

文章编号: 1006-2467(2021)10-1281-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.320

考虑随机生产等待的串行生产系统机会维护建模

宁小涵, 周晓军

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 为了充分利用由外部因素如原材料不足或需求不足等导致的随机生产等待带来的维护机会, 针对多设备串行生产系统, 引入质心与引力窗概念, 提出一种时间窗与引力窗相结合的机会维护决策优化模型, 同时考虑设备强制预防维护引发的内部维护机会和生产等待带来的外部维护机会, 以最小化规划期内系统的维护总成本率为目标, 获取最优维护策略。算例分析表明, 时间窗与引力窗相结合的建模方法在降低维护总成本方面有明显优势, 可有效解决生产等待的到达及持续时间的不确定性问题。

关键词: 多设备串行系统; 生产等待; 机会维护; 维护时间窗; 维护引力窗

中图分类号: TP 16

文献标志码: A

Opportunistic Maintenance Modeling for Serial Production Systems with Stochastic Production Waits

NING Xiaohan, ZHOU Xiaojun

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to make full use of the maintenance opportunities brought by stochastic production waits caused by external factors such as shortage of raw materials and insufficient demands, the notions of mass center and gravity windows are introduced and an opportunity maintenance decision-making model combining the time window and the gravity window is proposed for multi-unit serial production systems. Considering both internal maintenance opportunities caused by equipment mandatory maintenance and external maintenance opportunities caused by production waits, the optimal maintenance strategy is obtained by minimizing the total maintenance cost rate of the system in the planning period. The example analysis shows that the combination of the time window and the gravity window has prominent advantages in reducing the total maintenance cost, and can effectively solve the uncertainty of the arrival and duration of production waits.

Key words: multi-unit serial system; production waits; opportunistic maintenance; maintenance time window; maintenance gravity window

维护是保障生产系统正常运行、提高设备可靠性的有效手段。随着市场需求的日趋多样化, 越来越

多的制造企业采用面向订单的生产模式。在这一模式下, 由于原材料缺乏、需求不足等原因, 生产系统

收稿日期: 2020-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(52075336), 科技部重点研发计划(2020YFB1711103)资助项目

作者简介: 宁小涵(1997-), 女, 辽宁省沈阳市人, 硕士生, 主要从事设备维护决策研究。

通信作者: 周晓军, 男, 副教授, 博士生导师; E-mail: zzhou745@sjtu.edu.cn.

常面临着随机的生产等待,进而导致系统整体停机,这也为系统维护带来了机会.为此,如何充分利用随机生产等待以合理优化系统的维护方案,对制造企业降低维护成本、提高生产效率有重要的现实意义.

目前,已有的机会维护研究多围绕如何利用系统中设备强制预防维护所引发的确定性停机时间进行机会维护. Xia 等^[1]采用单维护时间窗方法判断串行系统中的设备是否接受预先计划的确定性预防维护机会,并对维护活动进行整合优化. 俞梦琦等^[2]则引入双维护时间窗方法进一步确定维护组合的最佳维护时刻. Zhou 等^[3]、Zhao 等^[4]和 Nguyen 等^[5]基于设备的状态判断其是否接受这种确定性机会. Zhou 等^[6]以最大化短期机会费用节余为目标,采用动态规划求解,判断是否接受强制预防维护引发的机会. 显然,已有研究均集中于如何利用设备强制预防维护所引发的系统内部维护机会,没有考虑生产等待带来的外部维护机会,不利于进一步降低维护成本.

在利用外部机会的机会维护研究中,先期有学者针对确定性的外部机会进行研究. Do van 等^[7]针对多设备串联系统提出新的动态成组维护策略,对预先已知的外部机会进行维护活动规划. Nzukam 等^[8]基于 Bruss 算法选择最优的外部机会对单设备进行机会维护. Khatab 等^[9]考虑利用生产计划中预先已知的生产间歇进行机会维护,提出基于弹性维护力度的串并联系统选择性维护优化模型. 随着市场需求的多样化,生产等待的随机性越来越高,为此, Li 等^[10]提出基于年龄的单设备更换策略,随机生产等待到达时,若设备年龄达到机会更换阈值则对其进行更换. Wu 等^[11]提出两阶段单设备机会维护策略,第 1 阶段对设备进行等周期检测,第 2 阶

段利用随机到达的生产等待进行机会维护,以充分利用设备剩余寿命. Yang 等^[12]采用逆高斯分布来表示设备衰退增量,针对生产等待随机到达的单设备系统,基于状态维护与机会维护相结合的策略,获得预防更换衰退阈值和机会更换衰退阈值. 在考虑机会到达随机性的基础上, Truong 等^[13-14]还考虑机会持续时间的随机性,提出基于时变持续时间阈值的单设备机会维护策略. 综合来说,由于随机性导致决策过程复杂,目前对利用随机外部机会进行机会维护的研究多局限于单设备维护规划层面,且没有兼顾系统中其余设备强制预防维护带来的内部机会.

本文以多设备串行生产系统为研究对象,考虑齐次泊松到达且持续时间随机的生产等待,提出一种时间窗与引力窗相结合的维护决策模型,充分利用了生产等待带来的外部维护机会以及系统中设备强制预防维护引发的内部维护机会实施维护优化,以获取系统在维护规划期内的最优维护计划,为面临随机生产等待的串行系统维护决策优化研究提供基础.

1 问题描述及维护策略

串行生产线中的生产等待如图 1 所示,该生产线由 n 台设备组成. 以串行生产系统为研究对象,在实际生产场景中,该生产线面临随机到达的生产等待且持续时间随机. 通常,串行生产系统中任何一台设备的停机往往意味着系统的整体停机,为了减少设备维护造成的停机时间,节约停机成本,可利用生产等待带来的外部机会对生产线进行维护.

