

文章编号: 1000-8152(2000)02-0215-05

# 两机器串联生产系统在随机状态下的 最优生产和维护策略的研究\*

张鹏

郑应平

0224

(北京东方电子集团新技术研究院·北京, 100016) (中国科学院自动化研究所·北京, 100080)

**摘要:** 对机器状态的变化为非齐次马尔可夫过程,带内部缓冲栈的单工件——两机器串联生产系统的最优生产率和维护率进行研究,给出了最优维护率的结构,得到最优生产率由安全面和临界面确定的结构特性,针对解析解无法获得,在得出的结构特性的基础上,给出了一种启发式的次优控制策略。

**关键词:** 动态规划; HJB 方程; 安全点策略; 安全面; 临界面

**文献标识码:** A

最优生产 维护策略 生产系统

## Optimal Control of Production and Maintenance Rate in a Stochastic Two-Machine System

ZHANG Peng

(Beijing Orient Electronics Group Company Limited·Beijing, 100016, P. R. China)

ZHENG Yingping

(Automation Institute, Chinese Academy of Science·Beijing, 100080, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, we study the optimal production rate and the preventive maintenance rate for the two tandem machines system, in which the state transitions of machines were supposed to a Markov process, give the structure of the optimal control policy, offer a heuristic control policy based on the structure properties deduced, and prove the heuristic control policy being near-optimal by a simulation.

**Key words:** dynamic programming; HJB equation; hedging point policy; hedging surface; critical surface

### 1 引言 (Introduction)

本文对单工件——两机器、中间含缓冲栈的随机制造系统的最优生产率和最优保养维护率进行研究,其基本思想为在满足产品需求和减少生产的费用间寻求均衡,以使所定义的价值泛函为最小,保养维护形式为不停机的保养行为,设机器状态(运行和维修)的转变有限状态马尔可夫过程。

本文要研究的问题可称为在跳跃马尔可夫随机过程下的具有完全观测状态的优化问题, Kimemia<sup>[1]</sup>针对生产系统首先建立了此类模型以寻求优化生产率,且给出了一种结构简单,易于实施的优化控制策略,称为安全点策略(Hedging Point Policy),之后有大量的学者围绕安全点策略进行进一步的研究, Boukas<sup>[2]</sup>引入了机器经时(age),并考虑保养维护行为,同时对生产率和维护率进行寻优,由于经时的引入将机器状态的转变扩展为非齐次马尔可夫过程,

但所针对的均是单机器和多机器并联的生产系统,本文将经时和保养维护率引入带中间缓冲栈的串联生产系统,以两机器生产线为目标,对生产率和维护率的优化进行研究。

### 2 系统的随机动态规划模型(The stochastic dynamic programming model of the system)

我们对图 1 所示的系统做如下的假设:

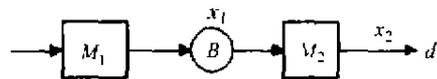


图 1 生产系统模型

Fig 1 The model of the production line

- 生产线入口处的工件原料随要随有。
- 缓冲栈 B 的容量为无穷大。
- 机器状态的变化过程为有限状态跳跃马尔可夫过程,以  $\xi(t) = (\xi_1(t), \xi_2(t))$  表示,其中  $\xi_1(t), \xi_2(t)$  分别为 t 时刻机器 1, 2 的状态,  $\xi_1(t) = 1$

\* 基金项目:西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室资助课题,国家自然科学基金(69635030)重点项目资助课题。  
收稿日期:1998-06-08; 收修改稿日期:1999-03-15

时为运行状态,  $\xi_2(t) = 2$  时为维修状态, 则该马尔可夫过程状态空间为  $\{(1,1), (1,2), (2,1), (2,2)\}$  分别以状态代号 1,2,3,4 表示. 从状态  $\xi$  到  $\xi'$  的跳跃率用  $\lambda_{\xi\xi'}(a_1(t), a_2(t))$ , 其中  $a_1(t), a_2(t)$  为机器的经时. 我们针对该过程定义一无穷小算子  $Q_\xi$ :

$$Q_\xi f(\cdot)(\xi) = \sum_{\xi' \neq \xi} \lambda_{\xi\xi'} [f(\xi') - f(\xi)],$$

其中  $f(\cdot)$  为  $\xi(t)$  的任意函数.

