

文章编号: 1001-0920(2008)06-0709-05

## 基于分解协调的空间分布系统的模糊控制

张宪霞<sup>1</sup>, 李少远<sup>1</sup>, 李涵雄<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 自动化研究所, 上海 200240; 2. 香港城市大学 制造与管理工程系, 香港)

**摘要:** 为解决多控制源空间分布系统的控制问题, 在以往文献提出的空间模糊控制器的基础上, 提出一种基于空间分解、局部协调的空间模糊控制策略, 针对多控制源设计了具有协调功能的空间模糊控制器. 以三区快速加热化学气相沉积反应器系统为例, 对所提出的控制方法进行了仿真验证. 仿真结果表明, 该方法能取得更好的空间均匀性.

**关键词:** 三维模糊集; 模糊控制; 空间分布系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Novel fuzzy control for spatially-distributed systems based on decomposition and coordination strategy

ZHANG Xianxia<sup>1</sup>, LI Shaoyuan<sup>1</sup>, LI Hanxiong<sup>2</sup>

(1. Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Department of Manufacturing Engineering and Engineering Management, City University of Hong Kong, Hong Kong, China.

Correspondent: LI Shaoyuan, E-mail: syli@sjtu.edu.cn)

**Abstract:** To solve the control problem of spatially-distributed systems with multiple actuators, a fuzzy control strategy with spatial decomposition and local coordination is proposed based on the existing literature. A spatial fuzzy controller is presented for multiple actuators, and then spatial fuzzy controllers with coordination function are designed. A rapid thermal chemical vapor deposition (RTCVD) system is taken as an example. The simulation results show that the proposed control method can achieve an excellent spatial uniformity.

**Key words:** Spatial fuzzy set; Fuzzy control; Spatially-distributed system

### 1 引言

现实中很多物理系统具有空间分布的特性. 对于此类系统, 通常要求被控变量在空间上具有均匀性或一定的分布, 如某些工业化学反应器<sup>[1]</sup>和半导体制造过程<sup>[2]</sup>, 均要求其物理装置在空间上满足温度这一被控变量的均匀性才能满足工艺要求. 在传统控制方法中, 往往不考虑被控变量的空间分布特性, 仅将被控变量控制在某设定值上. 然而, 对于空间分布系统, 考虑其被控变量随着空间分布方向的变化, 对于保证全局系统的控制要求更为重要. 对于难以直接建立准确数学模型的系统, 通常可采用模糊控制策略<sup>[3,4]</sup>, 尤其对于过程控制系统, 如温度的控制<sup>[5,6]</sup>, 可采用模糊隶属度表示在一定范围内的温度变化的大小或变化量的导数. 考虑到空间分布系统的被控物理量(如温度)随着空间分布的变化仍需用模糊隶属度表达, 因此在传统模糊控制的基础

上, 引入了具有第 3 维(空间维)的模糊集合, 并针对此类系统提出了一种新型的空间模糊控制器<sup>[7]</sup>. 此控制器不但继承了传统模糊控制器的优点<sup>[4]</sup>(不依赖于过程数学模型以及利用人类操作知识与专家经验), 而且增加了空间信息的表达及处理功能, 在空间分布系统的工程应用方面展现出了巨大潜力.

作为这一方法的尝试, 文献[7]仅考虑了具有一个控制源的空间分布系统, 而实际的被控系统, 往往要设置多个控制源, 在空间上的分布更为复杂. 针对此类系统, 本文利用空间分布系统的局部影响特性, 在文献[7]提出的空间模糊控制器的基础上, 提出一种基于空间分解、局部协调的空间模糊控制策略, 在空间上形成多个协调式空间模糊控制结构. 此控制结构具有非集中控制、分布式计算及可扩展性好的优点. 实例仿真验证了该方法的有效性.

### 2 问题描述

收稿日期: 2007-04-17; 修回日期: 2007-08-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60774015, 60604018); 高等学校博士点专项科研基金项目(20060248001).

作者简介: 张宪霞(1975—), 女, 山东烟台人, 博士生, 从事智能控制、分布参数系统等研究; 李少远(1965—), 男, 河北枣强人, 教授, 博士生导师, 从事预测控制、智能控制等研究.

