

等待时间有限的串行生产系统的缓冲区优化

李蕊¹, 赵宁^{2†}, 刘文奇³

(昆明理工大学 理学院, 昆明 650500)

摘要: 对于等待时间有限的串行生产系统, 由于上下游设备会发生随机故障, 若两个连续设备之间的缓冲区过大, 则会产生较大的返工成本, 缓冲区过小则会产生较大的产能损失成本. 在保证产品质量的前提下, 为了有效地降低系统运作成本, 提出等待时间有限的串行生产系统的缓冲区优化模型. 基于工件排队等待时间有限这一生产线特点, 分别分析预防性维护成本、返工成本和产能损失成本, 以单位时间总成本最小为优化目标, 建立一个成本函数的分析模型, 得到最优缓冲区阈值. 最后通过数值计算结果表明, 利用成本函数的分析模型能够确定最优缓冲区阈值, 从而有效降低运行成本.

关键词: 串行生产系统; 等待时间限制; 缓冲区

中图分类号: O226

文献标志码: A

Optimization of buffer for series production systems with waiting time constraints

LI Rui¹, ZHAO Ning^{2†}, LIU Wen-qi³

(College of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: For the series production system with waiting time constraints, breakdowns occur stochastically at the upward and downward stations. The big buffer size can cause high rework cost, and the small buffer size can cause high shortage cost. To ensure the quality of products and to reduce the operation cost effectively, an optimization model is proposed. Firstly, based on the characteristic of waiting time constraints, the preventive maintenance cost, rework cost and shortage cost are analyzed. Then, a model is established with an objective to minimize the total cost per unit time. The optimal buffer size is derived. Finally, the result of numerical computation shows that, the optimal buffer size can be determined by using the proposed model, which can reduce the operating cost effectively.

Keywords: series production system; waiting time constraint; buffer

0 引言

在现代制造业中, 生产系统一般为串行生产系统, 为了保障设备连续运行, 两个连续的设备之间通常设有缓冲区. 一般地, 工件在缓冲区有一个等待时间的限制, 如果工件在缓冲区的等待时间超过此限制, 则会失效, 需返回到第 1 个设备重新进行加工, 这将造成返工成本. 为减少此成本, 工件在缓冲区的等待时间应尽量小于等待时间的限制. 另外, 设备在生产产品的过程中可能发生故障, 为了提高设备的可靠性, 需要对设备进行相应的维护和维修. 多年来, 许多学者针对串行生产系统进行了深入而广泛的研究.

在串行生产系统的预防性维护方面, Dimitrakos 等^[1] 研究了具有有限缓冲区的串行生产系统, 在

上游设备进行预防性维护的情况下, 利用马尔科夫决策过程, 找到最优维护策略. Pavitsons 等^[2] 针对下游设备进行预防性维护, 得到了最优维护策略. Karamatsoukis 等^[3] 研究了上、下游设备均进行预防性维护的最优策略. Dehayem 等^[4] 运用动态规划方法得到了退化生产系统关于维修和预防性维护的最优联合策略. 甘婕等^[5] 针对设备状态可检测的系统建立了单机调度与维护决策集成模型, 得到了最优维护策略. 周炳海等^[6] 以维护时刻点作为随机变量, 建立了期望成本模型, 得到最优维护时刻. Cheng 等^[7] 研究了上游设备进行预防性维护的情况, 建立了设备维护与缓冲区阈值的联合优化模型, 得到了最优策略. Gan 等^[8] 研究了生产系统的预防性维护、维修和

收稿日期: 2016-11-23; 修回日期: 2017-06-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71501086).

作者简介: 李蕊(1993—), 女, 硕士, 从事排队论与网络优化的研究; 刘文奇(1965—), 男, 教授, 从事数据质量控制、决策分析等研究.

†通讯作者. E-mail: zhaoning@kmust.edu.cn

缓冲区阈值的联合优化,利用遗传算法实现生产系统的最小成本.邵健一等^[9]对串行生产系统中不同种类的设备进行预防性维护建模,提出了一种基于产能约束资源的设备预防性机会维护的建模方法.Zhou等^[10]针对有限缓冲区的恶化系统提出了预防性维护和缓冲区的联合优化算法.然而,以上文献均未考虑工件在缓冲区中的等待时间.

