

文章编号: 1000-8152(2009)10-1137-06

基于变折扣因子EWMA的混合产品批间控制方法

侯明阳, 郑英, 艾兵, 郑燕, 张杰

(华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 批间(run-to-run, 简称R2R)控制现今已被广泛用于半导体生产行业. 指数加权移动平均(exponent weighted moving average, EWMA)是R2R控制的一种重要算法. 折扣因子是EWMA控制期的主要参数. 本文在模型中考虑了实际生产过程中混合产品少量多样的特点, 引入了基于产品的变折扣因子EWMA控制算法, 解决了产品切换时制程输出收敛速度过慢的问题. 变折扣因子的引入提高了制程输出的响应速率而并不影响制程输出的稳定性. 对实际过程的模拟仿真检验了该控制算法的可行性和优越性.

关键词: 批间控制; 指数加权移动平均; 折扣因子; 基于产品的控制

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A

EWMA for run-to-run control with time-varying discount factor in high-mix process

HOU Ming-yang, ZHENG Ying, AI Bing, ZHENG Yan, ZHANG Jie

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Run-to-run(R2R) control is widely adopted in semiconductor manufacturing industries. Exponent weighted moving average(EWMA) is an important R2R algorithm. Discount factor is a major parameter of EWMA controller. Considering the high-mix characteristics of multi-product in practical manufacturing processes, we adopt the EWMA algorithm with time-varying discount factor to handle the slow convergence-rate in the product-switching phase. It improves the response speed while maintaining the stability of the process. The feasibility and advantages are demonstrated in simulations of practical processes.

Key words: run-to-run control; exponent weighted moving average; discount factor; product-based control

1 引言(Introduction)

半导体生产在近些年来有着突飞猛进的发展, 成为世界范围内一个重要的行业, 同时, 半导体生产产业也是一个投资额极高的行业, 因此提高产品的良率是生产企业盈利的关键. 统计过程控制(简称SPC)和现今过程控制(简称APC)是半导体生产过程中两个重要的控制方法. SPC通过测量装置来监测过程的输出, 并且在过程发生变化时找出导致这种变化的主要原因, 但是SPC并没有定义控制动作; 现今过程控制是通过调整过程参数来保证输出稳定在目标范围之内. 上世纪末批间控制算法出现, 并迅速成为包道题生产行业中的重要技术.

Box和Lucíneo对SPC和APC作了详细的介绍^[1]. SPC通过对统计过程的偏移进行监控来产生报警信号^[2], 但是SPC仅是对过程进行监测, 或作一些小的调整, 并不能从根本上解决问题. 为了解决SPC存

在的缺陷, 专家从20世纪90年代开始对批间控制进行研究. 近些年来许多专家学者对批间控制进行了深入的研究, 提出了多种不同的方法来解决生产过程中的漂移, 平移和干扰对生产过程产生的影响, 如ADROC算法, OAQC算法等^[3]. Ingolfsso等第一次使用EWMA方法作为反馈控制期来补偿在半导体的晶体外延增长过程中R2R方法的输出偏移问题^[4]. 随后有大量的专家学者对EWMA反馈控制做了研究, 并应用与半导体生产中. 批间反馈控制针对每个批次调整控制器参数, 使输出稳定在目标值, 其中每次参数的调整都基于前面批次产品的输出. Ingolfsson 和Sachs 提出了single-EWMA 算法, 之后Bulter和Stefani 针对多晶硅门电路的蚀刻过程提出double-EWMA算法来补偿过程输出偏移的问题^[5].

以上所提到的EWMA算法均使用固定折扣因子,

尽管EWMA 控制器使用小的折扣因子可以保证过程的长期稳定,但是调节速度比较慢,在初始的若干个批次输出值和目标值有较大的偏差,甚至超出误差允许范围.在实际生产中一般产品均为小批量生产,如果调节速度过慢可能在产品批次生产已经完成而输出仍未达到稳定.为了降低产品的返工率, Tseng等提出了变折扣因子EWMA控制器^[6].

在实际的生产过程中,同一生产线的产品往往是以少量多样的形式出现.这种笔者称之为High-mix制程.在过去的几年中,只有少数专家学者对这种制程进行研究. Patel等提出一种控制机制,正对特定制程如化学机械研磨,可以补偿机台干扰,产品干扰或外来干扰^[7]. Edgar等在处理High-mix制程针对黄光(photolithography)制程中的overlay制程,提出了实时自适应干扰预测(JADE)方法^[8].

