

串行伯努利生产线的实时维护决策控制

李 洋, 邓 嘉, 张新艳

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 基于状态的维护(condition-based maintenance, CBM)方法可以有效降低设备故障率,但维护导致的设备停机会在一定程度上造成系统产量流失.为了减少 CBM 对生产系统的影响,提出了实时维护决策控制方法.首先,建立基于马尔可夫过程的数学模型描述系统动态变化.其次,通过计算永久性生产损失量化停机维护对产量的影响.最后,提出了一种控制算法以优化 CBM 决策.仿真试验结果表明,该模型能恰当描述伯努利生产线的动态变化,且 CBM 决策控制方法可以减少永久性生产损失、提高整体生产效率.

关键词: 基于状态的维护(CBM);维护控制;马尔可夫过程模型;动态生产系统;永久性生产损失

中图分类号: TH186

文献标志码: A

A Real-Time CBM Decision-Making Model for Bernoulli Serial Production Line

LI Yang, DENG Jia, ZHANG Xinyan

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Conditional-based maintenance (CBM) can reduce the possibility of machines' failure, but the stoppage resulted by CBM will affect the system's throughput. In order to minimize the impact of CBM, a real-time maintenance decision method was proposed. First, a mathematical model based on Markov process model was developed to describe the system dynamics. Second, the model quantified the impact of system stoppages on the throughput by calculating the permanent production loss. Finally, a control algorithm was developed to optimize CBM decisions. A simulation case study was performed to validate the effectiveness of the model.

Key words: conditional-based maintenance (CBM); maintenance control; Markov process model; system dynamics; permanent production loss

制造系统需要将设备保持在良好的工作状态以防止设备故障,合理的设备维护作为典型的制造业生产性服务^[1]对于保证生产线高效运行具有至关重要的作用^[2].基于状态的维护(condition-based maintenance, CBM)是一种根据设备退化程度进行维护的决策方式,及时运用 CBM 方法辅助生产决策可以降低故障频率,减少维修费用.但由于进行 CBM 需要暂时停止设备运行,所以会在一定程度上影响系统产量^[3].CBM 引起的设备停机对于生产线的影 响不仅仅单独作用于维护设备,还会引起其上游设备的阻塞或下游设备的饥饿,进而影响生产系统的整体效率,延误既定的生产进程.因此,如何平衡设备故障导致的潜在风险和停机维护引起的产量损失,在恰当的时间对设备进行维护,是每个生产系统不容忽视的问题.

在制造系统中,利用缓冲区库存可以有效减少设备维护带来的生产损失,保证维护设备在停机时其上、下游工序可以继续生产^[4].作为学术和工业界关注的焦点,国内外学者不断对带缓冲区库存的生产系统的维护决策问题提出各种分析和解决方法,旨在提高系统的生产率.对于双机生产线,Karamatsoukis 等^[5]证明了根据系统状态控制维护决策的合理性.Gan 等^[6]对具有衰退特征的设备生产线建立基于马尔可夫链的数学模型,加上对备件库存量的考虑,确定上游设备的最佳维护周期.陆志强等^[7]针对可修复设备,同时对单位时间成本和系统可用度进行双目标优化.对于上下游设备同时退化的双机生产线,Fitouhi 等^[8]以提高系统整体生产效率为目标,计算了最佳维护点,并证明了设备运行速度对维护决策的影响.对于多机复杂系统,Nahas^[9]在产量约束的前提下综合考虑维护活动对系统的整体影响,通过合理分配各缓冲区的容量,确定最优预防性维护策略.周炳海等^[10]通过建立系统状态与质量损失间的函数关系,确定机会维护决策

收稿日期: 2017-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(51605335)

第一作者: 李 洋(1988—),男,助理教授,研究生导师,工学博士,主要研究方向为生产系统实时控制与维护.

E-mail: yangmli@tongji.edu.cn

点. 面对维护后不能完全恢复如新的设备, Zhang 等^[11]研究了故障设备数量与维护决策之间的关系.