在很多实际生产系统中,工件在缓冲区的等待时间对产品质量有很大影响,如半导体行业、化工、食品和钢铁生产行业等.Tu等^[11]提出了晶片生产的工作时间如果超过队列时间约束,晶片则会被报废.Kim等^[12]指出,化学气体在低压沉淀的过程中,若每步超过20s,晶片表面则会恶化,需要报废处理.Yang等^[13]在钢铁生产中发现了类似的问题.Wu等^[14]研究了缓冲区有限、服务时间无交集的串联排队系统,并通过引入虚拟干扰得到了排队时间的近似估计模型.Wu等^[15]研究了排队时间有限的串联排队系统,并讨论了系统缓冲区的优化问题.杨善林等^[16]研究了时变条件下带时间窗的车辆调度问题,并利用模拟退火算法求得最优路径.Min等^[17]指出,对于变质性物品,顾客的最长等待时间是一个重要约束,并得到了相应的库存模型.

为了确保产品质量,工件在缓冲区的等待时间有限制,并且为了提高系统的可靠性,减少相应的运作成本,生产者通常会对设备进行预防性维护或维修.本文综合考虑工件有等待时限,且上、下游设备进行维修和预防性维护的串行生产系统,分析系统的成本和最优缓冲区阈值,在Wu等^[15]研究工作的基础上考虑了系统的预防性维护对缓冲区阈值的影响.

首先介绍等待时间有限的串行生产系统,对系统进行分析,主要包括设备的预防性维护分析、设备故障导致的产能损失分析和返工分析;然后建立成本函数模型,得到最优控制策略;最后通过数值计算表明,利用成本函数的分析模型能够确定最优缓冲区阈值,从而有效降低运行成本.

1 系统描述

本文研究等待时间有限的串行生产系统,如图1所示.系统由两台设备和存放半成品的缓冲区组成,每台设备每次只能加工一个工件,设备1和设备2的服务时间分别为 s_1 和 s_2 ,不失一般性,假设 $s_1 < s_2$.半成品在缓冲区的等待时限为 t_c ($t_c > 0$),如果半成品在缓冲区的等待时间超过 t_c ,则半成品需要返回设备1进行再加工.为了避免半成品在缓冲区的等待时间太长,生产者通常设定一个缓冲区阈值 l_2 .当缓

冲区内的半成品数达到 l_2 时,设备1停止加工工件;当缓冲区内半成品数小于 l_2 时,设备1继续加工工件.

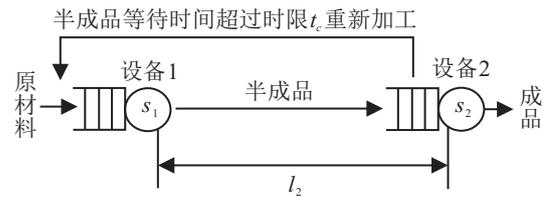


图1 等待时间有限的串行生产系统

为了延长设备使用寿命,每当设备 i 正常运行 M_i 后,生产者对设备进行一次预防性维护,维护时间为 m_i ;设备 i 维护期间,另一设备能够正常运行($i = 1, 2$).另外,在系统运行过程中设备会随机发生故障,若设备 i 正常运行 B_i 后发生故障,则立刻对设备 i 进行维修,维修时间为 R_i ($i = 1, 2$).假设维护或维修后的设备能够恢复为正常运行状态.

如果缓冲区阈值 l_2 较小,则对设备1的维护或维修会导致设备2缺货,从而引起系统产能损失;如果 l_2 较大,则对设备2的维护或维修会导致缓冲区中的半成品等待时间超过 t_c ,从而发生半成品的返工.一个合理的缓冲区阈值 l_2 应该综合考虑预防性维护成本、返工成本和产能损失成本,使单位时间系统的总成本最小.