2 问题的描述(Problem description)

下面的线性模型通常用来表示一个单输入单输出的CMP的R2R过程:

$$Y_t = \alpha + \beta x_t + \eta_t. \tag{1}$$

其中: Y_t 表示 t 批次过程输出,即晶元厚度; α 表示截距, β 表示增益; x_t 表示 t 批次过程的输入,即材料移除速度; η_t 表示过程干扰.通常用最小平方算法(LSE)对 α 和 β 进行估计得到初始值 a_0 和 b . EWMA控制器为

$$a_t = \lambda(Y_t - bx_t) + (1 - \lambda)a_{t-1}, \tag{2}$$

$$x_t = (\tau - a_{t-1})/b. \tag{3}$$

其中称 λ 为折扣因子,一般设 $0 < \lambda \leq 1, t = 1, 2, \dots, N$.在EWMA算法中,笔者规定过程增益的估计值 b 是不变的.在R2R过程的第一个批次控制器的输入值为 $x_0 = (\tau - a_0)/b$,其中 τ 为过程输出期望的目标值.由式(1)~(3)可以得出过程输出的表达式:

$$Y_t = \tau + \Gamma_0 \phi^{t-1} + W_t. \tag{4}$$

其中:

$$\xi = \beta/b, \phi = 1 - \xi\lambda,$$

$$\Gamma_0 = \alpha + \beta \frac{\tau - a_0}{b} - \tau,$$

$$W_t = \eta_t - \sum_{k=1}^{t-1} (1 - \phi)\phi^{k-1}\eta_{t-k},$$

对于式(1)所描述的过程,当且仅当 $|\phi| = |1 - \xi\lambda| < 1$ 时过程的输出是稳定的.并且还有以下结论:

1) 当过程干扰为IMA(1,1)时,即: $\eta_t = \eta_{t-1} + (1 + \theta B)\varepsilon_t, \varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Y_t = \tau. \tag{5}$$

2) 当过程干扰为 $\eta_t = \delta t$ 时, δ 为机台的确定行干扰(如磨损率),

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Y_t = \tau + \delta/(1 - \phi). \tag{6}$$

对于任何控制问题,最基本的一个要求就是过程能够保持长期的平稳,这里的平稳是指一种渐近性质,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(Y_t) = \tau,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} D(Y_t) < \infty.$$

它保证了输出的均值收敛于目标值,同时方差是有限的.半导体行业是高投入的行业,对产品的精度要求也很高,生产过程仅仅是稳定的是不够的,在生产中一般通过平均平方偏移(mean square error, MSE)来描述控制方法的优劣.

$$MSE_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_t - \tau)^2.$$

在实际生产中,同一机台上往往同时生产多种不同规格型号的产品,产品的物理化学性质也大不相同.这里考虑产品的的不同特性,使用基于产品(product-based)控制方法,针对不同的产品使用相应的EWMA控制器参数^[10].如图1,基于产品的控制方法的主要特点就是每个产品都使用该产品最近一个批次的参数.

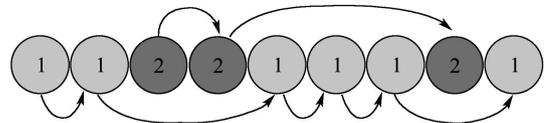


图1 基于产品控制方法示意图
Fig. 1 Product-based Control Approach

为了方便讨论假设产品为双产品序列.如图2所示,产品有规律排列,每 i 个批次循环一次,产品1的批次数为 j ,产品2的批次数为 $i - j$.产品1和产品2的截距和过程增益为 $\alpha_1, \beta_2, \alpha_1, \beta_2$,估计值为 a_{10}, b_1, a_{20}, b_2 ,目标值为 τ_1, τ_1 ,干扰为 $\{\eta_t\}$.