· 需求率  $d(t)$  为状态空间为  $\{d_1, d_2, \dots, d_l\}$  有限状态马尔可夫过程,  $l$  为某一正整数. 我们定义无穷小算子  $Q_d$  如下:

$$Q_d f(\cdot)(d) = \sum_{d' \neq d} \lambda_{dd'} [f(d') - f(d)].$$

系统有 4 个连续状态变量:

$x_1(t)$ : 缓冲栈中的工件数;  $x_2(t)$ : 工件余量;  
 $a_1(t)$ : 机器 1 的经时;  $a_2(t)$ : 机器 2 的经时.

系统的状态方程为:

$$\dot{x}_1(t) = u_1(t) - u_2(t), \quad (1)$$

$$\dot{x}_2(t) = u_1(t) - d, \quad (2)$$

$$\dot{a}_1(t) = f_1(u_1(t), v_1(t)) = k_{11}u_1(t) - k_{12}v_1(t), \quad (3)$$

$$\dot{a}_2(t) = f_2(u_2(t), v_2(t)) = k_{21}u_2(t) - k_{22}v_2(t), \quad (4)$$

其中  $u_1(t), u_2(t)$  分别代表机器 1,2 的生产率,  $v_1(t), v_2(t)$  分别代表机器 1,2 的保养维护率,  $d$  代表工件的需求率. 以下, 我们以  $Y(t)$  表示向量  $(x_1(t), x_2(t), a_1(t), a_2(t))$ , 其中  $x_1(t) \geq 0$ , 所以在  $x_1(t) = 0$  时必须满足  $u_1(t) \geq u_2(t)$  的约束条件.  $x_2(t) \in (-\infty, +\infty)$ . 这里, 我们设  $f_1(u_1(t), v_1(t)) \geq 0, f_2(u_2(t), v_2(t)) \geq 0$ , 所以有  $a_1(t) \in [0, +\infty), a_2(t) \in [0, +\infty)$ .

以  $L(t) = (L_1(t), L_2(t))$  表示机器生产能力的变化, 其中:

$$L_i(t) = \begin{cases} \bar{U}_i, & \text{if } \xi_i(t) = 1, \\ 0, & \text{if } \xi_i(t) = 2. \end{cases} \quad (5)$$

$\bar{U}_i$  为相应机器在运行状态时的最大生产率. 最大维护率  $\bar{V}_i(t)$  应满足  $\bar{V}_i(t) \leq (k_{i1}/k_{i2})L_i(t)$ .

设:

$$\Gamma(\xi(t)) =$$

$$\{(u_1(t), v_1(t)) \mid 0 \leq u_i(t) \leq L_i(t),$$

$$0 \leq v_i(t) \leq \bar{V}_i(t), k_{i1}u_i(t) - k_{i2}v_i(t) \geq 0\},$$

$$\Gamma(Y(t), (\xi(t))) =$$

$$\{(u_i(t), v_i(t)) \mid (u_i(t), v_i(t)) \in \Gamma(\xi(t)),$$

且在  $x_1 = 0$  时,  $u_1(t) \geq u_2(t)\}$ .

定义 如果  $\pi(t) = (u_1(t), u_2(t), v_1(t), v_2(t))$  满足下列条件, 则称为允许控制:

1)  $\pi(t)$  适应于由  $\xi(t)$  所产生的  $\sigma$ -代数. 用  $\sigma\{\xi(s): 0 \leq s \leq t\}$  表示;

2)  $\pi(t) \in \Gamma(Y, \xi(t))$ , 对于  $t \geq 0$ .