为便于分析,给出如下符号说明:

t_c : 半成品在缓冲区的等待时间阈值(常数);

l_2 : 缓冲区阈值(常数);

s_i : 设备 i 的服务时间(常数), $i = 1, 2$;

B_i : 设备 i 在发生故障之前的正常运行时间, $E(B_i) = b_i$, $i = 1, 2$;

R_i : 设备 i 的修理时间, $E(R_i) = r_i$, $i = 1, 2$;

M_i : 设备 i 进行预防性维护之前的正常运行时间(常数), $i = 1, 2$;

m_i : 设备 i 的维护时间(常数), $i = 1, 2$;

P_2 : 设备2正常工作的概率;

c_r : 单位时间返工成本;

c_s : 单位时间缺货成本;

c_{m_i} : 设备 i 进行预防性维护的单位时间成本, $i = 1, 2$.

2 系统分析

本节分别对系统的预防性维护成本、产能损失成本和返工成本进行分析.设备 i 的预防性维护和维修是随机发生的,假设在 t_0 时刻设备 i 开始正常运行,若在 $t_0 + M_i$ 时刻之前,设备 i 发生故障,即 $B_i < M_i$,则需要对设备 i 进行修理,如图2所示.反之,如果在 $t_0 + M_i$ 时刻,设备 i 没有发生故障,则需要对设备 i 进

进行预防性维护,如图3所示($i = 1, 2$). 因此,设备*i*进行预防性维护的概率为 $P(B_i > M_i)$,设备*i*发生故障进行维修的概率为 $P(B_i < M_i)$.

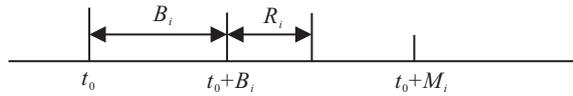


图2 设备*i*进行修理

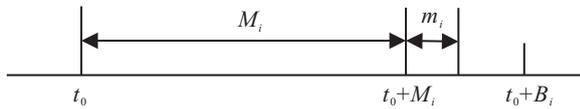


图3 设备*i*进行预防性维护

2.1 产能损失分析

如果设备1发生故障,当设备2将缓冲区库存的工件加工完时,设备1仍然在修理,即设备1的修理时间 R_1 大于 l_2s_2 ,则系统产能损失. 关于产能损失的分析如图4所示. 在图4中,设备1在 t_0 时刻开始正常运行,经过 B_1 时长($B_1 \leq M_1$),设备1在 t_1 时刻发生故障,在 t_3 时刻设备1修理完成,恢复到正常状态并开始工作,再经过 s_1 时长,即在 t_4 时刻设备1恢复正常后加工出第1个半成品. 假设设备1发生故障时,缓冲区有 l_2 个半成品在排队等待,设备2正常运行. 若 $R_1 + s_1 \geq l_2s_2$,则设备2在 $t_2 \sim t_4$ 时刻的时间间隔内处于缺货状态,缺货时间为 $T_l = R_1 + s_1 - l_2s_2$.

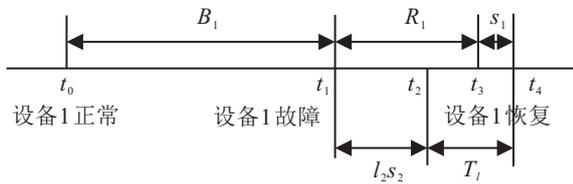


图4 产能损失分析图

在设备1的一个修理周期内,即 $B_1 + R_1$,设备1故障导致设备2的缺货时间为

$$T_l = \begin{cases} 0, & 0 \leq R_1 \leq l_2s_2 - s_1; \\ R_1 + s_1 - l_2s_2, & l_2s_2 - s_1 < R_1. \end{cases}$$

由于在设备1的一个维修周期内,设备2可能发生故障需进行修理,也可能进行预防性维护,而设备在修理期间和预防性维护期间,设备2停止工作,设备2正常工作的概率为

$$P_2 = P(B_2 \leq M_2) \frac{B_2}{B_2 + R_2} + P(B_2 > M_2) \frac{M_2}{M_2 + m_2}.$$