上述文献在计算维护活动造成的生产损失时, 往往假设系统损失的产量与设备停机时间成正比. 然而由于复杂生产系统中设备和缓冲区的交互作用^[12], 并非所有的停机时间都会对系统造成永久性的生产损失, 部分停机时间只会导致产量临时降低, 并在后续的生产活动中得以恢复^[13]. 对于机器可靠性服从伯努利分布的生产线, Chang 等^[14]验证了通过计算停机维护造成的生产损失, 可以量化维护活动对系统产生的影响. Li 等^[15]建立了基于事件的模型来量化设备活动对生产系统的影响. 上述文献通过可检测到的生产数据评估了停机活动对系统产生的影响并寻求改进, 但无法预测系统后期的动态变化并提前做出准备.

综上所述, 目前很少有文献在准确描述系统动态的基础上预测设备停机对系统带来的影响. 因此, 研究设备符合伯努利可靠性模型的生产线^[16] (伯努利生产线) 实时维护决策问题, 建立基于马尔可夫过程的数学模型描述系统的实时动态变化, 预测维护活动对系统带来的潜在影响, 使系统在一系列的停机维护过程中永久性生产损失最小, 并通过仿真实验, 验证模型和算法的有效性.

1 问题描述

考虑一条如图 1 所示的具有 M 台设备、 $M-1$ 个缓冲区的串行伯努利生产系统. M_m 表示第 m 个设备, b_m 表示第 m 个缓冲区. 该系统的符号和假设如下:



图 1 拥有 M 台设备和 $M-1$ 个缓冲区的串行伯努利生产线

Fig.1 Bernoulli serial production line with M machines and $M-1$ buffers

(1) 缓冲区 $b_m, m=1, \dots, M-1$ 的容量上限为 B_m .

(2) 设备 $M_m, m=1, \dots, M$ 的生产周期相同, 系统按照机器生产周期划分为生产阶段 $t=1, \dots, T$.

(3) 系统中所有设备均为可靠性为 p_m 的伯努利设备, 即在阶段 t , 设备 M_m 运行的概率为 p_m , 失效的概率为 $1-p_m$.

(4) α_m 表示设备 M_m 的状态.

$$\alpha_m = \begin{cases} 0, & M_m \text{ 不运行} \\ 1, & M_m \text{ 运行} \end{cases} \quad (1)$$

(5) 设备 M_m 的最大速度为 S_m , 即在运行过程

中, 设备 M_m 的时速不超过 S_m .

(6) 如果设备 M_m^* 的加工速度最小, 即 $M_m^* = \arg \min_{m=1, \dots, M} (S_m)$, 则设备 M_m^* 称为最慢设备.

(7) 当系统满足以下条件时, M_m 阻塞: ① M_m 运行; ② 下游缓冲区容量 $b_m(t) = B_m$; ③ M_{m+1} 不运行.

(8) 当系统满足以下条件时, M_m 饥饿: ① M_m 运行; ② 上游缓冲区容量 $b_{m-1}(t) = 0$.

(9) M_1 永远不会饥饿, M_M 永远不会阻塞.

(10) $e_i = (M_m, t_i, d_i)$ 表示发生在设备 M_m 的停机事件, 停机时间为 $[t_i, t_i + d_i)$.

1.1 基于马尔可夫过程的系统动态描述

用马尔可夫过程模型来描述生产系统的动态变化. 在生产阶段 t , 系统状态 $U(t)$ 可以用 $M-1$ 个缓冲区的容量来表示, 即 $U(t) = [b_1(t), b_2(t), \dots, b_{M-1}(t)]$. 因此, 系统共有 $h = \prod_{m=1}^{M-1} (B_m + 1)$ 种状态, 每种状态的次序可以表示为

$$\gamma = \sum_{m=1}^M b_m \theta_{m+1} \quad (2)$$

其中 $\theta_m = \begin{cases} \prod_{j=1}^{M-1} (B_j + 1), & m = 1, \dots, M-2 \\ 1, & m = M-1 \end{cases}$. 缓冲区容量变化由上下游设备的生产状态所决定, 因此, 在生产阶段 $t+1$, 缓冲区容量可以表示为

$$b_m(t) = b_m(t) + s_m(t) - s_{m+1}(t), \quad m = 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

