

考虑多缓冲库存情景的生产系统预防维护研究

刘勤明¹, 梅嘉健¹, 叶春明¹, 董 明²

(1. 上海理工大学管理学院, 上海 200093;

2. 上海交通大学安泰经济与管理学院, 上海 200240)

摘要: 针对 2M1B 生产系统由于发生故障将造成生产停滞, 增加短缺成本的问题, 构建了多情景模式下考虑产品次品率的预防维护模型. 分析缓冲区库存变化的轨迹, 确定不同的缓冲区库存情景模式, 构建生产周期内不同情景下缓冲区库存持有成本模型. 以预防性维护时的次品率阈值水平, 建立缓冲区库存时次品率的阈值水平和缓冲区库存量大小为决策变量, 以生产周期内单位时间总费用最小作为目标建立生产系统预防维护模型, 总费用包括预防性维护费用、库存持有费用、返工费用、短缺费用以及保修维修费用. 运用离散迭代算法对模型进行优化求解, 通过数值算例验证了所提出模型的适用性与有效性.

关键词: 生产系统; 缓冲区库存; 保修服务; 次品率; 预防维护

中图分类号: TB472; F273.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2020)06-0782-14

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2020.06.006

Research on preventive maintenance of production system considering multi-buffer inventory situation

Liu Qinming¹, Mei Jiajian¹, Ye Chunming¹, Dong Ming²

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Antai College of Economics & Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper proposes a preventive maintenance model under multi-scenario modes to solve the problem of production stagnation and shortage cost caused by the failure of 2M1B production system. This paper analyzes the buffer inventory change track, determines different scenario mode, and develops the buffer inventory holding cost models under different scenarios in the production cycle. Considering the rate threshold level of defective rates during preventive maintenance, a preventive maintenance model with the threshold level of defective rates when establishing the buffer inventory and the size of the buffer inventory as decision variables, and with the minimum total cost per unit time in the production cycle as the objective, is presented. The total cost includes preventive maintenance cost, inventory holding cost, rework cost, shortage cost and warranty maintenance cost. The discrete iterative algorithm is used to solve the model, and a numerical example illustrates the practicality and effectiveness of the proposed model.

Key words: production system; buffer inventory; warranty service; defective rate; preventive maintenance

收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2020-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71632008; 71840003; 71471116); 上海市自然科学基金资助项目(19ZR1435600); 教育部人文社会科学研究规划基金资助项目(20YJAZH068).

1 引言

科学技术的快速发展,经济全球化的影响以及市场竞争日益激烈,给生产者带来了巨大的压力. 在日常生活中消费者在购买产品前,总是会对多家同类产品进行选择比较,而由于厂家生产同类商品时所用的设备和技术几乎相同,因此根据与产品相关的特征,例如价格、产品的功能等因素,消费者很难做出选择. 尤其是产品越来越复杂,消费者很难判定产品质量的优劣. 而保修服务不仅能够提示产品质量信息,还保障了消费者的利益,已成为产品选择的重要依据. 因此,保修服务目前已成为市场竞争的重要工具. 现代制造业的生产制造系统朝着柔性化、高速化、大型化、自动化、精密化、智能化和集成化发展,生产设备发生故障带来的损失越来越大. 因此,通过考虑保修服务采取有效的设备维修保养策略来确保生产系统稳定、可靠运行,越来越受到现代制造企业的重视.

随着现代化生产的迅速发展,其对设备的可靠性和利用率提出了更高的要求,设备维护策略和产品保修一直是业内关注的热点. 因此,本文在设备维护策略和产品保修现有研究成果的基础上,针对现有研究的不足,对基于产品保修的预防性维护策略展开深入研究,旨在确定最佳缓冲区库存和生产系统的次品率,并根据所得结果制定合理的预防性维护策略,以降低设备故障率和生产成本、提高生产效率.

针对生产系统的维护,国内外的相关学者都进行了大量研究,提出了新的理论依据和决策方法,对今后的研究起到了重要的指导意义. 例如 Christer^[1]提出的时间延迟模型克服了许多维修模型存在的假定条件与实际条件不符而无法应用的问题. 之后, Wang^[2]考虑了生产中设备因缺陷而延迟形成故障,导致产品质量发生劣化的过程,而提出对设备进行定期重大的维护策略,目的是优化检查间隔. 在此基础上, Taghipour 等^[3]提出了机会维护的最优检查间隔模型. 特别地, Wijngaard^[4]首次提出了缓冲区库存,其后带有缓冲区的设备也得到了不同程度的研究^[5,6]. 考虑到现实生活中并非所有预防维修活动都是周期性活动, Nourelfath 等研究了单一串联生产系统的整合优化问题^[7]. Fitouhi 等^[8]又将理论应用于串并联混合设备的生产系统中. 周瑜等^[9]提出了设备的维修外包服务,在考虑不同故障的维修费用和保修服务差异基础上,给出了两种不同维修外包策略. 刘乐^[10]利用动态规划技术和两种不同的外包工件集决策方式,解决了生产重调度问题,考虑了维护和质量因素. 在后续的研究中,文献[11–16]将生产计划与设备维护策略进行联合优化研究,并且在设备维护过程中,考虑了产品的质量.

上述研究表明,设备的状态在控制缓冲区库存或者批量大小方面起着关键的作用,设备的状态也在控制产品质量方面发挥重要作用. 但是,由于预防性维护的时间间隔往往是确定的,而对缓冲区库存的状态并不关心,这就可能会出现缓冲区库存不足的情况下仍坚持进行预防性维护,而预防性维护过程中,也没有考虑产品的次品率,也就是保修服务,将会出现缺货现象,产生额外的缺货费. 目前,对带缓冲区设备的预防性维修研究几乎忽略了这一点.

基于上述问题,本文对不同缓冲库存情境下考虑保修服务的生产系统的预防性维护策略展开了深入研究. 首先,分析缓冲区库存变化的轨迹,确定不同的缓冲区库存情景模式,分别构建生产周期内缓冲区库存持有成本模型. 其次,根据次品率与进行预防维护时次品率阈值水平的关系,判断是否执行维护行动. 为了确保生产系统停止进行维护操作时仍持续满足生产需求,一旦发现次品率达到阈值水平,则建立生产系统的缓冲区库存量. 最后,采取预防性维护时的次品率阈值、建立缓冲区库存时次品率的阈值水平和缓冲区库存量大小为决策变量,将生产周期内单位时间总费用最小化作为目标函数建立预防维护模型,总费用包括预防维护费用、库存持有费用、返工费用、短缺费用以及保修维修费用. 利用具体数值进行算例分析验证所建模型的可行性与有效性. 通过将预防性维护计划与产品保修相结合,确定最佳的缓冲区库存和次品率阈值,综合考虑随机故障对企业设备预防维护费用、库存持有费用、返工费用和保修维修费用等方面的不利影响,有利于研究科学、合理和有效的生产系统预防性维护策略并制订预防性维护计划.

2 问题描述与符号说明

本文研究 2M1B 生产系统因受到劣化过程的影响而产生合格品和次品的问题. 该系统产生的所有次品都将在并行系统立即进行重新返工, 并以与合格产品相同的价格出售. 为确定次品的数量, 生产系统的每个生产批次都将进行产品质量控制. 根据观察到的次品率 l , 来决定生产系统是否执行维护行动. 如图 1 所示, 如果发现次品率 l 高于某个阈值 l_b 并且低于最大值 1 ($l_b < l < 1$), 则停止设备, 并进行预防性维护; 如果发现 l 在最小级别 l_0 和 l_b 之间 ($l_0 < l \leq l_b$), 则不执行任何操作. 生产系统的设备执行预防性维护后, 系统的状态将恢复如新, l_b 再次从 0 开始.

