

LED晶圆贴片过程中压力的二阶段模糊决策与控制

王佐勋^{1,2}, 徐德¹

(1. 中国科学院自动化研究所精密感知与控制研究中心, 北京 100190;
2. 齐鲁工业大学电气工程与自动化学院, 济南 250353)

摘要: 针对LED晶圆贴片过程, 设计一种利用阀门的开关和开度控制气缸内气压的压力控制系统, 提出一种多目标分阶段决策和控制的方法, 实现活塞运动和加压控制. 根据活塞的位移和压力, 采用逻辑决策方法, 选择需要控制的阀门. 根据规划压力与实测压力的差值及其差值变化率, 利用模糊自适应PID控制方法控制阀门的开度. 采用半张量积的方法将逻辑决策和模糊控制中的推理转变成矩阵形式, 以简化运算量, 提高运算速度和控制精确度.

关键词: LED晶圆贴片; 模糊决策和控制; 压力控制; 半张量积

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Two-step decision and control of pressure in LED wafer pasting process

WANG Zuo-xun^{1,2}, XU De¹

(1. Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China. Correspondent: WANG Zuo-xun, E-mail: wangzuoxun@126.com)

Abstract: A pressure control system is designed to control the pressure inside the cylinder via the valve's switching and opening degree in the LED wafer pasting process. The method of multi-target and multi-step decision and control is proposed, which can control the piston's motion and pressure. According to the displacement and pressure on the piston, the logic decision method is used to select the valve that needs to be controlled. According to the error and error change rate between planned and actual measured pressure, the fuzzy adaptive PID control method can be used to purposeful control valve's opening degree. By using the method of semi-tensor product, fuzzy reasoning can be transformed into a matrix form, which can greatly simplify the computation, and improve the calculation speed and the control precision.

Keywords: LED wafer paste; fuzzy decision and control; pressure control; semi-tensor product

0 引言

对于LED芯片的生产, 人们对其精密性要求越来越高, 这就需要通过提高LED晶圆表面的平整度、光滑度和洁净度. 化学机械抛光(CMP)是目前最有效的晶圆平坦化技术^[1-3]. LED晶圆在抛光之前需要将LED晶圆片粘贴到一块粘贴盘上, 在LED晶圆粘贴过程中, 为控制粘贴的质量, 需控制其加压机构的压力.

模糊控制自产生以来, 便由于不需要建立精确的数学模型而被广泛应用于实际过程控制中^[4-5], 大大促进了难以建模的MIMO系统控制的发展^[6-7]. 文献[8]针对乒乓球机器人, 利用二阶段模糊决策的方法对乒乓球机器人的击球点进行了选择. 传统的模糊控制给工程应用带来了非常大的便利, 但也存在诸多

不便. 例如, 实际应用中模糊规则需要占用大量的程序空间, 调用起来不方便, 编写程序较为繁琐, 这样可能使得程序运行缓慢, 降低模糊控制的精度, 而且操作人员对于模糊推理和模糊规则的建立也比较难以实现.

为了适应控制工程的应用, 程代展^[9]提出了一种新的矩阵运算——半张量积, 将普通矩阵乘法推广到任意两个矩阵的乘法, 在非线性多变量控制系统分析方面得到了成功应用^[10-12]. 文献[13]将矩阵半张量积算法引入布尔网络的逻辑系统, 得出一种布尔网络的能控性和能观性. 文献[14]针对环境舒适度控制系统中多个输入输出不能解耦的控制变量, 利用半张量积建立新型的模糊控制器, 并得出模糊关系矩阵, 完成

收稿日期: 2014-12-25; **修回日期:** 2015-03-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61227804, 61105036).

作者简介: 王佐勋(1972—), 男, 博士生, 从事机器人的规划与智能控制、检测技术及其自动化的研究; 徐德(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事机器人的视觉测量与控制、微装配等研究.

了对环境热舒适度的控制. 文献 [15] 利用矩阵半张量积方法研究了多变量模糊系统模糊逻辑控制器的设计, 并将所设计的模糊控制器应用于混合动力汽车能量管理和控制中.

本文针对 LED 晶圆贴片过程中压力的控制问题, 提出一种分阶段半张量积的多变量模糊控制方法. 首先, 采用半张量积逻辑决策理论选择需要控制的阀门; 然后, 对控制阀门采用模糊自适应 PID 控制方法, 实现实时的自适应控制. 整个决策控制过程采用半张量积的方法设计决策和控制规则, 将变量之间的逻辑关系与模糊控制器模糊推理和模糊规则的建立过程代数化, 大大简化了决策和控制过程, 简化了模糊控制程序量, 提高了控制效率和控制精确度.