其中, 设备 M_m 在阶段 t 的生产速度为

$$s_m(t) = \begin{cases} \min\{S_m \alpha_m(t), B_m - b_m(t-1) + s_{m+1}(t)\}, & m = 1 \\ \min\{S_m \alpha_m(t), b_{m-1}(t-1)\}, & m = M \\ \min\{S_m \alpha_m(t), b_{m-1}(t-1), B_m - b_m(t-1) + s_{m+1}(t)\}, & m = 2, \dots, M-1 \end{cases} \quad (4)$$

在阶段 t , 生产系统的设备状态共有 2^M 种组合方式, 每种组合方式分别对应了不同的缓冲区容量变化情况. 假设系统在阶段 t 的状态为 $U(t) = [b_1(t), b_2(t), \dots, b_{M-1}(t)]$, 不同的设备状态组合对应了不同的 $U(t+1)$. 系统状态从 $U(t)$ 转移到 $U(t+1)$ 的转移矩阵计算步骤如下:

步骤 1 计算阶段 t 设备状态 $\alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_M(t)$ 的组合概率

$$P(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M) = \prod_{m=1}^M p_m^{\alpha_m} (1-p_m)^{1-\alpha_m} \quad (5)$$

步骤 2 假设在阶段 t , 系统状态 $U(t) = [b_1(t), b_2(t), \dots, b_{M-1}(t)]$. 根据式(3)和(5), 求出每种设备

状态组合所对应的下一阶段的系统状态 $U(t+1)$.

步骤 3 将对应了相同的系统状态的设备状态组合概率相加,即得到系统从 $U(t)$ 变成 $U(t+1)$ 的转移概率.

步骤 4 对所有系统状态重复以上步骤,直到得到系统状态转移矩阵 A .

通过以上步骤,当给定系统初始状态 $P_{sys}(0)$ 时,任一生产阶段的系统状态可以由式(6)迭代得到

$$P_{sys}(t+1) = AP_{sys}(t) \quad (6)$$

1.2 机会窗口

1.2.1 机会窗口的定义

Li 等^[16]提出,机会窗口是指事件 $e_i = (M_m, t_i, d_i)$ 引起设备 M_m 停机但不会造成永久性生产损失的最长停机时间.只有当停机事件 e_i 的持续时间大于机会窗口 $W_m(e_i)$ 时,系统才会产生永久性生产损失.根据以上定义,机会窗口可以由以下公式表示:

$$W_m(e_i) = \begin{cases} \inf\{d: b_m(t_i + d) = \dots = \\ b_{M^* - 1}(t_i + d) = 0, 0 \leq d \leq d_i\}, \\ 1 \leq m \leq M^* \\ 0, m = M^* \\ \inf\{d: b_{M^*}(t_i + d) = B_{M^*} \dots \\ b_{m-1}(t_i + d) = B_{m-1}, 0 \leq d \leq d_i\}, \\ M^* \leq m \leq M \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)可以看出,机会窗口的定义与停机设备在生产线的相对位置有关.当 M_m 位于 M_{M^*} 上游 ($1 < m < M_{M^*}$) 时, $W_m(e_i)$ 表示设备 M_m 和 M_{M^*} 之间的缓冲区容量变为零的最短时间,当 M_m 位于 M_{M^*} 下游 ($M_{M^*} < m < M_m$) 时, $W_m(e_i)$ 表示设备 M_m 和 M_{M^*} 之间的缓冲区容量达到上限的最短时间.也就是说, $W_m(e_i)$ 是指从 M_m 停机开始到最慢设备 M_{M^*} 进入阻塞或饥饿状态的时间.

根据机会窗口的定义,通过分析 M_{M^*} 在停机过程 $[t_i, t_i + d_i)$ 中的状态变化,找出其饥饿或阻塞的时间点,可以准确量化停机维护对系统产量的影响.因此,发生在 M_m 的停机事件 $e_i = (M_m, t_i, d_i)$ 对系统造成的永久性生产损失 $L(e_i)$ 则可以通过最慢设备 M_{M^*} 在系统停机时间里的产生的生产损失来衡量.

$$L(e_i) = \begin{cases} \bar{S}_{M^*}(d_i - W_m(e_i)), & d_i > W_m(e_i) \\ 0, & d_i \leq W_m(e_i) \end{cases} \quad (8)$$

式中: \bar{S}_{M^*} 表示设备 M_{M^*} 的平均生产速度.