控制的目标是使描述生产花费的期望型价值函数为最小:

$$j(Y, \xi) = E \left[ \int_0^\infty e^{-\rho s} (g(x_1(s), x_2(s)) + h(v_1(s), v_2(s))) ds, Y = Y(0), \xi = \xi(0) \right]. \quad (6)$$

其中,  $\rho$  为折扣系数.  $g(x_1(s), x_2(s))$  为对正的  $x_1(s)$  和正及负的  $x_2(s)$  的价值惩罚函数, 为  $x_1(s), x_2(s)$  的凸函数,  $h(v_1(s), v_2(s)) = l_1(\xi_1(t))v_1 + l_2(\xi_2(t))v_2$  为进行保养维护的费用, 其中:

$$l_i(\xi_i(t)) = \begin{cases} k_i, & \text{if } \xi_i(t) = 1, \\ 0, & \text{if } \xi_i(t) = 2. \end{cases} \quad (7)$$

系统的最优价值函数为:

$$J(Y, \xi) = \min_{\pi(t) \in \Gamma(Y, \xi)} j(Y, \xi). \quad (8)$$

### 3 优化控制策略的结构 (Structural properties of optimal control policies)

#### 3.1 HJB 方程 (HJB equation)

针对内部缓冲栈所引起的状态约束 ( $x_1 \geq 0$ ), 我们以方向导数的形式给出系统的 HJB 方程. 假如函数  $f(x)$  在  $x$  是可微的, 则对于任何允许方向  $p$ , 方向导数  $f'_p(x)$  存在, 且:  $f'_p(x) = \langle \nabla f(x), p \rangle$ , 这里  $\nabla f(x)$  代表  $f(x)$  的梯度,  $\langle \rangle$  代表点积.

设最优价值函数  $J$  在状态空间中连续且是一次可微的. 注意到, 式(1) - (4) 在  $\pi(t) \in \Gamma(Y, \xi)$  的条件下既代表在本模型状态约束空间中的允许方向集, 用  $R$  表示, 则系统的 HJB 方程可以以方向导数的形式表示如下:

$$\rho J(Y, \xi, d) = \min_{\pi(t) \in \Gamma(Y, \xi)} \{ J'_R(Y, \xi, d) + h(v_1, v_2) \} + g(x_1, x_2) + Q_\xi J(Y, \cdot, d)(\xi) + Q_d J(Y, \xi, \cdot)(d). \quad (9)$$

上式在  $x_1(t) > 0$  时等同于一般的 HJB 方程. 以方向导数的形式给出 HJB 方程的优点在于, 可以以如下所述的形式给出在状态空间边界上 ( $x_1(t) = 0$ ) 的边界条件: 设价值函数在  $x_1(t) = 0$  的边界面上

的某一内点  $Y_0$  是可微的, 则存在一矢量  $\nabla J(Y_0)$ , 对任何  $Y_0$  点的允许方向  $R$  有  $J'_R(Y_0) = \langle \nabla J(Y_0), R \rangle$ , 由价值函数的连续性, 在  $x_1(t) = 0$  的边界上, 价值函数应满足下式:

$$\min_{v_1(t) \in \Gamma(Y_0, \xi(t))} |J'_R(Y_0) + h(v_1, v_2)| = \min_{v_1(t) \in \Gamma(Y_0, \xi(t))} |J'_R(Y_0) + h(v_1, v_2)|. \quad (10)$$

其中

$$\Gamma(Y_0, \xi(t)) = \{(u_i(t), v_i(t)) \mid (u_i(t), v_i(t)) \in \Gamma(\xi(t)), \text{ 且 } u_1(t) \geq u_2(t)\}.$$

### 3.2 优化保养维护率 (Optimal maintenance rate)

**定理 1** 两台机器的保养维护率的优化策略为:

$$v_1^* = \begin{cases} (k_{11}/k_{12})u_1, & \text{if } J'_{a_1} \geq k_1/k_{12}, \\ 0, & \text{if } J'_{a_1} < k_1/k_{12}; \end{cases} \quad (11)$$

$$v_2^* = \begin{cases} (k_{21}/k_{22})u_2, & \text{if } J'_{a_2} \geq k_2/k_{22}, \\ 0, & \text{if } J'_{a_2} < k_2/k_{22}. \end{cases} \quad (12)$$

证 由 HJB 方程即可获得相应结果(略).

