

一种提高制造系统运行可靠性的控制策略¹⁾

喻明

(Department of Electrical and Computer Engineering, College of Engineering,
Rutgers-The State University of New Jersey, USA.)

王然 吴澄

(清华大学国家 CIMS-ERC 北京 100084)

摘要 从控制理论的角度出发,通过折衷考虑系统的在线运行成本和可用度,对于一般可修的、具有中间缓冲库的级联生产线,基于制造系统的冲突点调度策略,提出一种改善系统运行可靠性和利用率等性能指标的控制策略.仿真结果证明了本文方法的有效性.这种方法可推广至一般结构的制造系统.

关键词 制造系统,最优控制,可靠性,库存控制,调度.

1 引言

制造系统的控制包括两个方面,生产计划和生产调度.前者确定集结的生产速度和库存轨迹,后者处理具体的机器分配和工件派遣问题,现行的方法是分别采用库存控制策略和运筹学方法.问题的难点在于系统中存在多级时标,呈现一种递阶结构;而且系统中的多台机器一般具有不可靠性,运行不均衡.

从控制理论的角度研究生产计划和调度问题,同时考虑机器的不可靠性,最重要的方法是递阶控制方法^[1-6],它的基本思想是将整个问题依时标分解为几个层次的动态优化子问题.文献[2]提出一种分三级实现递阶控制的方法:顶层离线计算生产目标函数,中层在线计算短期生产速度,低层将速度转化为工件派遣时刻.并提出冲突点 HP (Hedging-Point) 概念和冲突点控制策略.冲突点是指在某一系统状态下,使目标函数最优的库存状态值. HP 策略是使库存一直维持在 HP 值,直至出现机器故障,由此消除了控制律的快速切换现象.文献[3-5]对 HP 策略进行了扩展.

现行 HP 策略的不足之处在于,为追求最优成本,HP 值低于实际系统自由运行时的协调库存值,更低于缓冲库容量.对于多级串行生产线,每当后级机器阻塞或故障时,所有前级机器被迫停工,这就降低了机器可用度.实际上,制造系统的一个重要特点是存在减额运行状态,而且机器的运行可靠性与控制策略有关.

本文从提高机器的运行可靠性出发,在递阶控制的框架下,通过寻找次优 HP 值,得到一种提高机器可用度和生产率的控制策略.在本文的 HP 策略中,各机器的控制直接依

1)国家自然科学基金资助项目.

收稿日期 1993-10-22

其库存水平而定,无需计算,所以这是一种实时的、分布式闭环控制策略,即能反映需求变化.该方法可推广至一般结构的制造系统中.仿真结果证实了这种方法的可行性.

2 问题的表述及控制策略

设柔性制造系统由 M 台机器组成,需要生产 N 种产品,每种产品的需求为 $d_i, i=1, 2, \dots, N$, 为已知、恒定的.目标是控制生产速度,尽可能满足需求,并使在线库存成本最小.

设各机器的失效间隔时间和修复时间均服从负指数分布,均值分别为 T_{fj} 和 $T_{rj}, j=1, 2, \dots, M$, 系统状态用 M 维向量 $\mathbf{a}(t)$ 表示,当 M_j 正常时 $a_j=1$, 当 M_j 故障时 $a_j=0$.

令 $u_i(t)$ 为生产速度, t_{ij} 为第 i 种工件在 M_j 上所需的加工时间, k_{ij} 为第 i 种工件中在 M_j 上加工的部分, 则 $k_{ij}u_i$ 为第 i 种工件在 M_j 上的生产速度, 则容许生产速度必须满足约束条件

$$\begin{cases} u_i(t) \geq 0, & i = 1, 2, \dots, N, \\ \sum_{i=1}^N t_{ij} k_{ij} u_i \leq a_j(t), & j = 1, 2, \dots, M, \end{cases} \quad (1)$$

令 $\mathbf{x}(t)$ 表示缓冲库的累计库存, 则库存模型为

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{u}(t) - \mathbf{d}(t), \quad (2)$$

式中 $\mathbf{u}(t)$ 和 $\mathbf{d}(t)$ 分别表示 N 维生产速度和需求速度向量. 维持一定的库余是为了补偿机器故障时的库缺. 定义库存成本函数为

$$g(\mathbf{x}(t)) = \sum_{i=1}^N g_i(x_i(t)),$$

式中 $g(\cdot)$ 为凸函数.