假设设备执行一次维护操作后能保证在下一次维护操作之前系统故障率大约为 0 (如图 2), 为了确保系统停止进行维护工作时仍持续满足生产需求, 一旦发现 l 达到次品率阈值 l_a , 就建立 h 单位的缓冲区库存量, 并且, 缓冲区库存量每次完全更新消耗, 图 2 中符号说明见表 1.

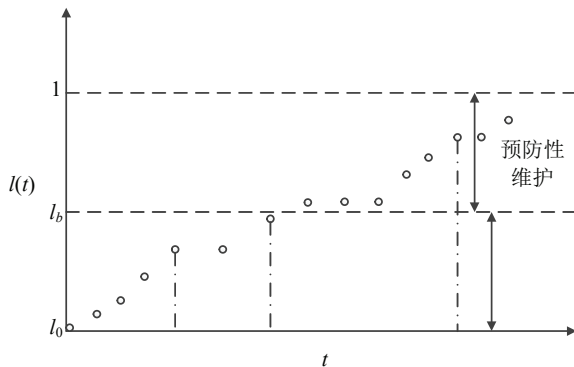


图 1 次品率的演变

Fig. 1 The evolution of the defective rate

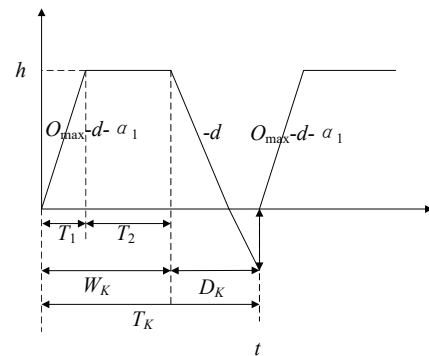


图 2 缓冲区库存的演变

Fig. 2 Evolution of buffer stocks

表 1 符号说明

Table 1 Symbol description

符号	含义	符号	含义
C_h	单位产品的库存持有费	l_a	建立缓冲区库存时次品率的阈值水平
C_s	单位产品的短缺费用	$f_P(t)$	与预防性维护行动持续时间相关的概率密度函数
C_q	单位次品的返工费用	$f_D(x)$	发生缓冲库存短缺的概率
C_r	单位产品最低维修保修费用	$P(l)$	与次品率 l 相关的概率分布函数.
C_P	单位时间预防维护费用		假设是由 0 作为最小值和 1 为最大值的连续分布函数
T_k	库存周期	$h_1(x)$	合格产品的故障率函数
W_k	生产系统在库存周期 T_k 内运行的时间	$h_2(x)$	次品的故障率函数
D_k	由于维护而导致生产系统服务中断的时间	μ_P	预防性维护的平均持续时间
w	保修期	$O_{\max}$	最大生产率
h	缓冲区库存量的大小	$\Gamma(h, l_b, l_a)$	单位时间内的总费用
TQ_i	情景 i 下的单位时间返工费用, $i = 1, 2, 3$	Γ_i	情景 i 下的单位时间总费用, $i = 1, 2, 3$
TC_i	情景 i 下的单位时间产品总费用, $i = 1, 2, 3$ (库存持有费用, 短缺费用和保修费用)	T_1	建立缓冲区库存的时间
TP	总预防性维护费用	T_2	缓冲区库存建立后的系统运行时间
d	需求率	α_1	T_1 期间平均次品率
l_b	进行预防性维护时次品率的阈值水平	α_2	T_2 期间平均次品率

假设: 1) 所产生的次品不会重新插入生产过程, 而是在并行系统中立即进行重新加工. 2) d 随着时间的变化是确定的和恒定的. 3) 生产过程中, 与维护、质量和库存等相关的所有成本已知且不变. 4) 执行维护操

作所需的资源是充足的.

3 考虑产品保修服务的预防维护模型

生产系统的总费用包括返工费用、产品总费用和设备预防维护费用, 其中产品总费用包括库存持有费用, 保修维修费用和短缺费用. 单位时间总费用表示多缓冲库存情景下考虑产品保修服务的生产系统的生产和维护效率, 等于总费用除以生产周期的平均持续时间. 所以本文以次品率阈值水平 l_b 和 l_a , 以及缓冲区库存 h 为决策变量, 以最小化单位时间总费用为目标, 建立数学模型.

3.1 单位时间返工费用和产品费用

对于库存周期 T_k , 根据是否达到缓冲库存量 h 以及是否发生短缺, 分为达到缓冲库存水平、未达到缓冲区库存水平和未建立缓冲区库存三种情况. 图3~图7描述了在达到 h 的情况下缓冲区库存的演变, 同时考虑到是否发生缺货的两种情况.

令 M 表示生产系统开始建立缓冲库存之前的时间, 若 M 结束时, 系统的次品率达到比 l_a 更高的水平, 则 $\alpha_1 = O_{\max} \int_0^1 (1-p(l))dl$, $\alpha_2 = d \int_0^1 (1-p(l))dl \left(1 - \int_0^1 (1-p(l))dl\right)^{-1}$.

3.1.1 情景1: 达到缓冲区库存水平

情景1表示在进行维护操作之前已经达到缓冲区库存量 h . 根据是否发生短缺, 考虑以下两种可能性, 见图3和图4.

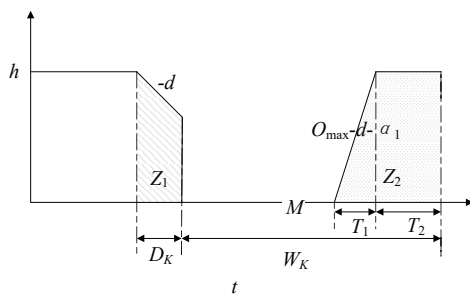


图3 不发生短缺的情况下缓冲区库存的演变

Fig. 3 The evolution of buffer stocks without shortages

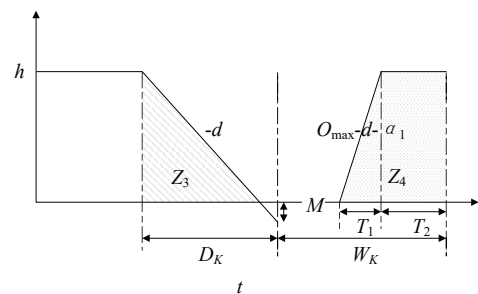


图4 发生短缺的情况下缓冲区库存的演变

Fig. 4 The evolution of buffer stocks in the event of a shortage

图3和图4分别描述了未发生短缺的情况以及发生短缺的情况下缓冲区库存的变化.

1) 情景1下的单位时间返工费用 TQ_1

在情景1下, TQ_1 与 C_q 和 W_k 期间次品的平均数有关, 因为 $T_2 = W_k - T_1$, 可得 $E[T_2] = E[W_k] - E[T_1]$, 其中 $E[T_1] = h / (O_{\max} - d - \alpha_1)$.