说明: 我们注意到所得到的结果体现为一种代价的权衡问题. 从式(11), (12)中我们可以观察到:  $J'_{a_i}$  表示经时的变化对最优价值函数的影响程度, 而  $k_i/k_{i2}$  中可理解为为了使经时减少一个单位而进行维护所需付出的维护费用. 因此, 对式(11), (12)中的条件, 我们可以认为体现了经时的增加对价值函数的影响与抑制经时增加所要付出的维护费用的一种比较. 当经时增加的影响占主要地位时, 即  $J'_{a_i} \geq k_i/k_{i2}$  时, 则应进行维护; 相反, 若维护的费用成为主要因素时, 即  $J'_{a_i} < k_i/k_{i2}$  时, 则不进行维护.

### 3.3 最优生产率的结构 (Structural properties of the optimal production rate)

**定理 2** 在相应的保养维护率下, 有如下的最优生产率控制策略:

对于机器 1:

当  $J'_{a_1} < k_1/k_{12}$  时,  $v_1^* = 0$ , 则:

$$u_1^* = \begin{cases} L_1, & \text{if } J'_{x_1} + k_{11}J'_{a_1} < 0, \\ u_1^0, & \text{if } J'_{x_1} + k_{11}J'_{a_1} = 0, \\ 0, & \text{if } J'_{x_1} + k_{11}J'_{a_1} > 0. \end{cases} \quad (13)$$

其中  $u_1^0$  为奇异控制函数, 应保证最优策略的唯一性.

当  $J'_{a_1} \geq k_1/k_{12}$  时,  $v_1^* = (k_{11}/k_{12})u_1$ ,  $a_1$  为常

数, 则:

$$u_1^* = \begin{cases} L_1, & \text{if } J'_{x_1} < -(k_1 k_{11})/k_{12}, \\ \min(L_1, u_2), & \text{if } J'_{x_1} = -(k_1 k_{11})/k_{12}, \\ 0, & \text{if } J'_{x_1} > -(k_1 k_{11})/k_{12}. \end{cases} \quad (14)$$

对于机器 2:

当  $J'_{a_2} < k_2/k_{22}$  时,  $v_2^* = 0$ , 则:

$$u_2^* = \begin{cases} L_2, & \text{if } J'_{x_2} + k_{21}J'_{a_2} - J'_{x_1} < 0, \\ u_2^0, & \text{if } J'_{x_2} + k_{21}J'_{a_2} - J'_{x_1} = 0, \\ 0, & \text{if } J'_{x_2} + k_{21}J'_{a_2} - J'_{x_1} > 0. \end{cases} \quad (15)$$

其中  $u_2^0$  为奇异控制函数, 应保证最优策略的唯一性.

当  $J'_{a_2} \geq k_2/k_{22}$  时,  $v_2^* = (k_{21}/k_{22})u_2$ ,  $a_2$  为常数, 则:

$$u_2^* = \begin{cases} L_2, & \text{if } J'_{x_2} + J'_{x_1} > (k_2 k_{21})/k_{22}, \\ \min(L_2, d), & \text{if } J'_{x_2} + J'_{x_1} = (k_2 k_{21})/k_{22}, \\ 0, & \text{if } J'_{x_2} + J'_{x_1} < (k_2 k_{21})/k_{22}. \end{cases} \quad (16)$$

证 由 HJB 方程即可获得相应结果(略).

说明: 应该指出的是, 定理 2 中给出的最优策略 ((13) ~ (16)) 在  $x_1(t) = 0$  时应满足  $u_1^*(t) \geq u_2^*(t)$  的边界条件, 容易验证当最优价值函数满足式(10)时, 有  $u_1^*(t) \geq u_2^*(t)$  成立.

### 3.4 最优生产率结构的定性研究 (Qualitative analysis to structure of the optimal production rate)

我们知道缓冲栈的作用是尽量减少机器间的相互影响, 所以可以认为当缓冲栈的容量足够大时, 每台机器在任何状态的优化控制策略与状态 1 (即两台机器均为运行状态) 时的策略近似. 所以在本节中只对状态 1 的情形进行讨论.