在设备1的一个修理周期 $B_1 + R_1$ 内,设备1故障导致系统产能损失时间为 $T_l P_2$,则单位时间的平均产能损失成本为

$$C_1 = P(B_1 \leq M_1) c_s \frac{E[T_l P_2]}{E[B_1 + R_1]}. \quad (1)$$

2.2 返工分析

如果设备2发生故障,则缓冲区中的半成品会由于等待时间过长导致返工,返工分析如图5所示. 图5中,设备2在 t_0 时刻开始正常运行,经过 B_2 时长($B_2 \leq M_2$),设备2在 t_1 时刻发生故障,在 t_2 时刻设备2修理完成,恢复到正常状态并开始工作. 假设设备2发生故障时,缓冲区中有 l_2 个半成品在排队等待. 缓冲区中的半成品至少等待 R_2 时长,才能被设备2加工. 若 $R_2 + l_2s_2 \leq t_c$,则缓冲区中的半成品在 t_4 时刻可被设备2全部加工完成. 若缓冲区的半成品等待时间超过 t_c ,则半成品需要返工. 若 $R_2 + l_2s_2 > t_c$,则在 $t_3 \sim t_4$ 时刻的时间间隔,缓冲区中的半成品存在返工. 若 $R_2 \geq t_c$,则缓冲区 l_2 个半成品全部返工,总的返工时间为 $T_r = l_2s_2$;若 $0 < R_2 + l_2s_2 - t_c < l_2s_2$,则缓冲区中部分半成品返工,总的返工时间为 $T_r = R_2 + l_2s_2 - t_c$.

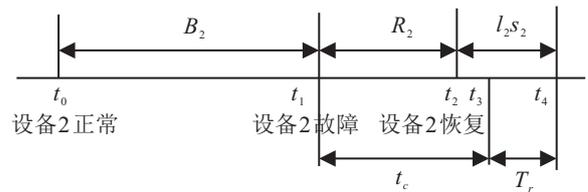


图5 返工分析图

在设备2的一个修理周期 $B_2 + R_2$ 内,设备2故障导致缓冲区中半成品返工的总时间为

$$T_r = \begin{cases} 0, & R_2 + l_2s_2 - t_c \leq 0; \\ R_2 + l_2s_2 - t_c, & 0 < R_2 + l_2s_2 - t_c < l_2s_2; \\ l_2s_2, & R_2 \geq t_c. \end{cases}$$

单位时间的平均返工成本为

$$C_2 = P(B_2 \leq M_2) c_r \frac{E[T_r]}{E[B_2 + R_2]}. \quad (2)$$

2.3 预防性维护分析

通常预防性维护时间是可控的,本文假设设备*i*预防性维护期间,另一个设备能够正常加工工件,不会发生半成品返工和设备2缺货的现象($i = 1, 2$). 预防性维护的时间 m_1 和 m_2 分别满足 $0 < m_1 \leq l_2s_2 - s_1$ 和 $0 < m_2 \leq t_c - l_2s_2$.

设备*i*的维护周期为 $M_i + m_i$,每个维护周期内设备*i*单位时间的维护成本为 $c_{m_i} \frac{m_i}{M_i + m_i}$ ($i = 1, 2$). 系统单位时间的平均维护成本为

$$C_3 = P(B_1 > M_1) c_{m_1} \frac{m_1}{M_1 + m_1} + P(B_2 > M_2) c_{m_2} \frac{m_2}{M_2 + m_2}. \quad (3)$$

3 控制策略

单位时间系统的总成本由设备的预防性维护成本、设备1发生故障导致的产能损失成本和设备2发生故障导致的返工成本组成,即

$$TC(l_2) = C_1 + C_2 + C_3.$$

系统的最小化成本模型为

$$\begin{aligned} \min \quad & TC(l_2), \\ \text{s.t.} \quad & \frac{m_1 + s_1}{s_2} \leq l_2 \leq \frac{t_c - m_2}{s_2}. \end{aligned}$$

