

文章编号: 1006-2467(2019)03-0276-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.03.004

面向串并联生产系统机会维护的 产能平衡导向租赁利润优化策略

孙博文, 郭闻雨, 夏唐斌, 潘尔顺, 奚立峰

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对服务型制造模式和维修外包服务, 面向租赁生产系统的串并联复杂结构和多工序产能需求, 提出以产能平衡为前提的租赁利润最大化机会维护策略. 以租赁生产系统的串并联结构为研究重点, 在维护决策建模中考虑整个系统的产能平衡; 构建多类型设备健康演化趋势函数, 规划成本率最小化的贯序预知维护计划; 在工序层和系统层, 以单设备预定的维护时点为组合维护契机, 优化机会维护方案; 建立以产能平衡为导向的租赁利润优化策略, 改进租赁利润结余算法, 以实时生成机会维护方案, 在保证产能平衡的同时实现租赁利润最大化. 通过对比租赁合同期内的全局性维护方案, 验证了该策略在服务外包决策中具有显著的经济优势.

关键词: 机会维护; 预知维护; 产能平衡; 串并联系统; 租赁利润优化

中图分类号: TH 17

文献标志码: A

Capacity Balancing-Oriented Leasing Profit Optimization of Opportunistic Maintenance for Leased Series-Parallel Production System

SUN Bowen, GUO Wenyu, XIA Tangbin, PAN Ershun, XI Lifeng

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

Abstract: Aimed at service-oriented manufacturing model and outsourcing paradigm, an opportunistic maintenance strategy based on capacity balancing is proposed to meet the demand of complex series-parallel structure and multi-process, eventually maximizing the leasing profits. The series and parallel structures are taken as the research emphasis. And the capacity balancing of the whole system is also considered. Sequential maintenance scheduling for each machine with individual health evolution aims to minimize the maintenance cost rate. At the process layer and the system layer, these maintenance time points are taken as combined maintenance opportunity. A capacity balancing-oriented leasing profit optimization (CB-LPO) policy is also developed by considering the capacity balancing to dynamically optimize maintenance decisions. In this study, by comparing with the global maintenance scheme during the lease contract period, it is verified that the proposed strategy has significant economic advantages in service outsourcing decision-making.

Key words: opportunistic maintenance; predictive maintenance; capacity balancing; series-parallel system; leasing profit optimization

收稿日期: 2018-07-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875359, 51535007); 临港地区智能制造专项(ZN2017020102); 国家市场监督管理总局质量基础设施效能研究重点实验室 2018 年开放课题(KF20180302)

作者简介: 孙博文(1995-), 男, 黑龙江省哈尔滨市人, 硕士生, 主要研究方向为服务型制造与维护策略.

通信作者: 夏唐斌, 副教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-34208589; E-mail: xtbxtb@sjtu.edu.cn.

自从 20 世纪 80 年代末航空发动机制造商首创发动机租赁业务以来,服务型制造日渐成为工业界的重要发展模式.越来越多的设备制造商采用“产品+服务”形式的方案,通过拓展维护外包服务来保证行业竞争优势.现代制造业普遍存在装备技术复杂、制造设备昂贵、产品库存冗余等问题,以租赁代替购买的方式能够使下游的生产企业减轻巨额设备投资和运维管理费用的压力.同时,上游的设备制造商也能够消除产品库存,并提供更专业的维护服务.为了保证租赁生产系统的可靠性,并在确保其生产能力的同时实现较高的运维经济性,具有串并联复杂结构的现代化生产系统亟需统筹产能平衡和租赁利润,拓展传统的维护决策理论和机会维护方法,以支撑设备制造商(出租方)动态地制定维护策略,更好地服务于生产企业(承租方).

随着现代制造业对制造设备可靠性要求的不断提高,相关研究人员已经提出了多种类型设备的维护决策模型. Yang 等^[1]研究了针对石油管道的退化故障和突然故障之间竞争失效的问题,根据预防维护的可靠性指标和状态监测次数制定替换策略,并联合优化替换区间、监控周期和可靠性准则来实现预期成本率的最小化. 郝虹斐等^[2]针对复杂装配预防性维护决策中设备寿命和成本估计不足的问题,基于虚拟寿命理论研究了维修效率与设备寿命之间的关系,提出一种预防性维护的多目标决策模型. Lu 等^[3]提出一种将基于运行的预防性维护集成到生产调度问题中的联合模型,并针对稳健系统的双目标优化问题提出一种基于最优调度的遗传算法. Tao 等^[4]利用模式识别和层次分析相结合的方法着重提取和评价环境因素对失效率评估的影响,并将其应用到设备的失效率演化模型中,以制定最优的维护策略. 随着服务型制造日趋成为研究热点,已有学者针对服务外包的维护策略进行了研究. 目前,研究内容主要是对于单台租赁设备的可靠性建模,研究重点主要有可靠性阈值、系统役龄损减和租赁费用评估. Schutz 等^[5]针对租赁设备制定了两种维护策略:考虑顾客要求、基于役龄退化阈值建模的预知维护策略;维护周期之间以修复取代小修的维护策略. Hajej 等^[6]提出一种综合考虑单机生产和维护的策略,通过对租赁期延长的评估实现双方利益最大化. Iskandar 等^[7]针对租赁设备的役龄增长和使用率演化问题,综合考虑故障检修、预知维护费用以及惩罚成本,最终实现了总维护成本的最小化.