在维护策略方面,对于串行生产系统中的每一台设备,当出现可接受的生产等待时,该设备实施机会维护;若在计划的预防维护周期内没有生产等待

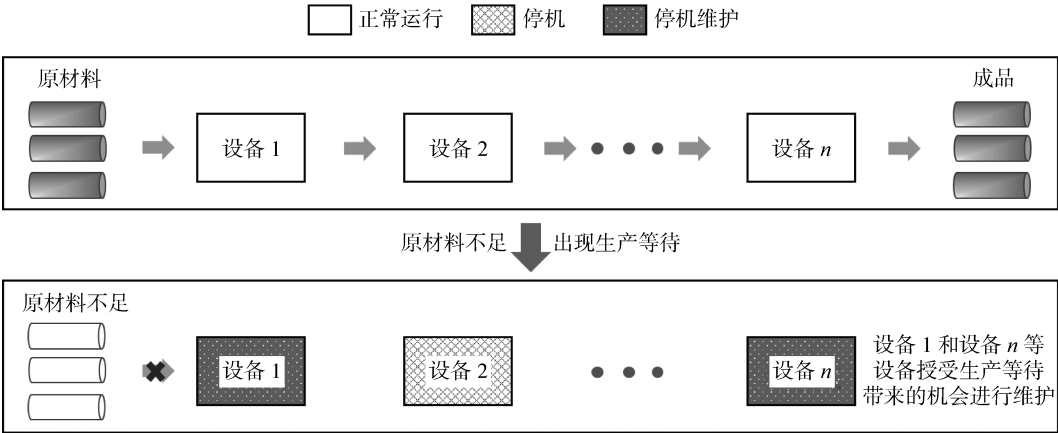


图 1 串行生产线中的生产等待
Fig. 1 Production waits in serial production line

被接受,则进行预防维护;设备发生故障时,则进行故障小修.从整个系统的角度考虑,设备的同时维护也意味着系统停机成本的节约,故当某些设备停机进行机会维护或预防维护时,其余设备也存在着提前维护的内部机会.对于由设备强制预防维护(内部机会)引发的维护活动,采用时间窗^[1]判断其余设备是否同时维护;而对于由设备接受生产等待(外部机会)引发的维护活动,由于每个设备进行维护的时刻并不固定,传统时间窗无法有效组合这类维护活动,所以引入引力窗判断未接受生产等待机会的设备是否同时维护.

基于以上维护策略,维护建模及决策分为两部分.首先,建立一个随机状态下的设备层维护决策优化模型,分别构建机会维护和预防维护的期望维护成本模型,以最小化各维护周期内各设备期望维修总成本率为目标,获得最优设备时间窗和生产等待持续时间阈值并判断是否接受生产等待的机会;其次,构建综合考虑内部机会和外部机会的系统层维护决策优化模型,以最小化维护规划期内系统维护总成本率为目标,基于系统时间窗与引力窗相结合的维护模型获得系统的最优维护计划.其中,引力窗的定义综合考虑了机会到达时刻与持续时间、设备维护相关成本及机会与设备时间窗之间的关系对于系统层维护整合趋向的影响.

2 维护建模及决策

2.1 考虑随机生产等待的单设备维护建模及决策

考虑到模型的复杂性,首先提出以下假设:①预防维护与机会维护均为修复非新,且效果相同;②故障小修仅恢复设备功能不改变其衰退状况;③维护活动和生产等待的持续时间相比于维护周期很短,故忽略不计;④生产等待到达服从齐次泊松过程,持续时间为已知分布的随机变量^[10-13].

基于以上假设,在考虑随机生产等待的单设备维护模型中,由于生产等待到达的随机性,判断其是否可接受需要确定一个时间区间,即设备时间窗.时间区间的下限 t_{ij}^{OM} 为第 i 台设备第 j 个维护周期开始接受机会维护的时间点,时间区间的上限 t_{ij}^{PM} 为第 i 台设备第 j 个维护周期的计划预防维护时间点,则第 i 台设备第 j 个维护周期的维护时间窗可表示为 $[t_{ij}^{OM}, t_{ij}^{PM}]$;由于生产等待持续时间的随机性,判断其是否可接受还需一个持续时间下限,用 ω_{ij} 表示持续时间下限阈值指数,假设第 i 台设备的维护持续时间是 τ_i^M ,则该设备可接受的生产等待持续时间阈值为 $\omega_{ij}\tau_i^M$.

预防维护和机会维护往往不会使设备恢复到全新状态. Pham 等^[15]概括总结了 8 种修复非新的建模方法,其中虚拟役龄法在工程实践中应用广泛,故基于该建模思想,采用虚拟役龄描述设备状态,并用虚拟役龄因子 $\theta \in (0, 1)$ 表示维护设备健康衰退演化的影响,则第 i 台设备在第 $j+1$ 次维护后的虚拟役龄 $A_{i,j+1}$ 为

$$A_{i,j+1} = A_{i,j} + \theta_i T_{i,j+1} \quad (1)$$

式中: θ_i 为第 i 台设备的虚拟役龄因子; $T_{i,j+1}$ 为第 i 台设备第 $j+1$ 个维护周期的长度.

由维护策略可知,每个设备维护周期内,设备进行一次预防维护或机会维护,如图 2 所示. 其中: $\tau_{k_{ij}}^O$ 为第 i 台设备在第 j 个维护周期中的第 k 个生产等待,即第 k_{ij} 次生产等待机会的持续时间; $t_{k_{ij}}^O$ 为第 k_{ij} 次生产等待机会的到达时刻. 为了得到最优维护规划,对于每个设备,以最小化维护成本率为目标,动态地决策各设备各维护周期的最优维护时间窗 $[t^{OM*}, t^{PM*}]$ 及生产等待持续时间阈值指数 ω^* . 由于考虑到生产等待的随机性,无法得到设备维护总成本率的确定值,所以以最小化期望维护总成本率为目标进行优化. 第 i 台设备在第 j 个维护周期的期望维护总成本率 $E(\bar{c}_{ij})$ 包括预防维护期望总成本率 $E(\bar{c}_{ij}^{OM})$ 和机会维护期望总成本率 $E(\bar{c}_{ij}^{PM})$, 则有:

$$E(\bar{c}_{ij}) = E(\bar{c}_{ij}^{PM}) + E(\bar{c}_{ij}^{OM}) \quad (2)$$

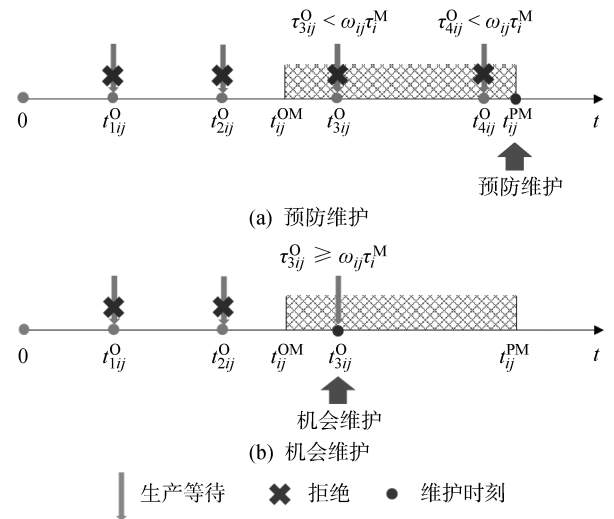


图 2 设备维护的两种情况

Fig. 2 Two situations of equipment maintenance

预防维护总成本包括维护成本、停机成本和故障小修成本,故第 i 台设备在第 j 个维护周期预防维护的期望维修成本率为

$$E(\bar{c}_{ij}^{PM}) = \frac{C_i^M + c^d \tau_i^M + C_i^{CM} E(N_i(t_{ij}^{PM}))}{t_{ij}^{PM}} P_{ij}^{PM} \quad (3)$$