1 半张量积理论

为叙述方便, 先对半张量积用到的一些符号和定义给出以下必要的说明:

δ_k^i 为单位矩阵 I_k 的第 i 列;

$$D_k = \left\{ 0, \frac{1}{k-1}, \frac{2}{k-1}, \dots, \frac{k-2}{k-1}, 1 \right\};$$

设 A 为一逻辑矩阵, 即 $A \in A_{n \times r}$, 则 $A = [\delta_n^{i_1}, \delta_n^{i_2}, \dots, \delta_n^{i_r}]$, 可记作 $A = \delta_n[i_1, i_2, \dots, i_r]$.

定义 1 [13] 设 $A \in R_k^{m,n}$, $B \in R_k^{p,q}$ 且 n 与 p 存在最小公倍数 α , 则矩阵 A 与 B 的半张量积记作 $A \times B$, 定义为

$$A \times B = (A \otimes I_{\alpha/n})(B \otimes I_{\alpha/n}). \quad (1)$$

注 1 \otimes 是 Kronecker 积, 半张量积是普通矩阵乘积的推广, 在文中的矩阵乘积都是半张量积, 为了简便, 省略 \times .

定义 2 [16] 换位矩阵 $W_{[m,n]} \in M_{mn \times mn}$ 定义如下: 用双指标 $(11, 12, \dots, 1n, \dots, m1, m2, \dots, mn)$ 标注它的列, 用双指标 $(11, 21, \dots, m1, \dots, 1n, 2n, \dots, mn)$ 标注它的行, 则它在 (I, J) 及 (i, j) 列处的元素定义为

$$w_{(IJ),(ij)} = \delta_{i,j}^{I,J} = \begin{cases} 1, & I = i \text{ 且 } J = j; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2)$$

命题 1 [16] 1) 设有两列向量, $X \in R^m, Y \in R^n$, 则有

$$W_{[m,n]} \times X \times Y = Y \times X; \quad (3)$$

2) 设有两行向量, $X \in R^m, Y \in R^n$, 则有

$$X \times Y \times W_{[m,n]} = Y \times X. \quad (4)$$

命题 2 [16] 给定 $A \in M_{m \times n}$. 1) 设 $Z \in R^t$ 为一列向量, 则有

$$Z \times A = (I_t \otimes A) \times Z; \quad (5)$$

2) 设 $Z \in R^t$ 为一行向量, 则有

$$A \times Z = Z \times (I_t \otimes A). \quad (6)$$

引理 1 [17] 设 $x_i \in D_{k_i}, i = 1, 2, \dots, n; z_j \in D_{s_j}, j = 1, 2, \dots, m$. 假设逻辑映射 $M, M : D_{k_1} \times \dots \times D_{k_n} \rightarrow D_{s_1} \times \dots \times D_{s_m}$, 映射可表示为

$$\begin{cases} Z_1 = M_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ Z_2 = M_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \vdots \\ Z_m = M_m(x_1, x_2, \dots, x_n), \end{cases} \quad (7)$$

其中 $M_i : D_{k_1} \times \dots \times D_{k_n} \rightarrow D_{s_j}, j = 1, 2, \dots, m$, 则逻辑函数可唯一地表示为

$$Z = M(x_1, x_2, \dots, x_n) = M \times_{i=1}^n x_i. \quad (8)$$

其中: $M \in L_{s \times k}$ 称为结构矩阵, $z \in \Delta_s, s = s_1, s_2, \dots, s_n, k = k_1, k_2, \dots, k_n$.

2 LED 晶圆贴片机器人压力控制系统

LED 晶圆贴片机器人加压系统如图 1 所示. 活塞所处的初始位置为 0 点, 垂直向下的方向为正方向, 活塞做向下运动 (加压)、向上运动 (抬起) 的循环运动. 为防止晶圆受到活塞的冲击而破裂, 加压过程中加压盘刚刚与晶圆接触时速度尽量小, 甚至为零, 然后气缸逐渐施加压力到定值, 保持一段时间后, 缓慢抬起, 之后快速回到初始位置. 压力控制系统结构如图 2 所示.



图 1 LED 晶圆贴片机器人加压系统

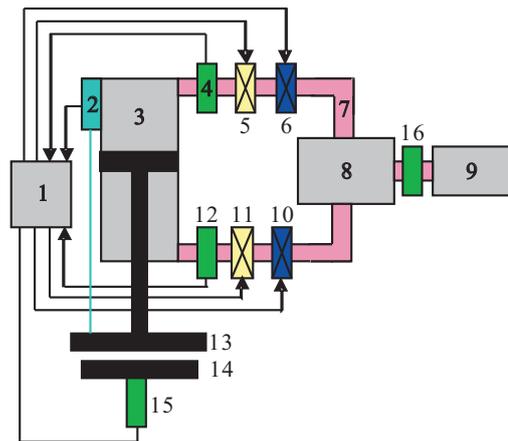


图 2 晶圆贴片机器人压力控制系统结构

图 2 中: 1 是控制器, 2 是位移传感器, 3 是气缸, 4 是压力传感器, 5 是减压阀, 6 是比例控制阀, 7 是输气

管道, 8是储气室, 9是空气压缩机, 10是比例控制阀, 11是减压阀, 12是压力传感器, 13是加压盘, 14是支撑台, 15和16是压力传感器. 系统不工作时, 活塞处于气缸的顶部, 活塞的摩擦力与活塞自身的重力恰好相等. 加压盘重5.5 kg, 直径为25 cm, 气缸的长度为30 cm, 活塞直径为10 cm. 定义活塞最顶端为0点, 向下运动的方向为正方向, 活塞运动27 cm时活塞连杆上的加压盘与支撑台接触. 定义活塞上部的气体压力为 F_1 , 活塞下部气体的压力为 F_2 , 活塞整体的受力为 F , 相对应的压强为 P_1 、 P_2 、 P , 活塞的面积为 s . F 、 F_1 、 F_2 三者存在如下的关系:

$$F = F_1 + mg - F_2. \quad (9)$$

其中: m 为加压盘质量, g 为重力加速度.

1) 活塞加速运动阶段.

活塞加速且加速度增加时, $P > 0$, P_2 为标准大气压(0.101 MPa); 活塞加速且加速度减小时, $P > 0$, P_1 逐渐减小到标准大气压, 同时 P_2 增加, 直至 $P = 0$, 即

$$P_2 = 0.101 + mg/s. \quad (10)$$

2) 活塞匀速运动阶段.

速度恒定, 加速度等于0, 也就是说 $P = 0$. 此时 P_1 为标准大气压, $P_2 = 0.101 + mg/s$.

3) 活塞减速运动阶段.

活塞减速运动且减速度增加时, $P < 0$, P_1 为标准大气压(0.101 MPa), P_2 由 $0.101 + mg/s$ 逐渐上升; 活塞减速运动且减速度减小时, $P < 0$, P_1 为标准大气压, P_2 逐渐减小到 $0.101 + mg/s$.

4) 活塞静止加压阶段.

活塞联接的加压盘已经与晶圆接触, 活塞静止, P 逐渐增大, 也就是 P_2 逐渐减小到标准大气压, P_1 逐渐增大, 直至压力为 $F/s = 0.55$ MPa, 即

$$P_1 + mg/s - 0.101 = 0.55 \text{ MPa}, \quad (11)$$

$$P_1 = 0.651 - mg/s. \quad (12)$$

3 活塞的运动规划

活塞的运动过程和加压目标的加压过程用五阶多项式进行规划^[18], 分为加速阶段、匀速阶段和减速阶段, 加速和减速阶段方程为

$$h(t) = a_{01} + a_{02}t + a_{03}t^2 + a_{04}t^3 + a_{05}t^4 + a_{06}t^5; \quad (13)$$

匀速阶段的方程为

$$h(t) = a_{11} + a_{12}t. \quad (14)$$

其中: $h(t)$ 为活塞运动的位移, t 为活塞运动的时间. 经仿真实验, 当加速和减速阶段分别占总时间的36.1%时, 速度和加速度曲线变化最为平滑. 规划活

塞从0点开始运动到加压目标, 用时1 s, 此时速度和加速度都为0, 在活塞对加压目标加压时, 压强从0开始加压.

4 多目标决策与控制

4.1 活塞受力决策与控制流程

活塞受力的模糊决策与控制过程分为两个阶段, 如图3所示. 第1阶段, 根据位移传感器测量的位移、上压力传感器和下压力传感器测量的压力数据选择需要控制的阀门; 第2阶段, 选择好控制阀门后, 对于相应的控制阀采用模糊PID控制方法, 利用半张量积构成的模糊关系矩阵实时调节PID控制器的3个参数 k_p 、 k_i 、 k_d , 完成压力的控制. 第1阶段和第2阶段是一个相互交叉的、动态的过程, 在执行第2阶段的同时, 也对第1阶段的任务进行处理, 为下一次第2阶段的执行做好准备.



图3 活塞受力决策控制流程

4.2 控制目标选择

系统决策模型如图4所示.

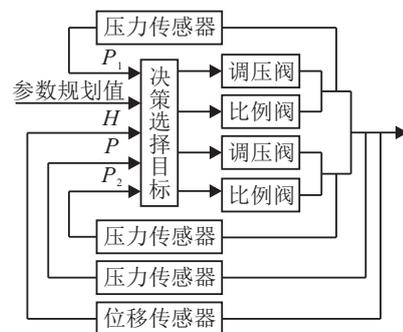


图4 系统决策模型

定义活塞向下运动的方向为正方向. 为了使系统能够按照最优的方式完成其功能, 必须对减压阀5、比例阀6、减压阀11和比例阀10进行控制, 以使气缸的上下腔室内能够保持适当的压力.

根据各变量的逻辑关系, 用半张量积的方法选择需要控制的阀门, 具体步骤如下.

Step 1: 确定输入输出变量. 输入量有2个, 分别是活塞的位移 H 和活塞受到的合力 F , 相应的压强为 P ; 输出变量为4个, 分别是减压阀5、比例阀6、减压阀11和比例阀10, 分别命名为 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 .