假设 B_i 服从均值为 b_i 的指数分布, 概率密度函数为

$$f_{B_i}(x) = \frac{e^{-x/b_i}}{b_i}, \quad i = 1, 2.$$

R_i 服从均值为 r_i 的指数分布, 概率密度函数为

$$f_{R_i}(x) = \frac{e^{-x/r_i}}{r_i}, \quad i = 1, 2.$$

则有

$$\begin{aligned} C_1 &= P(B_1 \leq M_1) c_s \frac{E[T_1 P_2]}{E[B_1 + R_1]} = \\ &P(B_1 \leq M_1) c_s \frac{E[T_1]}{E[B_1 + R_1]} E[P_2] = \\ &P(B_1 \leq M_1) c_s \left[P(B_2 > M_2) \frac{M_2}{M_2 + m_2} + \right. \\ &\left. P(B_2 \leq M_2) \frac{b_2}{b_2 + r_2} \right] \times \\ &\frac{\int_{l_2 s_2 - s_1}^{+\infty} E[R_1 + s_1 - l_2 s_2 | R_1 = x] f_{R_1}(x) dx}{b_1 + r_1} = \\ &(1 - e^{-M_1/b_1}) c_s \times \\ &\frac{\int_{l_2 s_2 - s_1}^{+\infty} (x + s_1 - l_2 s_2) f_{R_1}(x) dx}{b_1 + r_1} \times \\ &\left[e^{-M_2/b_2} \frac{M_2}{M_2 + m_2} + (1 - e^{-M_2/b_2}) \frac{b_2}{b_2 + r_2} \right] = \\ &(1 - e^{-M_1/b_1}) c_s \frac{r_1 e^{s_1 - l_2 s_2 / r_1}}{b_1 + r_1} \times \\ &\left[e^{-M_2/b_2} \frac{M_2}{M_2 + m_2} + (1 - e^{-M_2/b_2}) \frac{b_2}{b_2 + r_2} \right], \\ C_2 &= P(B_2 \leq M_2) c_r \frac{E[T_r]}{E[B_2 + R_2]} = \\ &P(B_2 \leq M_2) c_r \left(\frac{\int_{t_c}^{+\infty} l_2 s_2 f_{R_2}(x) dx}{b_2 + r_2} + \right. \\ &\left. \frac{\int_{t_c - l_2 s_2}^{t_c} E[R_2 + l_2 s_2 - t_c | R_2 = x] f_{R_2}(x) dx}{b_2 + r_2} \right) = \\ &(1 - e^{-M_2/b_2}) c_r \left(\frac{\int_{t_c}^{+\infty} l_2 s_2 f_{R_2}(x) dx}{b_2 + r_2} + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left. \frac{\int_{t_c - l_2 s_2}^{t_c} (x + l_2 s_2 - t_c) f_{R_2}(x) dx}{b_2 + r_2} \right) = \\ &(1 - e^{-M_2/b_2}) c_r \frac{r_2 e^{-t_c/r_2} (e^{l_2 s_2/r_2} - 1)}{b_2 + r_2}, \\ C_3 &= P(B_1 > M_1) c_{m_1} \frac{m_1}{M_1 + m_1} + \\ &P(B_2 > M_2) c_{m_2} \frac{m_2}{M_2 + m_2} = \\ &e^{-M_1/b_1} c_{m_1} \frac{m_1}{M_1 + m_1} + e^{-M_2/b_2} c_{m_2} \frac{m_2}{M_2 + m_2}, \end{aligned}$$

因此, 单位时间的总成本为

$$\begin{aligned} TC(l_2) &= \\ &e^{-M_1/b_1} c_{m_1} \frac{m_1}{M_1 + m_1} + e^{-M_2/b_2} c_{m_2} \frac{m_2}{M_2 + m_2} + \\ &(1 - e^{-M_2/b_2}) c_r \frac{r_2 e^{-t_c/r_2} (e^{l_2 s_2/r_2} - 1)}{b_2 + r_2} + \\ &\left[e^{-M_2/b_2} \frac{M_2}{M_2 + m_2} + (1 - e^{-M_2/b_2}) \frac{b_2}{b_2 + r_2} \right] \cdot \\ &(1 - e^{-M_1/b_1}) c_s \frac{r_1 e^{(s_1 - l_2 s_2)/r_1}}{b_1 + r_1}. \end{aligned} \tag{4}$$