## 2.1 空间分布系统

空间分布系统的动态特性通常可由偏微分方程描述<sup>[1]</sup>,其状态、控制输入和输出等不但随时间变化,而且随空间变化.图1为空间分布系统示意图,是设有 $m$ 个点式传感器和 $n$ 个分布式控制源的一维空间分布系统.被控量的空间分布信息通过传感器在离散点 $z_1, \dots, z_m$ 测量获取,控制量则通过控制源 $u_1, \dots, u_n$ 进入系统.此系统提出了一类调整空间分布变量的控制问题.

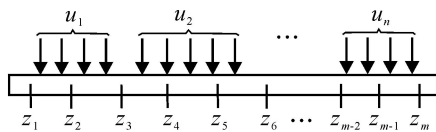


图1 空间分布系统示意图

## 2.2 三维模糊集与空间模糊控制器

三维模糊集是在传统模糊集的基础上增加了表达空间信息的第3维,如图2所示.它具有3个维数,分别用于变量 $x$ ,隶属度 $\mu$ 和空间信息 $z$ .对于具有单控制源 $u$ 的系统(见图2),空间模糊控制器可以将来自空间域上的多点传感信息作为空间输入(如空间误差 $e(\bar{z})$ 和误差变化率 $\dot{e}(\bar{z})$ ,其中 $\bar{z} = \{z_1, \dots, z_m\}$ ),利用三维模糊集表达空间信息,然后执行空间规则推理机制来处理这些空间信息.空间模糊控制器并不象传统的模糊控制器那样操纵每个空间点上的行为,而是操纵空间域的整体行为.

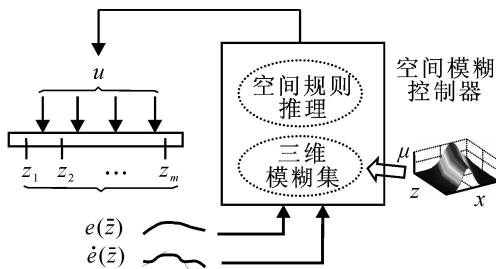


图2 三维模糊集与空间模糊控制器

空间模糊控制器具有与传统模糊控制器相似的组成结构,仍由模糊化、规则推理及解模糊化三大部分构成.由于其特有的空间特性,空间模糊控制器各部分的具体操作不同于传统模糊控制器.模糊化将涉及到空间维数的操作,可以将清晰化的空间输入转换成空间模糊输入.规则推理涉及到空间规则和空间推理机.通常使用的模糊规则结构形式为

$$\text{If } e(\bar{z}) \text{ is } \bar{C}_1 \text{ and } \dot{e}(\bar{z}) \text{ is } \bar{C}_2,$$

$$\text{Then } u \text{ is } G.$$

其中 $\bar{C}_1$ 和 $\bar{C}_2$ 均为三维模糊集, $G$ 为传统模糊集.空间推理机是空间模糊控制器的核心部分,包含3个子操作:空间信息融合、降维和传统推理.前2个子操作可实现空间域上整体行为信息的提取,第3

个子操作则实现传统模糊推理.因为规则推理之后产生了传统模糊输出,因此空间模糊控制器的解模糊化与传统解模糊化相同.实际应用时通常采用有限数目点式传感器测量空间信息,因此三维模糊集与空间模糊化可分别看成是多个传统模糊集与多个传统模糊化在空间上合成的结果.关于空间模糊控制器的详细描述可参考文献[7].

基于三维模糊集的空间模糊控制器,能有效地解决具有单控制源空间分布系统的控制问题.但对于空间分布更为复杂的多控制源系统,则需采取更加先进的控制策略,使得被控量满足全局系统的控制要求.

## 3 基于分解协调的空间模糊控制

针对多控制源空间分布系统,利用空间分布系统的局部影响特性,可以将空间域分解成多个子区域,进而可以将复杂多控制源系统分解成多个相对简单的单控制源子系统.每个子系统均采用空间模糊控制器.针对子系统之间不可忽略的较强耦合,空间邻近子系统之间采取局部协调策略,形成了协调式空间模糊控制.多个协调式空间模糊控制最终实现整个空间上的控制目标,如跟踪某空间分布曲线,达到某空间均匀性等.