至此, 控制问题可表述为寻找使下列性能指标最小的控制律

$$\begin{cases} J(\mathbf{x}(t), \mathbf{a}(t), t_0) = \min E \left[\int_{t_0}^{t_f} \mathbf{g}(\mathbf{x}(t)) dt \mid \mathbf{x}(t_0), \mathbf{a}(t_0) \right], \\ \text{满足: 式(1) 和 (2)} \end{cases} \quad (3)$$

精确的最优控制律要求解^[1]

$$\min_{\mathbf{u}(t)} \frac{\partial J_u(\mathbf{u}^*(t), \mathbf{a}(t))}{\partial \mathbf{x}(t)} \mathbf{u}(t), \quad (4)$$

式中 $J_u(\mathbf{u}^*(t), \mathbf{a}(t))$ 定义为前向成本函数, 即待完成的生产任务所需成本.

由文献[3]知, 分析解仅在 $\mathbf{x}(t)$ 和 $\mathbf{a}(t)$ 为标量(即单工件单机器)时才可获得, 对于其它情形, 数值解也难以求得^[6].

假设机器状态变化不频繁, 既一定区间内 $\mathbf{a}(t) = \mathbf{a}$, 则依文献[1]可采用

$$J_u(\mathbf{x}(t), \mathbf{a}) = 1/2 \mathbf{x}(t)^T A(\mathbf{a}) \mathbf{x}(t) + \mathbf{b}(\mathbf{a})^T \mathbf{x}(t) + c(\mathbf{a}) \quad (5)$$

近似, 式中 $A(\mathbf{a})$ 为一正定对角矩阵, 反映各种工件的相对重要性, $\mathbf{b}(\mathbf{a})$ 为向量, $c(\mathbf{a})$ 为标量, 均未知. 当上式相对于 $\mathbf{u}(t)$ 极小化时, $\mathbf{x}(t)$ 的收敛值即为 HP 值. 文献[1]只求出单工件单机器下 HP 值, 文献[2]则提出一种依 HP 策略的库存轨迹确定 A, \mathbf{b}, c 的方法, 进而确定 HP 值.

对单工件多机器的流水线情形提出一种控制策略

$$u_j^*(t) = \begin{cases} u_j, & \text{当 } x_j(t) < H_j, \\ d, & \text{当 } x_j(t) = H_j, \\ v_j, & \text{当 } H_j < x_j(t) < B_j, \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (6)$$

式中 u_j 和 v_j 均为 M_j 的允许速度,且 $v_j < d < u_j$,当 $u_j = \max u_j, v_j = 0$ 时,即为现行的 HP 策略. 式中 H_j 为 M_j 的 HP 值,待定; B_j 为 M_j 的库容.

按此控制策略得库存轨迹,如图 1 所示.