1.2.2 机会窗口的单调性

从机会窗口的定义可以看出,机会窗口 $W_m(e_i)$ 的长度与停机设备 M_m 和最慢设备 M_{M^*} 之间的缓冲区容量有关. M_m 和 M_{M^*} 相对位置的不同, $W_m(e_i)$

呈现不同的单调性.

定理 1 在服从假设(1)~(10)定义的伯努利生产线中:

(1) 如果 M_m 位于 M_{M^*} 上游,那么机会窗口 $W_m(e_i)$ 随着 M_m 和 M_{M^*} 间的缓冲区容量 $\sum_{k=m}^{M^* - 1} b_k(t_i)$ 的增加而单调递增.

(2) 如果 M_m 位于 M_{M^*} 下游,那么机会窗口 $W_m(e_i)$ 随着 M_m 和 M_{M^*} 间的缓冲区容量 $\sum_{k=m}^{M^* - 1} b_k(t_i)$ 的增加而单调递减.

证明 假设停机事件发生于最慢设备 M_{M^*} 的上游 ($1 < m < M_{M^*}$). 在生产阶段 $[t_i, t_i + d_i)$ 中,设备 M_m 和 M_{M^*} 之间缓冲区的容量的变化 Δb 等于 2 台设备在此阶段产量的差,具体可以表示为

$$\Delta b = \sum_{k=m}^{M^* - 1} b_k(t_i + d_i) - \sum_{k=m}^{M^* - 1} b_k(t_i) = \sum_{t=t_i}^{t_i + d} s_m(t) - \sum_{t=t_i}^{t_i + d} s_{M^*}(t) \quad (9)$$

其中 $\sum_{k=m}^{M^* - 1} b_k(t_i)$ 和 $\sum_{k=m}^{M^* - 1} b_k(t_i + d_i)$ 分别表示阶段 t_i 和 $t_i + d_i$ 时缓冲区 b_m 到 $b_{M^* - 1}$ 的总容量, $\sum_{t=t_i}^{t_i + d} s_m(t)$ 和 $\sum_{t=t_i}^{t_i + d} s_{M^*}(t)$ 分别表示设备 M_m 和 M_{M^*} 从阶段 t_i 和 $t_i + d_i$ 的累积产量.由于停机过程中, M_m 没有加工速度,即 $s_m(t) = 0, \forall t \in [t_i, t_i + d_i)$,式(9)可以简化为

$$\sum_{k=m}^{M^* - 1} b_k(t_i + d_i) - \sum_{k=m}^{M^* - 1} b_k(t_i) = - \sum_{t=t_i}^{t_i + d} s_{M^*}(t) \quad (10)$$

根据机会窗口的定义,要计算在不造成永久性生产损失的前提下 M_m 的最长停机时间,就要找到缓冲区 b_m 到 $b_{M^* - 1}$ 容量全部变为零的时刻 $t_i + d_i$,即

$$\sum_{k=m}^{M^* - 1} b_k(t_i + d_i) = 0. \text{ 因此式(10)可以进一步简化为}$$

$$\sum_{k=m}^{M^* - 1} b_k(t_i) = \sum_{t=t_i}^{t_i + d} s_{M^*}(t) \quad (11)$$

M_{M^*} 的累计产量 $\sum_{t=t_i}^{t_i + d} s_{M^*}(t)$ 可以近似表示为

$$\sum_{t=t_i}^{t_i + d} s_{M^*}(t) \approx \bar{S}_{M^*} \cdot d \quad (12)$$

其中 \bar{S}_{M^*} 表示设备 M_{M^*} 的平均生产速率,可以用以下公式计算:

$$\bar{S}_{M^*} = \frac{\int_0^T S_{M^*}(\tau, E) d\tau}{T}$$

因此, M_m 的机会窗口 $W_m(e_i)$ 为

$$E[W_m(e_i)] = \frac{\sum_{k=m}^{M^*-1} b_k(t_i)}{\bar{S}_{M^*}}, 1 \leq m \leq M^* \quad (13)$$