当今工业界大多采用多设备复杂生产系统,由于需要进一步考虑设备间的关联性及系统结构的影

响,相关研究人员对系统层维护决策进行了拓展性研究. Xia 等^[8]针对可重构制造系统,分析系统的动态重构过程和设备健康演化趋势,提出可重构维护时间窗理论. 张晓文等^[9]面向多工序串并联系统,根据产线平衡原理采用 Monte Carlo 模拟方法确定合理的机会维护可靠性阈值. Khatab 等^[10]针对串并联生产系统,利用连续作业间的离散停机,采取针对性维护策略,以提高系统完成加工任务的准确性. 张博文等^[11]针对批量计划问题模型,采用基于设备运行的预防性维护思想与成组维护策略,建立了以系统生产与维护总成本最小化为目标的并行机生产计划与预防性维护联合决策模型. 为了有效地支撑当前的服务型制造模式,亟需进一步结合设备间的结构依赖性来实现租赁利润最大化,并在分析系统健康管理与维护决策制定两者内在关系的基础上提出面向租赁系统的维护策略. 基于租赁系统的行业热点需求, Xia 等^[12]针对串联结构提出租赁利润结余算法,根据维护作业提前的经济性动态评估制定成组维护方案,但该研究未涉及更复杂的串并联结构的产能平衡约束问题.

本文针对串并联租赁生产系统的结构特征和多工序平衡产线的产能特点,提出一种以产能平衡为导向的租赁利润优化(CB-LPO)维护策略. 针对系统各个工序中不同类型的租赁设备,构建多类型设备健康演化趋势函数,规划贯序预知维护计划. 在工序层和系统层,以单设备预定的维护时点为组合维护契机,优化机会维护方案;引入系统产能平衡要素,量化建模产能惩罚成本,改进租赁利润结余算法,以实时生成机会维护方案,在保证产能平衡的同时实现租赁利润最大化.

1 问题描述

针对机会维护决策问题,将研究对象设定为多工序串并联租赁生产系统,其结构示意图如图 1 所示. 该系统由 J 道工序串联而成以实现不同的加工工序,工序 j 由 K_j 台设备并联而成以确保生产能

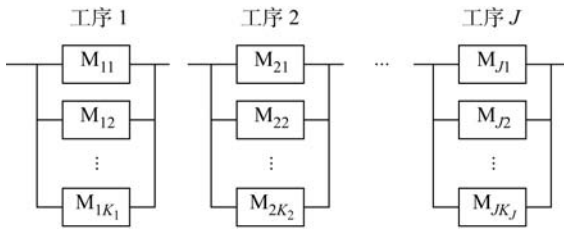


图 1 串并联生产系统示意图

Fig. 1 System structure of a series-parallel leased system

力, M_{jk} 为工序 j 中的第 k 台设备 ($j = 1, 2, \dots, J$; $k = 1, 2, \dots, K_j$). 为了统筹产能平衡和租赁利润, 提出 CB-LPO 维护策略以支撑服务型制造模式.

(1) 在设备层(面向各单台设备), 针对租赁系统中的多类型(不同工序)制造设备, 构建整合内部维护和外部环境劣化因素的健康演化趋势函数, 以单台设备的成本率最小为决策目标, 动态输出各台租赁设备的预知维护周期.

(2) 在工序层(面向并联设备组), 针对设备组中与触发设备类型相同但可靠性参数不同的设备, 建立数学模型量化其停机维护对产能的影响, 利用并联系统 CB-LPO 策略规划组合维护策略, 并输出各工序为保证产能平衡所需的最大停机数量, 以支撑系统层的维护优化决策.

(3) 在系统层(面向串联工序组), 针对层中其他与机会维护触发设备串联的非修设备, 动态建模并计算串联系统 CB-LPO 决策的租赁利润结余, 与工序层输出一起联合决策确保产能平衡下的各工序停机数量, 从而优化并实时输出机会维护组合方案.

2 产能平衡导向租赁利润优化策略

2.1 设备层贯序维护计划

在串并联租赁生产系统中, 不同工序的各台设备都有着不同且独立的衰退特性. 在整个租赁周期内, 设备的故障率都会受到内部和外部因素的影响, 且随着役龄的增加而上升. 同时, 考虑到预知维护作业只能将设备恢复到较新的健康状态, 本文引入基于两种调整因子的修复非新模型. 预知维护前后设备 M_{jk} 的失效率函数为

$$\lambda_{(i+1)jk}(t) = \epsilon_{jk} \lambda_{ijk}(t + a_{jk} T'_{ijk}) \quad (1)$$

$$t \in (0, T_{(i+1)jk})$$

式中: T_{ijk} 为成本率模型中设备 M_{jk} 的第 i 个维护周期, T'_{ijk} 是从系统层的维护决策反馈而来的实际维护时间间隔, 如果系统层决策提前预知维护作业, 则由成本率模型计算出的原最优维护时间间隔 T^*_{ijk} 将被缩短; a_{jk} ($0 < a_{jk} < 1$) 为役龄递增因子, 描述内部维护因素的影响; ϵ_{jk} ($\epsilon_{jk} > 1$) 为环境影响因子, 描述外部工况因素的影响.