式中: C_i^M 为第 i 台设备的维护成本; c^d 为系统停机成本率, 即系统中各设备自身的停机成本率之和; C_i^{CM} 为小修维护成本; $E(N_i(t_{ij}^{PM}))$ 为第 i 台设备在第 j 个维护周期的计划预防维护时间点的期望累计故障次数; P_{ij}^{PM} 为第 i 台设备在第 j 个维护周期的预防维护发生概率. 若用 $h_i(t)$ 表示设备故障率函数, 则期望累计故障次数为

$$E(N_i(t_{ij}^{PM})) = \int_{A_{i,j}}^{A_{i,j}+t_{ij}^{PM}} h_i(t) dt \quad (4)$$

预防维护发生的概率 P_{ij}^{PM} 可定义为

$$P_{ij}^{PM} = 1 - P_{ij}^{OM} \quad (5)$$

式中: P_{ij}^{OM} 为机会维护发生的概率. 机会维护在 $t \in [t_{ij}^{OM}, t_{ij}^{PM}]$ 时刻发生的概率可以表示为

$$P_{ij}^{OM}(t) = \sum_{k_{ij}=2}^{\infty} (\bar{F}_D(\omega_{ij}\tau_i^M) f_{k_{ij}}^O(t) \prod_{l=1}^{k_{ij}-1} (1 - \bar{F}_D(\omega_{ij}\tau_i^M) F_{l,t_{ij}^{OM}}^O(t_{ij}^{PM}))) + \bar{F}_D(\omega_{ij}\tau_i^M) f_1^O(t) \quad (6)$$

式中: $\bar{F}_D(\omega_{ij}\tau_i^M) = 1 - F_D(\omega_{ij}\tau_i^M)$ 为生产等待的持续时间大于等于 $\omega_{ij}\tau_i^M$ 的概率; $f_{k_{ij}}^O(t)$ 为第 i 台设备在第 j 个维护周期内第 k_{ij} 次生产等待在 t 时刻到达的概率; $F_{l,t_{ij}^{OM}}^O(t_{ij}^{PM})$ 为第 l 次生产等待到达时刻 t_l^O 在 t_{ij}^{OM} 和 t_{ij}^{PM} 之间的概率. 由于生产等待的到达为齐次泊松过程, 强度为 λ , 则 $f_{k_{ij}}^O(t)$ 服从 k 阶 Erlang 分布^[16], 定义为

$$f_{k_{ij}}^O(t) = \frac{\lambda^{k_{ij}} t^{k_{ij}-1}}{(k_{ij}-1)!} e^{-\lambda} \quad (7)$$

$F_{l,t_{ij}^{OM}}^O(t_{ij}^{PM})$ 可以表示为

$$F_{l,t_{ij}^{OM}}^O(t_{ij}^{PM}) = P(t_{ij}^{OM} < t_l^O \leq t_{ij}^{PM}) = \int_{t_{ij}^{OM}}^{t_{ij}^{PM}} f_l^O(\tau) d\tau \quad (8)$$

则 P_{ij}^{OM} 可以表示为

$$P_{ij}^{OM} = \int_{t_{ij}^{OM}}^{t_{ij}^{PM}} P_{ij}^{OM}(t) dt \quad (9)$$

机会维护总成本包括维护成本、故障小修成本、停机成本和惩罚成本, 故第 i 台设备在第 j 个维护周期机会维护的期望维修总成本率 $E(\bar{c}_{ij}^{OM})$ 为

$$E(\bar{c}_{ij}^{OM}) = E(\bar{c}_{ij}^M) + E(\bar{c}_{ij}^{CM}) + E(\bar{c}_{ij}^d) + E(\bar{c}_{ij}^{pen}) \quad (10)$$

式中: \bar{c}_{ij}^M 为在机会维护情况下的维护成本率; \bar{c}_{ij}^{CM} 为在机会维护情况下的小修维护成本率; \bar{c}_{ij}^d 为在机会维护情况下的停机成本率; \bar{c}_{ij}^{pen} 为在机会维护情况下的惩罚成本率. \bar{c}_{ij}^M 的期望可表示为

$$E(\bar{c}_{ij}^M) = \int_{t_{ij}^{OM}}^{t_{ij}^{PM}} C_i^M \frac{P_{ij}^{OM}(t)}{t} dt \quad (11)$$

\bar{c}_{ij}^{CM} 的期望可表示为

$$E(\bar{c}_{ij}^{CM}) = \int_{t_{ij}^{OM}}^{t_{ij}^{PM}} C_i^{CM} E(N_i(t)) \frac{P_{ij}^{OM}(t)}{t} dt \quad (12)$$

\bar{c}_{ij}^d 的期望可表示为

$$E(\bar{c}_{ij}^d) = \int_{\omega_{ij}\tau_i^M}^{\tau_i^M} \int_{t_{ij}^{OM}}^{t_{ij}^{PM}} c^d (\tau_i^M - \tau) \frac{f_D(\tau)}{\bar{F}_D(\omega_{ij}\tau_i^M)} \frac{P_{ij}^{OM}(t)}{t} dt d\tau \quad (13)$$

式中: $f_D(\tau)$ 为生产等待持续时间为 $\tau \in [\omega_{ij}\tau_i^M, \tau_i^M]$ 的概率. 通常, 实施预防维护活动需要人力、物料等方面的准备, 而机会维护将维护活动执行时间提前, 意味着维护准备的不完善, 故产生惩罚成本 C_i^{pen} , 表示维护活动从计划时间 t_{ij}^{PM} 转移到机会维护发生时间 t 所付出的代价, 通常包括加急导致的人工费用和备件采购费用, 定义为

$$C_i^{pen}(t) = c_i^{pen}(t_{ij}^{PM} - t) \quad (14)$$

式中: c_i^{pen} 为第 i 台设备的惩罚成本率. 据此, \bar{c}_{ij}^{pen} 的期望可表示为

$$E(\bar{c}_{ij}^{pen}) = \int_{t_{ij}^{OM}}^{t_{ij}^{PM}} C_i^{pen}(t) \frac{P_{ij}^{OM}(t)}{t} dt \quad (15)$$

综上, 可以得到设备的期望维护成本率, 以最小化期望维护成本率为目标求解, 即可得 $[t_{ij}^{OM*}, t_{ij}^{PM*}]$ 和 ω_{ij}^* .