Step 2: 确定各个变量的语言集和论域. 根据活塞的加压过程将位移 H 分成5段, 分别是活塞运动的加速度增加阶段、加速度减小阶段、匀速阶段、减速度增加阶段和减速度减小阶段, 其论域为 $\{0 \sim 37.8, 37.8 \sim 75.6, 75.6 \sim 194.4, 194.4 \sim 232.2, 232.2 \sim 270\}$. 活塞处于运动阶段时, P 的论域为 $\{小于-0.5, -0.5$

~ 0.5, 大于 0.5}; 活塞处于恒定加压阶段时, P 的论域为 $\{P < 0.55, P > 0.55, P = 0.55\}$. K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 的论域为 {放开, 关闭} ~ {0, 1}, 若阀门打开为 $[1, 0]^T$, 则阀门关闭为 $[0, 1]^T$. 位移 H 的逻辑语言集合为 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 ; P 的逻辑语言集合为 B_1, B_2, B_3 ; K_1 的逻辑语言集合为 D_1, D_2 ; K_2 的逻辑语言集合为 G_1, G_2 ; K_3 的逻辑语言集合为 I_1, I_2 ; K_4 的逻辑语言集合为 J_1, J_2 . 令逻辑语言集合与半张量积向量对应, 即 $A_1 \sim \delta_5^1, A_2 \sim \delta_5^2, A_3 \sim \delta_5^3, A_4 \sim \delta_5^4, A_5 \sim \delta_5^5, B_1 \sim \delta_3^1, B_2 \sim \delta_3^2, B_3 \sim \delta_3^3, D_1 \sim \delta_{21}^1$ (放开), $D_2 \sim \delta_{21}^2$ (关闭), $G_1 \sim \delta_{22}^1, G_2 \sim \delta_{22}^2, I_1 \sim \delta_{23}^1, I_2 \sim \delta_{23}^2, J_1 \sim \delta_{24}^1, J_2 \sim \delta_{24}^2$.

Step 3: 设计逻辑决策规则. 表 1 所示为阀门 K_1 的逻辑决策规则表, 阀门 K_2 、 K_3 和 K_4 的逻辑决策规则类似于 K_1 的逻辑决策规则.

表 1 阀门 K_1 的逻辑决策规则

P	H				
	δ_5^1	δ_5^2	δ_5^3	δ_5^4	δ_5^5
δ_3^1	δ_{21}^2	δ_{21}^1	δ_{21}^1	δ_{21}^1	δ_{21}^1
δ_3^2	δ_{21}^2	δ_{21}^2	δ_{21}^2	δ_{21}^2	δ_{21}^2
δ_3^3	δ_{21}^2	δ_{21}^1	δ_{21}^1	δ_{21}^1	δ_{21}^1

Step 4: 求系统的结构矩阵. 根据逻辑规则, 输出变量 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 和输入变量 H 、 P 的表示形式为

$$k_1 = M_{11}hp, M_{11} \in \mathbf{R}_{2 \times 15}; \quad (15)$$

$$k_2 = M_{21}hp, M_{21} \in \mathbf{R}_{2 \times 15}; \quad (16)$$

$$k_3 = M_{31}hp, M_{31} \in \mathbf{R}_{2 \times 15}; \quad (17)$$

$$k_4 = M_{41}hp, M_{41} \in \mathbf{R}_{2 \times 15}. \quad (18)$$

其中 M_{11} 、 M_{21} 、 M_{31} 和 M_{41} 是逻辑系统的结构矩阵, 分别为

$$M_{11} = \delta_{21}[2, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1],$$

$$M_{21} = \delta_{22}[1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2],$$

$$M_{31} = \delta_{23}[1, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2],$$

$$M_{41} = \delta_{24}[2, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1].$$

4.3 控制目标模糊控制

调节的阀门决策选择完毕, 立即对选中的阀门进行控制. 选用半张量积的模糊自适应 PID 控制, 其控制算法的形式为

$$u(t) = (k_p + \Delta k_p)e(t) + (k_i + \Delta k_i) \sum e(t) + (k_d + \Delta k_d)[e(t) - e(t-1)]. \quad (19)$$

其中: $e(t)$ 和 $e(t-1)$ 分别为第 t 次及第 $t-1$ 次偏差值, $u(t)$ 为第 t 次的控制输出量; k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例调节系数、积分调节系数和微分调节系数, Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 分别为 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊调节量. 图 5 为半张量积的自适应模糊 PID 控制器. 图中: $r(t)$ 为活塞上受力的规划值, $r_1(t)$ 为气缸内活塞上部气体压力的

规划值, $r_2(t)$ 为气缸内活塞下部气体压力的规划值, e_1 、 e_2 、 e_{1c} 、 e_{2c} 分别为对应的上部气体的压力误差和下部气体的压力误差以及它们的误差变化率, $\Delta k_1(\Delta k_{1p}$ 、 Δk_{1i} 、 $\Delta k_{1d})$ 和 $\Delta k_2(\Delta k_{2p}$ 、 Δk_{2i} 、 $\Delta k_{2d})$ 分别为活塞上部 and 活塞下部气体压力 PID 控制器的比例系数变化量、PID 积分系数变化量和微分系数变化量.