T_1 期间次品的平均数为 $Q_1 = \alpha_1 E[T_1]$, T_2 期间次品的平均数为 $Q_2 = \alpha_2 E[T_2]$, 则情景1的单位时间返工费用为

$$TQ_1 = \frac{C_q(Q_1 + Q_2)}{E[T_k]} = \frac{C_q}{E[T_k]} \left(\left(\alpha_1 \frac{h}{O_{\max} - d - \alpha_1} \right) + \alpha_2 \left(E[W_k] - \frac{h}{O_{\max} - d - \alpha_1} \right) \right).$$

2) 情景1下的单位时间产品总费用 TC_1

(a) 第一种情况, 未发生短缺(如图3). D_k 不超过缓冲区库存的消耗时间, 在 M 个单位时间(对应于发现次品率高于 l_a 的第一时刻)再次以 $O_{\max} - d - \alpha_1$ 的速率建立缓冲区库存.

在这种情况下, 保修期 $[0, w]$ 内产品出现故障的概率为

$$EF_1 = (1 - (Q_1 + Q_2) / Z_1) \int_0^w h_1(x) dx + (Q_1 + Q_2) / Z_2 \int_0^w h_2(x) dx.$$

所以, 产品维修保修费用为 $\text{EPF}_1 = C_r Z_2 \text{EF}_1$. 库存持有费用为 $\text{EPC}_1 = C_h (Z_1 + Z_2)$, 其中 $Z_1 = D_k h - \frac{dD_k^2}{2}$, $Z_2 = (W_k - M)h - \frac{h^2}{2(O_{\max} - d - \alpha_1)}$. 该情况下, 产品总费用为 $\delta_{\text{NS1}} = \text{EPF}_1 + \text{EPC}_1$.

(b) 第二种情况, 发生短缺(如图 4 所示).

在这种情况下, 保修期 $[0, w]$ 内产品出现故障的概率为

$$\text{EF}_2 = \left(1 - \frac{Q_1 + Q_2}{Z_4}\right) \int_0^w h_1(x) dx + \frac{Q_1 + Q_2}{Z_4} \int_0^w h_2(x) dx.$$

所以, 产品维修保修费用为 $\text{EPF}_2 = C_r Z_4 \text{EF}_2$, 库存持有费用为 $\text{EPC}_2 = C_h (Z_3 + Z_4)$, 其中 $Z_3 = h^2/(2d)$, $Z_4 = (W_k - M)h - h^2/(2(O_{\max} - d - \alpha_1))$ 短缺费用为 $\text{ESC}_1 = C_s (D_k - h/2)^2 d$. 该情况下, 产品总费用为 $\delta_{\text{WS1}} = \text{EPF}_2 + \text{EPC}_2 + \text{ESC}_1$.

考虑到以上两种情景, 情景 1 的产品总费用表示为 $\delta_{\text{S1}} = \delta_{\text{NS1}} (1 - f_D(h/d)) + \delta_{\text{WS1}} f_D(h/d)$, 其中 $f_D(h/d) = \int_{h/d}^{+\infty} f_p(x) (1 - P(l_b)) dx$.

因此

$$\begin{aligned} \delta_{\text{S1}} = & (1 - f_D(h/d)) \left\{ C_h [D_k h - dD_k^2/2 + (W_k - M)h - h^2/(2(O_{\max} - d - \alpha_1))] + \right. \\ & C_r Z_2 \left[(1 - (Q_1 + Q_2)/Z_1) \int_0^w h_1(x) dx + ((Q_1 + Q_2)/Z_2) \int_0^w h_2(x) dx \right] \Big\} + \\ & f_D(h/d) \left\{ C_h [h^2/(2d) + (W_k - M)h - h^2/(2(O_{\max} - d - \alpha_1))] + C_s (D_k - h/2)^2 d + \right. \\ & \left. C_r Z_4 \left[(1 - (Q_1 + Q_2)/Z_4) \int_0^w h_1(x) dx + ((Q_1 + Q_2)/Z_4) \int_0^w h_2(x) dx \right] \right\}. \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} \text{TC}_1 = & \frac{1}{\text{E}[T_k]} \left\{ C_h h (\text{E}[W_k] - \text{E}[M]) + C_h \int_0^{h/d} f_p(x) (1 - P(l_b)) dx \times \right. \\ & \int_{h/d}^{+\infty} (xh - \frac{dx^2}{2}) f_p(x) (1 - P(l_b)) dx + \frac{C_h h^2}{2(O_{\max} - d - \alpha_1)} \int_0^{h/d} f_p(x) (1 - P(l_b)) dx + \\ & C_r \left[\frac{2(O_{\max} - d - \alpha_1)(h\text{E}[W_k] - h\text{E}[M] - \alpha_2\text{E}[W_k]) - h(2\alpha_1 - 2\alpha_2 + h)}{2h(O_{\max} - d - \alpha_1)(\text{E}[W_k] - \text{E}[M]) - h^2} \right] \times \\ & \int_0^w h_1(x) dx + \frac{2h(\alpha_1 - \alpha_2) + 2\alpha_2\text{E}[W_k](O_{\max} - d - \alpha_1)}{2h(O_{\max} - d - \alpha_1)(\text{E}[W_k] - \text{E}[M]) - h^2} \times \\ & \int_0^w h_2(x) dx \int_0^{h/d} f_p(x) (1 - P(l_b)) dx + \\ & C_r \left(\frac{2(O_{\max} - d - \alpha_1)(h\text{E}[W_k] - h\text{E}[M] - \alpha_2\text{E}[W_k]) - h(2\alpha_1 - 2\alpha_2 + h)}{2h(O_{\max} - d - \alpha_1)(\text{E}[W_k] - \text{E}[M]) - h^2} \right) \int_0^w h_1(x) dx + \\ & \frac{2h(\alpha_1 - \alpha_2) + 2\alpha_2\text{E}[W_k](O_{\max} - d - \alpha_1)}{2h(O_{\max} - d - \alpha_1)(\text{E}[W_k] - \text{E}[M]) - h^2} \int_0^w h_2(x) dx \int_{h/d}^{+\infty} f_p(x) (1 - P(l_b)) dx + \\ & \left. C_s \int_0^{h/d} f_p(x) (1 - P(l_b)) dx \int_{h/d}^{+\infty} (dx - h) f_p(x) (1 - P(l_b)) dx \right\}. \end{aligned}$$

3.1.2 情景 2: 未达到缓冲区库存水平

在情景 2, 表示因为设备停止, 缓冲区库存没有达到 h , 仅仅达到了 h^* . 根据是否发生短缺, 同样考虑未发生短缺以及发生短缺两种情况下缓冲区库存的变化, 见图 5 和图 6.

1) 情景 2 下的单位时间返工费用 TQ_2

由于缓冲区库存没能达到 h , T_2 为 0, 次品在 T_1^* 期间产生, 即 $\text{E}[T_1^*] = \frac{h^*}{O_{\max} - d - \alpha_1}$, T_1^* 期间次品的平均数为 $Q_3 = \alpha_1 \text{E}[T_1^*]$.

单位时间返工费用为 $\text{TQ}_2 = \frac{C_q Q_3}{\text{E}[T_k]} = \frac{C_q}{\text{E}[T_k]} \left(\alpha_1 \frac{h^*}{O_{\max} - d - \alpha_1} \right)$.

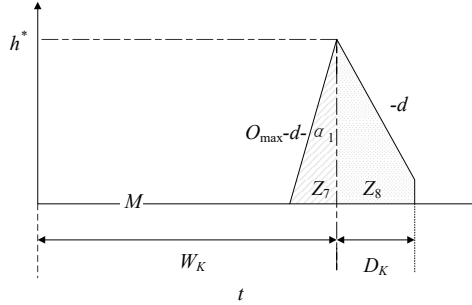
2) 情景2下的单位时间产品总费用 TC_2 (a) 第一种情况: 未发生短缺(如图5), D_k 不超过缓冲区库存的消耗时间.