从经济层面而言, 在设备层建立维护成本率模型可以制定动态预知维护策略. M_{jk} 在第 i 个维护周期中的维护成本率 c_{ijk} 可以表述为

$$c_{ijk} = \frac{C^P_{ijk} + C^R_{ijk} \int_0^{T_{ijk}} \lambda_{ijk}(t) dt}{T_{ijk} + T^P_{ijk} + T^R_{ijk} \int_0^{T_{ijk}} \lambda_{ijk}(t) dt} \quad (2)$$

式中: C 为成本; P 表示预知维护作业; R 表示小修

作业; 分子表示当前维护周期内的总维护成本; 分母表示整个维护周期时间段. 求解上式中的最优周期 T_{ijk} , 使得 c_{ijk} 最小化. 采用动态循环的预知维护规划, 结合贯序周期期间的衰退演化规则, 动态输出各租赁设备的最优维护周期序列.

2.2 租赁利润量化评估

系统层维护决策优化的构建核心, 是以单台设备预知维护作业停机维护的时点为契机, 动态分析是否需要提前其他相关设备(与触发设备串联或并联)的预知维护作业, 即若加入当前维护组合是否能产生租赁利润结余, 从而实现系统全局的维护成本降低和租赁利润增加. 租赁利润结余的量化评估包括维护提前引起的租赁利润收益和租赁利润损失.

2.2.1 租赁利润收益(LPA) 在串并联租赁生产系统中, 当单台设备最先到达预知维护作业时点 t_{ijk} 时, 以此作为系统层第 u 个周期的维护决策时点 t_u . 其他设备的预知维护作业被提前加入该时点的维护组合 GP_u 后可能会产生的 LPA 包括:

(1) 人员派遣收益 LPA^D_{jku} . 若每次为 1 台设备专程派出 1 支维护团队, 则会产生较高的人员派遣成本. 若将其他设备的预知维护作业提前一起实施, 非修设备 M_{jk} 的人员派遣收益即为 1 次人员派遣的费用 C^D_{ijk} , 即

$$LPA^D_{jku} = C^D_{ijk} \quad (3)$$

(2) 失效控制收益 LPA^M_{jku} . 提前维护调度使预知维护周期从 T^*_{ijk} 缩短为 $T^*_{ijk} - (t_{ijk} - t_u)$, 可降低设备的累积失效概率, 故障次数期望值的减小可以降低相应的小修作业成本.

$$LPA^M_{jku} =$$

$$\left[\int_0^{T^*_{ijk}} \lambda_{ijk}(t) dt - \int_0^{T^*_{ijk} - (t_{ijk} - t_u)} \lambda_{ijk}(t) dt \right] C^R_{ijk} \quad (4)$$

(3) 设备租金收益 LPA^R_{jku} . 当非修设备 M_{jk} 的预知维护作业被提前至当前维护组合 GP_u 时, 即可免去未来的停机维护规划. 生产时间的增加对于出租方意味着额外的租金收益, 令 κ_{jk} 代表设备 M_{jk} 的租金率, 则有

$$LPA^R_{jku} = T^P_{ijk} \kappa_{jk} \quad (5)$$

2.2.2 租赁利润损失(LPR) 负责外包运维的出租方对非修设备 M_{jk} 提前实施预知维护作业, 除了会产生 LPA 之外, 也会产生一定的 LPR, 具体包括:

(1) 频繁维护损失 LPR^P_{jku} . 若非修设备 M_{jk} 的预知维护提前, 维护周期缩短至 $T^*_{ijk} - (t_{ijk} - t_u)$, 将会导致租赁合同期内, 出租方需提供更多的维护次数, 增加相应的预知维护成本. 根据预知维护周期的

变化和调整后更新后的周期,频繁维护损失可以表示为

$$\text{LPR}_{jku}^p = \frac{t_{ijk} - t_u}{T_{ijk}^* - (t_{ijk} - t_u)} C_{ijk}^p \quad (6)$$

(2) 加速折旧损失 LPR_{jku}^D . 对每台租赁设备的资产评估而言,频繁维护会导致加速折旧. 加速折旧损失由非修设备 M_{jk} 的维护周期变化和租赁合同期 (T_L) 的比例、合同始末的价值折损 ($V_{jk}^S - V_{jk}^E$) 及折旧率系数 δ_{jk} 构建:

$$\text{LPR}_{jku}^D = \delta_{jk} \frac{t_{ijk} - t_u}{T_L} (V_{jk}^S - V_{jk}^E) \quad (7)$$

(3) 产能惩罚损失 LPR_{jku}^C . 若触发设备同一工序的非修设备 M_{jk} 被提前维护,将会导致工序乃至整个系统的产能下降,出租方需为因维护作业而导致的承租方产能下降支付惩罚费用. 产能惩罚损失用产能损失时长和产能惩罚系数 μ_{jk}^C 表示:

$$\text{LPR}_{jku}^C = T_{ijk}^p \mu_{jk}^C \quad (8)$$

由于每道工序的各台设备产能之和相等,每台并联非修设备在停机后加入维护组合时,对产能减少的影响与该工序设备总数成反比.

2.2.3 租赁利润结余 (LPS) 根据上述 LPA 和 LPR 的量化建模以及串并联租赁系统的生产特点,动态分析当前时点每台非修设备的 LPS,并依此权衡是否将原定预知维护提前到 t_u .