由式(4)得

$$\begin{aligned} \frac{d(TC(l_2))}{dl_2} &= \\ &\frac{(1 - e^{-M_2/b_2}) c_r s_2 e^{(l_2 s_2 - t_c)/r_2}}{b_2 + r_2} - \\ &\frac{(1 - e^{-M_1/b_1}) c_s s_2 e^{(s_1 - l_2 s_2)/r_1}}{b_1 + r_1} \times \\ &\left[e^{-M_2/b_2} \frac{M_2}{M_2 + m_2} + (1 - e^{-M_2/b_2}) \frac{b_2}{b_2 + r_2} \right], \\ \frac{d^2(TC(l_2))}{dl_2^2} &= \\ &\frac{(1 - e^{-M_2/b_2}) c_r s_2^2 e^{(l_2 s_2 - t_c)/r_2}}{r_2 (b_2 + r_2)} + \\ &\frac{(1 - e^{-M_1/b_1}) c_s s_2^2 e^{(s_1 - l_2 s_2)/r_1}}{r_1 (b_1 + r_1)} \times \\ &\left[e^{-M_2/b_2} \frac{M_2}{M_2 + m_2} + (1 - e^{-M_2/b_2}) \frac{b_2}{b_2 + r_2} \right] > 0. \\ \text{令 } \frac{d(TC(l_2))}{dl_2} &= 0, \text{ 即} \\ &\frac{(1 - e^{-M_2/b_2}) c_r s_2 e^{(l_2 s_2 - t_c)/r_2}}{b_2 + r_2} - \\ &\frac{(1 - e^{-M_1/b_1}) c_s s_2 e^{(s_1 - l_2 s_2)/r_1}}{b_1 + r_1} \times \\ &\left[e^{-M_2/b_2} \frac{M_2}{M_2 + m_2} + (1 - e^{-M_2/b_2}) \frac{b_2}{b_2 + r_2} \right] = 0. \end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned} &(b_2 + r_2) (1 - e^{-M_1/b_1}) c_s e^{(s_1 - l_2 s_2)/r_1} \times \\ &\left[e^{-M_2/b_2} \frac{M_2}{M_2 + m_2} + (1 - e^{-M_2/b_2}) \frac{b_2}{b_2 + r_2} \right] = \\ &(b_1 + r_1) (1 - e^{-M_2/b_2}) c_r e^{(l_2 s_2 - t_c)/r_2}. \end{aligned}$$

两边同时取对数,得

$$\ln(1 - e^{-M_1/b_1}) + \ln[c_s(b_2 + r_2)] + \frac{s_1 - l_2 s_2}{r_1} + \ln \left[e^{-M_2/b_2} \frac{M_2}{M_2 + m_2} + (1 - e^{-M_2/b_2}) \frac{b_2}{b_2 + r_2} \right] = \ln(1 - e^{-M_2/b_2}) + \ln[c_r(b_1 + r_1)] + \frac{l_2 s_2 - t_c}{r_2}.$$

因此, l_2 的最优值为

$$l_2^* = \frac{r_1 r_2}{s_2(r_1 + r_2)} \cdot \left\{ \ln(1 - e^{-M_1/b_1}) - \ln(1 - e^{-M_2/b_2}) + \ln[c_s(b_2 + r_2)] - \ln[c_r(b_1 + r_1)] + \frac{s_1}{r_1} + \frac{t_c}{r_2} + \ln \left[e^{-M_2/b_2} \frac{M_2}{M_2 + m_2} + (1 - e^{-M_2/b_2}) \frac{b_2}{b_2 + r_2} \right] \right\}.$$

当缓冲区阈值为 l_2^* 时, 单位时间的总成本最小. 由于缓冲区阈值为整数, 若 $TC([l_2^*]) \leq TC([l_2^*] + 1)$, 则最优缓冲区阈值为 $[l_2^*]$; 反之, 最优缓冲区阈值为 $[l_2^*] + 1$.

4 数值计算

为了验证模型的可行性, 下面分别针对系统的各类成本和最优缓冲区阈值在设备2的服务时间 s_2 与半成品在缓冲区的等待时间阈值 t_c 取不同值的情况下进行数值分析. 固定 $r_1 = 5 \text{ h}$, $r_2 = 10 \text{ h}$, $b_1 = 120 \text{ h}$, $b_2 = 180 \text{ h}$, $s_1 = 0.4 \text{ h}$, $m_1 = 0.5 \text{ h}$, $m_2 = 0.5 \text{ h}$, $M_1 = 100 \text{ h}$, $M_2 = 200 \text{ h}$, $c_r = 1000 \text{ 元/h}$, $c_s = 3000 \text{ 元/h}$, $c_{m_1} = 1500 \text{ 元/h}$, $c_{m_2} = 3500 \text{ 元/h}$, 分别改变 s_2 和 t_c 的取值, 进行下一步分析.