图5 不发生短缺的情况下缓冲区库存的演变

Fig. 5 The evolution of buffer stocks without shortages

在这种情况下, 保修期 $[0, w]$ 内产品出现故障的概率为 $EF_3 = \left(1 - \frac{Q_3}{Z_5}\right) \int_0^w h_1(x)dx + \frac{Q_3}{Z_5} \int_0^w h_2(x)dx$.

所以, 产品保修维修费用为 $EPF_3 = C_r Z_5 \left(\left(1 - \frac{Q_3}{Z_5}\right) \int_0^w h_1(x)dx + \frac{Q_3}{Z_5} \int_0^w h_2(x)dx \right)$.

库存持有费用为 $EPC_3 = C_h(Z_5 + Z_6)$, 其中 $Z_5 = \frac{1}{2}(W_k - M)h^*$, $Z_6 = h^*D_k - \frac{1}{2}dD_k^2$, $h^* = (O_{\max} - d - \alpha_1) - (E[W_k] - E[M])$.

该情况下, 产品总费用为

$$\delta_{NS2} = EPF_3 + EHC_3 = C_r Z_5 \left(\left(1 - \frac{Q_3}{Z_5}\right) \int_0^w h_1(x)dx + \frac{Q_3}{Z_5} \int_0^w h_2(x)dx \right) + C_h \left(h^* D_k - \frac{1}{2} d D_k^2 + \frac{1}{2} (W_k - M) h^* \right).$$

(b) 第二种情况, 发生短缺(如图6所示).

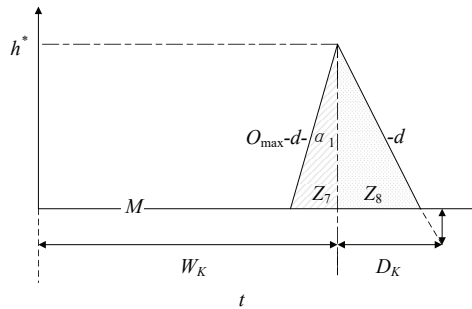


图6 发生短缺的情况下缓冲区库存的演变

Fig. 6 The evolution of buffer stocks in the event of a shortage

在这种情况下, 保修期 $[0, w]$ 内产品出现故障的概率为 $EF_4 = \left(1 - \frac{Q_3}{Z_7}\right) \int_0^w h_1(x)dx + \frac{Q_3}{Z_7} \int_0^w h_2(x)dx$,

所以, 产品保修维修费用为 $EPF_4 = C_r Z_7 \left(\left(1 - \frac{Q_3}{Z_7}\right) \int_0^w h_1(x)dx + \frac{Q_3}{Z_7} \int_0^w h_2(x)dx \right)$. 库存持有费用

为 $EPC_4 = C_h(Z_7 + Z_8)$, 其中 $Z_7 = \frac{1}{2}(W_k - M)h^*$, $Z_8 = \frac{1}{2} \frac{h^*}{d} h^*$, 短缺费用为 $ESC_2 = C_s(D_k - h^*/d)^2 d$,

该情况下, 产品总费用为

$$\delta_{NS2} = EPF_4 + EPC_4 + ESC_2 = C_h \left(\frac{1}{2} \frac{h^*}{d} h^* + \frac{1}{2} (W_k - M) h^* \right) + C_s (D_k - h^*/d)^2 d + C_r Z_7 \left(\left(1 - \frac{Q_3}{Z_7}\right) \int_0^w h_1(x)dx + \frac{Q_3}{Z_7} \int_0^w h_2(x)dx \right).$$

考虑到以上两种情况, 情景2的产品总费用为 $\delta_{S2} = \delta_{NS2} \left(1 - f_D \left(\frac{h^*}{d}\right)\right) + \delta_{WS2} f_D \left(\frac{h^*}{d}\right)$, 其中 $f_D \left(\frac{h^*}{d}\right) = \int_{h^*/d}^{+\infty} f_p(x)(1 - P(l_b))dx$.

因此,

$$\begin{aligned} \delta_{S2} = & (1 - f_D(h^*/d)) \left\{ C_h [D_k h^* - d D_k^2/2 + (W_k - M)h^*/2] + \right. \\ & C_r Z_5 \left[(1 - Q_3/Z_5) \int_0^w h_1(x)dx + (Q_3/Z_5) \int_0^w h_2(x)dx \right] \left. \right\} + \\ & f_D(h^*/d) \left\{ C_h [h^*2/(2d) + (W_k - M)h^*/2] + C_s (D_k - h^*/d)^2 d + \right. \\ & C_r Z_7 \left[(1 - Q_3/Z_7) \int_0^w h_1(x)dx + (Q_3/Z_7) \int_0^w h_2(x)dx \right] \left. \right\}. \end{aligned}$$

情景2下的单位时间产品总费用

$$\begin{aligned} TC_2 = & \frac{1}{E[T_k]} \left\{ C_h \frac{h^*}{2} (E[W_k] - E[M]) + C_h \int_0^{h^*/d} f_p(x)(1 - P(l_b))dx \right. \\ & \int_{h^*/d}^{+\infty} \left(xh^* - \frac{dx^2}{2} \right) f_p(x)[1 - P(l_b)]dx + \frac{C_h(h^*)^2}{2d} \int_0^{h^*/d} f_p(x)(1 - P(l_b))dx + \\ & C_r h^* \left(\frac{(O_{\max} - d - \alpha_1)(E[W_k] - hE[M] - \alpha_2 E[W_k]) - 2\alpha_1}{2(O_{\max} - d - \alpha_1)(E[W_k] - E[M])} \right) \int_0^w h_1(x)dx + \\ & \frac{\alpha_1}{(O_{\max} - d - \alpha_1)(E[W_k] - E[M])} \int_0^w h_2(x)dx \int_0^{h^*/d} f_p(x)(1 - P(l_b))dx + \\ & C_r h^* \left[\left(\frac{(O_{\max} - d - \alpha_1)(E[W_k] - hE[M] - \alpha_2 E[W_k]) - 2\alpha_1}{2(O_{\max} - d - \alpha_1)(E[W_k] - E[M])} \right) \int_0^w h_1(x)dx + \right. \\ & \frac{\alpha_1}{(O_{\max} - d - \alpha_1)(E[W_k] - E[M])} \int_0^w h_2(x)dx \left. \right] \int_{h^*/d}^{+\infty} f_p(x)(1 - P(l_b))dx + \\ & C_s \int_0^{h^*/d} f_p(x)(1 - P(l_b))dx \int_{h^*/d}^{+\infty} (dx - h^*)f_p(x)(1 - P(l_b))dx \left. \right\}. \end{aligned}$$

3.1.3 情景3: 未建立缓冲区库存

情景2表示由于次品率突然变化很大, 以致没能建立缓冲区库存, 如图7所示. 在这种情况下, 只计算短缺费用.