(1) 并联关系租赁利润结余. 对与位于工序 m_1 的第 n_1 台触发设备 $M_{m_1 n_1}$ ($t_u = t_{i m_1 n_1} = \min\{t_{ijk}\}$) 处于同一工序的设备 M_{jk} ($j = m_1$ 且 $k \neq n_1$) 而言,并联关系租赁利润结余可表示为

$$\begin{aligned} \text{LPS}(p)_{jku} &= \text{LPA}_{jku} - \text{LPR}_{jku} = \\ &= \text{LPA}_{jku}^R + \text{LPA}_{jku}^D + \text{LPA}_{jku}^M - \\ &= \text{LPR}_{jku}^p - \text{LPR}_{jku}^D - \text{LPR}_{jku}^C \end{aligned} \quad (9)$$

如果 $\text{LPS}(p)_{jku} > 0$,说明将 M_{jk} ($j = m_1$ 且 $k \neq n_1$) 的预知维护提前至 t_u 可产生租赁利润结余,则提前组合实施该设备的预知维护作业.

(2) 串联关系租赁利润结余. 对与触发设备 $M_{m_1 n_1}$ 处于不同工序的设备 M_{jk} ($j \neq m_1$) 而言,两台设备间存在串联关系,则相应的租赁利润结余可表示为

$$\begin{aligned} \text{LPS}(s)_{jku} &= \text{LPA}_{jku} - \text{LPR}_{jku} = \\ &= \text{LPA}_{jku}^R + \text{LPA}_{jku}^D + \text{LPA}_{jku}^M - \\ &= \text{LPR}_{jku}^p - \text{LPR}_{jku}^D \end{aligned} \quad (10)$$

如果 $\text{LPS}(s)_{jku} > 0$,说明将 M_{jk} ($j \neq m_1$) 的预知维护作业提前至 t_u 可产生租赁利润结余,但是否提前要进一步综合考虑工序层规划的最大停机数量.

2.3 工序层瓶颈产能计算

整个租赁生产系统往往由多个工序(各自包含

若干并联的同类型设备)串联构成,确定最先到达设备层预知维护点的触发设备 $M_{m_1 n_1}$,并将该时点作为系统的 CB-LPO 决策时点 t_u , $t_u = t_{i m_1 n_1} = \min\{t_{ijk}\}$. 同时,由于停机导致所在工序的产能下降,所以该工序为当前的瓶颈. 因此,执行工序层(并联设备组)CB-LPO 决策,对该设备处于同一工序的设备 M_{jk} ($j = m_1$ 且 $k \neq n_1$) 进行判断,将能够产生并联关系租赁利润结余的非修设备与触发设备 $M_{m_1 n_1}$ 进行组合预知维护,同时对规划维护和剩余工作的设备进行计数:

$$\forall \Omega(m_1 k, t_u) = \begin{cases} 1, & \text{LPS}(p)_{m_1 k u} > 0 \\ 0, & \text{LPS}(p)_{m_1 k u} \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\alpha_{m_1 u} = \sum_{k=1}^{K_{m_1}} \forall \Omega(m_1 k, t_u) \quad (12)$$

$$\beta_{m_1 u} = K_{m_1} - \alpha_{m_1 u} \quad (13)$$

式中: $\forall \Omega(m_1 k, t_u) = 1$ 时,表示设备 $M_{m_1 k}$ 需要进行预知维护; $\forall \Omega(m_1 k, t_u) = 0$ 时,表示设备 $M_{m_1 k}$ 不需要进行预知维护而是继续运行; $\alpha_{m_1 u}$ 和 $\beta_{m_1 u}$ 分别表示在维护决策时点 t_u , 工序 m_1 进行预知维护和剩余继续运行的设备台数.

由于稳定生产时每道工序的总生产能力 C_p 相同,所以工序 m_1 的剩余生产能力可表达为

$$C_{p u}^{\text{remain}} = \frac{\beta_{m_1 u}}{K_{m_1}} C_p \quad (14)$$

为了保证整个租赁生产系统的产能平衡,需分析上下游工序. 为保证瓶颈工序 m_1 的产能,其余工序所需的最小运行设备台数 β_{ju} 和最大可停机台数 α_{ju} 可表示为

$$\beta_{ju} = \left\lceil \frac{C_{p u}^{\text{remain}}}{C_p \cdot K_j} \right\rceil, \quad \alpha_{ju} = K_j - \beta_{ju} \quad (15)$$

$$j \neq m_1$$

上下游工序的各台设备利用串联关系 CB-LPO 决策判断,识别提前组合预知维护会产生 $\text{LPS}(s) > 0$ 的设备台数 γ_{ju} :

$$\forall \Omega(jk, t_u) = \begin{cases} 1, & \text{LPS}(s)_{jku} > 0 \\ 0, & \text{LPS}(s)_{jku} \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\gamma_{ju} = \sum_{k=1}^{K_j} \forall \Omega(jk, t_u) \quad (17)$$

$$j \neq m_1$$

若 $\gamma_{ju} \leq \alpha_{ju}$,将所有 $\text{LPS}(s) > 0$ 的设备与触发设备 $M_{m_1 n_1}$ 成组进行维护,在剩余设备中选择 $\text{LPS}(s)$ 数值较小的 ($\alpha_{ju} - \gamma_{ju}$) 台设备停机等待,并对其赋值 $\Omega(jk, t_u) = 2$,其他的 β_{ju} 台设备继续正常运行;否则,为保证瓶颈工序产能,对所有 $\text{LPS}(s) > 0$ 的设备的 LPS 从大到小排序,选出前 α_{ju} 台设备与设备

$M_{m_1 n_1}$ 成组进行维护, 剩余的 β_{ju} 台设备继续运行。

2.4 系统层运维决策流程

动态的系统层全过程周期性决策流程如下: 系统层以单设备预定的维护时点为组合维护契机开展机会维护优化; 在工序层利用并联系统 CB-LPO 策略规划组合维护, 并输出各工序为保证产能平衡的最大停机数量; 在系统层动态建模并计算串联系统 CB-LPO 决策的租赁利润结余, 与工序层输出的确保产能平衡下各工序停机数量进行联合决策, 优化并实时输出机会维护组合方案, 同时将结果及时反馈给设备层进行维护计划更新。