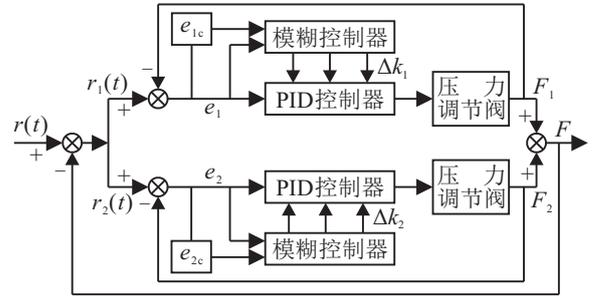


图 5 半张量积自适应模糊 PID 控制模型

假如对上部的比例阀进行控制, 控制步骤如下.

Step 1: 测量值与规划值比较. 计算测量值与规划值得差值 e_1 和差值变化率 e_{1c} .

Step 2: 确定模糊控制器输入变量和输出变量的模糊论域. 输入变量为 e_1 和 e_{1c} , 输出变量为 Δk_{1p} 、 Δk_{1i} 、 Δk_{1d} . e_1 的论域为

$$\{-0.002, -0.001, 0, 0.001, 0.002\};$$

e_{1c} 的论域为

$$\{-0.001, -0.0005, 0, 0.0005, 0.001\};$$

Δk_{1p} 的论域为

$$\{-2, -1, 0, 1, 2\};$$

Δk_{1i} 的论域为

$$\{-0.04, -0.02, 0, 0.02, 0.04\};$$

Δk_{1d} 的论域为

$$\{-0.02, -0.01, 0, 0.01, 0.02\}.$$

Step 3: 确定变量的模糊集合. e_1 的模糊集合为

$$\{(-\infty, -0.001], (-0.001, -0.0005],$$

$$(-0.0005, 0.0005], (0.0005, 0.001], (0.001, +\infty)\};$$

e_{1c} 的模糊集合为

$$\{(-\infty, -0.0002], (-0.0002, -0.0001],$$

$$(-0.0001, 0.0001], (0.0001, 0.0002], (0.0002, +\infty)\};$$

Δk_{1p} 的模糊集合为

$$\{-2, -1, 0, 1, 2\};$$

Δk_{1i} 的模糊集合为

$$\{-0.04, -0.02, 0, 0.02, 0.04\};$$

Δk_{1d} 的模糊集合为

$$\{-0.02, -0.01, 0, 0.01, 0.02\}.$$

Step 4: 确定模糊子集对应的半张量积向量. e_1 的模糊子集对应的半张量积向量为

$$\{\delta_{51}^1, \delta_{51}^2, \delta_{51}^3, \delta_{51}^4, \delta_{51}^5\};$$

e_{1c} 的模糊子集对应的半张量积向量为

$$\{\delta_{52}^1, \delta_{52}^2, \delta_{52}^3, \delta_{52}^4, \delta_{52}^5\};$$

Δk_{1p} 的模糊子集对应的半张量积向量为

$$\{\delta_{53}^1, \delta_{53}^2, \delta_{53}^3, \delta_{53}^4, \delta_{53}^5\};$$

Δk_{1i} 的模糊子集对应的半张量积向量为

$$\{\delta_{54}^1, \delta_{54}^2, \delta_{54}^3, \delta_{54}^4, \delta_{54}^5\};$$

Δk_{1d} 的模糊子集对应的半张量积向量为

$$\{\delta_{55}^1, \delta_{55}^2, \delta_{55}^3, \delta_{55}^4, \delta_{55}^5\}.$$

为了简化计算, 对变量 e_1 、 e_{1c} 、 Δk_{1p} 、 Δk_{1i} 、 Δk_{1d} 选择负大(NB)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正大(PB)共5个模糊子集, 其隶属度函数均选择对称均匀分布的三角函数, 如图6所示.