4.1 关于 s_2 的数值算例

令 $t_c = 20 \text{ h}$, s_2 分别取值为 0.5 h 、 0.6 h 、 0.9 h 和 1.2 h , 得到相应的各类成本和 l_2^* 如表1所示. 由表1可见, s_2 越大, 其他参数不变, 缓冲区最优阈值 l_2^* 越小.

表1 s_2 改变时 l_2^* 及各类成本

s_2	C_1	C_2	C_3	$TC(l_2)$	l_2^*
0.5	7.1027	10.3121	11.8630	29.2778	23
0.6	7.2462	10.1619	11.8630	29.2711	19
0.9	6.8242	10.6169	11.8630	29.3041	13
1.2	8.1701	9.2919	11.8630	29.3250	9

在 $t_c = 20 \text{ h}$ 的情况下, 固定 s_2 为 0.5 h , 得到各类成本与 l_2 之间的变化关系如图6所示. 由图6可见, s_2 固定的情况下, 返工成本是 l_2 的单调增函数, 产能损失成本是 l_2 的单调减函数, 预防性维护成本不变, 总成本关于 l_2 是下凸的, 存在最优缓冲区阈值使单位时

间总成本最小.

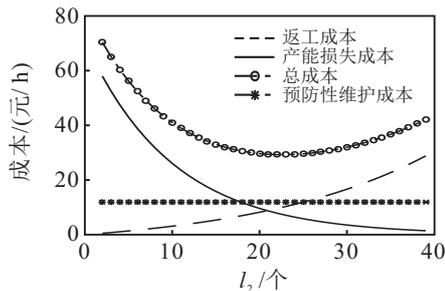


图6 成本分析曲线图 ($s_2 = 0.5 \text{ h}$)

4.2 关于 t_c 的数值算例

令 $s_2 = 0.5 \text{ h}$, t_c 分别取值为 30 h 、 40 h 、 80 h 、 100 h 时, 得到相应的各类成本和 l_2^* 如表2所示. 由表2可见, t_c 越大, 其他参数不变, 缓冲区最优阈值 l_2^* 越大.

表2 t_c 改变时 l_2^* 及各类成本

t_c	C_1	C_2	C_3	$TC(l_2)$	l_2^*
30	3.8981	5.7358	11.8630	21.4969	29
40	1.9357	3.2653	11.8630	17.0640	36
80	0.1301	0.2645	11.8630	12.2576	63
100	0.0355	0.0700	11.8630	11.9685	76

在 $s_2 = 0.5 \text{ h}$ 的情况下, 固定 t_c 为 30 h , 得到各类成本与 l_2 之间的变化关系如图7所示. 由图7可见, t_c 固定的情况下, 返工成本是 l_2 的单调增函数, 产能损失成本是 l_2 的单调减函数, 预防性维护成本不变, 总成本关于 l_2 是下凸的, 存在最优缓冲区阈值使单位时间总成本最小.

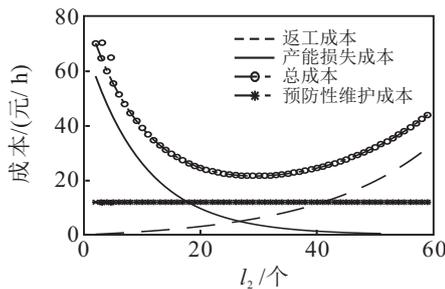


图7 成本分析曲线图 ($t_c = 30 \text{ h}$)

5 结论

本文在考虑两个设备进行预防性维护的前提下, 针对等待时间有限的串行生产系统, 分析了两个设备发生故障对工件生产的影响, 并建立了包括预防性维护成本、返工成本和产能损失成本的单位时间成本函数, 通过此函数得到最优缓冲区阈值, 从而实现单位时间总成本最小化. 数值计算结果进一步表明, 利用成本函数的分析模型能够确定最优缓冲区阈值, 从而有效地降低运行成本.