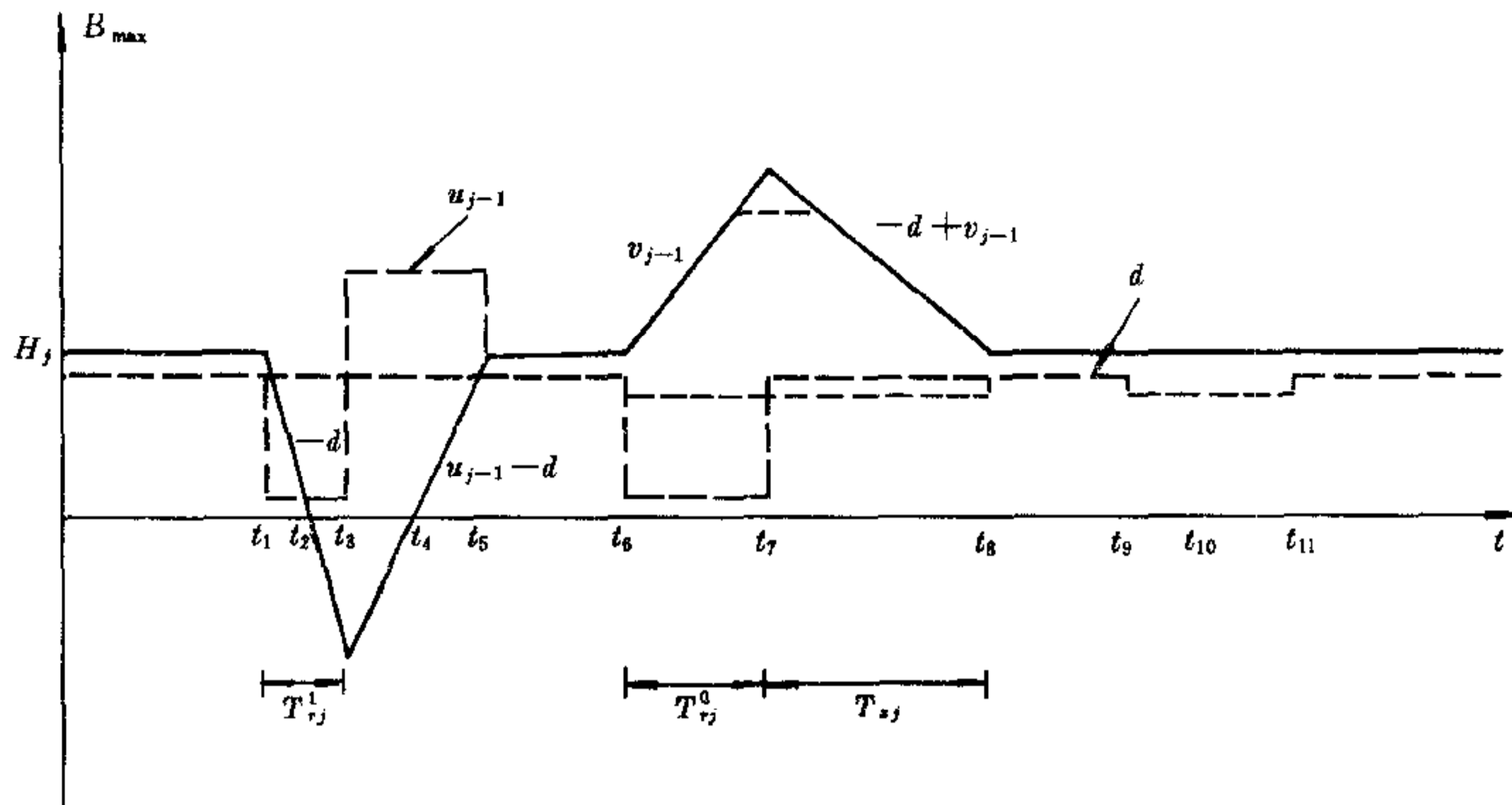


图 1 HP 策略(6)式的等效库存轨迹

3 多级生产线的控制律计算

串行多级生产线(如图 2 所示)中,缓冲库 B_j 有两种故障情形.

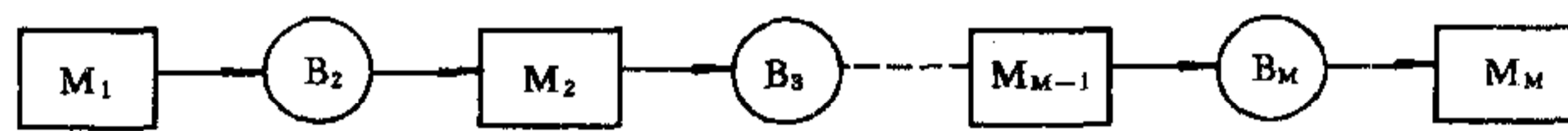


图 2 串行多级生产线结构图

(i)当 B_j 无输入, M_{j-1} 故障或 B_{j-1} 空; 设故障间隔时间为 T_{fj}^1 , 修复时间为 T_{rj}^1 .