**定理 3** 最优价值函数  $J(Y)$  对  $X = (x_1, x_2)$  是凸函数. 若  $g(x_1, x_2)$  为严格凸的, 则  $J(Y)$  亦为严格凸的(证明从略).

a) 针对式(14), 由定理 3,  $J$  为  $x_1$  的严格凸函数, 则  $J + ((k_1 k_{11})/k_{12})x_1$  亦为  $x_1$  的严格凸函数, 注意到  $\partial(J + ((k_1 k_{11})/k_{12})x_1)/\partial x_1 = J'_{x_1} + (k_1 k_{11})/k_{12}$ , 所以对任意给定的  $a_1, x_2$ , 及  $a_2, a_1$  有相应于  $x_1$  的某一点  $Z_1(a_1, x_2, a_2)$ , 式(14)变为:

$$u_1^* = \begin{cases} \bar{U}_1, & \text{if } x_1 < z_1(a_1, x_2, a_2), \\ \min(\bar{U}_1, u_2), & \text{if } x_1 = z_1(a_1, x_2, a_2), \\ 0, & \text{if } x_1 > z_1(a_1, x_2, a_2). \end{cases} \quad (17)$$

$x_1 = z_1(a_1, x_2, a_2)$  被成为安全面. 它将  $a_1, x_1, a_2, x_2$  空间分区, 并完全确定  $u_1^*$ .

b) 针对式(16):

设:  $y = x_2 + x_1$ , 有  $x_1 = y - x_2$ , 以  $y$  代替  $J$  中的  $x_1$ .

**定理 4**  $J(y, x_2)$  对  $x_2$  为严格凸函数 (证明从略).

显然  $J(y - x_2, x_2) + ((k_2 k_{21})/k_{22})x_2$  亦为  $x_2$  的严格凸函数. 注意到上式对  $x_2$  求偏导既为  $J'_{x_2} + J'_{y_1} + (k_2 k_{21})/k_{22}$ , 则有如下结论: 当任意确定  $a_1, x_1, a_2$  时, 有相应于  $x_2$  的某一点  $z_2(a_1, x_1, a_2)$ , 式(16)变为:

$$u_2^* = \begin{cases} \bar{U}_2, & \text{if } x_2 < z_2(a_1, x_1, a_2), \\ d, & \text{if } x_2 = z_2(a_1, x_1, a_2), \\ 0, & \text{if } x_2 > z_2(a_1, x_1, a_2). \end{cases} \quad (18)$$

$x_2 = z_2(a_1, x_1, a_2)$  即为安全面.

c) 当  $J'_{a_1} < k_1/k_{12}$  时, 机器 1 和  $J'_{a_2} < k_2/k_{22}$  时, 机器 2 的生产率的结构, 由式(13)和式(15), 我们无法得到类似安全面的结构, 此处我们称偏微分方程  $J'_{x_1} + k_{11}J'_{a_1} = 0$  和  $J'_{x_2} + k_{21}J'_{a_2} - J'_{x_1} = 0$  为临界面.

#### 4 一种启发式的次优控制策略 (A heuristic control policy)

由于无法用解析的方法获得安全面和临界面的解析解. 本节在上节得出的结构特性的基础上, 通过某些近似的手段给出一种启发式的次优控制策略.

为获得次优控制策略, 我们对生产模型进一步作如下的假设:

· 设  $g(x_1, x_2) = c_1 x_1^2 + c_1^+ x_1^{+2} + c_2^- x_2^{-2}$ , 其中  $c_1$  是对  $x_1$  的价值惩罚系数;  $c_1^+, c_2^-$  分别是对  $x_2$  的余量 (surplus) 和短缺 (backlog) 的惩罚系数,  $x_1^+ = \max\{0, +x_1\}$ ,  $x_2^- = \max\{0, -x_2\}$ .

· 设两台机器的维修率相同, 即  $r_1 = r_2 = r$ .