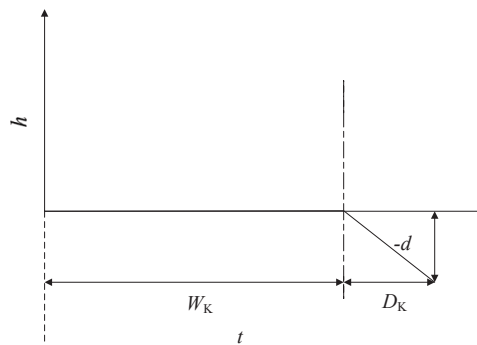


图7 未建立缓冲库存的情况下生产周期的演变

Fig. 7 Evolution of the production cycle without the establishment of buffer stocks

1) 情景3下的单位时间返工费用 TQ_3

对于这种情况, 设备只生产满足需求的数量, 这时次品的平均数量为 $Q_4 = \alpha_2 E[W_k]$. 单位时间返工费用为 $TQ_3 = \frac{R_q Q_4}{E[T_k]} = \frac{R_q}{E[T_k]} (\alpha_2 E[W_k])$.

2) 情景3下的单位时间产品总费用 TC_3

在情景3下, 保修期 $[0, w]$ 内产品出现故障的概率为

$$EF_5 = \left(1 - \frac{Q_4}{E[W_k]}\right) \int_0^w h_1(x) dx + \frac{Q_4}{E[W_k]} \int_0^w h_2(x) dx,$$

所以, 产品维修保修费用为

$$EPF_5 = C_r E[W_k] d \left(\left(1 - \frac{Q_4}{E[W_k]}\right) \int_0^w h_1(x) dx + \frac{Q_4}{E[W_k]} \int_0^w h_2(x) dx \right).$$

短缺费用为 $ESC_3 = \frac{1}{2} C_s d D_k^2$.

情景3下, 产品总费用为

$$\begin{aligned} \delta_{WS3} &= EPF_5 + ESC_3 \\ &= C_r E[W_k] d \left(\left(1 - \frac{Q_4}{E[W_k]}\right) \int_0^w h_1(x) dx + \frac{Q_4}{E[W_k]} \int_0^w h_2(x) dx \right) + \\ &\quad \frac{1}{2} \int_{h/d}^{+\infty} x^2 f_p(x) (1 - P(l_b)) dx C_s d D_k^2. \end{aligned}$$

情景3下的单位时间产品总费用

$$\begin{aligned} TC_3 &= \frac{1}{E[T_k]} \left(\int_{h/d}^{+\infty} x^2 f_p(x) [1 - P(l_b)] dx \frac{1}{2} C_s d D_k^2 + \right. \\ &\quad \left. C_r E[W_k] d \left((1 - \alpha_2) \int_0^w h_1(x) dx + \alpha_2 \int_0^w h_2(x) dx \right) \right). \end{aligned}$$

3.2 单位时间预防维护费用

生产系统的单位时间预防维护费用为 $TP = \frac{1}{E[T_k]} (C_p (1 - P(l_b)))$. 其中 $E[T_k]$ 表示生产周期的平均持续时间, $E[T_k] = E[W_k] + E[D_k]$, $E[D_k] = \mu_p (1 - P(l_b))$.

3.3 单位时间总费用模型

根据是否构建缓冲区库存, 定义函数

$$\varepsilon = \text{ind}(M < W_k) = \begin{cases} 1, & \text{若 } M < W_k \\ 0, & \text{若 } M \geq W_k. \end{cases}$$

根据是否达到缓冲区库存量 h , 定义函数

$$\vartheta = \text{ind}((W_k - M) > \frac{h}{O_{\max} - d - \alpha_1}) = \begin{cases} 1, & \text{若 } (W_k - M) > \frac{h}{O_{\max} - d - \alpha_1} \\ 0, & \text{若 } (W_k - M) \leq \frac{h}{O_{\max} - d - \alpha_1}. \end{cases}$$

时间单位总费用为

$$\Gamma(h, l_b, l_a) = \vartheta \varepsilon (TC_1 + TQ_1) + (1 - \vartheta) \varepsilon (TC_2 + TQ_2) + (1 - \varepsilon) (TC_3 + TQ_3) + TP. \quad (1)$$

式(1)中, 需建立平均运行周期 $E[W_k]$ 的表达式. 根据以上所提出的问题, 可以注意到 W_k 的结束与发现次品率超过 l_b 的时刻一致, 用 t_b 来表示这个瞬间, 其中 $l(t)$ 是连续递增的函数, 表示随着时间的变化次品率的变化, 则

$$l(t_b) = l_b. \quad (2)$$

因此, $E[W_k]$ 和 $E[M]$ 对应于

$$E(W_k) = l^{-1}(l_b), \quad (3)$$

$$E(M) = l^{-1}(l_a). \quad (4)$$

由于难以获得 $E[W_k]$ 的精确解析表达式, 本文使用模拟法获得 $E[W_k]$. 首先, 针对 4.1 节给定的一组输入参数开发一个模拟模型, 找到函数 $l(t)$ 的估计值, 其次, 基于式(3)和式(4)确定 $E[W_k]$ 和 $E[M]$.

3.4 模型求解

该模型是含有三个自变量(h, l_a, l_b)的非线性规划, 而且存在三种缓冲库存情景, 要从理论上求得最优解相当困难, 所以本文将借助模型离散迭代算法的思想. 对于离散迭代算法来说, 首先确定离散迭代变量 h, l_b 和 l_a , 并赋予迭代变量的初始值, 其次确定离散迭代递推关系, 利用迭代步长 $\Delta h, \Delta l_b$ 和 Δl_a 分别建立迭代递推关系 $h \leftarrow h + \Delta h, l_b \leftarrow l_b + \Delta l_b$ 和 $l_a \leftarrow l_a + \Delta l_a$; 最后确定离散迭代过程和离散迭代终止条件, 先赋予 h 初始值, 固定不变, 再赋予 l_b 初始值, 转换为 l_b 与 l_a 的函数关系, 以 Δl_a 连续迭代 l_a 初始值, 确定当函数值最优时, l_a 的值. 然后, 以 Δl_b 连续迭代 l_b 初始值, 每迭代一次, 同理确定 l_a 最优解, 直至在可行域全部迭代完毕. 再次, 以 Δh 更新 h 的值, 重复这个过程, 直到跳出 h 的可行域.

离散迭代算法步骤如下:

步骤 1 输入参数值 $C_h, C_s, C_q, C_r, C_p, \omega, \beta_1, \beta_2, \lambda_1, \lambda_2, h, l_a, l_b, O_{\max}, l_{b\max}, l_{a\max}, h_{\max}, d, \Delta h, \Delta l_a, \Delta l_b$;

步骤 2 $h \leftarrow h + \Delta h$;

步骤 3 判断 $h < h_{\max}$, 成立转步骤 4, 否则转步骤 5;

步骤 4 $l_b \leftarrow l_b + \Delta l_b$, 转步骤 6;

步骤 5 转步骤 19;

步骤 6 判断 $l_b < l_{b\max}$, 成立, $l_a \leftarrow l_a + \Delta l_a$, 转步骤 7, 否则, 转步骤 2;

步骤 7 判断 $l_a < l_{a\max}$, 成立, 转步骤 8, 否则, 转步骤 4;

步骤 8 计算 $E[M], E[W_k], h/(O_{\max} - d - a_1)$;

步骤 9 判断 $E[M] < E[W_k]$, 成立转步骤 10, 否则转步骤 13;

步骤 10 判断 $h/(O_{\max} - d - a_1) < E[W_k] - E[M]$, 成立转步骤 11, 否则转步骤 12;

步骤 11 计算情景 1 的总费用 Γ_1 , 转步骤 14;

步骤 12 计算情景 2 的总费用 Γ_2 , 转步骤 14;

步骤 13 计算情景 3 的总费用 Γ_3 ;

步骤 14 计算 Γ ;

步骤 15 $l_a \leftarrow l_a + \Delta l_a$;

步骤 16 判断 $l_a < l_{a\max}$, 成立, 转步骤 8, 否则, $l_b \leftarrow l_b + \Delta l_b$;

步骤 17 判断 $l_b < l_{b\max}$, 成立, $l_a \leftarrow l_a + \Delta l_a$, 转步骤 16, 否则, $h \leftarrow h + \Delta h$;

步骤 18 判断 $h < h_{\max}$, 成立, $l_b \leftarrow l_b + \Delta l_b$, 转步骤 17, 否则, 转步骤 19;

步骤 19 迭代终止, 获得不超过 $h_{\max}, l_{a\max}$ 和 $l_{b\max}$ 时, 最小单位时间总费用对应的最优组合 (h', l'_b, l'_a) .