从式(13)可以看出,当停机设备 M_m 位于最慢设备 M_{M^*} 的上游时,其机会窗口 $W_m(e_i)$ 与 M_m 和 M_{M^*} 之间的缓冲区总容量 $\sum_{k=m}^{M^*-1} b_k(t_i)$ 成正比. 同理,当 M_m 位于 M_{M^*} 的下游时,其机会窗口 $W_m(e_i)$ 与 M_m 和 M_{M^*} 之间的缓冲区总容量 $\sum_{k=m}^{M^*-1} b_k(t_i)$ 成反比.

2 模型求解

2.1 机会窗口计算

结合系统动态描述和机会窗口的定义,可以计算出在复杂系统动态下各个设备的机会窗口,进而预测停机事件 e_i 对系统产量的影响. 假设存在停机维护 $e_i = (M_m, t_i, d_i)$, 根据机会窗口的定义,为了确定 M_m 不造成生产损失的最长停机时间,需要找到维护设备 M_m 和最慢设备 M_{M^*} 之间缓冲区容量开始变为零 ($1 < m < M_{M^*}$) 或达到容量上限 ($M_{M^*} < m < M_m$) 的时间点. 用 Z_m 表示这 2 种特殊的系统状态,即

$$Z_m = \begin{cases} b_m(t) = b_{m+1}(t) = \dots = b_{M^*-2}(t) = \\ b_{M^*-1}(t) = 0, 1 < m < M_{M^*} \\ b_{M^*}(t) = B_{M^*}, b_{M^*+1}(t) = B_{M^*+1}, \dots, \\ b_{m-2}(t) = B_{m-2}, b_{m-1}(t) = B_{m-1}, \\ M_{M^*} < m < M_m \end{cases} \quad (14)$$

则机会窗口的定义可以简化为

$$W_m(e_i) = \begin{cases} \inf\{d: U(t_i + d) \in Z_m\}, & m \neq M^* \\ 0, & m = M^* \end{cases} \quad (15)$$

因此,维护活动 $e_i = (M_m, t_i, d_i)$ 的机会窗口 $W_m(e_i)$ 可以通过以下步骤求得.

步骤 1 初始化: $d=0$.

步骤 2 根据式(5)求得系统状态在 $t_i + d$ 的概率分布 $P_{\text{sys}}(t_i + d)$.

步骤 3 计算系统状态在阶段 $t_i + d$ 处于 Z_m 的概率和 $\sum_{U(t_i+d) \in Z_m} (P_U(t_i + d), t_i + d)$.

步骤 4 计算机会窗口为 d 的概率 $P(W_m(e_i))$, 为

$$P(W_m(e_i) = d) = \sum_{U(t_i+d) \in Z_m} (P_{\text{sys}}(t_i + d), t_i + d) - \sum_{U(t_i+d-1) \in Z_m} (P_{\text{sys}}(t_i + d - 1), t_i + d - 1) \quad (16)$$

步骤 5 判断 $\sum_{\sigma=0}^d P(W_m(e_i) = \sigma) \geq \epsilon$, 其中 ϵ 表示容许区间. 若成立,则终止计算,否则转到步骤 5.

步骤 6 $d=d+1$, 根据式(5), 确定阶段 $t_i + d$ 的系统转移概率并转到步骤 2.

通过以上步骤可以得到机会窗口 $W_m(e_i)$ 的概率分布, 即 $P(W_m(e_i) = 0), P(W_m(e_i) = 1), \dots, P(W_m(e_i) = n)$. 则 M_m 机会窗口 $W_m(e_i)$ 的期望可以表示为

$$E[W_m(e_i)] = \sum_{d=0}^n d \cdot P(W_m(e_i) = d) \quad (17)$$

2.2 实时 CBM 决策控制算法

根据上文的算法,可以计算出待维护设备 M_m 的机会窗口,进而量化维护活动 e_i 对生产线造成的永久性生产损失. 为了降低此损失,维护活动应尽量安排在机会窗口较长的生产阶段. 因此,如何调整维护活动 e_i 的停机时间,保证停机时 M_m 的机会窗口相对较长,是下一个需要解决的问题. 假设每次维护的决策窗口为 $[0, T)$, 即对于维护活动 $e_i = (M_m, t_i, d_i)$, 其开始时间 t_i 可以为决策窗口时间段内的任一时间点, 即 $0 \leq t_i < T$. 此时,维护活动 e_i 的开始时间 t_i 可以通过以下步骤求得.