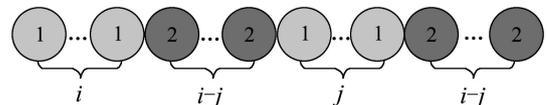


图2 有规律性的双产品制程
Fig. 2 The periodic two-product process

过程的模型如下所示:

$$Y_{it+n} = \begin{cases} \alpha_1 + \beta_1 x_{it+n} + \eta_{it+n}, & 1 \leq n \leq j, \\ \alpha_2 + \beta_2 x_{it+n} + \eta_{it+n}, & j+1 \leq n \leq i. \end{cases} \quad (7)$$

EMWA控制器为

当 $t = 0$ 时:

$$\begin{cases} a_1 = \lambda(Y_1 - b_1 x_1), & 1 < n \leq j, \\ a_{j+1} = \lambda(Y_{j+1} - b_2 x_{j+1}), & j+1 < n \leq i; \end{cases} \quad (8)$$

当 $t \geq 1$ 时:

$$\begin{cases} a_{it+1} = \lambda(Y_{it+1} - b_1 x_{it+1}) + (1 - \lambda)a_{it-i+j}, \\ a_{it+j+1} = \\ \lambda(Y_{it+j+1} - b_2 x_{it+j+1}) + (1 - \lambda)a_{it-i}, \end{cases} \quad (9)$$

$$a_{it+n} = \begin{cases} \lambda(Y_{it+n} - b_1 x_{it+n}) + (1 - \lambda)a_{it+n-1}, & 1 < n \leq j, \\ \lambda(Y_{it+n} - b_2 x_{it+n}) + (1 - \lambda)a_{it+n-1}, & j+1 < n \leq i. \end{cases} \quad (10)$$

过程输入为

当 $t = 0$ 时:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{\tau_1}{b_1}, & 1 < n \leq j, \\ x_{j+1} = \frac{\tau_2}{b_2}, & j+1 < n \leq i; \end{cases} \quad (11)$$

当 $t \geq 1$ 时:

$$\begin{cases} x_{it+1} = \frac{\tau_1 - a_{it-i+j}}{b_1}, \\ x_{it+j+1} = \frac{\tau_2 - a_{it-i}}{b_2}, \end{cases} \quad (12)$$

$$x_{it+n} = \begin{cases} \frac{\tau_1 - a_{it+n-1}}{b_1}, & 1 < n \leq j, \\ \frac{\tau_2 - a_{it+n-1}}{b_2}, & j+1 < n \leq i. \end{cases} \quad (13)$$

3 基于产品的变折扣因子的EWMA方法(The product-based EWMA approach with time-varying discount factor)

假设过程以 i 个批次为一个循环, 以产品1为例得到一个循环的过程输出.

定理 1 对于如图2所示的双产品制程, 第 $t + 1$ 个循环的第1个产品输出表达式为

$$Y_{it+i+1} = \sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} [\xi_1 \lambda \tau_1 (\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} + 1)] + \phi_1^{(t+1)j} Y_1 + \sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} [\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} (\eta_{ik+j-m} - \eta_{ik+j-m-1}) + (\eta_{ik+i+1} - \eta_{ik+j})].$$

$$(\eta_{ik+i+1} - \eta_{ik+j})]. \quad (14)$$

其中: $|\phi_1| = |1 - \xi_1 \lambda| < 1$, $\{\eta_t\}$ 为过程干扰.

证 由式(1), $Y_{it+j} = \alpha_1 + \beta_1 x_{it+j} + \eta_{it+j}$, $it + j - 1$ 过程为

$$\begin{aligned} Y_{it+j-1} &= \alpha_1 + \beta_1 x_{it+j-1} + \eta_{it+j-1}, \\ Y_{it+j} - Y_{it+j-1} &= -\xi_1 (a_{it+j-1} - a_{it+j-2}) + \\ &\quad (\eta_{it+j} - \eta_{it+j-1}), \end{aligned}$$

$$Y_{it+j} = (1 - \xi_1 \lambda)^{j-1} Y_{it+1} + \sum_{m=0}^{j-2} (1 - \xi_1 \lambda)^m (\xi_1 \lambda \tau_1 + \eta_{it+j-m} - \eta_{it+j-m-1}),$$

$$\begin{aligned} Y_{it+i+1} &= \\ (1 - \xi_1 \lambda) Y_{it+j} + \xi_1 \lambda \tau_1 + \eta_{it+i+1} - \eta_{it+j} &= \\ (1 - \xi_1 \lambda)^j Y_{it+1} + \sum_{m=0}^{j-2} (1 - \xi_1 \lambda)^{m+1} (\xi_1 \lambda \tau_1 + \eta_{it+j-m} - \eta_{it+j-m-1}) + \\ \xi_1 \lambda \tau_1 + \eta_{it+i+1} - \eta_{it+j} &= \\ \sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} [\xi_1 \lambda \tau_1 (\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} + 1)] + \end{aligned}$$

$$\phi_1^{(t+1)j} Y_1 + \sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} [\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} (\eta_{ik+j-m} - \eta_{ik+j-m-1}) + (\eta_{ik+i+1} - \eta_{ik+j})].$$

证毕.

