ 的隶属函数图

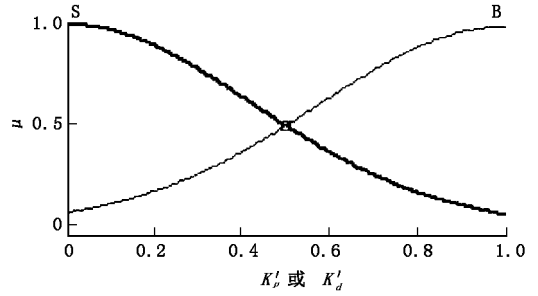


图 3 K'_p 或 K'_d 的隶属函数图

图 3 中, $0 < x < 1$ 对于曲线 S $\sigma = 0.4247 \quad \rho = 0$; 对于曲线 B $\sigma = 0.4247 \quad \rho = 1$.

积分控制具有滞后特性,积分太强会使被控对象的动态品质变坏,导致闭环系统不稳定,考虑到系统的特点,采用公式(5)所述的 gaussmf 函数建立 K'_i 的隶属函数图(如图 4). 图中 $0 < x < 1$ 对于曲线 S $\sigma = 0.21 \quad \rho = 0$; 对于曲线 SM $\sigma = 0.11 \quad \rho = 0.33$; 对于曲线 M $\sigma = 0.11 \quad \rho = 0.5$; 对于曲线 B, $\sigma = 0.21 \quad \rho = 1$.

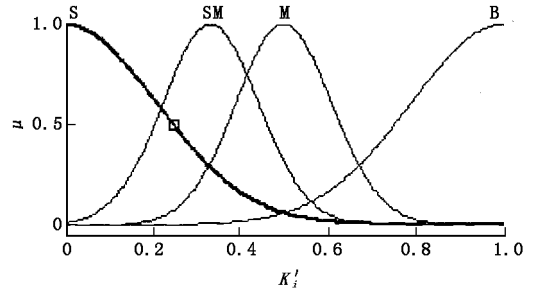


图 4 K'_i 的隶属函数图

3.3 模糊控制规则

这里所述 Fuzzy-PID 控制方法的模糊控制规则采用“if-then”规则,具体形式如下:

If $e(K)$ is A_i and $\Delta e(K)$ is B_i , Then K'_p is C_i , K'_i is D_i , K'_d is E_i ;

在响应的起始点,误差 $e(K)$ 很大且为正, $\Delta e(K)$ 几乎为 0. 为了得到快速的系统响应,必须加大对被控对象的操作量. 此时的控制规则为:

If $e(K)$ is PB and $\Delta e(K)$ is ZE, Then $\Delta K'_p$ is B, $\Delta K'_i$ is B, $\Delta K'_d$ is S.

第一次达到设定值时,输出响应需要产生一个小的控制信号,以避免大的超调量. 此时规则为:

If $e(K)$ is ZE and $\Delta e(K)$ is NB, Then $\Delta K'_p$ is S, $\Delta K'_i$ is B, $\Delta K'_d$ is S.

根据生产工程师的工程经验,并参考文献[25, 6],建立 K'_p, K'_i, K'_d 的模糊控制表.

3.4 模糊运算

用于模糊运算的第 i 条模糊控制规则,由条件模糊集合成的隶属度为 $\mu_i = \min\{\mu_{A_i}(e(K)), \mu_{B_i}(\Delta e(K))\}$.

3.5 解模糊

这里所述 Fuzzy-PID 控制方法采用面积中心法^[4]进行解模糊.