步骤 1 初始化: $t_i = 0$.

步骤 2 根据 2.1 节的计算步骤, 求出系统在阶段 t_i 的机会窗口 $W_m(e_i)$.

步骤 3 $t_i = t_i + 1$, 判断 $t_i < T$, 若成立, 则转到步骤 4; 否则转到步骤 5.

步骤 4 根据式(5), 确定阶段 t_i 的系统转移概率并转到步骤 2.

步骤 5 寻找维护活动的最佳开始时间 t_i^* , 并终止计算, 计算方式见式(18):

$$t_i^* = \arg \max E[W_m(e_i), t_i] \quad (18)$$

3 算例分析

如图 2, 假设一条拥有 4 台设备和 3 个缓冲区的伯努利生产线, 长方形表示生产机器, 圆形表示缓冲区. 随运行时间增加, 设备 M_1 和 M_3 的健康状态不断退化, 设备可靠性随之降低. 用 h_i 表示 M_i 的健康状态, 从初始状态 $h_i(0) = 1$ 不断衰减至退化状态, 即 $0 < h_i \leq 1$. 假设每次维护后 h_i 恢复到初始值, 即 $h_i(t) = 1$. 设备的可靠性 $p_i(t) = 1$ 也随着状态 h_1 的退化而降低, 其中 t 表示距离上一次维护的时间. 为

为了方便计算,假设设备 M_2 和 M_4 的健康状态和可靠性保持不变. 模拟系统的主要参数如表 1、表 2,时间轴按加工周期 $c=10$ min 划分生产阶段.



图 2 拥有 4 台设备和 3 个缓冲区的伯努利生产线
Fig. 2 Bernoulli serial production line with 4 machines and 3 buffers

表 1 生产机器性能参数

Tab. 1 Parameters of production machines

容量	b_1	b_2	b_3
最大容量	6	4	5
初始容量	3	2	2

表 2 缓冲区性能参数

Tab. 2 Parameters of buffers

物理量	M_1	M_2	M_3	M_4
$p_i(0)$	0.92	0.86	0.94	0.78
$p_i(t)$	$e^{-0.008t}p_1(0)$	0.86	$e^{-0.006t}p_3(0)$	0.78
$h_i(0)$	1.00	1.00	1.00	1.00
$h_i(t)$	$e^{-0.008t}h_1(0)$	1.00	$e^{-0.006t}h_3(0)$	1.00
s_i	0.50	0.30	0.30	0.20

实验 1 证明了机会窗口的单调性,即通过调整缓冲区容量,可以减少维护活动 $e_i = (M_m, t_i, d_i)$ 对生产系统的影响. 假设对设备 M_1 和 M_3 按时进行维护,其平均修复时间分别为 $R(t) = R_1 \cdot e^{0.008t}$ 和 $R(t) = R_3 \cdot e^{0.006t}$,平均无故障时间分别为 $F(t) = F_1 \cdot e^{-0.008t}$ 和 $F(t) = F_3 \cdot e^{-0.006t}$,其中 $R_1 = 3.5$ h, $R_3 = 4$ h, $F_1 = 10$ h, $F_3 = 8$ h. 生产线每天运行 8 h,连续工作 80 h. 由于维护设备 M_1 和 M_3 位于最慢设备 M_4 上游,根据机会窗口的单调性规律,增加的 b_2 和 b_3 缓冲区容量可以减少 M_4 饥饿的概率,从而增加 M_1 和 M_3 机会窗口的时长. 假设有一批加时生产的半成品 x 存储在设备 M_4 上游,当 M_4 由于停机维护而饥饿时,可以通过加工半成品 x 保证生产线继续运行. 实验 1 验证了当 x 分别等于 0、2、4、6、8、10 时所对应的系统产量和生产损失情况. 图 3 所示在 x 等于 0 到 8 时,系统产量 G 从 52.34 增加至 72.12,增幅达到 37.79%. 而在 x 等于 8 和 10 时,产量略有减少. 图 3 所示 x 等于 0 到 8 时,系统生产损失从 21.25 减少到 10.34,降幅达到 51.34%. 而在 x 等于 8 和 10 时,生产损失略增. 这是因为 x 从 0 增加到 8 时, M_1 和 M_3 最大机会窗口小于停机时间,因此其增长对减少生产损失,增加产量有明显的影 响. 当 x 大于 8 后,机会窗口等于或超过停机时间,因此无法再通过增加机会窗口而增加系统产量或减少生产损失.