(ii)当 B_j 无输出, 即 M_j 故障或 B_{j+1} 满; 设故障间隔时间为 T_{fj}^0 , 修复时间为 T_{rj}^0 . 其总库存 A 为库存轨迹与横轴所构成的面积, 如图 1 所示. 对各部分加权即得库存成本. 设 $H < 0$ 部分的面积加权系数为 c_1 , $0 < H < B_{\max}$ 部分的面积加权系数为 c_2 , $H > B_{\max}$ 部分的面积加权系数为 c_3 . 总库存成本 $A_j = A_j^1 + A_j^0$, 即为两种情形的库存之和. 设 T 为总运行时间, 则

B_j 无输入的次数为 $T / (T_{fj}^1 + T_{rj}^1)$,

B_j 无输出的次数为 $T / (T_{fj}^0 + T_{rj}^0)$.

假设 1) t_3 至 t_5 间无输入故障: 即 $t_5 - t_3 \ll T_{fj}^1$;

2) t_7 至 t_8 间无输出故障: 即 $t_8 - t_7 \ll T_{fj}^0$,

故 d, u_{j-1}, v_{j-1} 之间的约束条件为

$$\frac{T_{fj}^0 + T_{rj}^0}{T_{fj}^0} v_{j-1} < d < \frac{T_{fj}^1}{T_{fj}^1 + T_{rj}^1} u_{j-1} \quad (7)$$

无输入故障(i)时的故障间隔和修复时间均值的递推公式为

$$\begin{cases} T_{f2}^1 = T_{f1}, \\ T_{r2}^1 = T_{r1}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{1}{T_{fj}^1} = \frac{1}{T_{fj-1}} + \frac{1}{T_{fj-1}^1} P_{fj}^1, \\ \frac{1}{T_{rj}^1} = \frac{1}{T_{rj-1}} \frac{T_{fj-1}}{T_{fj-1} + T_{fj-1}^1/P_{fj}^1} + \frac{1}{T_{rj-1}^1} \frac{T_{fj-1}^1/P_{fj}^1}{T_{fj-1} + T_{fj-1}^1/P_{fj}^1}. \end{cases} \quad (8)$$

式中 $P_{fj}^1 = P(t_{rj}^1 > H_{j-1}/d)$, 因修复时间服从负指数分布, 则

$$P_{fj}^1 = \exp(-H_{j-1}/d T_{rj-1}^1).$$

· 无输出故障(ii)时的故障间隔和修复时间概率的递推公式为

$$\begin{cases} T_{fM}^0 = T_{fM}, \\ T_{rM}^0 = T_{rM}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{1}{T_{fj}^0} = \frac{1}{T_{fj}} + \frac{1}{T_{fj+1}^0} P_{fj}^0, \\ \frac{1}{T_{rj}^0} = \frac{1}{T_{rj}} \frac{T_{fj}}{T_{fj} + T_{fj+1}^0/P_{fj}^0} + \frac{1}{T_{rj+1}^0} \frac{T_{fj+1}^0/P_{fj}^0}{T_{fj} + T_{fj+1}^0/P_{fj}^0}. \end{cases} \quad (9)$$

式中 $P_{fj}^0 = P[t_{rj+1}^0 > (B_{j+1} - H_{j+1})/v_j] = \exp[-(B_{j+1} - H_{j+1})/v_j T_{rj+1}^0]$.

假设所有机器都有相同的故障间隔和修复时间, 且各级机器可调至相同的最大和最小生产速度. 即

$$\begin{cases} T_{fj} = T_f, \\ T_{rj} = T_r, \end{cases} \quad \begin{cases} u_j = u, \\ v_j = v, \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, M,$$

且令 $f_j^1 = T_f/T_{rj}^1$, $f_j^0 = T_f/T_{rj}^0$, 则式(8)(9)改写为

$$\begin{cases} f_2^1 = 1, \\ f_j^1 = 1 + f_{j-1}^1 \exp(-H_{j-1}/dT_r), \end{cases} \quad j = 3, 4, \dots, M, \quad (10)$$

$$\begin{cases} f_M^0 = 1, \\ f_j^0 = 1 + f_{j+1}^0 \exp\left(-\frac{B_{j+1} - H_{j+1}}{vT_r}\right), \end{cases} \quad j = M - 1, \dots, 3, 2. \quad (11)$$