算法迭代前, 根据某石化企业实际生产情况以及文献[17, 18]确定 h, l_a 和 l_b 初值及上限 $h_{\max}, l_{a\max}, l_{b\max}$ 和步长 $\Delta h, \Delta l_a$ 和 Δl_b . 其中 β_1 和 λ_1 是 $h_1(x)$ 的参数, β_2 和 λ_2 是 $h_2(x)$ 的参数, $h_{\max}, l_{a\max}$ 和 $l_{b\max}$ 分别是 h, l_a 和 l_b 的上限, $\Delta h, \Delta l_a$ 和 Δl_b 分别是 h, l_a 和 l_b 的迭代步长.

4 算例分析

4.1 数据准备

根据某石化企业的 2M1B 系统的实际生产历史资料以及文献[17, 18], 设备预防性维护持续时间概率分布为正态分布, 根据历史生产资料统计分析得到参数取值, 即 $f_p(t) \sim N(0.5, 0.1^2)$.

由于次品率 l 具有上限和下限(在这种情况下分别为 0 和 1), 因此与次品率 l 相关的概率分布选择服从 Beta, 且是合理的. Beta 密度函数在其任一边界处可以接近零或无穷大, 其中 a 控制下限, b 控制上限. 根

据历史生产资料统计分析得到 $P(l)$ 服从参数为 a, b 的 Beta 分布的参数取值, 即 $p(l) \sim \beta(3, 3)$.

另外, 其他参数取值为 $w = 2, \beta_1 = 2, \beta_2 = 2, \lambda_1 = 1/36, \lambda_2 = 112, C_h = 5, C_s = 45, C_p = 500, C_r = 50, C_q = 70, O_{\max} = 100$ 单位/h, $d = 20$ 单位/h.

$$h_1(x) = \lambda_1^{\beta_1} \beta_1 x_1^{\beta_1-1}, \quad h_2(x) = \lambda_2^{\beta_2} \beta_2 x_2^{\beta_2-1}.$$

为了估计函数 $l(t)$, 对于任何给定的输入数据, 为生产过程开发了一个模拟模型. 在大范围内模拟生产过程中, 对于大小为 x 的每个生产批次, 根据以下关系生成次品的数量, 即

$$L(t + \Delta t) = L(t)(1 + \xi), \quad (5)$$

其中 $L(t)$ 代表在时刻 t 时次品的累积量. ξ 是 0 到 1 之间服从 Beta 分布的随机变量.

次品率 $l(t) = L(t)/x$. 在 T 期间生产批量为 X , 然后根据式(5)随机产生一定数量的次品, 并且使用式(5)计算相应的次品率 $l(t)$. 只要次品率不超过 1, 该过程就重复 m 个周期 T , 总共进行 n_{rep} 次重复.

最后, 对 $i = 1, 2, \dots, n_{\text{rep}}$ 的 $l(iT)$ 平均值使用基本的最小二乘法求解函数 $l(t)$ 的近似表达式.

4.2 结果分析

基于 $l(t)$ 的值, 对于任何给定的 l_b , 使用式(2)得到 $E[W_k]$ 的估计值. 设置初始值: 0 时刻次品的数量 2、生产批次 $x = 50$ 、重复次数 $n_{\text{rep}} = 10$, 可得到模拟结果, 见表 2.

表 2 模拟结果
Table 2 The simulation results

	$l^{(1)}(t)$	$l^{(2)}(t)$	$l^{(3)}(t)$	$l^{(4)}(t)$	$l^{(5)}(t)$	$l^{(6)}(t)$	$l^{(7)}(t)$	$l^{(8)}(t)$	$l^{(9)}(t)$	$l^{(10)}(t)$	平均值
T	0.073	0.067	0.058	0.054	0.069	0.065	0.066	0.067	0.067	0.073	0.071
$2T$	0.119	0.12	0.091	0.082	0.109	0.112	0.121	0.122	0.121	0.103	0.105
$3T$	0.169	0.21	0.149	0.151	0.219	0.177	0.209	0.218	0.193	0.203	0.179
$4T$	0.311	0.379	0.249	0.22	0.355	0.319	0.352	0.37	0.335	0.337	0.312
$5T$	0.523	0.586	0.461	0.337	0.601	0.517	0.633	0.654	0.539	0.602	0.529
$6T$	0.821	0.87	0.801	0.496	0.958	0.956	0.831	0.904	0.811	—	—
$7T$	0.841	0.893	0.851	0.876	0.86	—	—	—	—	—	—

用最小二乘曲线拟合函数对表 2 中的数据进行拟合的到了拟合曲线 $l(t) = 0.433 \ln(t) - 0.109$, 如图 8 所示.

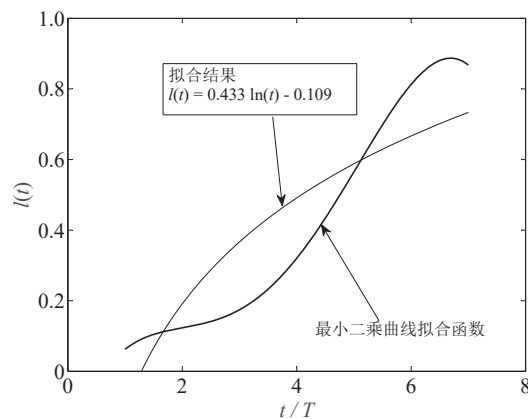


图 8 次品率的近似演变

Fig. 8 Approximate evolution of defective rate

基于式(3)和式(4), 对于给定的 l_b , 可得

$$E[W_k] = \exp((l_b + 0.109)/0.433), \quad E[M] = \exp((l_a + 0.109)/0.433).$$

由表 3 可以看出, 平均生产运行时间随着次品率 l_b 的增加而增加, 对于最优策略, 平均生产运行时间为 8.38 h, 平均停机时间为 0.23 h, 平均循环持续时间为 8.61 h. 并且, 从表 3 可以看出, 库存维持费用

与 h, l_a 负相关的, 在 h 不变的情况下, 随着 l_a 增大而减小. 短缺费用是与 l_a 和 l_b 呈现正相关, 随着 l_a 和 l_b 的增大, 服务中断时间 D_k 减小, 对应的短缺费用减小. 返工费用和保修维修费用都与 l_a 相关, 随着 l_a 的增大而增大.