2.2 时间窗与引力窗相结合的系统维护建模及决策

由单设备的维护建模可以获得第 i 台设备在第 j 个维护周期内的最优维护时间窗, 假设 $t_{i,j}$ 为第 i 台设备进行第 j 次维护的时刻, 则第 i 台设备的第 j 个维护周期为 $[t_{i,j-1}, t_{i,j}]$, 故可得到第 i 台设备在第 j 个维护周期 $[t_{i,j-1}, t_{i,j}]$ 内的进行维护活动的时间区间 $[t_{i,j}^{st}, t_{i,j}^{en}]$, 定义为

$$t_{i,j}^{st} = t_{i,j-1} + t_{ij}^{OM*} \quad (16)$$

$$t_{i,j}^{en} = t_{i,j-1} + t_{ij}^{PM*} \quad (17)$$

对于由 n 台设备组成的串行系统, t_r^{sys} 为系统实施第 r 次维护活动的时刻, 则第 r 次维护活动周期为 $[t_{r-1}^{sys}, t_r^{sys}]$. 假设第 i 台设备第 j 个维护周期对应第 r 次维护活动, 则 $[t_{i,j}^{st}, t_{i,j}^{en}]$ 也为第 i 台设备在第 r 次维护活动的时间区间. 对于串行系统, 为了节约停机成本, 需将系统中的设备维护活动进行优化整合. 对于内部机会(设备进行强制预防维护)引发的系统维护活动, 可以采用系统时间窗 T^{win} 判断其余设备是否同时维护, 即对计划预防维护时间点落在时间窗所在区间 $[t_r^{sys}, t_r^{sys} + T^{win}]$ 的设备均进行维护组合, 如图 3 所示, 其中, T^{sys} 为系统维护规划期; T^{win*} 为最优维护整合时间窗. 由图 3 可知, 第 2 台设备的计划预防维护时间点 $t_{2,n}^{en}$ 落在系统时间窗内, 第 n 台设

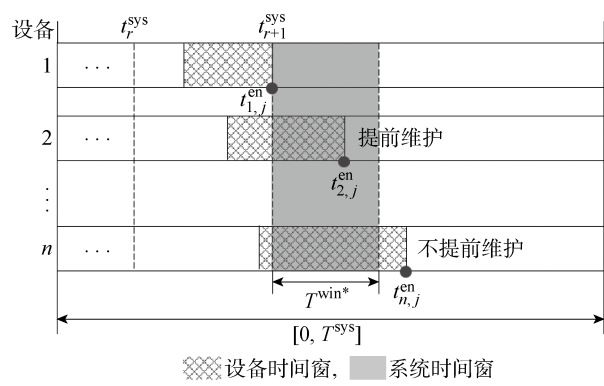


图 3 针对强制预防维护的时间窗模型

Fig.3 Time window model for mandatory preventive maintenances

备的计划预防维护时间点 $t_{n,j}^{\text{cen}}$ 未落在系统时间窗内,故对第 2 台设备进行提前维护,第 n 台设备在此次系统维护活动中不进行维护。

而对于外部机会(接受生产等待)引发的系统维护活动,由于每个设备都分别通过设备时间窗判断是否接受生产等待的机会,而不是在一个计划的时间点进行维护,系统时间窗无法处理这类维护活动的优化整合,所以引入引力窗这一概念来进一步对维护活动进行优化整合。

引力窗这一概念来源于万有引力定律.若系统中第 k 个生产等待,即第 k^{sys} 个生产等待带来的机会,对于未接受此次机会的第 i 台设备的时间窗引力 F_{ik}^{sys} 大于引力阈值 F^* ,则第 i 台设备在第 k^{sys} 个生产等待到达时也需要进行维护,如图 4 所示.其中: t_k^{Osys} 为第 k^{sys} 个生产等待带来的机会的到达时刻; $t_{i,j}^{\text{cen}}$ 为第 i 台设备在第 j 个设备维护周期的设备时间窗质心.由图 4 可知,第 k^{sys} 个生产等待对第 2 台设备的引力 F_{2k}^{sys} 大于等于引力阈值 F^* ,对第 n 台设备的引力 F_{nk}^{sys} 小于引力阈值 F^* ,故对第 2 台

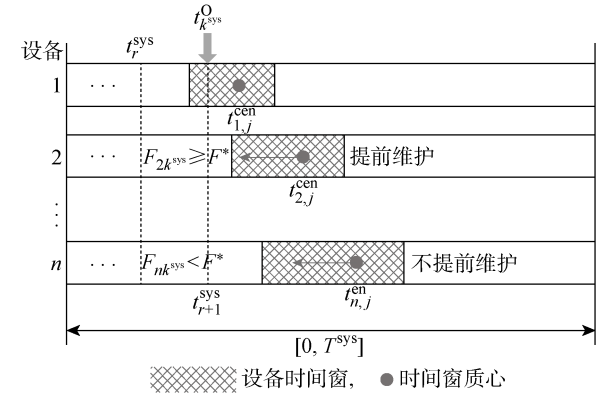


图 4 针对随机生产等待的引力窗模型

Fig.4 Gravity window model for stochastic production waits

设备进行提前维护,第 n 台设备在此次系统维护活动中不进行维护。

类比于万有引力公式 F_{ik}^{sys} 可以定义为

$$F_{ik}^{\text{sys}} = \frac{Gm_{ik}^{\text{sys}}M_i}{R_{ik}^{\text{sys}2}} \quad (18)$$

式中: G 为引力常量; m_{ik}^{sys} 为机会的“质量”; M_i 为第 i 台设备时间窗的“质量”; R_{ik}^{sys} 为机会与设备时间窗之间的“距离”.将万有引力公式与机会维护策略相结合的关键在于如何定义以上“质量”和“距离”.引力常量 G 是一个比例系数,为了计算方便,取为 $G=1 \text{ N} \cdot \text{h}^2 / \text{元}^2$;“质量”表示维护整合趋向的大小.机会的持续时间和设备的停机成本影响这一趋向的大小,故机会的“质量” m_{ik}^{sys} 可定义为

$$m_{ik}^{\text{sys}} = \rho_{ik}^{\text{sys}} \tau_i^{\text{M}} (c_i^{\text{d}} - c_i^{\text{d}}) \quad (19)$$

式中: ρ_{ik}^{sys} 为生产等待持续时间指数; c_i^{d} 为第 i 台设备自身的停机成本率. ρ_{ik}^{sys} 衡量第 k^{sys} 次生产等待带来的机会的持续时间 τ_k^{Osys} 对于第 i 台设备维护整合决策的影响,定义为

$$\rho_{ik}^{\text{sys}} = \frac{\min\{\tau_k^{\text{Osys}}, \tau_i^{\text{M}}\}}{\tau_i^{\text{M}}} \quad (20)$$