推论 1 对于如图2所示的双产品制程, 当

1) 干扰为 IMA(1, 1) 时:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} E(Y_{it+i+1}) &= \tau_1, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} D(Y_{it+i+1}) &< \infty. \end{aligned} \quad (15)$$

2) 干扰为 $\eta_t = \delta t + \varepsilon_t$ 时:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} E(Y_{it+i+1}) = \\ \tau_1 + \frac{\phi_1 (1 - \phi_1^{j-1}) (i - j + 1)}{(1 - \phi_1) (1 - \phi_1^j)} \delta, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} D(Y_{it+i+1}) < \infty. \end{cases} \quad (16)$$

证 对于式(14), 令

$$\nabla = \sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} [\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} (\eta_{ik+j-m} - \eta_{ik+j-m-1}) + (\eta_{ik+i+1} - \eta_{ik+j})],$$

当 $|\phi_1| < 1$ 时:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} E(Y_{it+i+1}) &= \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (\sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} [\xi_1 \lambda \tau_1 (\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} + 1)]) &+ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\phi_1^{(t+1)j} Y_1 + \lim_{t \rightarrow \infty} E(\nabla) = \\ &\lim_{t \rightarrow \infty} \xi_1 \lambda \tau_1 \left(\frac{1 - \phi_1^{tj}}{1 - \phi_1} \right) + \lim_{t \rightarrow \infty} E(\nabla) = \\ &\tau_1 + \lim_{t \rightarrow \infty} E(\nabla). \end{aligned}$$

当干扰为IMA(1, 1)时:

$$\begin{aligned} &\lim_{t \rightarrow \infty} E(Y_{it+i+1}) = \\ &\tau_1 + \lim_{t \rightarrow \infty} E\left(\sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} \left[\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} (\varepsilon_{ik+j-m} - \theta \varepsilon_{ik+j-m-1}) + (\varepsilon_{ik+i+1} - \theta \varepsilon_{ik+j}) \right]\right) = \tau_1, \\ &\lim_{t \rightarrow \infty} D(Y_{it+i+1}) = \\ &\lim_{t \rightarrow \infty} D\left(\sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} \left[\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} (\varepsilon_{ik+j-m} - \theta \varepsilon_{ik+j-m-1}) + (\varepsilon_{ik+i+1} - \theta \varepsilon_{ik+j}) \right]\right) = \\ &\lim_{t \rightarrow \infty} E\left(\sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} \left[\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} (\varepsilon_{ik+j-m} - \theta \varepsilon_{ik+j-m-1}) + \right. \right. \\ &\left. \left. (\varepsilon_{ik+i+1} - \theta \varepsilon_{ik+j}) \right]^2\right) = \\ &\sum \begin{cases} \frac{(1 + \theta^2)\sigma^2}{1 - \phi_1^2}, & k = k', \\ \frac{-4\theta\sigma^2}{1 - \phi_1^2}, & |k - k'| = 1, \\ 0, & |k - k'| \geq 2, \end{cases} = \\ &\frac{(1 - 4\theta + \theta^2)\sigma^2}{1 - \phi_1^2} < \infty. \end{aligned}$$

当干扰为 $\eta_t = \delta t + \varepsilon_t$ 时:

$$\begin{aligned} &\lim_{t \rightarrow \infty} E(Y_{it+i+1}) = \\ &\tau_1 + \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} \left[\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} \delta + (i - j)\delta \right] = \\ &\tau_1 + \frac{\phi_1(1 - \phi_1^{j-1})(i - j + 1)\delta}{(1 - \phi_1)(1 - \phi_1^j)}, \\ &\lim_{t \rightarrow \infty} D(Y_{it+i+1}) = \\ &\lim_{t \rightarrow \infty} D\left(\sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} \left[\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} (\varepsilon_{it+j-m} - \theta \varepsilon_{it+j-m-1} + \delta) + (i - j + 1)\delta + \right. \right. \\ &\left. \left. 1 - \theta \sum_{k=in+j}^{in+i} \varepsilon_k + \varepsilon_{in+i+1} - \varepsilon_{in+j} \right]\right) < \infty. \end{aligned}$$

由式(15)和(16)可以得出, 基于产品的控制方法的输出是稳定的, 而且完全消除了不同产品之间的影响, 即使过程受到机台干扰IMA(1, 1)和 δt 的影响, 仍能较好的稳定于给定的目标值.