### 3.1 分解策略

多数空间分布系统都具有空间域上的局部影响特性<sup>[8]</sup>,如半导体制造过程<sup>[2]</sup>和工业材料热处理过程<sup>[9]</sup>等.根据这种空间特性,整个空间域可分解成多个子区域,进而多控制源系统可分解成相对简单的多个子系统.

为了能将多控制源系统的空间域进行定量的划分,首先定义影响度的概念.

**定义1(影响度)** 一个单位控制源影响空间域上的节点的强度称为影响度.用 $S$ 表示空间域上的节点集合, $s \in S$ 表示空区域上的一个节点, $C$ 表示控制源的集合, $c \in C$ 表示一个控制源,则 $\Phi(c, s) \in [0, 1]$ 表示控制源 $c$ 对节点 $s$ 的影响度.

根据影响度的概念,可以定量地将一个控制源在空间域上的影响范围划分为近域和远域,并给出如下定义:

**定义2<sup>[8]</sup>(近域和远域)** 控制源 $c$ 的近域可用一些节点的集合 $N_c$ 表示,其中 $N_c = \{s \in S / \Phi(c, s) > \sigma\}$ ,控制源 $c$ 的远域则表示为 $S - N_c$ . $\sigma$ 为 $c$ 在空间域节点集合 $S$ 上的影响度阈值.

$\sigma$ 的大小主要取决于 $c$ 的位置,可以是固定的值,或者是与热山峰值成比例的值<sup>[8]</sup>.针对不同控制源,根据实际情况可以取相同或不同的影响度阈值.因此,一个多控制源空间分布系统的空间域可分解

成多个子区域,如图 3 所示.任一个子区域对应于一个控制源的近域,其他子区域便是该控制源的远域.

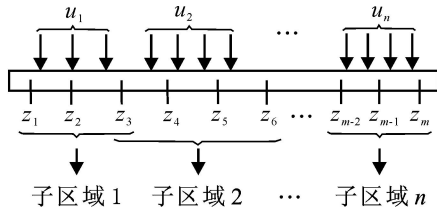


图 3 多控制源空间分布系统空间域分解

### 3.2 空间模糊控制

针对上述分解的子系统,每个子系统都可看成单控制源空间分布的系统.如果子系统之间耦合较小甚至可以忽略,那么就可以将空间模糊控制器直接作为每个子系统的控制器.对于每个子系统,它所对应的子区域上的多点传感信息作为空间模糊控制器的输入,而控制器的输出则作为它所包含的控制源的输入信号.以子系统  $p$  为例,它的子区域为  $\bar{z}_p = \{z_{p,1}, \dots, z_{p,n_p}\}$ .其中:  $n_p$  为传感器数目,  $z_{p,q} (q = 1, \dots, n_p)$  为空间点.定义  $e_p(\bar{z}_p)$  和  $\dot{e}_p(\bar{z}_p)$  分别为子区域  $p$  上的空间误差和空间误差变化率,在空间点  $z_{p,q}$  上的误差和误差变化率分别表示为  $e_p(z_{p,q}) = e_{p,q}$  和  $\dot{e}_p(z_{p,q}) = \dot{e}_{p,q}$ .空间模糊控制器可采用如下空间控制规则:

$$\begin{aligned} & \bar{R}_p(i_p, j_p) : \\ & \text{If } e_p(\bar{z}_p) \text{ is } \bar{A}_{p,i_p} \text{ and } \dot{e}_p(\bar{z}_p) \text{ is } \bar{B}_{p,j_p}, \\ & \text{Then } u_p \text{ is } V_{p,k_p}. \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $\bar{A}_{p,i_p}$  和  $\bar{B}_{p,j_p}$  为子区域  $p$  上的三维模糊集,  $i_p = 1, \dots, I_p, j_p = 1, \dots, I_p, I_p$  和  $I_j$  分别为空间输入  $e_p(\bar{z}_p)$  和  $\dot{e}_p(\bar{z}_p)$  模糊划分数;  $u_p$  为控制源  $p$  的控制输入信号;  $V_{p,k_p}$  为单点式传统模糊集,它只在  $H_p k_p$  处是非零的,  $H_p$  为相邻 2 个模糊集中心之间的距离,  $k_p = f_p(i_p, j_p)$  为  $i_p$  与  $j_p$  的函数.