在式(19)中, $c_i^{\text{d}} - c_i^{\text{d}}$ 表示由于第 i 台设备维护导致的系统多余的停机成本率.显然,自身停机成本很小的设备进行维护导致系统整体停机是最不希望发生的情况,故其维护整合的趋向最大.其次,小修成本和惩罚成本在一定程度上影响了维护组合的决策,故第 i 台设备时间窗的“质量” M_i 定义为设备时间窗内第 i 台设备的期望小修成本和期望惩罚成本之差,可表示为

$$M_i = \int_{t_{ij}^{\text{OM}}}^{t_{ij}^{\text{PM}}} C_i^{\text{CM}} E(N_i(t)) P_{ij}^{\text{OM}}(t) dt - \int_{t_{ij}^{\text{OM}}}^{t_{ij}^{\text{PM}}} C_i^{\text{pen}}(t) P_{ij}^{\text{OM}}(t) dt \quad (21)$$

最后,生产等待到达的时机也影响着整合维护的趋向,故机会与设备时间窗之间的“距离” R_{ik}^{sys} 定义为生产等待到达的时刻 t_k^{Osys} 与未接受生产等待带来的机会的第 i 台设备在第 j 个设备维护周期的时间窗“质心” $t_{i,j}^{\text{cen}}$ 间的“距离”,可表示为

$$R_{ik}^{\text{sys}} = |t_{i,j}^{\text{cen}} - t_k^{\text{Osys}}| \quad (22)$$

类比于质心计算公式,第 i 台设备时间窗的质心 $t_{i,j}^{\text{cen}}$ 定义为设备时间窗内期望维护成本的中心,则有:

$$t_{i,j}^{\text{cen}} = \frac{E(\bar{c}_{ij}^{\text{PM}}) t_{ij}^{\text{PM}} + \int_{t_{ij}^{\text{OM}}}^{t_{ij}^{\text{PM}}} E(\bar{c}_{ij}^{\text{OM}}(t)) t dt}{E(\bar{c}_{ij})} \quad (23)$$

式中: $\bar{c}_{ij}^{\text{OM}}(t)$ 为在 t 时刻进行机会维护的维修总成本率,其期望可表示为

$$E(\bar{c}_{ij}^{\text{OM}}(t)) = [C_i^{\text{M}} + C_i^{\text{CM}} E(N_i(t))] +$$

$$\int_{\omega_{ij}\tau_i^M}^{\tau_i^M} c^d(\tau_i^M - \tau) \frac{f_D(\tau)}{\bar{F}_D(\omega_{ij}\tau_i^M)} d\tau +$$
$$C_i^{\text{pen}}(t) \frac{P_{ij}^{\text{OM}}(t)}{t}$$

(24)

基于以上所述的系统维护整合模型,具体决策步骤如下.

步骤 1 从系统初始活动次数,即 $r = 1$ 开始,各设备处于全新状态;

步骤 2 输入各设备维护时间窗及质心,并赋值给 3 个时刻 t^{st} 、 t^{en} 和 t^{cen} ,即

$$t_{i,1}^{\text{st}} = t_{i1}^{\text{OM}}, \quad t_{i,1}^{\text{cen}} = t_{i1}^{\text{C}}, \quad t_{i,1}^{\text{en}} = t_{i1}^{\text{PM}}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

步骤 3 判断累计系统维护活动次数是否达到维护规划期 T^{sys} . 若是,结束系统维护规划;否则,转入步骤 4;

步骤 4 若第 r 次维护活动由强制预防维护引发,则 $t_r^{\text{sys}} = \min_i t_{i,r}^{\text{en}}$,用 $T^{\text{win}*}$ 进行维护整合判断,即

$$\Theta(i, t_r^{\text{sys}}) = \begin{cases} 1, & t_{i,r}^{\text{en}} \leq t_r^{\text{sys}} + T^{\text{win}*} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

(25)

式中: $\Theta(i, t_r^{\text{sys}}) = 0$ 表示在系统第 r 次维护活动中不对第 i 台设备采取维护活动;而 $\Theta(i, t_r^{\text{sys}}) = 1$ 表示在系统第 r 次维护活动中实施时刻 t_r^{sys} 对第 i 台设备进行维护. 若第 r 次维护活动由接受第 k^{sys} 个生产等待的机会引发,则 $t_r^{\text{sys}} = t_{k^{\text{sys}}}^{\text{O}} \in [\min_i t_{i,r}^{\text{st}}, \min_i t_{i,r}^{\text{en}}]$,用引力窗 F^* 进行维护整合判断,即

$$\Theta(i, t_r^{\text{sys}}) = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 台设备接受机会} \parallel F_{ik^{\text{sys}}} \geq F^* \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

(26)

从而得到第 r 次系统维护活动中进行维护的设备集合为 $\Omega_r = \{i \mid \Theta(i, t_r^{\text{sys}}) = 1\}$ 并实施维护活动,其维护持续时间 τ_r^{sys} 可以表示为

$$\tau_r^{\text{sys}} = \begin{cases} \max_{i \in \Omega_r} \{ \tau_i^{\text{M}} \}, & \text{第 } r \text{ 次维护活动由强制预防维护触发} \\ \max_{i \in \Omega_r} \{ \tau_i^{\text{M}}, \tau_{k^{\text{sys}}}^{\text{O}} \}, & \text{第 } r \text{ 次维护活动由接受第 } k^{\text{sys}} \text{ 个} \\ & \text{生产等待的机会触发} \end{cases}$$

(27)

步骤 5 进入下一次维护活动,赋值 $r=r+1$,则

$$t_{i,r}^{\text{st}} = \begin{cases} t_{r-1}^{\text{sys}} + t_{ij}^{\text{OM}}, & \text{for } \Theta(i, t_r^{\text{sys}}) = 1 \\ t_{i,r-1}^{\text{st}}, & \text{for } \Theta(i, t_r^{\text{sys}}) = 0 \end{cases}$$

(28)

$$t_{i,r}^{\text{cen}} = \begin{cases} t_{r-1}^{\text{sys}} + t_{ij}^{\text{C}}, & \text{for } \Theta(i, t_r^{\text{sys}}) = 1 \\ t_{i,r-1}^{\text{cen}}, & \text{for } \Theta(i, t_r^{\text{sys}}) = 0 \end{cases}$$

(29)

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$t_{i,r}^{\text{en}} = \begin{cases} t_{r-1}^{\text{sys}} + t_{ij}^{\text{PM}}, & \text{for } \Theta(i, t_r^{\text{sys}}) = 1 \\ t_{i,r-1}^{\text{en}}, & \text{for } \Theta(i, t_r^{\text{sys}}) = 0 \end{cases}$$

(30)

$$i = 1, 2, \dots, n$$

然后转回步骤 3 进行下一次维护活动的维护规划.