故库存成本为

$$\begin{aligned} A_j^1 &= c_2 H_j \frac{T}{T_{fj}^1 + T_r} \left(\frac{T_{fj}^1(u-d) - T_r d}{u-d} \right) + \frac{T}{T_{fj}^1 + T_r} \frac{1}{2} c_2 H_j^2 \frac{u}{d(u-d)} \\ &+ \frac{T}{T_{fj}^1 + T_r} \frac{1}{2} c_1 (dT_r - H_j)^2 \frac{u}{d(u-d)}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} A_j^0 &= c_3 \frac{T}{T_{fj}^0 + T_r} \frac{1}{2} (vT_r - B_j + H_j)^2 \frac{d}{v(d-v)} \\ &+ c_2 \frac{T}{T_{fj}^0 + T_r} \left[(B_j - H_j)vT_r - \frac{1}{2}(B_j - H_j)^2 \right] \frac{d}{v(d-v)}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$A = \sum_{j=2}^M A_j = \sum_{j=2}^M A_j^1 + \sum_{j=2}^M A_j^0 = A^1 + A^0.$$

令 $\frac{\partial A}{\partial H_j} = 0$, 可求得各 H_j 值, 但非常复杂, 以下给出一种数值解法.

由 $A = A^1 + A^0$, 分别对 H_j 求导得

$$\frac{\partial A^1}{\partial H_j} = \frac{\partial A_j^1}{\partial H_j} - \frac{f_j^1}{dT_r} P_j, \quad (14)$$

$$\frac{\partial A^0}{\partial H_j} = \frac{\partial A_j^0}{\partial H_j} + \frac{f_j^0}{vT_r} Q_j, \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} P_M = 0 \\ P_j = e^{-H_j/dT_r} \left\{ \frac{\partial A_{j+1}^1}{\partial f_{j+1}^1} + P_{j+1} \right\}, \quad j = 2, 3, \dots, M-1. \end{cases}$$

$$\frac{\partial A_j^1}{\partial f_j^1} = \frac{T_{f_j}^1}{(T_{f_j}^1 + T_r) f_j^1} (A_j^1 - c_2 T H_j), \quad (16)$$

$$\begin{cases} Q_2 = 0 \\ Q_{j+1} = e^{-(B_{j+1} - H_{j+1})/vT_r} \left\{ \frac{\partial A_j^0}{\partial f_j^0} + Q_j \right\}, \quad j = 3, 4, \dots, M. \end{cases}$$

$$\frac{\partial A_j^0}{\partial f_j^0} = \frac{T_{f_j}^0}{(T_{f_j}^0 + T_r) f_j^0} A_j^0. \quad (17)$$

令 $\frac{\partial A}{\partial H_j} = 0$, 由式(14), (15)则导出

$$H_j = [Y_j - X_j(vT_r - B_j) - F_j] / (E_j + X_j), \quad j = 2, 3, \dots, M. \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} E_j = \frac{(c_1 + c_2)Tu}{(T_{f_j}^1 + T_r)d(u-d)} \\ F_j = \frac{c_2 T T_{f_j}^1 (u-d) + (c_1 u + c_2 d) T T_r}{(T_{f_j}^1 + T_r)(u-d)} \\ X_j = \frac{Td(c_3 - c_2)}{(T_{f_j}^0 + T_r)v(d-v)} \\ Y_j = \frac{f_j^1}{dT_r} P_j - \frac{f_j^0}{vT_r} Q_j \end{cases} \quad (19)$$

它是求解最优 H_j 值的刷新公式. 至此可给出求解 H 值的数值解法:

(i) 选取误差限 ξ , 及各 H_j 的初值为协调运行时的库存值 $H_j(0) = B_j/2, j = 2, 3, \dots, M$. 令 $k=1$;

(ii) 由(10)和(11)式计算 $T_{f_j}^1(k), T_{f_j}^0(k)$ 以及 $f_j^1(k)$ 和 $f_j^0(k)$;

(iii) 由(16)和(17)式计算 P_j 和 Q_j ;

(iv) 由(19)式计算中间参数 E_j, F_j, X_j, Y_j ;

(v) 由(18)式计算 $H_j(k+1)$;

(vi) 如果 $|H_j(k+1) - H_j(k)| < \xi$, 则 $H_j(k+1) \rightarrow H_j(k)$, 否则令 $k \rightarrow 1$, 返回第(ii)

步.