· 需求率为常数  $d$ .

##### 4.1 经时曲线的梯形近似 (Step approximation of age)

在式(13)和式(15)中得到的临界面的结构中, 由于不进行维护, 经时是时间的单调非减函数, 这使我们无法获得可实施的控制策略. 对此我们做如下的近似处理: 我们对机器的运行状态参照经时的递

增量进行分段, 假设每一阶段中的经时为常数, 等于开始点的经时, 此方法既是将经时连续变化曲线用阶梯式的变化来代替, 可用图 2 形象的描述.

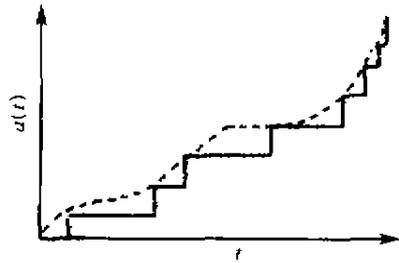


图 2 经时的梯形近似

Fig. 2 Step approximation of age

图中虚线代表实际的经时的变化, 实线代表阶梯近似. 进行如此的近似处理使我们有以下两点收获:

I) 由于在每一阶段中假设  $a_i(t)$  为常数, 则  $J'_{a_i} = 0$ , 此时式(13), (15)也可表示为如式(17), (18)安全面的结构, 回避了难以处理的临界面方程.

II) 在每一阶段中机器的失效率  $p_i(a_i)$  为常数. 由于维护行为投入时经时也为常数, 这样我们就将机器的运行状态分为失效率  $p_i(a_i)$  为常数的一系列阶段. 在每一阶段中可以认为与齐次马尔可夫过程模型的情形近似. 由此, 我们可以借鉴齐次马尔可夫过程模型的已有的研究成果来求取每一阶段的安全面的近似解.

##### 4.2 次优生产和维护率控制策略 (Near optimal production and maintenance rate)

通过 4.1 的假设, 在每一阶段中有如下生产率反馈控制策略:

第一台机器控制策略与第 2 台机器的工件余量  $x_2$  有关, 由两段组成:

当  $x_2$  为较大的负值时, 存在  $Z_1^H(a_1, a_2)$ , 有:

$$u_1^* = \begin{cases} U_1, & \text{if } x_1 < Z_1^H(a_1, a_2), \\ \min(U_1, u_2), & \text{if } x_1 = Z_1^H(a_1, a_2), \\ 0, & \text{if } x_1 > Z_1^H(a_1, a_2). \end{cases} \quad (19)$$

当  $x_2$  小于某一负值时, 则存在一个  $x_2$  的线性函数:  $Z_1(x_2, a_2, a_1) = Z_2(a_2, a_1) - x_2$ , 有:

$$u_1^* = \begin{cases} U_1, & \text{if } x_1 < Z_1(x_2, a_2, a_1), \\ \min(U_1, u_2), & \text{if } x_1 = Z_1(x_2, a_2, a_1), \\ 0, & \text{if } x_1 > Z_1(x_2, a_2, a_1). \end{cases} \quad (20)$$

对于第二台机器其控制是相对独立的, 安全点为  $Z_2(a_2, a_1)$ :

$$u_2^* = \begin{cases} U_2, & \text{if } x_2 < Z_2(a_2, a_1), \\ d, & \text{if } x_2 = Z_2(a_2, a_1), \\ 0, & \text{if } x_2 > Z_2(a_2, a_1). \end{cases} \quad (21)$$

其中  $Z_1^H(a_1, a_2)$  和  $Z_2(a_2, a_1)$  借鉴 Ryzin<sup>[3]</sup> 中的方法进行求取, 考虑维护的费用加以相应的改变。

通过 3.2 中的式(11), (12), 我们给出启发式的次优反馈维护率控制策略:

$$v_1^* = \begin{cases} (k_{11}/k_{12})u_1, & \text{if } x_1/(k_1/k_{12}) \leq q_1, \\ 0, & \text{if } x_1/(k_1/k_{12}) > q_1; \end{cases} \quad (22)$$

$$v_2^* = \begin{cases} (k_2/k_{22})u_2, & \text{if } x_2/(k_2/k_{22}) \leq q_2, \\ 0, & \text{if } x_2/(k_2/k_{22}) > q_2. \end{cases} \quad (23)$$