空间模糊控制器首先将清晰化的空间输入经空间模糊化后变成空间模糊输入,然后根据式(1)所表达的规则进行空间推理,依次经过空间信息融合、降维及传统推理操作之后,产生传统模糊输出;最后进行解模糊化,产生清晰化的输出.当子系统  $p$  与其他子系统耦合较小至可以忽略时,空间模糊控制器的输出便可直接作为控制源  $p$  的控制输入信号.然而,当子系统  $p$  与其他子系统关联较大、耦合较强而不可忽略时,控制器的输出则不可以直接作为控制源  $p$  的控制输入信号,这时需考虑多个空间模糊控制器之间的协调.

### 3.3 协调策略

由于空间分布系统所具有的特殊性(局部影响特性),子系统之间的耦合会随着空间距离的增大而

减小.因此,可忽略在空间上相距较远的子系统之间的耦合,仅考虑空间邻近的子系统之间的耦合.这样,就可以采取一种局部协调的策略,仅对空间邻近的空间模糊控制器之间进行协调.对于需要协调的空间模糊控制器,使其在原控制输出的基础上增加一协调输出,此处将未经协调时应该产生的输出称为主控制输出,而将增加的输出称为协调控制输出.对于子系统  $p$ ,假设它的空间邻近子系统为  $p_N = \{p_1, p_2, \dots, p_Q\}$ ,其中  $p_q$  为第  $q$  个空间邻近子系统 ( $q = 1, \dots, Q$ ),  $Q$  为正整数.针对子系统  $p$ ,考虑协调的空间模糊控制器可采用如下空间控制规则:

$$\begin{aligned} & \bar{R}_p(i_p, j_p, i_{p_1}, j_{p_1}, \dots, i_{p_Q}, j_{p_Q}) : \\ & \text{If } [e_p(\bar{z}_p) \text{ is } \bar{A}_{p,i_p} \text{ and } \dot{e}_p(\bar{z}_p) \text{ is } \bar{B}_{p,j_p}] \text{ and} \\ & [e_{p_1}(\bar{z}_{p_1}) \text{ is } \bar{A}_{p_1,i_{p_1}} \text{ and } \dot{e}_{p_1}(\bar{z}_{p_1}) \text{ is } \bar{B}_{p_1,j_{p_1}}] \text{ and} \\ & \dots \text{ and } [e_{p_Q}(\bar{z}_{p_Q}) \text{ is } \bar{A}_{p_Q,i_{p_Q}} \text{ and} \\ & \dot{e}_{p_Q}(\bar{z}_{p_Q}) \text{ is } \bar{B}_{p_Q,j_{p_Q}}], \\ & \text{Then } u_p \text{ is } V_{p,k_p}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中:除子区域编号不同,规则前件中的各变量与式(1)具有相同的含义;规则的后件中,  $V_{p,k_p}$  仍表示单点式传统模糊集,但它在  $H_p k_p + p_{1,p} H_{p_1} k_{p_1} + p_{2,p} H_{p_2} k_{p_2} + \dots + p_{Q,p} H_{p_Q} k_{p_Q}$  处是非零的,其中  $H_{p_q}$  为  $u_{p_q}$  的相邻 2 个模糊集中心之间的距离,  $k_{p_q} = f_{p_q}(i_{p_q}, j_{p_q})$  为  $i_{p_q}$  与  $j_{p_q}$  的函数,  $p_{q,p}$  为子系统  $p_q$  对子系统  $p$  的协调参数.  $H_p k_p$  为主控制输出,  $p_{1,p} H_{p_1} k_{p_1} + p_{2,p} H_{p_2} k_{p_2} + \dots + p_{Q,p} H_{p_Q} k_{p_Q}$  为协调控制输出.