综上,系统层优化就是以最小化维护规划期内的系统维护总成本率为目标,得到最优维护整合的时间窗 $T^{\text{win}*}$ 及引力窗 F^* . 系统的维护总成本为各设备维护总成本之和,设备的维护总成本包括维护成本、小修成本、停机成本和惩罚成本. 若第 r 次系统维护活动是设备强制预防维护导致的,则第 i 台设备的维护总成本 C'_{ir}^{P} 为

$$C'_{ir}^{\text{P}} = \begin{cases} c_i^{\text{d}} \tau_r^{\text{sys}}, & \text{for } i \notin \Omega_r \\ C_i^{\text{M}} + C_i^{\text{pen}}(t_r^{\text{sys}}) + \\ C_i^{\text{CM}} E(N_f(T_r^{\text{sys}})) + c_i^{\text{d}} \tau_r^{\text{sys}}, & \text{for } i \in \Omega_r \end{cases}$$

(31)

式中: T_r^{sys} 为系统第 r 次维护活动的长度.

若第 r 次系统维护活动是设备接受第 k^{sys} 个生产等待的机会导致的,则第 i 台设备的维护总成本 C'_{ir}^{O} 为

$$C'_{ir}^{\text{O}} = \begin{cases} c_i^{\text{d}} (\tau_r^{\text{sys}} - \tau_{k^{\text{sys}}}^{\text{O}}), & \text{for } i \notin \Omega_r \\ C_i^{\text{M}} + C_i^{\text{pen}}(t_r^{\text{sys}}) + C_i^{\text{CM}} E(N_f(T_r^{\text{sys}})) + \\ c_i^{\text{d}} (\tau_r^{\text{sys}} - \tau_{k^{\text{sys}}}^{\text{O}}), & \text{for } i \in \Omega_r \end{cases}$$

(32)

3 算例分析

3.1 算例概览及策略对比

考虑一个由 6 台串行设备组成的机械加工生产线,如车床、磨床、铣床等组成的串行生产系统,生产线维护规划期 $T^{\text{sys}} = 1\,500\text{ h}$. Weibull 分布特别适用于机械加工设备的故障率建模,故假设该串行生产线中每台设备的故障率分布均服从 Weibull 分布,即为

$$h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1}$$

(33)

式中: β 为形状参数; α 为尺度参数,可以通过设备历史故障数据的统计分析得到. 生产等待带来的机会的到达服从强度为 $\lambda = 0.05\text{ 次/h}$ 的齐次泊松过程,其持续时间 $\tau^{\text{O}} \sim N(2, 0.6)$,可通过生产线生产等待数据的统计,并拟合相应分布获得. 具体设备参数如表 1 所示. 其中:成本参数 C_i^{M} 、 C_i^{CM} 、 c_i^{pen} 、 c_i^{d} 及维护相关参数 τ_i^{M} 、 θ_i 是基于设备的历史维护数据,通过统计分析得到的;各设备的故障率参数 α_i 和 β_i 是基于历史故障数据,采用最小二乘法或最大似然估计等得到的.

表 1 设备参数
Tab.1 Equipment parameters

i	$C_i^M/\text{元}$	$C_i^{\text{CM}}/\text{元}$	$c_i^{\text{pen}}/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	$c_i^d/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	τ_i^M/h	α_i	β_i	θ_i
1	513	628.0	52.3	1748	3.42	3.10	67.00	0.97
2	507	711.0	44.8	1802	3.31	2.90	84.24	0.95
3	535	998.0	37.2	2378	3.00	3.03	107.78	0.98
4	629	1 131.2	53.4	2752	3.20	2.88	103.36	0.95
5	908	876.0	51.4	1822	2.89	3.12	78.59	0.98
6	545	884.0	37.2	1804	3.14	3.70	98.26	0.97

为获得时间窗和引力窗维护整合模型下系统的最优维护策略,基于 MATLAB 对系统进行仿真,系统维护模型的决策变量为 $T^{\text{win}*}$ 和 F^* . $T^{\text{win}*}$ 取值以设备预防维护周期为依据,通过设备层的数值模拟得到系统中设备的最长预防维护周期约为 250 h,因此 $T^{\text{win}*}$ 的搜索范围为 $[0,250]$ h,搜索步长为 10 h,通过仿真得到 F^* 的最优取值落在 $[3,9]$ kN 区间内,即为搜索范围,搜索步长为 0.1 kN. 生产等待的随机性给系统带来了不确定性,因此利用仿真获得系统平均总维护成本率,每次数值模拟均对系统做 2 000 次随机场景中的仿真.

为了验证时间窗和引力窗维护整合策略的有效性,本文设置了两组对照策略进行比较,第 1 组既不考虑时间窗也不考虑引力窗,即不存在维护组合的

情况;第 2 组仅考虑时间窗的情况,分别验证了引力窗和时间窗策略的有效性. MATLAB 仿真结果显示,在既不考虑时间窗也不考虑引力窗的情况下,系统维护总成本率为 $c_0^{\prime\text{sys}}=727.866\ 6$ 元;仅考虑时间窗的情况下, $T^{\text{win}}=80$ h,系统维护总成本率为 $c_1^{\prime\text{sys}}=668.785\ 5$ 元;考虑时间窗和引力窗的情况下, $T^{\text{win}*}=80$ h, $F^*=4.9$ kN,得到系统最低维护总成本率为 $c_2^{\prime\text{sys}}=583.495\ 2$ 元. 故时间窗与引力窗相结合的策略优于两种对照策略. 时间窗和引力窗维护整合最优模型下,系统在某次仿真中的维护计划表如表 2 所示,展示了系统在第 1~18 次维护活动中的停机维护时刻及维护整合情况. 其中:“1”表示在对应周期中第 i 台设备参与维护整合;“0”表示在对应周期中第 i 台设备不参与维护整合.

表 2 系统维护时刻表
Tab.2 System maintenance schedule

i	系统维护活动次数								
	$r=1$	$r=2$	$r=3$	$r=4$	$r=5$	$r=6$	$r=7$	$r=8$	$r=9$
1	1	0	1	0	1	1	0	1	1
2	0	1	0	1	0	1	0	1	1
3	0	1	0	1	0	1	0	1	0
4	0	1	0	1	0	1	0	1	1
5	1	0	1	0	1	1	0	1	1
6	1	0	1	0	1	0	1	1	1
t/h	145.62	160.80	271.41	335.27	426.45	525.55	565.02	718.55	862.85

i	系统维护活动次数								
	$r=10$	$r=11$	$r=12$	$r=13$	$r=14$	$r=15$	$r=16$	$r=17$	$r=18$
1	0	1	0	1	0	1	1	1	0
2	0	1	0	0	1	1	1	0	0
3	1	0	0	1	0	1	0	1	1
4	0	0	1	0	0	1	0	1	0
5	0	1	0	0	1	1	1	1	0
6	0	1	0	0	1	1	1	1	0
t/h	903.84	985.06	1 033.36	1 065.04	1 112.00	1 240.07	1 346.28	1 478.07	1 553.55

3.2 不同停机成本下的策略对比

对于串行生产系统,对设备进行维护组合可有效减少系统的维护停机次数,进而降低停机成本.因此,停机成本的大小是影响维护决策的主要因素.为了验证所提策略的有效性,在上述串行系统中,令设备的其他参数保持不变,所有设备停机成本成倍变化,对以上 3 组策略分别进行仿真,结果如图 5 所示.其中: κ 为停机成本变化倍数; c_{sys}' 为系统维护总成本率.由图 5 可知,3 组策略下的维护总成本率均随着停机成本的增大而增大.对其进行具体对比分析,可以发现 $c_2^{\text{sys}} < c_1^{\text{sys}} < c_0^{\text{sys}}$ 始终成立,进一步证明了所提策略的有效性.