表3 数值结果
Table 3 The numerical results

l_b	l_a	h	$E[W_k]$	$E[T_k]$	库存持有费用	短缺费用	返工费用	保修维修费用	单位时间内总费用
0.01	0	60	2.97	3.24	843.96	93.02	234.78	94.06	1 565.32
0.07	0.03	60	5.98	6.25	787.02	59.93	242.67	107.64	1 521.24
0.12	0.07	60	6.79	7.04	560.27	54.2	250.03	118.93	1 435.96
0.18	0.1	60	7.56	7.81	439.08	50.83	261.46	129.88	1 378.56
0.23	0.13	60	7.94	8.19	409.01	44.2	274.98	141.37	1 259.42
0.28	0.2	50	8.15	8.39	399.04	39.28	281.92	152.98	1 143.84
0.33	0.23	40	8.38	8.61	387.89	41.79	293.88	160.85	1 038.75
0.38	0.28	60	8.57	8.81	388.33	44.23	304.07	181.04	1 092.56
0.48	0.3	60	8.76	8.93	374.28	48.66	325.42	208.43	1 217.56
0.58	0.43	60	8.98	9.19	357.35	53.02	341.09	237.91	1 413.83

从图9和图10可以看出, 最优策略是在次品率 l_b 为0.33时才开始进行预防性维护. 为了满足2M1B系统中上游设备停止时继续满足生产需求, 需要在次品率 l_a 达到0.23时建立一个 $h' = 40$ 单位的缓冲库存, 此时, 总平均成本为1 038.75.

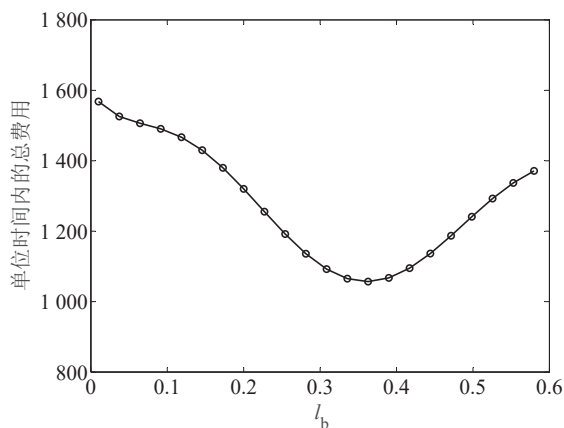


图9 当 $l'_a = 0.23, h' = 40$ 时单位时间内总费用随 l_b 的演变

Fig. 9 When $l'_a = 0.23, h' = 40$, the total cost per unit time changes with

l_b

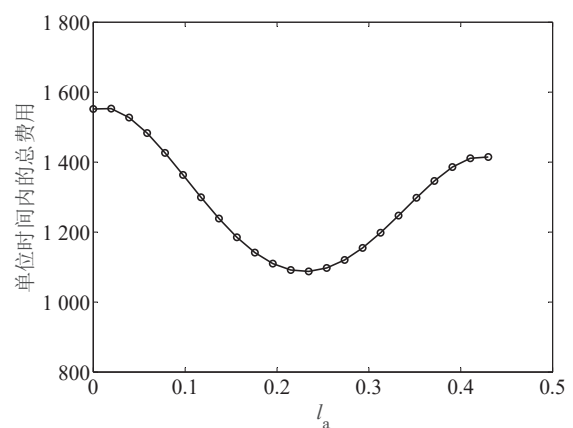


图10 当 $l'_b = 0.33, h' = 40$ 时单位时间内总费用随 l_a 的演变

Fig. 10 When $l'_b = 0.33, h' = 40$, the total cost per unit time changes

with l_a

4.3 敏感性分析

本文主要对以下参数进行灵敏度分析: 保修期 w , 单位产品的短缺费用 C_s , 单位产品最低维修保修费用 C_r , 单位次品的返工费用 C_q , 单位产品的库存持有费用 C_h 和单位时间内的预防性维护费用 C_p .

1) 保修期 w . 当保修期增加时最佳缓冲库存增加, 进行预防性维护和建立缓冲库存的次品率阈值增加, 这也意味着生产运行得时间会延长. 随着生产运行时间的延长, 返工费用、保修维修费用和单位时间内的总费用会增加. 此外, 较大的缓冲库存减少了维护期间的短缺费用, 见表4所示.

2) 单位产品的短缺费用 C_s . 由表5可以看出, 最优单位时间内总费用随着短缺费用的增加而增加, 而在短缺费用增加的同时需要提供更高的缓冲库存. 随着更多产品的生产, 会使返工费用和保修维修费用更高. 根据最优质量阈值 l'_b 随着短缺费用的增加而增加, 此时的最优策略会减少设备的停机时间, 以避免发生短

缺的可能性。

表4 基于单一保修期的最优策略演变

Table 4 Evolution of optimal policy based on single warranty period

w	h'	l'_b	l'_a	$\Gamma(h, l_b, l_a)$
2	40	0.33	0.23	1 038.75
4	45	0.34	0.25	1 087.90
6	55	0.36	0.27	1 199.25
10	69	0.39	0.29	1 289.58
14	82	0.43	0.32	1 471.06

表5 基于单一短缺费用的最优策略演变

Table 5 Evolution of optimal strategy based on single shortage cost

C_s	h'	l'_b	l'_a	$\Gamma(h, l_b, l_a)$
10	35	0.11	0.03	471.32
20	35	0.11	0.03	807.96
45	40	0.33	0.23	1 038.75
100	60	0.36	0.26	1 476.24
200	60	0.46	0.37	2 357.87

3) 单位产品最低维修保修费用 C_r . 最优缓冲库存和最优阈值对每单位的保修维修费用的变化并不敏感, 只是改变了总的维修保修费用, 见表6所示。

表6 基于单一保修维修费用的最优策略演变

Table 6 Evolution of optimal strategy based on single warranty maintenance cost

C_r	h'	l'_b	l'_a	$\Gamma(h, l_b, l_a)$
10	39	0.31	0.2	998.85
20	39	0.32	0.21	1023.81
50	40	0.33	0.23	1 038.75
100	40	0.33	0.24	1 057.03
200	41	0.34	0.25	1 070.68

4) 单位次品的返工费用 C_q . 每单位产品较高的返工费用使总的返工费用提高, 为了更好的完成生产任务, 降低短缺费用, 因此, 缓冲区库存和生产运行时间会增加, 在这种情况下, 单位时间内的总费用会随着返工费用的增加而增加, 见表7所示。

表7 基于单一返工费用的最优政策演变

Table 7 Evolution of optimal policies based on single rework costs

C_q	h'	l'_b	l'_a	$\Gamma(h, l_b, l_a)$
10	31	0.3	0.2	1 002.82
20	34	0.31	0.22	1 021.33
70	40	0.33	0.23	1 038.75
100	45	0.34	0.24	1 046.37
200	52	0.35	0.26	1 059.36

5) 单位产品的库存持有费用 C_h . 每单位时间更高的持有费用会降低缓冲库存、生产运行时间和最优阈值, 这时短缺费用会随着库存持有费用和返工费用的减少而增加。由于生产率较低, 保修期内的保修维修费用会降低。最优策略倾向于较低的库存持有费用, 见表8所示。

表8 基于单一持有费用的最优政策演变

Table 8 Evolution of optimal policy based on a single holding charge

C_h	h'	l'_b	l'_a	$\Gamma(h, l_b, l_a)$
1	49	0.36	0.25	1 025.86
5	40	0.33	0.23	1 038.75
10	33	0.33	0.22	1 085.09
20	30	0.32	0.22	1 125.46
50	26	0.3	0.21	1 297.32