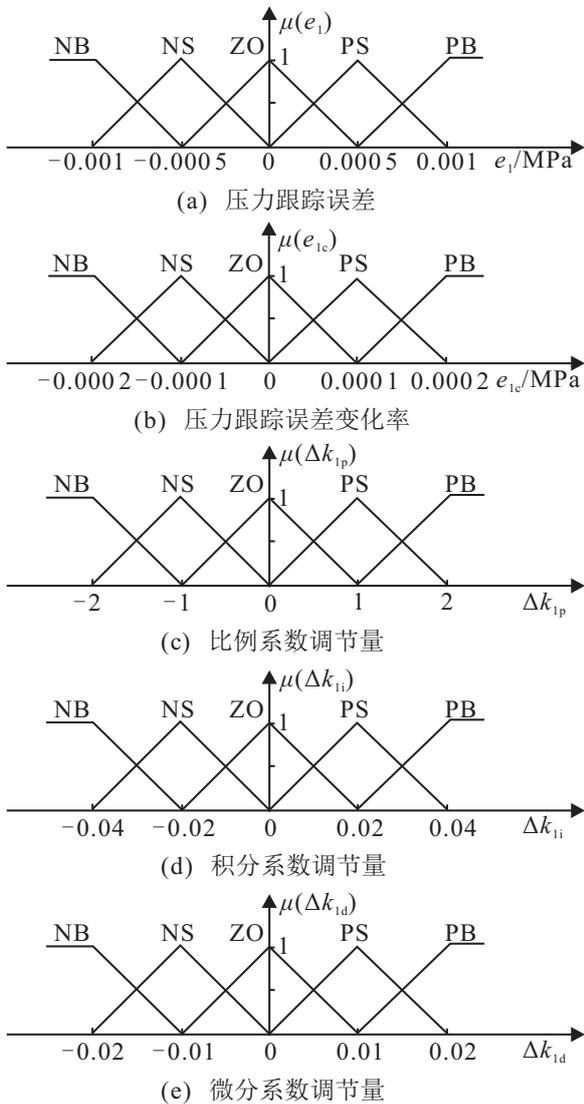


图6 压力决策控制中各变量的隶属度函数

Step 5: 设计自适应模糊规则. Δk_{1p} 的模糊规则如表2所示, 采用类似方法可以得到 Δk_{1i} 和 Δk_{1d} 的

模糊规则表.

表2 Δk_{1p} 自适应模糊控制规则表

e_{1c}	e_1				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	PB	PS	ZO
NS	PB	PB	PS	ZO	NS
ZO	PS	PS	ZO	NS	NB
PS	PS	ZO	NS	NS	NB
PB	ZO	NS	NB	NB	NB

Step 6: 求结构矩阵. 根据模糊规则, 用矩阵形式表示输出变量 Δk_{1p} 、 Δk_{1i} 、 Δk_{1d} 和输入变量 E_1 、 E_{1c} 之间的关系为

$$\Delta k_{1p} = M_{12}E_1E_{1c}, M_{12} \in \mathbf{R}_{5 \times 25}; \quad (20)$$

$$\Delta k_{1i} = M_{22}E_1E_{1c}, M_{22} \in \mathbf{R}_{5 \times 25}; \quad (21)$$

$$\Delta k_{1d} = M_{32}E_1E_{1c}, M_{32} \in \mathbf{R}_{5 \times 25}. \quad (22)$$

其中 M_{12} 、 M_{22} 和 M_{32} 是该半张量积模糊系统的结构矩阵, 分别为

$$M_{12} = \delta_{53}[5, 5, 4, 4, 3, 5, 5, 4, 3, 2, 5, 4, 3, 2, 1, 4, 3, 2, 2, 1, 3, 2, 1, 1, 1],$$

$$M_{22} = \delta_{54}[1, 1, 2, 2, 3, 1, 2, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4, 5, 2, 3, 4, 4, 5, 3, 4, 4, 5, 5],$$

$$M_{32} = \delta_{54}[2, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 3, 2, 4, 4, 4, 4].$$

5 实验与结果

5.1 选择需要控制的阀门

活塞的位移 $H = \{4.5 \sim 9\}$, 假设此时活塞压力 $P > 0$. 计算此时各阀门的状态, 将 H 和 P 写成如下半张量积逻辑矩阵形式:

$$h = [0, 1, 0, 0, 0]^T, p = [1, 0, 0]^T.$$

利用式(15)求 K_1 阀门的状态为

$$k_1 = M_{11}hp = \delta_{21} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 15} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

即 K_1 处于开放状态. 采用同样方法可求出

$$k_2 = [1 \ 0]^T, k_3 = [0 \ 1]^T, k_4 = [1 \ 0]^T.$$

由定义可知, K_2 、 K_4 处于开放状态, K_3 处于关闭状态, 需要调节减压阀 K_1 和比例阀 K_2 、 K_4 .

5.2 计算自适应调节参数

当活塞上压力的误差 $e_1 = -0.0003$, 误差变化率 $e_{1c} = -0.0007$ 时, 计算3个自适应调节参数, 写成半

张量积模糊矩阵形式为

$$E_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, E_{1c} = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0].$$

代入式(20)得

$$\Delta k_{1p} = M_{12} E_1 E_{1c} = \delta_{53} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \delta_{53} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 2.$$

同样可求得 $\Delta k_{1i} = -0.04$, $\Delta k_{1d} = -0.02$.