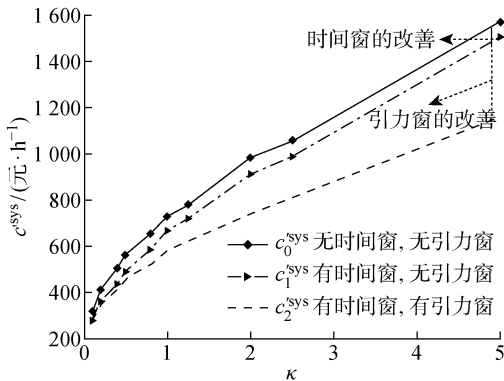


图 5 不同停机成本下的系统维护总成本率分析
Fig. 5 Total cost rate analysis of system maintenances at different downtime costs

此外,停机成本越小, c_2^{sys}' 与 c_1^{sys}' 越为接近;停机成本越大, c_1^{sys}' 与 c_0^{sys}' 越为接近.引力窗改进的总维护成本率占总改进的维护成本率的比例 ϕ 可以表示为

$$\phi = \frac{c_1^{\text{sys}} - c_2^{\text{sys}}}{c_0^{\text{sys}} - c_2^{\text{sys}}} \tag{34}$$

随着停机成本的增加, ϕ 的变化如图 6 所示.由图 6 可知,停机成本越大, ϕ 越大,意味着引力窗改进的效果越明显.这是因为当停机成本增加时,设备更趋向于利用生产等待进行机会维护,从而避免设备强制性预防维护导致巨额停机成本的情况.由仿真结果可知,当 $\kappa=0.1$ 时,最优维护策略下,在维护规划期内由外部机会引发的系统维护的平均次数为 10.152 5 次,由内部机会引发的系统维护的平均次数为 6.928 次;而当 $\kappa=50$ 时,最优维护策略下,由外部机会引发的系统维护的平均次数为 7.826 次,由内部机会引发的系统维护的平均次数仅为 0.015 次.故停机成本越大时,引力窗对于系统维护计划的改进越为重要;停机成本相对较小时,时间窗对于系统维护计划的改进越为重要.不同停机成本下的具体仿真及优化结果如表 3 所示.

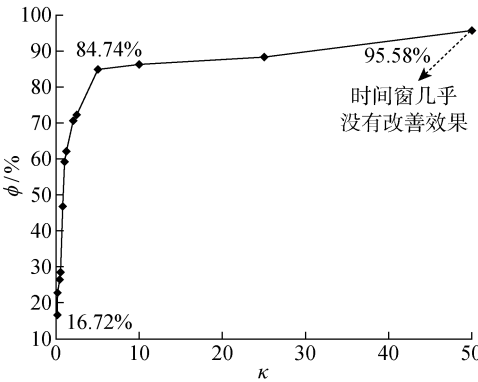


图 6 不同停机成本下的引力窗改善占比分析
Fig. 6 Analysis of the proportion of gravity window improvements at different downtime costs

表 3 不同停机成本的仿真结果

Tab. 3 Simulation results of different downtime costs

κ	$T_{\text{win}}^*/\text{h}$	F^*/kN	$c_0^{\text{sys}}'/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	$c_1^{\text{sys}}'/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	$c_2^{\text{sys}}'/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	$\phi/\%$
0.10	60	2.9	318.715 27	281.839 2	274.437 1	16.72
0.20	80	4.0	411.607 28	361.176 6	346.234 0	22.86
0.40	90	3.7	506.001 81	437.251 9	412.490 9	26.48
0.50	100	3.9	562.588 74	490.878 3	462.240 1	28.54
0.80	90	4.2	656.733 53	586.201 3	524.346 7	46.72
1.00	80	4.9	727.866 63	668.785 5	583.495 2	59.08
1.25	140	4.5	783.242 24	723.118 9	624.985 7	62.01
2.00	180	4.0	985.138 45	913.276 8	741.153 4	70.55
2.50	210	7.2	1 057.890 10	989.734 4	813.114 3	72.16
5.00	240	5.9	1 572.102 50	1 509.066 0	1 159.151 0	84.74
10.00	340	5.4	2 433.612 10	2 400.648 0	2 192.511 0	86.33
25.00	470	6.2	4 006.108 30	3 993.238 0	3 897.190 0	88.18
50.00	560	13.0	6 785.667 50	6 780.433 4	6 667.250 4	95.58

3.3 不同生产等待到达频率的策略对比

在此维护模型中,考虑了齐次泊松到达的生产等待,利用生产等待进行机会维护是降低维护成本的一个重要手段,故生产等待到达的频率对于维护决策也有很大的影响.为了验证所提策略的有效性,令模型的其他参数保持不变,改变生产等待到达的频率,对以上 3 组策略分别进行仿真,结果如图 7 所示.由图 7 可知,随着 λ 的增大,即生产等待的到达趋于频繁, $c_0^{'sys}$ 、 $c_1^{'sys}$ 和 $c_2^{'sys}$ 均持续减小.对其进行具体对比分析,可以发现 $c_2^{'sys} < c_1^{'sys} < c_0^{'sys}$ 始终成立,证明了所提策略的有效性.