将求得的 H_j 代入(6)式得多级生产线的控制律.

4 系统性能分析

制造系统的性能可从两个方面进行评估:(1)机器的运行可靠性,即可用度,(2)负载程度,即利用率.

在此分别定义如下:

可用度:在规定的条件下和规定的时间内,机器可以使用的概率.平均可用度为

$$A_{vj} = T_{vj}/T \quad (20)$$

式中 T_{vj} 为在总运行时间 T 内机器 M_j 可使用的时间,包括正常运行和减额运行两部分.

利用率:在规定的条件下和规定的时间内,机器完成额定功能的概率,反映了机器被使用的情况即负载程度.平均利用率为

$$Z_j = T_{zj}/T \quad (21)$$

式中 T_{zj} 为在总运行时间 T 内机器 M_j 加工工件所花的时间,包括正常运行和减额运行两部分.

以下分别计算各性能指标.采用(6)式策略:

$$A_{vj} = \left[1 - \frac{T_r}{T_{fj+1}^1 + T_r} \right] \left[1 - \frac{T_r}{T_{fj}^0 + T_r} \right], \quad (22)$$

$$Z_j = \left[1 - \frac{T_r}{T_{fj+1}^1 + T_r} - \frac{1}{T_{fj}^0 + T_r} \max \left\{ 0, \frac{v_j T_r - (B_{j+1} - H_{j+1})}{v_j} \right\} \right] \cdot \left[1 - \frac{T_r}{T_{fj}^0 + T_r} - \frac{1}{T_{fj}^1 + T_r} \max \left\{ 0, \frac{dT_r - H_j}{d} \right\} \right], \quad (23)$$

采用文献[5]中的 HP 策略,用 * 表示.

$$A_{vj}^* = \left[1 - \frac{T_r}{T_{fj+1}^1 + T_r} \right] \left[1 - \sum_j^M \frac{T_r}{T_{fj}^0 + T_r} \right], \quad (24)$$

$$Z_j^* = A_{vj}^*, \quad (25)$$

5 仿真结果

给定一条五级生产线,结构如图(2)所示.各参数为 $B_j=4, j=2,3,4,5, T_f=60, T_r=6, u=1, d=0.5, v=0.25, T=500$. 分别采用本文和文献[5]的控制策略,结果如下:

1) $H_2=2.8361, H_3=2.8341, H_4=2.7194, H_5=0.3130; H_j^*=1.27, j=2,3,4,5$.

可知 $H_j > H_j^*, j=2,3,4$.

2) $A_1=0.8496, A_2=0.7523, A_3=0.7560, A_4=0.7761, A_5=0.8025, A_{v1}^*=0.5455, A_{v2}^*=0.5853, A_{v3}^*=0.6458, A_{v4}^*=0.7179, A_{v5}^*=0.7969$.

可知 $A_{vj} > A_{vj}^*, j=1,2,\dots,5$;

3) $Z_1=0.8223, Z_2=0.7236, Z_3=0.7378, Z_4=0.7654, Z_5=0.7620, Z_1^*=0.5455, Z_2^*=0.5853, Z_3^*=0.6458, Z_4^*=0.7179, Z_5^*=0.7969$

可知 $Z_j > Z_j^*, j=1,2,\dots,5$.

4) 令 $c_1=1, c_2=2, c_3=3$. 有 $A=4305, A^*=1597$. 而自由运行状态下(不加 HP 策略) $A_0=5540$,

可知 $A^* < A < A_0$.

6 结论

本文提出的控制策略,虽然成本有所增加,但仍优于自由运行状态的成本.事实上,制

造系统的可靠性和利用率比成本的最优性更为重要,所以本文提出的方法是非常有实际意义的.