实验 2 证明了实时 CBM 决策控制算法的合理

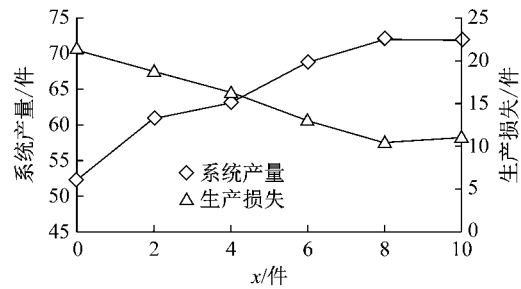


图 3 不同半成品 x 数量影响下的系统产量和生产损失变化
Fig. 3 System throughput production loss variation when adding different amount of semi-finished products

性,即通过预测机会窗口灵活调整维护活动的开始时间,降低生产损失. 假设设备 $M_i (i=1,3)$ 有一组维护计划 $E_i = \{e_{i,1}, \dots, e_{i,n}\}$,每次维护活动 $e_{i,j} (j=1, \dots, n)$ 的决策窗口 $W=1$ h,即设备 M_i 在 1 h 内任意时刻均可以停机维护. 决策窗口 W 的间隔时间和维护活动的持续时间服从指数分布,且均值分别为 8 h 和 4 h. 生产线每天运行 8 h,连续工作 240 h. 实验 2 对比了停机维护开始时间的选择在以下 3 种策略下对生产线的不同影响.

策略 1:在决策窗口开始时停机维护.

策略 2:随机选择时间停机维护,即维护活动的开始时间为决策窗口 W 内任一时刻.

策略 3:实时 CBM 决策控制方法.

图 4 显示了 3 种策略下每次维护造成的永久性生产损失. 从图 4 可以看出,由于策略 3 可以有效缓解 CBM 对产量的影响,因此在该种策略下产生的损失低于前 2 种策略. 如表 3 所示,在决策窗口开始时停机维护和随机选择时间停机维护对系统造成的平均生产损失分别为 19.25 和 17.38,而利用实时 CBM 决策控制方法来控制停机维护的生产损失只有 10.56,相较于前 2 种情况,生产损失分别减少了 45.14% 和 39.24%,有效提升了系统产量.

4 结论

研究了伯努利生产线的实时维护决策问题,通过建立数学模型描述生产系统的状态变化,预测待维护设备的机会窗口,从而控制 CBM 决策,降低生产系统由于停机维护所导致的永久性生产损失. 实验结果表明,本文的数学模型可以有效描述复杂系统的动态变化,量化停机维护对生产线带来的负面影响. 而 CBM 控制算法对降低由维护导致的永久性生产损失有明显效果. 本文目前只从生产损失角度