(1) 设备层贯序预知维护周期的确定. 从第 1 个设备层维护周期 ($i=1$) 开始, 从维护成本率模型中实时地获取各台租赁设备的 T_{ijk}^* 。

(2) 系统层预知维护决策时点的规划. 根据设备层维护成本率模型的实时输出, 生成所有工序各台设备 M_{jk} 系统层规划的预知维护时点:

$$t_{ijk} = T_{ijk}^* \quad (18)$$

$$j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K_j$$

(3) 全系统组合维护决策时点的选择. 对于整个租赁生产系统而言, 单台设备的预知维护会为其其他设备提供提前维护的机会. 从第 1 个系统层维护周期 ($u=1$) 开始, 根据当前的触发设备 $M_{m_1 n_1}$ 确定系统层决策时点:

$$t_u = t_{i m_1 n_1} = \min\{t_{ijk}\} \quad (19)$$

$$j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K_j$$

(4) 工序内并联租赁利润结余的计算. 在当前维护决策时点 t_u , 通过分析并触发设备 $M_{m_1 n_1}$ 同一工序的其他非修设备, 按照并联关系租赁利润结余, 判断 $LPS(p) > 0$ 的设备与设备 $M_{m_1 n_1}$ 成组进行维护, 对其赋值 $\Omega(jk, t_u) = 1$, 获得该工序的维护作业设备台数 $\alpha_{m_1 u}$ 。

(5) 工序层瓶颈产能停机台数的确定. 结合产线平衡和设备停机, 将该工序作为系统的瓶颈. 计算瓶颈工序的剩余生产能力, 规划上下游各工序为了保证系统产能所需的 β_{ju} 和 α_{ju} 。

(6) 工序间串联租赁利润结余的计算. 对其他工序中的各台租赁设备, 利用串联关系租赁利润结余算法, 分析获得预知维护提前产生 $LPS(s) > 0$ 的设备数 γ_{ju} 。

(7) 产能导向的维护组合方案的确定. 比较上下游工序设备产生 $LPS(s) > 0$ 的台数 γ_{ju} 和保证瓶颈产能最大的停机台数 α_{ju} , 根据租赁利润结余最终确定系统的维护设备集合; 确定停机等待的设备并对其赋值 $\Omega(jk, t_u) = 2$ 。

(8) 多层间维护调度结果的交互反馈. 交互地将预知维护调度结果 (实际维护周期 T'_{ijk}) 反馈给设备层的维护成本率模型, 并进行下一周期的预知维护规划:

$$T'_{ijk} = T_{ijk}^* - (t_{ijk} - t_u), \quad \forall \Omega(jk, t_u) = 1 \quad (20)$$

(9) 系统维护作业实施计划的安排. 安排所有 $\forall \Omega(jk, t_u) = 1$ 的租赁设备加入维护组合 GP_u , 出租方一次性派遣团队进行维护, 维护时长为所有设备预知维护作业最大时长:

$$T_u^{\text{Pmax}} = \max\{T_{ijk}^{\text{P}}\}, \quad \forall \Omega(jk, t_u) = 1 \quad (21)$$

(10) 设备贯序预知维护时点的更新. 对下一系统层维护周期, 赋值 $u = u + 1$. 根据设备层规划和上一周期的系统层决策结果, 更新每台租赁设备 M_{jk} ($j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K_j$) 的系统层维护时点:

$$t_{ijk} = \begin{cases} t_{ijk}, & \Omega(jk, t_u) = 0 \\ t_{u-1} + T_{u-1}^{\text{Pmax}} + T_{ijk}^* (i = i + 1), & \Omega(jk, t_u) = 1 \\ t_{ijk} + T_{u-1}^{\text{Pmax}}, & \Omega(jk, t_u) = 2 \end{cases} \quad (22)$$

(11) 租赁合同期与决策结束的判断. 判断新的系统层维护时点 t_{ijk} 是否超出租赁合同期 T_L . 若是, 结束串并联租赁系统维护调度决策; 若否, 回到步骤 (3), 寻找下一个系统层维护机会, 继续贯序全系统维护时点决策。

3 算例分析

以服务外包的某发动机零件串并联租赁生产系统为例, 该租赁系统由 3 道工序串联而成, 各工序 ($j=1, 2, 3$) 分别由 2 台车床、3 台钻床、4 台铣床并联而成, 其生产系统示意图如图 2 所示。

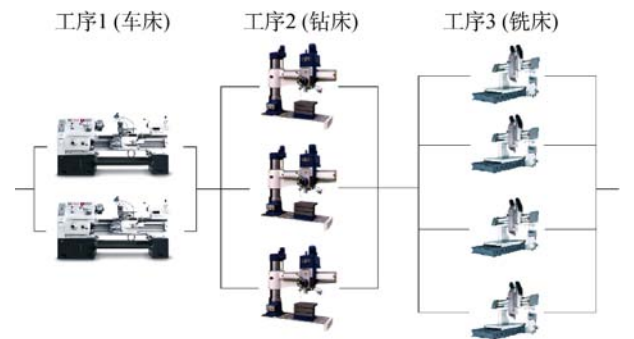


图 2 串并联租赁生产系统示意图

Fig. 2 System structure of leased series-parallel system

每台租赁设备 M_{jk} 具有独立的健康衰退特征, 其失效率函数均服从 Weibull 分布:

$$\lambda_{jk}(t) = (m_{jk}/\eta_{jk})(t/\eta_{jk})^{m_{jk}-1}$$

其中： m 和 η 为 Weibull 分布参数. M_{jk} 相应的可靠性参数如表 1 所示.