协调参数的符号和幅值大小与相邻子系统之间的输出是如何耦合紧密相关的呢?假设用  $y_{r_1}(\bar{z}_{r_1})$  和  $y_{r_2}(\bar{z}_{r_2})$  分别表示子系统  $r_1$  和子系统  $r_2$  在其子区域上的空间输出.如果  $y_{r_1}(\bar{z}_{r_1})$  的增加将引起  $y_{r_2}(\bar{z}_{r_2})$  的增加(减小),  $r_1, r_2$  将取负号(正号),并且如果这种耦合越大,  $r_1, r_2$  的绝对值越大<sup>[4]</sup>;如果这种耦合不存在,那么  $r_1, r_2$  就为 0;如果所有协调参数均为 0,则式(2)退化式为式(1).

为了区别于具有式(1)规则的典型空间模糊控制器,本文将带有协调功能的空间模糊控制器称为协调式空间模糊控制器.当控制器产生增量式输出时,称为 PI 型控制器;当控制器产生直接输出时,则称之为 PD 型控制器.此控制器采用的式(2)规则结构,在规则的前件中,每一个方括号的内容代表了定义于特定子区域上的空间输入变量和三维模糊集,不同的方括号内容定义于不同的子区域上,这是不同于典型的空间模糊控制器的规则结构之处.因此,在计算方法上,协调式空间模糊控制器将对处于不同子空间区域上的输入变量分别设计三维模糊集和

空间模糊化操作,在空间模糊推理过程中,空间信息融合和降维这两步子操作,也是对于不同子空间区域内的输入变量分别进行,而传统推理子操作,则与典型的空间模糊控制器相同.此外,在计算细节上,如三维模糊集、模糊化、空间信息融合、降维、传统推理及反模糊化,都与典型的空间模糊控制器的方法相同,具体计算均可参见文献[7].

对于复杂多控制源空间分布系统,可采用多个协调式空间模糊控制器,以实现全局系统的控制要求.此控制结构具有非集中控制、分布式计算、可扩展性好等优点.

#### 4 设计实例与仿真研究

以三区快速加热化学气相沉积(RTCVD)反应器<sup>[2,10]</sup>为例.该反应器炉体上有三区加热灯组(A、B和C),混合有10%硅烷的氩气从炉体顶部进入反应器,然后硅烷在反应器内分解成硅和氢气.通过控制三区灯组功率百分比 $u_a$ 、 $u_b$ 和 $u_c$ 来加热晶圆温度,使晶圆表面在短时内均匀沉积0.5 $\mu\text{m}$ 厚的多晶硅薄膜.多晶硅薄膜的均匀度直接取决于晶圆温度的均匀度,因此本过程的控制目标是使得晶圆温度在整个晶圆半径上,能够快速均匀地达到设定温度值1000 K.晶圆热动态特性可用下列偏微分方程表示:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + (1 - T^4) + q_a(r)u_a + q_b(r)u_b + q_c(r)u_c.$$

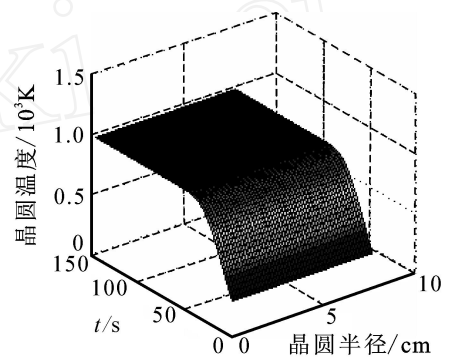
具有下列边界条件:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial r} &= \text{ed}(1 - T^4) + q_{\text{ed}}u_b, \quad r = 1; \\ \frac{\partial T}{\partial r} &= 0, \quad r = 0. \end{aligned}$$

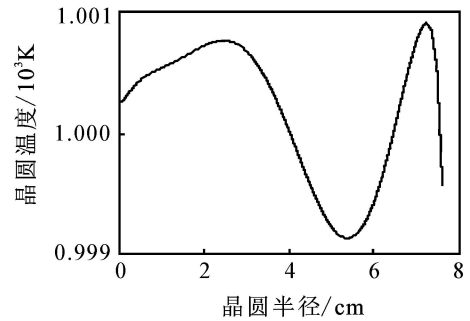
式中: $T$ 、 $r$ 和 $t$ 分别为无量纲晶圆温度、晶圆径向位置及时间; $q_a(r)$ 、 $q_b(r)$ 和 $q_c(r)$ 分别为加热灯组(A、B和C)在位置 $r$ 处的辐射热流量.辐射热流量分布以及所涉及到的参数值可参考文献[10].在晶圆径向位置0.17、0.33、0.50、0.67、0.83和1上分别安置了6个传感器测量晶圆温度.