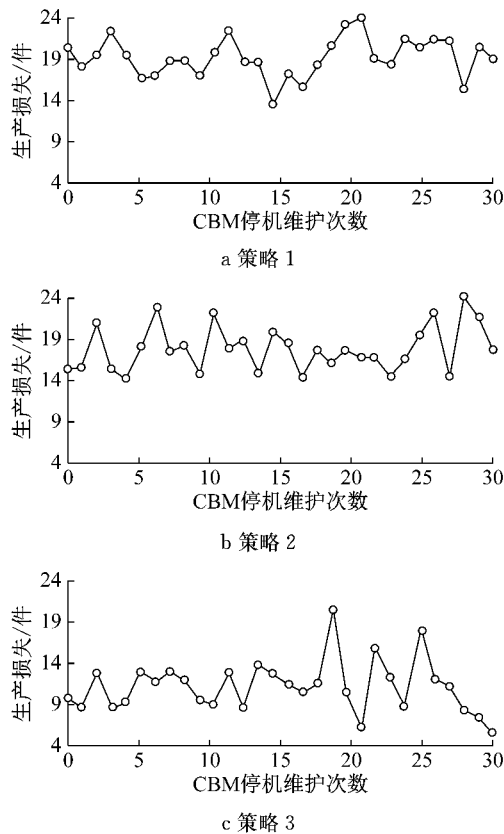


图 4 3 种维护决策方法下的生产损失变化
Fig.4 Production loss variations in different maintenance decision methods

表 3 3 种维护决策方法下的平均生产损失
Tab.3 Average production loss in different maintenance decision methods

CBM 维护策略	平均生产损失/(件·d ⁻¹)
策略 1	19.25
策略 2	17.38
策略 3	10.56

来评估 CBM 对制造系统带来的影响,而在实际生产中,维护决策的实施还要考虑生产成本、维护成本和库存成本等其他方面的因素.综合考虑以上多种成本对维护决策的影响是后续工作重点.

参考文献:

[1] 黄君政, 李爱平, 刘雪梅, 等. 考虑缓冲区配置的生产线布局优化设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 1075.
HUANG Junzheng, LI Aiping, LIU Xuemei. Optimal design of production line layout considering buffer allocation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(7): 1075.

[2] WANG H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 139(3): 469.

[3] KOCHAKI J, BOKHORST J A C, WORTMANN H, *et al.* Condition based maintenance in the context of opportunistic maintenance[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(23): 6918.

[4] PAVITSOS A, KYRIAKIDIS E G. Markov decision models for the optimal maintenance of a production unit with an upstream buffer [J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(6): 1993.

[5] KARAMATSOUKIS C C, KYRIAKIDIS E G. Optimal maintenance of two stochastically deteriorating machines with an intermediate buffer[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207(1): 297.

[6] GAN S, ZHANG Z, ZHOU Y, *et al.* Joint optimization of maintenance, buffer, and spare parts for a production system [J]. Applied Mathematical Modelling, 2015, 39(19): 6032.

[7] 陆志强, 王佳跃, 周炳海. 带缓冲区的可修复设备多目标预防性维护决策模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2124.
LU Zhiqiang, WANG Jiayue, ZHOU Binghai. Multi-objective preventive maintenance decision-making model for repairable equipment with buffer[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(10): 2124.

[8] FITOUHI M C, NOURELFATH M, GERSHWIN S B. Performance evaluation of a two-machine line with a finite buffer and condition-based maintenance [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 166: 61.

[9] NAHAS N. Buffer allocation and preventive maintenance optimization in unreliable production lines [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 28(1): 1.

[10] 周炳海, 刘子龙. 考虑质量损失的退化系统维护建模[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(12): 2270.
ZHOU Binghai, LIU Zilong. Maintenance modeling for deteriorating system considering quality loss[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(12): 2270.

[11] ZHANG Y L, WANG G J. An optimal replacement policy for a multistate degenerative simple system [J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(12): 4138.

[12] ZHANG L, WANG C, ARINEZ J, *et al.* Transient analysis of Bernoulli serial lines: Performance evaluation and system-theoretic properties[J]. IIE Transactions, 2013, 45(5): 528.

[13] CHANG Q, BILLER S, XIAO G, *et al.* Transient analysis of downtimes and bottleneck dynamics in serial manufacturing systems[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2010, 132(5): 635.

[14] CHANG Q, NI J, BANDYOPADHYAY P, *et al.* Maintenance opportunity planning system [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2007, 129(3): 661.

[15] LI Y, CHANG Q, NI J, *et al.* Event-based supervisory control for energy efficient manufacturing systems [J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2016, 15(1): 92.

[16] LI J, Meerkov S M. Production Systems Engineering[M]. [S. l.]: Springer US, 2009.