表 1 K'_p 的模糊控制表

K'_p	$\Delta e(K)$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	B	B	B	B	B	S
NS	S	S	B	B	B	S	S
ZE	S	S	S	B	S	S	S
PS	S	S	B	B	B	S	S
PM	S	B	B	B	B	B	S
PB	B	B	B	B	B	B	B

表 2 K'_i 的模糊控制表

K'_i	$\Delta e(K)$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	SM	M	B	B	B	M	SM
NS	S	SM	M	B	M	SM	S
ZE	S	S	SM	M	SM	S	S
PS	S	SM	M	B	M	SM	S
PM	SM	M	B	B	B	M	SM
PB	B	B	B	B	B	B	B

表 3 K'_d 的模糊控制表

K'_p	$\Delta e(K)$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
NM	B	B	S	S	S	B	B
NS	B	B	B	S	B	B	B
ZE	B	B	B	B	B	B	B
PS	B	B	B	S	B	B	B
PM	B	B	S	S	S	B	B
PB	S	S	S	S	S	S	S

$$K'_p = \sum_{i=1}^m \mu_i K_{p_i} / \sum_{i=1}^m \mu_i \quad (6)$$

$$K'_i = \sum_{i=1}^m \mu_i K_{i_i} / \sum_{i=1}^m \mu_i \quad (7)$$

$$K'_d = \sum_{i=1}^m \mu_i K_{d_i} / \sum_{i=1}^m \mu_i \quad (8)$$

4 控制实现

通过大量的实验测试,并参考文献 [5, 6], 设定 K'_p , K'_d 的变化范围.

$$K_{p_{min}} = 0.235 K_u, K_{p_{max}} = 0.418 K_u, K_{d_{min}} = 0.0347 K_u T_u, K_{d_{max}} = 0.0951 K_u T_u,$$

K_u, T_u 分别为比例控制下等幅振荡时的比例增益和振荡周期.

根据 Ziegler-Nichols 整定 PID 参数法, 得到 $T_i = 4T_d$, 所以

$$K_i = K_p / T_i = K_p / (4T_d) = K_p^2 / (4K_d) \quad (9)$$

根据公式 (9), 参考文献 [5, 6], 并考虑到系统对积分控制的特殊要求, 通过实验测试, 设定 K'_i 的变化范围为

$$K_{i_{min}} = 0.0010, K_{i_{max}} = 0.00156.$$

实时控制时, 首先需要将 $e(K)$ 及 $\Delta e(K)$ 量化到论域 $[-3, 3]$ 中, 然后进行模糊控制运算, 得到 PID 参数变化系数 K'_p, K'_i, K'_d 的值, 再相应计算出 K_p, K_i, K_d 的值, 作为 PID 控制的参数.

5 仿 真

在文献 [7] 中, 采用曲线飞升法求得 MOCVD 温度控制系统的参数: 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 .

$$G(s) = (3.2 / (200s + 1)) \exp(-150s) \quad (10)$$

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. 根据文献 [8] 所述方法, 建立 Smith 预估算法模型, 作为对比参考.

分别采用 Fuzzy-PID 方法和 Smith 预估算法, 在 Matlab 软件中对 MOCVD 温度控制系统进行仿真测试. 图 5 所示为仿真曲线图. 表 4 中, Y_{os} 为最大超调的百分比, T_s 代表稳定时间, IAE, ISE 分别是绝对误差积分和平方误差积分.

表 4 仿真结果数据表

	$Y_{os}(\%)$	T_s / s	IAE(10^5)	ISE(10^8)
Fuzzy-PID	2.32	350	2.016	1.348
Smith 预估	0.31	549	2.339	1.440

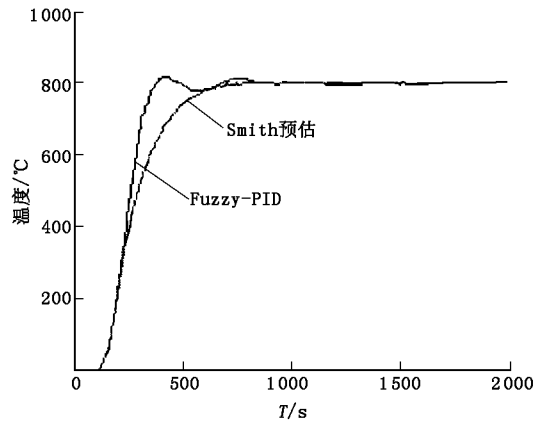


图 5 仿真曲线图

6 结 论

由图 5 和表 4 可知, 本文中所述的 Fuzzy-PID 算法在 T_s, IAE, ISE 项指标上, 性能优于 Smith 预估控制