根据3.1节介绍的基于影响度的空间域分解方法,通过仿真实验,将沿晶圆径向方向的空间域分解成3个子区域.在空间域的分解过程中,采用与热山峰值成比例的影响度阈值设定方法,三区加热灯组(A、B和C)的影响度阈值分别为0.5、0.6、0.24,则传感器点组 $\{0.17, 0.33, 0.50\}$ 、 $\{0.50, 0.67, 0.83, 1\}$ 和 $\{0.67, 0.83, 1\}$ 分别包含于三区加热灯组(A、B和C)的各子区域内.然后,针对灯组(A、B和C)分别设计3个PI型协调式空间模糊控制器,其输入分别来自上述传感器组.每个协调式空间模糊控制器具体构成如下:来自每个传感点的归一化输入在

论域 $[-1, 1]$ 上设计有5个等距标准三角隶属度函数,输出采用8个等距为1的单点隶属度函数,单点式模糊化,线性规则库<sup>[4]</sup>,最小 $t$ -norm,最大 $t$ -conorm,“center-of-sets”法解模糊化<sup>[11]</sup>.量化因子、比例因子及协调参数分别为: $k_{AB} = -0.2$ ,  $k_{CB} = -0.05$ ,  $k_e^B = 0.0006$ ,  $k_e^B = 0.006$ ,  $k_u^B = 0.07$ ,  $k_{BA} = -0.1$ ,  $k_e^A = 0.0006$ ,  $k_e^A = 0.006$ ,  $k_u^A = 0.13$ ,  $k_{BC} = -0.1$ ,  $k_e^C = 0.0006$ ,  $k_e^C = 0.006$ ,  $k_u^C = 0.115$ .其中: $k_e^i$ 、 $k_e^i$ 和 $k_u^i$ 分别为灯组 $i$ 的误差量化因子、误差变化率量化因子和输出比例因子; $j_k$ 为子系统 $k$ 对子系统 $j$ 的协调参数.基于分解协调的空间模糊控制的晶圆温度随时间空间变化曲线与稳态时晶圆温度空间分布曲线如图4所示.从图4可以看出,在整个晶圆半径上,晶圆温度能快速达到设定温度值1000 K,且空间均匀性较好,最大不均匀温度小于1 K.



(a) 晶圆温度随时间空间变化曲线

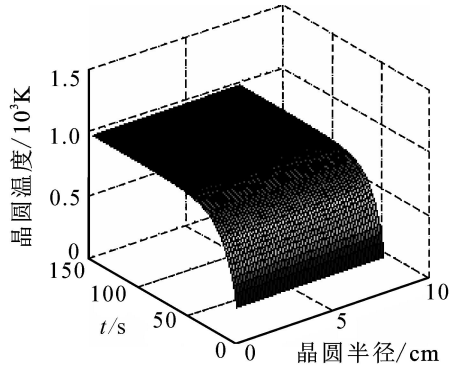


(b) 稳态时晶圆温度空间分布曲线

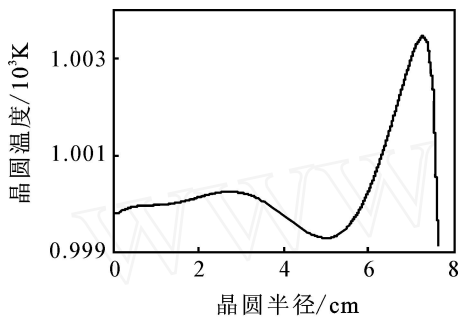
图4 基于分解协调的空间模糊控制的晶圆温度

PID控制器在工业生产中具有广泛的应用,因此对RTCVD系统进行PI控制仿真研究.迄今尚未得到具有处理空间信息的PI控制方法,于是仅将来自1个传感器点上的信息作为1个PI控制器的输入.采用3个PI控制器,分别取径向位置0.17、0.50和0.83为灯组(A、B和C)的PI控制器的传感输入点.采用试凑法对PI控制器的比例和积分增益进行调整,经大量仿真实验,得到下列一组使得系统取得