比较式(14)和(4)不难看出, 令

$$\begin{aligned} \tau' &= \sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} [\xi_1 \lambda \tau_1 (\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} + 1)], \Gamma'_0 = Y_1, \\ W'_t &= \sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} \left[\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} (\eta_{ik+j-m} - \eta_{ik+j-m-1}) + \right. \\ &\left. (\eta_{ik+i+1} - \eta_{ik+j}) \right]. \end{aligned}$$

则式(14)可以写为

$$Y_t = \tau'_1 + \Gamma'_0 \phi_1^{(t+1)j} + W'_t. \tag{17}$$

由上面的证明可以看出, 即对于双产品的任意一个产品的连续生产过程, 都具有和但产品输出相同的特性.

由式(14)可以看出, 如果产品的模型预测不是很准确, 在过程之初 Γ_0 较大, 过程将需要几个批次才可以达到目标值, 如果折扣因子 λ 较小, 则会出现当产品已经生产完毕而过程输出仍未达到目标值, 对于这种现象, Tseng等提出了便折扣因子的方法^[6]:

$$\lambda_s = \lambda_0 + d^s. \tag{18}$$

这里是最优折扣因子 λ_0 , 且 $\lambda_0 = b(1-\theta)/\beta$, s 为时间变量, 则 $\phi_1 = 1 - \xi_1 \lambda_s$. 本文中设变权值 $\lambda_s = \lambda_0 + f_s$, 针对混合产品得到输出表达式如下:

定理 2 变折扣因子的基于产品的EWMA控制算法的第 $t + 1$ 次循环的第一个产品输出期望的表达式为

$$E(Y_{it+i+1}) = \tau_1 + (i - j)\delta + \frac{\delta}{\xi(\lambda_0 + f_s)}, \tag{19}$$

这里 $\lambda_s = \lambda_0 + f_s$, f_s 是关于时间 s 的函数.

证 由引理可得

$$\begin{aligned} Y_{it+i+1} &= \\ &\frac{1 - \phi_1^{(t+1)j}}{(1 - \phi_1)} + \phi_1^{(t+1)j} Y_1 + \\ &\sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} \left[\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} (\eta_{ik+j-m} - \eta_{ik+j-m-1}) + \right. \\ &\left. (\eta_{ik+i+1} - \eta_{ik+j}) \right] = \\ &\tau_1 + (Y_1 - \tau_1) \phi_1^{(t+1)j} + \\ &\sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} \left[\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} (\eta_{ik+j-m} - \eta_{ik+j-m-1}) + \right. \\ &\left. (\eta_{ik+i+1} - \eta_{ik+j}) \right]. \end{aligned}$$

当干扰为 $\eta_t = \delta t + \varepsilon_t$ 时:

$$\begin{aligned} E(Y_{it+i+1}) &= \\ &\tau_1 + (Y_1 - \tau_1) \phi_1^{(t+1)j} + \\ &\sum_{k=0}^t \phi_1^{kj} \left[\sum_{m=0}^{j-2} \phi_1^{m+1} \delta + (i - j + 1)\delta \right] = \\ &\tau_1 + (Y_1 - \tau_1) \phi_1^{(t+1)j} + \frac{1 - \phi_1^{(t+1)j}}{1 - \phi_1^j}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\phi_1 - \phi_1^j}{1 - \phi_1} + i + 1 - j\right)\delta = \\ & \tau_1 + (\alpha_1 + \xi_1\tau_1 + \delta - \tau_1)\phi_1^{(t+1)j} + \\ & \frac{1 - \phi_1^{(t+1)j}}{1 - \phi_1^j} \left(\frac{\phi_1 - \phi_1^j}{1 - \phi_1} + i + 1 - j\right)\delta \approx \\ & \tau_1 + \left(\frac{1}{1 - \phi_1} + i - j\right)\delta \approx \\ & \tau_1 + (i - j)\delta + \frac{\delta}{\xi_1(\lambda_0 + f_s)}. \end{aligned}$$