另外,从推导过程可知,对于一般结构的单类工件制造系统,只要各机器具有专用缓冲库,本文的方法都适用.对于具有公用缓冲库或多类工件的系统,本文的方法还需改进,这是作者今后努力的方向.

参 考 文 献

- [1] Kimemia J, Gershwin S B. An algorithm for the computer control of a FMS. *IIE Trans.*, 1983, **15**(4):353—362.
- [2] Gershwin S B, Akella R, Chong Y F. Short-term production scheduling of an automated manufacturing facility. *IBM J. Res. Develop.*, 1985, **29**(4):392—400.
- [3] Akella R, Kumar P R. Optimal control of production rate in a failure prone manufacturing system. *IEEE Trans. A. C.*, 1986, **31**(2):116—126.
- [4] Sharifnia A. Production control of a manufacturing system with multiple machine states. *IEEE Trans. A. C.*, 1988, **33**(7):620—625.
- [5] Eleftheriu M N, Desrochers A A. An approximation schema for the estimation of buffer sizes for manufacturing facilities. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 1991, **7**(4):551—562.
- [6] Gershwin S B. Hierarchical flow control; A framework for scheduling and planning discrete events in manufacturing systems. *IEEE Proceedings*, 1989, **77**(1):195—209.

A CONTROL POLICY TO IMPROVE OPERATION RELIABILITY OF MANUFACTURING SYSTEMS

YU MING

(Department of Electrical and Computer Engineering, College of Engineering, Rutgers-The State
University of New Jersey, U. S. A.)

WANG RAN WU CHENG

(State CIMS-ERC, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract This paper, from control theoretic point of view, proposes a control policy to improve performances of a general repairable serial production line with buffers. The proposed policy is based on the concept of hedging point scheduling strategy that considers both running costs and availability of the system. The simulation results illustrate the effectiveness of the policy. The method can be used to manufacturing systems with general structure.

Key words Manufacturing systems, optimal control, reliability, inventory control, scheduling.

喻 明 男, 1994 年毕业于清华大学自动化系, 获工学博士学位. 研究方向为制造系

统的建模、设计、优化;库存控制等. 现在 Department of Electrical and Computer Engineering, College of Engineering, Rutgers-The State University of New Jersey, USA.

王 然 女,现为清华大学自动化系博士研究生. 研究方向为:复杂生产线的建模、优化和计划调度、质量控制等.

吴 澄 男,现为清华大学自动化系教授,中国工程院院士,国家 863 计划 CIMS 主题专家组组长. 主要研究方向有:集成系统的总体设计方法及实施;复杂工业自动化系统的建模、设计、优化和计划调度;系统结构和平台技术;系统可靠性.

IEEE ICIPS'97

CALL FOR PAPERS

IEEE First International Conference on Intelligent Processing Systems (IEEE ICIPS)

October 20—24, 1997, Beijing, China

Deadlines: Proposal submission due: February 28, 1997, Acceptance notification:

April 30, 1997, Final paper due: June 30, 1997

The Aim: With the advances in computer technology and intelligent machines, we have seen a dramatic increase in intelligent capabilities in many different fields. The International Conference on Intelligent Processing Systems provides an important central forum for researchers and engineers from different disciplines to exchange ideas, study differences, share common interests, explore new directions, and initiate possible collaborative research and development. More importantly, this conference will significantly benefit a large variety of economical and industrial sectors, as well as the research community.

Topics (but not limited to)

Machine intelligence and applications
Intelligent communications networks
Computer vision systems
Fuzzy systems
Softcomputing and applications
Computer vision
Robotics and applications
Intelligent process control
Diagnostic system
Intelligent engineering design
Image information processing and management
Design and development systems
Resource management
Virtual reality
Intelligent GIS and GPS
Decision support systems
Natural language understanding systems

Expert systems
Intelligent transportation systems
Evolutionary computing and systems
Operational systems
Intelligent agents
Knowledge-based signal processing
Computer databased
Multimedia applications
Intelligent manufacturing
Computer networks and applications
Software development
Medical information processing
Environment care
Agricultural processing and management systems
Scheduling and planning
Neural networks
Biomedical systems

(下转第 34 页)