参考文献(References)

- [1] Dimitrakos T D, Kyriakidis E G. A semi-Markov decision algorithm for the maintenance of a production system with buffer capacity and continuous repair times[J]. *Int J of Production Economics*, 2008, 111(2): 752-762.
- [2] Pavitsos A, Kyriakidis E G. Markov decision models for the optimal maintenance of a production unit with an upstream buffer[J]. *Computers and Operational Research*, 2009, 36(6): 1993-2006.
- [3] Karamatsoukis C C, Kyriakidis E G. Optimal maintenance of two stochastically deteriorating machines with an intermediate buffer[J]. *European J of Operational Research*, 2010, 207(1): 297-308.
- [4] Dehayem Nodem F I, Kenne J P, Gharbi A. Simultaneous control of production repair replacement and preventive maintenance of deteriorating manufacturing systems[J]. *Int J of Production Economics*, 2011, 134(1): 271-282.
- [5] 甘婕, 曾建潮. 考虑劣化状态的单机调度与维修决策集成模型[J]. *控制与决策*, 2016, 31(3): 513-520.
(Gan J, Zeng J C. Integrated model of single-machine scheduling and maintenance decision for degrading state systems[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(3): 513-520.)
- [6] 周炳海, 高忠顺. 带缓冲区的设备预防性维护优化建模[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(2): 364-368.
(Zhou B H, Gao Z S. Equipment preventive maintenance optimal modeling with buffers[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(2): 364-368.)
- [7] Cheng G Q, Zhou B H, Li L. Joint optimisation of buffer size and preventive maintenance for a deteriorating upstream machine[J]. *Int J of Systems Science: Operations and Logistics*, 2015, 2(4): 199-210.
- [8] Gan S Y, Zhang Z S, Zhou Y F, et al. Joint optimization of maintenance, buffer, and spare parts for a production system[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(19): 6032-6042.
- [9] 邵健一, 周炳海. 基于CCR的串行生产系统机会维护建模方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(5): 1051-1057.
(Shao J Y, Zhou B H. Opportunistic maintenance modeling method for series production system based on capacity constraint resource[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(5): 1051-1057.)
- [10] Zhou B H, Liu Z L. Optimizing preventive maintenance: A deteriorating system with buffers[J]. *Industrial Management and Data Systems*, 2016, 116(8): 1719-1740.
- [11] Tu Y M, Chen H N. Capacity planning with sequential time constraints under various control policies in the back-end of wafer fabrications[J]. *J of the Operational Research Society*, 2009, 61(8): 1258-1264.
- [12] Kim J H, Lee T E, Lee H Y, et al. Scheduling analysis of time-constrained dual-armed cluster tools[J]. *IEEE Trans on Semiconductor Manufacturing*, 2003, 16(3): 521-534.
- [13] Yang D L, Chen M S. A two-machine flowshop sequencing problem with limited waiting time constraints[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 1995, 28(1): 63-70.
- [14] Wu K, Zhao N. Analysis of dual tandem queues with a finite buffer capacity and non-overlapping service times and subject to breakdowns[J]. *IIE Trans*, 2015, 47(12): 1329-1341.
- [15] Wu K, Zhao N, Gao L, et al. Production control policy for tandem workstations with constant service times and queue time constraints[J]. *Int J of Production Research*, 2016, 54(21): 6302-6316.
- [16] 杨善林, 马华伟, 顾铁军. 时变条件下带时间窗车辆调度问题的模拟退火算法[J]. *运筹学学报*, 2010, 14(3): 83-90.
(Yang S L, Ma H W, Gu T J. Simulated annealing algorithm for vehicle routing problem with time window under time-dependent[J]. *OR Trans*, 2010, 14(3): 83-90.)
- [17] Min J, Zhou Y W, Zhao J. An inventory model for perishable items with maximum customer waiting time under inflation[J]. *Mathematica Application*, 2007, 20(4): 688-696.

(责任编辑: 郑晓蕾)