5.3 实验结果

采用 Ziegler-Nichols 方法(简称 Z-N 算法), 通过大量实验整定 PID 的 3 个参数的初始值. 首先, 对比例调节系数 k_p 进行整定, 将比例系数由小到大变化, 并观察系统响应, 直到得到反应快、超调较小的响应曲线, 并将此作为 k_p 的初值; 然后, 整定积分系数 k_i , 将整定好的比例系数稍微调小, 积分系数从小到大变化, 使得系统在快速响应的条件下, 能够消除误差; 最后, 整定微分系数, 微分系数从零逐渐增大, 同时比例系数和积分系数在整定好的值的基础上同比例变化, 并观察系统变化, 直到获得调节效果较好的 PID 控制参数. 这样得到的参数为 $k_p = 40$ 、 $k_i = 1.2$ 、 $k_d = 0.8$. 运用二阶段半张量积的模糊自适应的决策控制方法跟踪控制活塞的压力变化, 使活塞按照规划的曲线运动, 并且给晶圆施加恒定的力. 为了更好地说明该方法的控制效果, 同时应用 PID 控制算法对压力控制过程进行控制, 得出相应的曲线如图 7 所示.

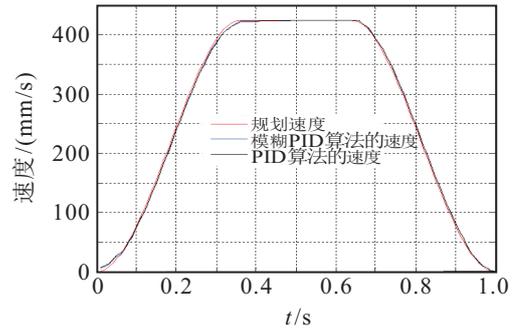
图 7(a)为活塞运动速度曲线图. 采用模糊自适应算法时, 开始时误差较大, 约为 5 mm/s, 经过 0.05 s 后基本上能够跟踪上规划的曲线, 运动过程中活塞能够较快地跟踪所规划的曲线; 加速和减速运动过程误差稍大, 最大误差为 1.97 mm/s; 在匀速运动时, 误差小于 1 mm/s; 采用 PID 算法时, 开始误差约为 6 mm/s, 0.07 s 后能够跟踪规划曲线; 加减速时最大误差约为 2.5 mm/s; 匀速时误差约为 1.5 mm/s.

图 7(b)为加压盘与晶圆片接触后晶圆片承受压力曲线的变化过程. 从图 7(b)可以看出, 大约 0.9 s 后压力基本上能稳定在 0.55 MPa.

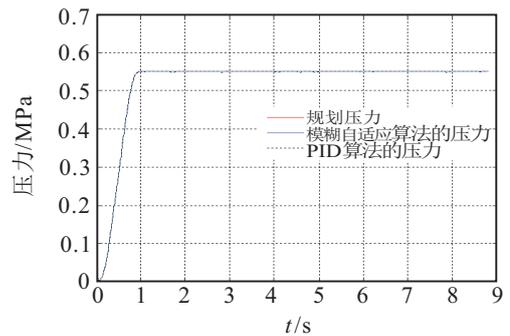
图 7(c)为初始加压时晶圆片承受压力的局部放大. 从图 7(c)可以看出, 初始阶段误差较大, 大约为 0.02 MPa, 经过 0.7 s 后能够迅速跟踪上规划的压力曲线, 从曲线可以看出模糊自适应算法的响应速度明显快于 PID 算法的响应速度.

图 7(d)为加压稳定后晶圆片承受压力的局部放大. 从图 7(d)可以看出, 稳定后压力曲线以 0.55 MPa

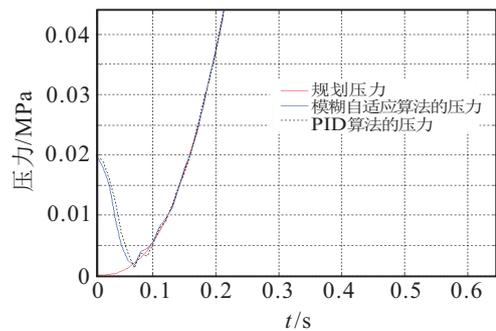
为中心上下波动, 采用模糊自适应算法的误差能够控制在 0.000 1 MPa, 但是采用 PID 算法的误差只能控制在 0.000 2 MPa.



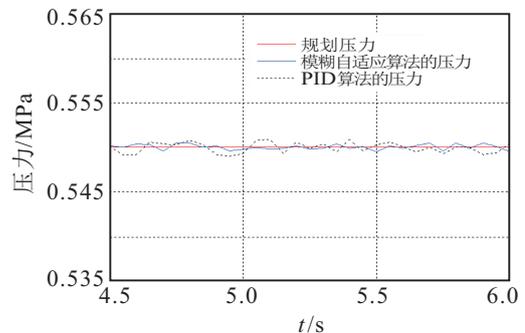
(a) 活塞运动速度曲线



(b) 晶圆压力曲线



(c) 初始加压时的曲线



(d) 稳定后的压力曲线

图 7 实验曲线

6 结论

本文提出了一种利用半张量积自适应模糊控制策略控制 LED 晶圆贴片过程中活塞压力的方法. 首先, 根据活塞运动过程所处的位置和活塞上承受的压力设计逻辑规则, 列出半张量积计算方程, 通过计算选择出需要控制的阀门; 然后, 根据规划的压力值

与实际测量值的误差和误差变化率,采用模糊自适应PID的控制方法,通过设计模糊控制策略得到半张量积矩阵方程,确定实时的PID参数变化量,实时地调节PID的3个参数,实时地调节和控制阀门的开度,以此来控制压力,使压力值的误差在规定的范围之内.通过与PID控制算法的对比实验可以看出,这种控制压力的方法能够有效提高LED贴片的精度.