其中,  $q_1, q_2$  为人为设定值。

#### 4.3 控制策略的实施(Implementation of the control policy)

我们以框图 3 的形式给出策略的实际实施方法, 其中:“计算安全面”即是计算出  $Z_1^H(a_1, a_2)$ ,  $Z_1(x_2, a_2, a_1)$ ,  $Z_2(a_2, a_1)$  的近似解。“实时反馈控制”是指由计算出的安全面的值, 采用式(19)~(21)的形式进行反馈控制, 同时在维护投入时应考虑维

护率控制。

#### 5 仿真验证(Simulation)

为了证明启发式算法的优化性能, 我们进行了软件仿真运行, 由仿真结果我们可获得如下的两个结论: a) 当机器失效的可能性随经时的增加而增大的幅度相对较大时, 本启发式控制策略明显优于在不考虑经时影响的控制策略; b) 维护行为能够优化系统行为, 使生产花费下降, 但必须注意维护投入的时机或准则, 时机的选择应综合考虑维护本身的费用及维护行为对经时增加的抑制作用程度, 如维护投入的时机选择不当, 反而会增加整个生产的花费。

#### 6 总结(Conclusion)

本文给出了最优生产率和最优维护率的结构, 指出最优生产率完全由安全面和临界面确定的结构特性, 由于整个系统的精确解析解无法获得, 我们以获得的结构特性为依据, 给出启发式的安全点型次优控制策略, 并通过仿真验证了该策略的优化性能。

#### 参考文献(References)

- [1] Kimemia J and Gershwin B S. An algorithm for the computer control of a flexible manufacturing system[J]. Institute of Industrial Engineering Transactions, 1983, 15(4): 353 - 362
- [2] Boukas E K and Haurie A. Manufacturing flow control and preventive maintenance: a stochastic control approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1990, 35(9): 1024 - 1031
- [3] Ryzin G V, Lou X C and Gershwin S B. Production control for a tandem two-machine system[J]. Institute of Industrial Engineering Transactions, 1993, 25(5): 5 - 20
- [4] Presman E and Sethi S P. Optimal feedback production planning in a stochastic N-machine flowshop[J]. Automatica, 1995, 31(9): 1325 - 1332

#### 本文作者简介

张 鹏 1964 年生, 中国科学院自动化研究所博士, 现为北京东方电子集团新技术研究院高级工程师, 主要研究兴趣为计算机集成制造系统、控制理论在工厂领域的应用。

郑应平 1941 年生, 现为中国科学院自动化研究所研究员, 博士生导师, 主要研究兴趣为复杂系统控制理论及其应用。

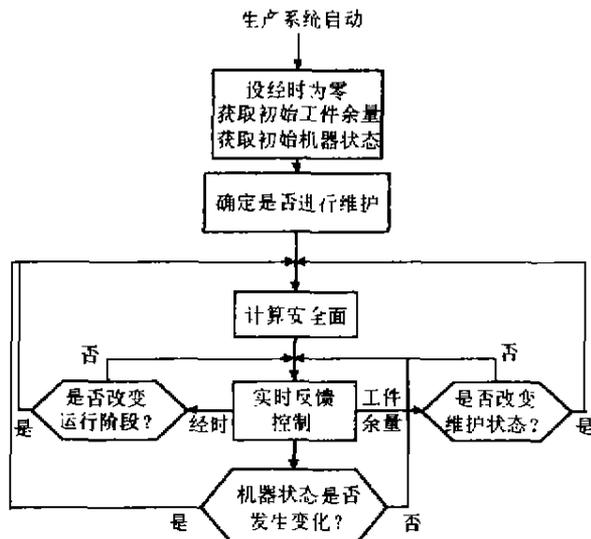


图 3 策略实施框图

Fig. 3 Flow chart of implementation