说明 1 由上面的证明可知, 在干扰为IMA(1, 1)和漂移时, 当 $\phi_1 = 1 - \xi_1\lambda_s < -1$ 或 $\phi_1 = 1 - \xi_1\lambda_s > 1$ 时, 过程输出是不稳定的. 即: 当 $f_s > \frac{1+\theta}{\xi_1}$ 或 $f_s < \frac{(\theta-1)}{\xi_1}$ 时, 系统输出是不稳定的.

说明 2 由定理2可知, 折扣因子的选择不止可以为^[6]提出的 $\lambda_s = \lambda_0 + f_s$ 形式, 只要满足 $\lambda_s = \lambda_0 + f_s$, 并且在满足定理2所给的稳定性条件时就能达到较好的控制效果. 由式(19)可知, 要使第 $t + 1$ 次循环的第一个产品的输出偏离目标值尽可能的小, 必须在满足系统稳定的前提下, f_s 的取值应当尽可能的大.

4 仿真例子(Simulation example)

在少量多样过程中, 由于机台干扰(如 δt)的变化及产品的不同, 在产品交界处产品的初值和目标值的偏移会较大, 为了加快响应速度提高产品的良率, 采用基于产品的变折扣因子的EWMA方法. 模型仍以双产品为例, 产品1和产品2以10个为一个组合构成生产序列, 参数为: $\alpha = (2, 2)$, $\beta = (1.5, 2.5)$, $b = (1, 3)$, $\tau = (10, 15)$, $a_0 = (2, 2)$, $\lambda = (0.333, 0.6)$, $\delta = 0.1$. 取 $\lambda_1 = 0.333 + 0.3^t$, $\lambda_2 = 0.6 + 0.5^t$. 过程的仿真结果如图3所示.

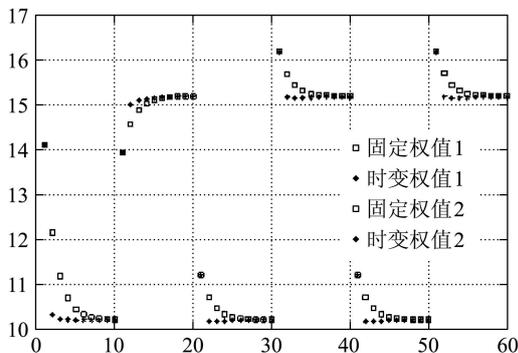


图 3 固定折扣因子和变折扣因子控制效果的比较

Fig. 3 Comparison of control performance of the approach with fixed and time-varying discount factor

由图3可以看到, 第2个批次就可以达到产品误差范围之内, 使用新的折扣因子的过程的响应速度明

显加快, 但是终值和稳定性不受影响, 应用固定折扣因子过程的MSE值为[0.935, 0.2197], 应用变折扣因子过程的MSE值为[0.6907, 0.1619], 可以看出变折扣因子过程的MSE值分别下降28%和26%.

将双产品推广到多产品来研究方案的可行性. 假设采取五种产品, 过程和模型参数如下:

$$\begin{aligned} \alpha &= [2, 3, 4, 4, 5], \quad \beta = [1.5, 2, 2.5, 3, 3.5], \\ b &= [1, 3, 3, 3.5, 4], \quad \tau = [10, 20, 30, 40, 50], \\ a_0 &= [2, 2.5, 4, 3.5, 4.5], \\ \xi &= [1.5, 0.667, 0.833, 0.857, 0.875]. \end{aligned}$$

过程的仿真结果见图4.

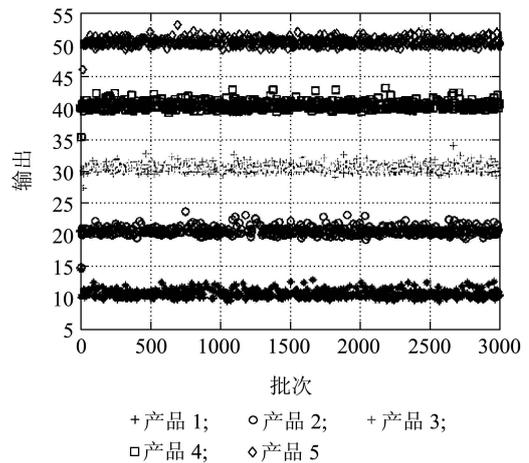


图 4 变折扣因子在基于产品控制中的作用

Fig. 4 The approach with time-varying discount factor applied in product-based control

5种产品过程的MSE = [0.1274, 0.1320, 0.1248, 0.1218, 0.1259], 可以看出在对过程的模型截距 a_0 和 b 过程增益估计并不准确的情况下, 变折扣因子的基于产品的方法仍能保证较小的MSE值.