在租赁合同的信息数据方面,总租赁合同期 $T_L=24\,000\text{ h}$, 各台租赁设备的始末价值 (V_{jk}^S , V_{jk}^E)、租金率 κ_{jk} 、折旧率系数 δ_{jk} 、人员派遣费用 C_{jk}^D 和产能惩罚系数 μ_{jk}^C 的取值如表 2 所示.

利用文中提出的 CB-LPO 策略,获得的第 8 个系统维护周期的输出方案如表 3 所示,通过动态计算实时的 LPS 得出组合维护决策的结果. 根据设备层贯序预知维护规划的输出, M_{23} 是系统层维护策略的触发设备,故将其规划维护时点 t_{233} 赋值给第 8 个系统层决策时点 t_8 . 然后在工序层中分析工序 2 中其他设备的并联关系租赁利润结余, M_{21} 的利润结余 281 美元为正,故加入当前维护组合. 工序 2

表 1 各台租赁设备的可靠性参数

Tab. 1 Maintenance parameters of various leased machines								
(j,k)	m_{jk}	η_{jk}	α_{jk}	ϵ_{jk}	T_{ijk}^P/h	T_{ijk}^R/h	$C_{ijk}^P/\text{\$}$	$C_{ijk}^R/\text{\$}$
(1,1)	3.1	7 000	0.025	1.035	20	66	6 500	18 000
(1,2)	1.8	6 400	0.016	1.042	25	74	8 000	30 000
(2,1)	2.1	8 200	0.023	1.054	10	38	3 400	8 800
(2,2)	1.9	9 500	0.038	1.032	12	68	9 600	28 000
(2,3)	2.5	7 900	0.018	1.044	14	48	6 000	17 000
(3,1)	3.3	9 900	0.015	1.039	15	30	7 000	20 000
(3,2)	1.7	8 500	0.036	1.052	10	22	8 800	26 000
(3,3)	2.3	7 500	0.048	1.041	8	18	4 000	6 800
(3,4)	2.8	6 600	0.015	1.036	15	55	8 800	22 900

表 2 各台租赁设备的租赁参数

Tab. 2 Lease parameters of individual leased machines						
(j,k)	$V_{jk}^S/\text{\$}$	$V_{jk}^E/\text{\$}$	$\kappa_{jk}/(\text{\$}\cdot\text{h}^{-1})$	δ_{jk}	$C_{jk}^D/\text{\$}$	$\mu_{jk}^C/(\text{\$}\cdot\text{h}^{-1})$
(1,1)	700 000	660 000	12	0.11	1 200	108
(1,2)	960 000	860 000	16	0.15	1 440	108
(2,1)	400 000	350 000	8	0.12	800	72
(2,2)	860 000	700 000	18	0.22	1 600	72
(2,3)	520 000	400 000	14	0.13	1 000	72
(3,1)	600 000	550 000	10	0.14	1 350	54
(3,2)	750 000	600 000	20	0.28	1 500	54
(3,3)	330 000	250 000	16	0.16	900	54
(3,4)	550 000	430 000	20	0.22	1 500	54

表 3 第 8 个系统层维护周期的 CB-LPO 决策

Tab. 3 CB-LPO optimization at the eighth system-layer cycle											
(j,k)	t_{ijk}/h	t_8/h	T_{ijk}^*/h	T'_{ijk}/h	$\text{LPA}_{jk8}/\text{\$}$	$\text{LPR}_{jk8}/\text{\$}$	$\text{LPS}_{jk8}/\text{\$}$	$\Omega(jk,t_8)$	α_{j8}	γ_{j8}	$T_8^{\text{max}}/\text{h}$
(1,1)	14 176		3 656	545	4 533	37 674	−33 141	0	1	1	25
(1,2)	12 226		3 124	1 963	7 332	5 457	1 875	1			
(2,1)	11 532		4 633	4 166	1 499	1 218	281	1			
(2,2)	15 874		5 354	545	12 391	92 626	−90 235	0	1	—	
(2,3)	11 065	11 065	4 191	4 191	—	—	—	1			
(3,1)	15 874		5 354	545	4 538	63 170	−58 632	0			
(3,2)	14 174		5 072	1 963	11 757	19 378	−7 621	2	2	0	
(3,3)	13 931		4 829	1 963	3 663	7 369	−3 705	2			
(3,4)	14 064		3 544	545	6 607	51 723	−45 116	0			

剩余 1 台 M_{22} 继续运行,为保证系统产能,工序 1 和工序 3 保持运转的设备数为 1 台和 2 台.对这两道工序的设备实时计算串联关系租赁利润结余:工序 1 中结余为正的 M_{12} 加入维护组合;工序 3 中结余都为负,则选择结余数值较大的两台(M_{32} 和 M_{33})进行停机等待;剩下的两台继续运行.