最好控制效果的增益参数  $k_{pA} = 0.01$ ,  $k_{iA} = 0.001$ ,  $k_{pB} = 0.01$ ,  $k_{iB} = 0.000\ 998$ ,  $k_{pC} = 0.01$  和  $k_{iC} = 0.001$ . 其中  $k_{pj}$  和  $k_{ij}$  分别为灯组  $j$  的比例增益和积分增益. PI 控制的相应曲线如图 5 所示.



(a) 晶圆温度随时间空间变化曲线



(b) 稳态时晶圆温度空间分布曲线

图 5 PI 控制的晶圆温度

比较图 4 和图 5 可以发现,两种控制方法都可以使晶圆温度快速达到设定温度值 1 000 K.但二者在空间均匀性上存在较大差异,即基于分解协调的空间模糊控制方法取得了较好的均匀性(最大不均匀温度小于 1 K),而 PI 控制方法的均匀性较差(最大不均匀温度接近 4 K).这主要是因为基于分解协调的空间模糊控制采取了一套行之有效的空间信息处理机制:从多控制源空间分布系统整体上看,它利用了空间系统特性,采取了分解协调控制策略;从系统局部(子系统)上看,它采用了能处理空间信息的空间模糊控制策略.

## 5 结 论

本文提出了一种基于分解协调的空间模糊控制策略,将空间模糊控制器处理空间信息的优点扩展到多控制源系统,使其能够处理一般的空间分布系统的控制问题.利用控制源在空间上的局部影响特性,将空间域分解成多个子区域,将复杂多控制源系统分解成多个相对简单的子系统,每个子系统均采用空间模糊控制器.对子系统之间不可忽略的较强

耦合,空间邻近子系统之间采取局部协调策略,设计了具有协调功能的空间模糊控制器.仿真结果表明,本文提出的控制方法取得了比常规 PI 控制更好的空间均匀性.

## 参考文献(References)

- [1] Christofides P D. Nonlinear and robust control of partial differential equation systems: Methods and applications to transport-reaction processes [M]. Boston: Birkhäuser, 2001.
- [2] Theodoropoulou A, Adomaitis R A, Zafiriou E. Model reduction for optimization of rapid thermal chemical vapor deposition systems [J]. IEEE Trans on Semiconductor Manufacturing, 1998, 11(1): 85-98.
- [3] 诸静. 模糊控制理论与系统原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
(Zhu J. Fuzzy control and system theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.)
- [4] Ying H. Fuzzy control and modeling: Analytical foundations and applications [M]. New York: IEEE Press, 2000.
- [5] 刘红波, 李少远, 柴天佑. 一种基于模糊切换的模糊复合控制器及其应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 615-618.  
(Liu H B, Li S Y, Chai T Y. Fuzzy hybrid controller based on fuzzy switching and its application[J]. Control and Decision, 2003, 18(5): 615-618.)
- [6] Zhang X X, Liu H B, Li S Y. A wide-range operation intelligent coordinated control system for a fossil-fuel power unit[J]. J of Intelligent & Fuzzy Systems, 2005, 16(3): 181-188.
- [7] Li H X, Zhang X X, Li S Y. A three-dimensional fuzzy control methodology for a class of distributed parameter systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2007, 15(3): 470-481.
- [8] Bailey-Kellogg C, Zhao F. Influence-based model decomposition for reasoning about spatially distributed physical systems[J]. Artificial Intelligence, 2001, 130(2): 125-166.
- [9] Doumanidis C. In-process control in thermal rapid prototyping [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1997, 17(4): 46-54.
- [10] Adomaitis R A. RTCVD model reduction: A collocation on empirical eigenfunctions approach [R]. MD: The Institute for Systems Research, 1995.
- [11] Mendel J M. Uncertain rule-based fuzzy logic systems: Introduction and new directions [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.