6) 单位时间内的预防性维护费用 C_p . 缓冲区库存随着每时间单位的预防性维护费用的增加而增加, 从而降低了短缺费用, 以弥补更高的库存持有费用、返工费用和保修维修费用。根据最优质量阈值 l'_b 随着预防性维护费用的增加而增加, 可以看出, 最优策略会减少设备的停机时间, 见表9所示。

表 9 基于单一预防性维护费用的最优策略演变
Table 9 Evolution of optimal strategies based on single preventive maintenance costs

C_p	h'	l'_b	l'_a	$\Gamma(h, l_b, l_a)$
100	29	0.29	0.2	1 023.71
200	32	0.3	0.21	1 031.96
500	40	0.33	0.23	1 038.75
1 000	58	0.34	0.24	1 044.02
2 000	74	0.35	0.26	1 050.11

5 结束语

本文基于产生合格品和次品的 2M1B 生产系统, 提出了多缓冲区库存情境下考虑产品保修服务的预防维护策略模型. 对生产系统进行质量控制, 观察生产系统次品率的变化, 当次品率超过 l_b 时, 进行预防维护, 当次品率超过 l_a 时, 建立缓冲区库存. 本文以 h, l_a 和 l_b 为决策变量, 以预防维护费用、返工费用、保修维修费用、库存持有费用、短缺费用构成的单位时间总费用为目标函数, 建立数学模型, 使其目标函数 $\Gamma(h, l_b, l_a)$ 最小. 用建立的数学模型和数值程序求得使单位时间总费用最小的最优维护策略 (h', l'_b, l'_a) . 在次品率 $l'_b = 0.33$ 时进行预防性维护, 并且在次品率 $l'_a = 0.23$ 时建立 $h' = 40$ 的缓冲库存, 这时单位时间总费用最小, 为 1 038.75.

参考文献:

- [1] Christer A H, Waller W M. Delay time models of industrial inspection maintenance problems. *Journal of the Operational Research Society*, 1984, 35(5): 401–406.
- [2] Wang W B. An inspection model for a process with two types of inspections and repairs. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(2): 526–533.
- [3] Taghipour S, Banjevic D. Optimum inspection interval for a system under periodic and opportunistic inspections. *IIE Transactions*, 2012, 44(11): 932–948.
- [4] Wijngaard J. The effect of interstage buffer storage on the output of two unreliable production units in series, with different production rates. *IIE Transactions*, 1977, 11(1): 374–390.
- [5] 杨志远, 程中华, 邓立杰, 等. 基于寿命周期成本分析的产品延伸保修决策优化模型. *工业工程*, 2016, 19(1): 38–44.
Yang Z Y, Cheng Z H, Deng L J, et al. A product extended warranty decision optimization model based on life cycle cost analysis. *Industrial Engineering*, 2016, 19(1): 38–44. (in Chinese)
- [6] 刘学娟, 赵 斐, 马晓洋. 多产品生产计划与非周期预防维修整合优化模型. *中国管理科学*, 2017, 25(11): 189–196.
Liu X J, Zhao P, Ma X Y. Integrated optimization model for multi-product production planning and aperiodic preventive maintenance. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(11): 189–196. (in Chinese)
- [7] Nourelfath M, Chatelet E. Integrating production, inventory and maintenance planning for a parallel system with dependent components. *Reliability Engineering and System Safety*, 2012, 101: 59–66.
- [8] Fitouhi M C, Nourelfath M. Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for multi-state systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 2014, 121: 175–186.
- [9] 周 瑜, 寇 纲. 基于完全信息动态博弈的维修外包策略研究. *系统工程学报*, 2017, 32(3): 423–432.
Zhou Y, Kou G. Research on maintenance outsourcing strategy based on dynamic game of complete information. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(3): 423–432. (in Chinese)
- [10] 刘 乐. 可外包条件下最大时间偏离受限的单机重调度. *系统工程学报*, 2019, 34(1): 12–28.
Liu L. Single machine rescheduling with limited maximum time deviation under outsourcing conditions. *Journal of Systems Engineering*, 2019, 34(1): 12–28. (in Chinese)
- [11] 刘学娟, 赵 斐, 马晓洋. 考虑生产率调整的多产品 EPQ 与设备维修整合模型. *系统工程学报*, 2018, 33(1): 136–144.
Liu X J, Zhao P, Ma X Y. Multi-product EPQ and equipment maintenance integration model considering productivity adjustment. *Journal of Systems Engineering*, 2018, 33(1): 136–144. (in Chinese)

- [12] 张 琪, 高 杰. 竞争市场上保修期与价格的联合质量信号传递作用. 中国管理科学, 2018, 26(7): 71–83.
Zhang Q, Gao J. The combined quality signal transmission function of warranty period and price in competitive market. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(7): 71–83. (in Chinese)
- [13] 刘勤明, 李永朋, 叶春明. 基于三阶段时间延迟模型的设备预防维修策略研究. 控制与决策, 2020, 35(7): 1780–1786.
Liu Q M, Li Y P, Ye C M. Research on equipment preventive maintenance strategy based on three-stage time delay model. Control and Decision, 2020, 35(7): 1780–1786. (in Chinese)
- [14] 成国庆, 周炳海, 李 玲, 等. 考虑缓冲区库存的退化系统最优维修更换策略. 计算机集成制造系统, 2015, 21(6): 1593–1600.
Cheng G Q, Zhou B H, Li L, et al. Consider the optimal maintenance and replacement strategy for degraded systems with buffer stocks. Computer Integrated Manufacturing System, 2015, 21(6): 1593–1600. (in Chinese)
- [15] 逯 程, 徐廷学, 王 虹. 装备视情维修与备件库存联合优化决策. 系统工程与电子技术, 2019, 41(7): 1560–1567.
Lu C, Xu T X, Wang H. Equipment maintenance and spare parts inventory joint optimization decision. Systems Engineering and Electronic Technology, 2019, 41(7): 1560–1567. (in Chinese)
- [16] 卢 震, 郭巧顺, 徐 健. 基于周期性不完全预防性维修的最优经济生产批量决策. 系统工程理论与实践, 2017, 37(10): 2621–2629.
Lu Z, Guo Q S, Xu J. Optimal economic production volume decision based on periodic incomplete preventive maintenance. System Engineering: Theory and Practice, 2017, 37(10): 2621–2629. (in Chinese)
- [17] 刘勤明, 吕文元, 叶春明. 考虑中间库存缓冲区的设备不完备预防维修策略研究. 计算机应用研究, 2018, 35(9): 2614–2616.
Liu Q M, Lü W Y, Ye C M. Study on equipment imperfection prevention maintenance strategy considering intermediate inventory buffer. Computer Application Research, 2018, 35(9): 2614–2616. (in Chinese)
- [18] 黄 松, 吕文元. 带缓冲区的基于时间延迟的可修设备联合优化. 工业工程, 2018, 21(6): 46–53.
Huang S, Lü W Y. Joint optimization of repairable devices with buffer based on time delay. Industrial Engineering, 2018, 21(6): 46–53. (in Chinese)

作者简介:

刘勤明(1984—), 男, 山东日照人, 博士, 副教授, 研究方向: 维护调度, 人工智能等, Email: lqm0531@163.com;
梅嘉健(1996—), 男, 江苏常州人, 硕士生, 研究方向: 设备维护, Email: 1402065592@qq.com;
叶春明(1964—), 男, 安徽宣城人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 生产调度, Email: yechm6464@163.com;
董 明(1968—), 男, 河南郑州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 供应链管理, Email: mdong@sjtu.edu.cn.