该周期内所有设备的 LPS 明细如表 4 所示.例如,设备 M_{21} 的提前维护可导致额外 80 美元的租金收入、800 美元的人员派遣收入和 619 美元的小修维护成本结余;与此同时,也会产生 1 218 美元的租赁利润损失,包括 381 美元的频繁维护费用、117 美

元的设备额外折旧费用和 720 美元的产能惩罚损失.权衡利弊, M_{21} 在第 8 个系统层维护周期的提前维护可以产生 281 美元的租赁利润结余.对其他工序的设备进行利润结余计算时无需考虑产能惩罚成本.

系统整个租赁合同期内,上述 CB-LPO 策略可以利用每个机会维护时点,对各台租赁设备实施利润结余分析,并实时输出优化的预知维护组合方案,最终决策预知维护活动是否需要被提前.系统层的决策会反馈回设备层来更新设备的贯序预知维护周期.每个系统维护周期的利润结余和维护组合如表 5 和 6 所示.其中,PM 为系统层 CB-LPO 决策的触发设备.

表 4 第 8 个系统层维护周期的具体利润结余计算(\$)

Tab. 4 Saving calculations at the eighth system-layer cycle (\$)

(j,k)	LPA_{jks}^R	LPA_{jks}^D	LPA_{jks}^M	LPA_{jks}	LPR_{jks}^P	LPR_{jks}^D	LPR_{jks}^C	LPR_{jks}	LPS_{jks}
(1,1)	240	1 200	3 093	4 533	37 104	570	—	37 674	−33 141
(1,2)	400	1 440	5 492	7 332	4 732	726	—	5 457	1 875
(2,1)	80	800	619	1 499	381	117	720	1 218	281
(2,2)	216	1 600	10 575	12 391	84 709	7 053	864	92 626	−80 235
(2,3)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(3,1)	150	1 350	3 038	4 538	61 767	1 403	—	63 170	−58 632
(3,2)	200	1 500	10 057	11 757	13 937	5 441	—	19 378	−7 621
(3,3)	128	900	2 635	3 663	5 840	1 529	—	7 369	−3 705
(3,4)	300	1 500	4 807	6 607	48 424	3 299	—	51 723	−45 116

表 5 整个租赁合同期内系统层利润结余计算结果

Tab. 5 Saving results of sequential system-optimization cycles

u	t _u /h	LPS _{jku} / \$								
		j=1		j=2			j=3			
		k=1	k=2	k=1	k=2	k=3	k=1	k=2	k=3	k=4
1	3 470	−690	PM	665	−1 167	741	−992	−283	−158	1 696
2	3 969	PM	−41 824	933	356	−45 852	221	902	456	−57 092
3	5 594	262	1 922	−3 914	5 306	−3 216	PM	−14 650	−7 036	−3 675
4	5 729	606	2 277	−3 867	PM	−3 504	−309 222	−11 862	−5 597	−1 963
5	6 849	PM	−830	136	−32 844	731	−20 608	−1 918	−1 000	1 658
6	9 077	−919	2 684	−1 031	−1 222	−2 308	−1 646	1 273	PM	−2 615
7	10 500	1 504	−1 704	920	1 769	1 110	618	−17 242	−8 209	PM
8	11 065	−33 141	1 875	281	−80 235	PM	−58 632	−7 621	−3 705	−45 116
9	13 956	1 526	2 320	458	−254	219	−1 441	1 298	PM	996
10	14 176	PM	−107 386	−68 787	391	−113 314	−70	−204 296	−88 929	−144 418
11	15 894	−3 238	2 165	−1 442	−13 554	−3 223	PM	−7 549	−3 997	−3 943
12	16 971	−1 034	PM	710	−2 591	630	−24 232	−7	−158	1 511
13	17 755	PM	−15 730	−12 180	529	1 233	−9 416	1 633	782	−26 782
14	19 377	−3 652	2 748	−683	PM	−6 177	−331	9 882	−4 806	−5
15	19 899	−2 654	PM	738	—	−1 732	746	−3 951	−2 087	1 487
16	21 242	PM	−3 486	−3 941	—	1 203	—	1 558	695	−9 244
17	22 743	—	PM	765	—	—	—	—	—	1 462

表 6 整个租赁系统维护组合输出

Tab. 6 Maintenance outputs of predictive maintenance groups of system-layer cycles

u	t _u /h	Ω(jk,t _u)								
		j=1		j=2			j=3			
		k=1	k=2	k=1	k=2	k=3	k=1	k=2	k=3	k=4
1	3 470	0	PM	0	0	1	0	0	2	1
2	3 969	PM	0	1	0	0	0	1	1	0
3	5 594	0	0	0	0	0	PM	0	0	0
4	5 729	0	0	0	PM	0	0	0	0	2
5	6 849	PM	1	1	2	1	2	2	2	1
6	9 077	0	1	2	0	0	0	1	PM	0
7	10 500	1	0	0	1	0	1	0	0	PM
8	11 065	0	1	1	0	PM	0	2	2	0
9	13 956	0	1	1	0	1	0	1	PM	1
10	14 176	PM	0	0	1	0	2	0	2	0
11	15 894	0	0	0	0	0	PM	0	0	0
12	16 971	0	PM	1	0	0	0	2	0	1
13	17 755	PM	0	0	0	1	0	1	1	0
14	19 377	0	0	0	PM	0	0	0	0	0
15	19 899	0	PM	1	—	0	0	0	0	1
16	21 242	PM	0	0	—	1	—	1	1	0
17	22 743	—	PM	1	—	—	—	—	—	1

采用相同的租赁参数和设备可靠性参数,与两种传统的常用维护策略进行成本比较,其结果如图 3 所示. CB-LPO 策略在租赁合同期内产生的总租赁利润结余(TLPS)为 31 404 美元. 两种传统维护策略的 TLPS 分别如下.