此外,随着 λ 的增大, ϕ 的变化如图 8 所示.由图 8 可知, λ 越大, ϕ 越大,意味着生产等待的到达越

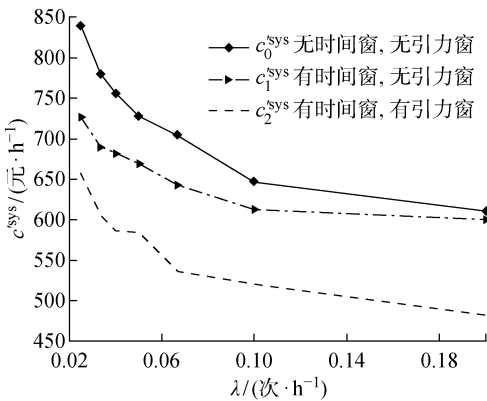


图 7 不同生产等待到达频率下的系统维护总成本率分析
Fig. 7 Total cost rate analysis of system maintenances at different production wait frequencies

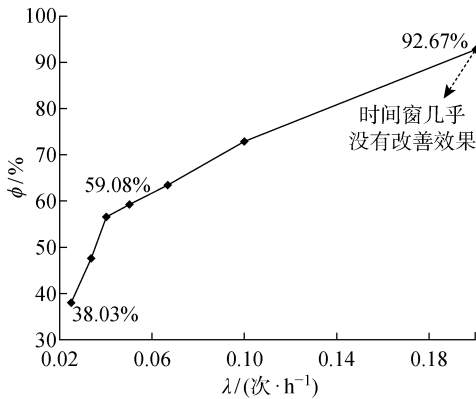


图 8 不同生产等待到达频率下的引力窗改善占比分析
Fig. 8 Analysis of the proportion of gravity window improvements at different production wait frequencies

频繁,引力窗改进的效果越明显.这是因为生产等待的到达越频繁,设备越大概率地利用生产等待进行机会维护.由仿真结果可知,当 $\lambda=0.025$ 次/h 时,在维护规划期内由外部机会引发的系统维护的平均次数为 7.462 次,由内部机会引发的系统维护的平均次数为 1.730 5 次;而当 $\lambda=0.2$ 次/h 时,由外部机会引发的系统维护的平均次数为 14.082 次,由内部机会引发的系统维护的平均次数仅为 0.045 5 次.故生产等待的到达越频繁,引力窗对于系统维护总成本率的改进越为重要;生产等待到达相对稀疏时,时间窗对于系统维护总成本率的改进越为重要.不同生产等待到达的频率下的具体仿真及优化结果如表 4 所示.

表 4 不同生产等待到达频率的仿真结果

Tab. 4 Simulation results of different production wait frequencies

$\lambda/(\text{次} \cdot \text{h}^{-1})$	$T^{\text{win}^*}/\text{h}$	F^*/kN	$c_0^{'sys}/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	$c_1^{'sys}/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	$c_2^{'sys}/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	$\phi/\%$
1/40	80	1.6	838.871 3	726.119 7	656.925 9	38.03
1/30	70	1.4	779.477 4	689.210 0	607.462 0	47.52
1/25	60	1.9	755.503 6	681.504 3	585.652 5	56.43
1/20	80	4.9	727.866 6	668.785 5	583.495 2	59.08
1/15	180	5.1	703.895 2	642.503 8	536.292 0	63.37
1/10	220	5.3	646.689 8	612.300 3	520.242 7	72.80
1/5	180	1.0	609.526 2	600.181 4	482.039 6	92.67

4 结语

本文同时考虑了串行生产系统面临的由预防维护引发的内部维护机会以及由生产等待带来的随机外部维护机会,提出时间窗与引力窗相结合的机会维护策略.对设备和系统分别进行维护建模,利用时间窗对内部机会引发的维护活动进行整合,利用引

力窗对外部机会引发的维护活动进行整合.算例分析结果表明,在复杂的参数环境中,相对于无维护整合模型和时间窗模型,时间窗与引力窗相结合的决策模型均可以获得更低的系统维护总成本率,具有广泛的适应性与稳定性,且随着停机成本的增大或生产等待到达频率的提高,引力窗的改善占比呈递增趋势.因此,在停机成本较高或生产中频繁发生

的串行生产系统中,引力窗对于维护计划的改进更为重要。

参考文献:

- [1] XIA T B, XI L F, ZHOU X J, *et al.* Dynamic maintenance decision-making for series-parallel manufacturing system based on MAM-MTW methodology[J]. **European Journal of Operational Research**, 2012, 221(1): 231-240.
- [2] 俞梦琦, 史凯龙, 周晓军. 基于双时间窗的多设备串行系统机会维护策略[J]. **上海交通大学学报**, 2020, 54(1): 69-75.
YU Mengqi, SHI Kailong, ZHOU Xiaojun. Opportunistic maintenance strategy for multi-unit serial systems based on dual time window[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2020, 54(1): 69-75.
- [3] ZHOU P, YIN P T. An opportunistic condition-based maintenance strategy for offshore wind farm based on predictive analytics[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2019, 109: 1-9.
- [4] ZHAO H S, XU F H, LIANG B T, *et al.* A condition-based opportunistic maintenance strategy for multi-component system[J]. **Structural Health Monitoring**, 2019, 18(1): 270-283.
- [5] NGUYEN K A, DO P, GRALL A. Multi-level predictive maintenance for multi-component systems[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2015, 144: 83-94.
- [6] ZHOU X J, XI L F, LEE J. Opportunistic preventive maintenance scheduling for a multi-unit series system based on dynamic programming[J]. **International Journal of Production Economics**, 2009, 118(2): 361-366.
- [7] DO VAN P, BARROS A, BÉRENGUER C, *et al.* Dynamic grouping maintenance with time limited opportunities[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2013, 120: 51-59.
- [8] NZUKAM C, VOISIN A, LEVRAT E, *et al.* Opportunistic maintenance scheduling with stochastic

opportunities duration in a predictive maintenance strategy[J]. **IFAC-PapersOnLine**, 2018, 51(11): 453-458.

- [9] KHATAB A, AGHEZZAF E H, DIALLO C, *et al.* Selective maintenance optimisation for series-parallel systems alternating missions and scheduled breaks with stochastic durations[J]. **International Journal of Production Research**, 2017, 55(10): 3008-3024.
- [10] LI P, WANG W B, PENG R. Age-based replacement policy with consideration of production wait time[J]. **IEEE Transactions on Reliability**, 2016, 65(1): 235-247.
- [11] WU T Y, MA X B, YANG L, *et al.* Proactive maintenance scheduling in consideration of imperfect repairs and production wait time[J]. **Journal of Manufacturing Systems**, 2019, 53: 183-194.
- [12] YANG L, ZHAO Y, PENG R, *et al.* Opportunistic maintenance of production systems subject to random wait time and multiple control limits[J]. **Journal of Manufacturing Systems**, 2018, 47: 12-34.
- [13] TRUONG B H, CHOLETTE M E, BORGHESENI P, *et al.* Opportunistic maintenance considering non-homogenous opportunity arrivals and stochastic opportunity durations[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2017, 160: 151-161.
- [14] TRUONG B H, CHOLETTE M E, BORGHESENI P, *et al.* Opportunistic maintenance for wind turbines considering external opportunities—A case study [C]// **Proceedings of 3rd International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing**. Belgrade, Serbia: Springer, 2018: 211-226.
- [15] PHAM H, WANG H Z. Imperfect maintenance[J]. **European Journal of Operational Research**, 1996, 94(3): 425-438.
- [16] CINLAR E. Introduction to stochastic processes [M]. Mineola, NY, USA: Dover Publications, Inc., 2013.

(本文编辑:石易文)