5 结论(Conclusion)

本文对半导体生产的实际过程进行模拟, 给出了多产品基于产品的批间控制方法的稳定性条件及在不同干扰条件下的输出, 得到基于产品的批间控制算法, 完全避免了生产中不同产品之间因模型预测精度造成的相互干扰, 在使用变折扣因子改进算法后明显降低了MSE的值, 从而达到提高产品良率的效果. 对于变折扣因子 $\lambda_s = \lambda_0 + f_s$, 如何寻找最优的 f_s 是笔者下一步研究的内容.

参考文献(References):

[1] BOX G, LUCNEO A. *Statistical Control by Monitoring and Feedback Adjustment*[M]. New York: Wiley, 1997.
 [2] MONTGOMERY D C. *Introduction to Statistical Quality Control*[M]. 3th ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

- [3] FAN S, LIN Y. Multiple-input dual-output adjustment scheme for semiconductor manufacturing process using a dynamic dual-response approach[J]. *ScienceDirect European journal of operational research*, 2007, 39(4):868 – 884.
- [4] INGOLFSSON A, SACHS E. Stability and sensitivity of an EWMA control[J]. *Journal of Quality Technology*, 1993, 25(2): 271 – 287.
- [5] BUTER S W, STEFANI J A. Supervisory run-to-run control of a polysilicon gate Etch using in Situ elipsometry[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1994, 7(2): 193 – 201.
- [6] TSENG S T, YEH. A Study of variable EWMA controller[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2003, 16(4): 633 – 643.
- [7] PATEL N S, MILLER G A, GUINN C, et al. Device dependent control of chemical-mechanical polishing of dielectric films[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2000, 13(3): 331 – 343.
- [8] FIRTH S K. *Just-in-time adaptive disturbance estimation for run-to-run control in semiconductor process*[D]. USA: the University of Texas, 2002.
- [9] ZHENG Y, LIN Q H, JANG S S, et al. Stability and performance analysis of mixed product run-to-run control[J]. *Journal of Process Control*, 2006, 16(5): 431 – 443.

作者简介:

侯明阳 (1983—), 男, 硕士, 研究方向为半导体生产过程的控制, E-mail: h90001764@huawei.com;

郑英 (1977—), 女, 副教授, 研究方向为半导体生产过程的控制、网络控制、容错控制, E-mail: zyhidly@mail.hust.edu.cn;

艾兵 (1985—), 男, 博士研究生, 研究方向为半导体生产过程的控制, E-mail: aibingbisheng@foxmail.com;

郑燕 (1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为半导体生产过程的控制, E-mail: hndx-zhengyan@163.com;

张杰 (1963—), 男, 副教授, 研究方向为检测与控制, E-mail: zjnet@mail.hust.edu.cn.

第29届中国控制会议征文通知

第29届中国控制会议(CCC'10)将于2010年7月29~31日在北京召开. 大会采用会前讲座、大会报告、专题研讨会、分组报告与张贴论文等形式进行学术交流. 中国控制会议论文集自2005年起由ISTP收录, 2006年起进入IEEE CPP(Conference Publications Program), 2007年起由EI收录. 欢迎广大的海内外控制学者和工程技术人员参加, 就系统与及相关领域的最新理论与应用成果以及未来的发展趋势进行广泛交流.

详细情况请见附件征文通知或访问会议网站: <http://ccc10.bit.edu.cn>.

重要日期:

提交论文初稿日期: 2009年11月1日~12月31日

录用通知日期: 2010年3月15日

提交最终论文截止日期: 2010年4月15日

会议接收中、英文两种语言论文. 论文采用网上投稿, 请登陆<http://ccc.amss.ac.cn/pms>了解具体事宜并投稿. 我们期待您的来稿.