(1) 独立按期预知维护策略(IPM). 各台租赁设备按照设备层(维护成本率模型)维护规划输出的各自预知维护周期独立进行维护,每次系统层预知维护时点只对本台设备进行维护作业,不考虑设备间的结构和经济依赖性,未从系统层视角对各预知维护作业进行优化调度. 将此策略下租赁合同期内

的利润作为基准线,设定其 TLPS=0 美元.

(2) 统一提前成组维护策略(AGM). 系统中一旦出现某台设备维护停机,则统一调度其余非修设备的预知维护作业全部提前到此时点,并根据计划更新各设备维护周期. 该策略虽然利用了单台设备停机的维护机会,但没有充分考虑设备间的经济依赖性,未能结合产能需求有针对性地进行系统层维护优化,不可避免地会产生过度维护的现象. 相较于 IPM 策略,该策略在整个租赁合同期内的 TLPS=10 683 美元.

上述成本对比分析表明,CB-LPO 策略在服务外包决策中同时考虑了各台设备的可靠性演化特征、租赁参数及生产系统中设备间串并联结构的相关性,充分利用了单台设备停机的维护机会,在确保系统产能平衡的前提下,避免了成组维护可能存在的过度维护现象. 该策略还兼顾了设备间的串并联结构和租赁利润的依赖性,在保证生产的前提下具有明显的经济优势.

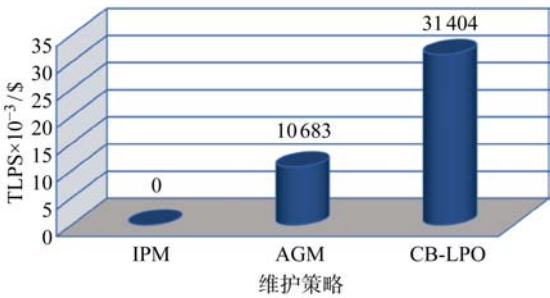


图 3 不同维护策略的 TLPS 值

Fig. 3 Total leasing profit saving comparison of different policies

4 结语

面向租赁生产系统的串并联复杂结构和多工序产能需求,以串并联系统设备间的物理依赖性为研

究重点,在维护策略中将产能平衡和利润结余相结合,考虑了生产运作和预知维护间的相互关联性.在传统机会维护策略的基础上,在系统层和设备层之间引入了工序层决策.在考虑单台设备的贯序预知维护策略和多设备动态租赁利润最大化的同时,进一步考虑了产能平衡对系统生产关联性及经济性的影响,从而形成了面向串并联租赁生产系统的机会维护策略.算例分析结果表明,CB-LPO 机会维护策略能够有效地提高租赁生产系统的利润结余.在一些生产过程中,贯序工序之间可能存在缓冲区,会对维护调度方案有一定的影响,考虑缓存的串并联租赁系统维护策略将在未来作进一步研究.

参考文献:

- [1] YANG L, ZHAO Y, PENG R, *et al.* Hybrid preventive maintenance of competing failures under random environment[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2018, 174: 130-140.
- [2] 郝虹斐,郭伟,桂林,等.非完美维修情境下的预防性维修多目标决策模型[J]. **上海交通大学学报**, 2018, 52(5): 518-524.
HAO Hongfei, GUO Wei, GUI Lin, *et al.* A multi-objective preventive maintenance decision-making model for imperfect repair process[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2018, 52(5): 518-524.
- [3] LU Z Q, CUI W W, HAN X L. Integrated production and preventive maintenance scheduling for a single machine with failure uncertainty [J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2015, 80: 236-244.
- [4] TAO X Y, XIA T B, XI L F. Environment factor-based equipment hazard rate prognosis for maintenance scheduling[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, 2017, 231(8): 1488-1497.
- [5] SCHUTZ J, REZG N. Maintenance strategy for leased equipment[J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2013, 66(3): 593-600.
- [6] HAJEJ Z, REZG N, GHARBI A. A decision optimization model for leased manufacturing equipment with warranty under forecasting production/maintenance problem[DB/OL]. [2018-06-14]. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/274530>.
- [7] ISKANDAR B P, HUSNIAH H. Optimal preventive maintenance for a two dimensional lease contract[J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2017, 113: 693-703.
- [8] XIA T B, XI L F, PAN E S, *et al.* Reconfiguration-oriented opportunistic maintenance policy for reconfigurable manufacturing systems[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2017, 166: 87-98.
- [9] 张晓文,孙小明,蒋祖华,等.考虑生产线平衡的串-并联生产系统机会维护策略[J]. **上海交通大学学报**, 2015, 49(5): 702-707.
ZHANG Xiaowen, SUN Xiaoming, JIANG Zuhua, *et al.* Opportunistic preventive maintenance strategy for series-parallel system considering line balancing [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2015, 49(5): 702-707.
- [10] 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.
- [11] 张博文,陆志强,张岳君.并行机系统生产计划与预防性维护联合建模[J]. **上海交通大学学报**, 2015, 49(4): 564-571.
ZHANG Bowen, LU Zhiqiang, ZHANG Yuejun. An integrated model of production planning and preventive maintenance for parallel systems[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2015, 49(4): 564-571.
- [12] XIA T B, XI L F, PAN E S, *et al.* Lease-oriented opportunistic maintenance for multi-unit leased systems under product-service paradigm[J]. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 2017, 139(7): 071005.

(本文编辑:石易文)