参考文献(References)

- [1] 郭东明,康仁科,苏建修,等.超大规模集成电路制造中硅片平坦化技术的未来发展[J].机械工程学报,2003,39(10):100-105.
(Guo D M, Kang R K, Su J X, et al. Future development on wafer planarization technology in ULSI fabrication[J]. J of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 100-105.)
- [2] 杜诗文,李永堂.化学机械抛光中Si/Cu/Ta/low-k界面剥离和断裂特性研究[J].机械工程学报,2012,48(4):26-31.
(Du S W, Li Y T. Delamination and fracture characteristic study of Si/Cu/Ta/low-k system during chemical mechanical Polishing[J]. J of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 26-31.)
- [3] 王同庆,路新春,赵德文,等.300 mm晶圆化学机械抛光机关键技术研究及实现[J].机械工程学报,2014,50(5):182-187.
(Wang T Q, Lu X C, Zhao D W, et al. Research and implementation on critical technology of chemical mechanical polishing tool for 300 mm wafer[J]. J of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 182-187.)
- [4] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(1): 338-353.
- [5] Li P, Yang G. An adaptive fuzzy design for fault-tolerant control of MIMO nonlinear uncertain systems[J]. J of Control Theory and Applications, 2011, 9(2): 244-250.
- [6] Li T, Wang D, Chen N. Adaptive fuzzy control of uncertain MIMO non-linear systems in block triangular forms[J]. Nonlinear Dynamics, 2011, 63(1): 105-123.
- [7] 师五喜.未知多变量非线性系统自适应模糊预测控制[J].控制理论与应用,2011,28(10):1399-1404.
(Shi W X. Adaptive fuzzy predictive control for unknown multi-variable nonlinear systems[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(10): 1399-1404.)
- [8] 苏虎,徐德,陈国栋,等.基于两阶段多目标模糊决策的乒乓球机器人击球点选择[J].控制理论与应用,2013,30(3):597-603.
(Su H, Xu D, Chen G D, et al. Striking position selection based on two-step multi-purpose fuzzy decision method for robotic table tennis[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(3): 597-603.)
- [9] Cheng D Z. A survey on semi-tensor product of matrices[J]. J of Systems Science and Complexity, 2007, 20(2): 304-322.
- [10] Cheng D Z, Hu X M, Wang Y Z. Non-regular feedback linearization of nonlinear systems via a normal form algorithm[J]. Automatica, 2004, 40(3): 439-447.
- [11] Cheng D Z, Feng J, Lv H. Solving fuzzy relational equations via semi-tensor product[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2012, 20(2): 390-396.
- [12] Liu Z B, Wang Y Z. Disturbance decoupling of mix-valued logical networks via the semi-tensor product method[J]. Automatica, 2012, 48(8): 1839-1844.
- [13] 程代展,齐洪胜,赵寅.布尔网络的分析与控制-矩阵半张量积方法[J].自动化学报,2011,37(5):529-540.
(Cheng D Z, Qi H S, Zhao Y. Analysis and control of boolean networks: A semi-tensor product approach[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(5): 529-540.)
- [14] 段培永,吕红丽,冯俊娥,等.室内热舒适环境的模糊关系矩阵模型控制系统[J].控制理论与应用,2013,30(3):215-221.
(Duan P Y, Lv H L, Feng J E, et al. Fuzzy relation matrix model control system for indoor thermal comfort[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(3): 215-221.)
- [15] 葛爱冬,王玉振,魏爱荣,等.多变量模糊系统控制设计及其在并行混合动力汽车中的应用[J].控制理论与应用,2013,30(8):998-1004.
(Ge A D, Wang Y Z, Wei A R, et al. Control design for multi-variable fuzzy systems with application to parallel hybrid electric vehicles[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(8): 998-1004.)
- [16] 程代展,赵寅.矩阵的半张量积:一个便捷的新工具[J].科学通报,2011,56(32):2664-2674.
(Cheng D Z, Zhao Y. Semi-tensor product of matrices: A convenient new tool[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(32): 2664-2674.)
- [17] Cheng D Z, Qi H S, Zhao Y. An introduction to semi-tensor product of matrices and its applications[M]. Singapore: World Scientific, 2012.
- [18] Wang Z X, Xu D, Wu B L, et al. Motion planning for the fast opening of the protection cover based on high order polynomial interpolation[C]. Proc of the 2012 IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics. Guangzhou: IEEE, 2012: 2310-2316.