

文章编号:1006-2467(2019)04-0387-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.04.001

面向租赁服务网络广域运维的 3 层机会维护调度策略

司国锦, 夏唐斌, 宋 亚, 奚立峰

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 针对当前设备供应商提供全球维护服务中存在的租赁服务网络的广域运维问题, 提出设备层、系统层、网络层动态交互的 3 层机会维护调度策略. 根据各台设备的独立健康演化趋势, 实时地规划设备层的预知维护时间间隔; 基于贯序的设备层输出, 在系统层进行优化调度并输出成组维护方案; 基于各租赁产线的维护需求, 在网络层解决租赁服务需求和维护资源约束之间的供需矛盾问题. 根据调度特点建立数学优化模型, 动态地更新决策向量和状态向量, 并由此提出 3 层机会维护调度策略, 得出层次递进的交互求解算法. 通过算例分析, 验证所提出的调度策略在广域运维领域的可行性和有效性.

关键词: 机会维护; 租赁服务网络; 利润优化; 广域运维

中图分类号: TH 17 **文献标志码:** A

Triple-Level Opportunistic Maintenance Optimization Policy for Multi-Location Operation and Maintenance of Leasehold Service Network

SI Guojin, XIA Tangbin, SONG Ya, XI Lifeng

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

Abstract: This study focuses on the multi-location operation and maintenance problem of the leasehold service network where original equipment manufacturers provide global maintenance services. We propose an opportunistic maintenance optimization policy with dynamic interactions between the machine level, the system level and the network level. According to individual health evolutions of leased machines, preventive maintenance intervals are scheduled at the machine level. At the system level, group maintenance schemes are arranged by using leasing profit optimization. By pulling the requirements of multi-location leased lines, the balancing of lease service demand and maintenance resource constraint is handled at the network level. Therefore, a triple-level opportunistic maintenance policy is developed and an alternating algorithm based on hierarchical progression is then designed. Through arithmetic analysis, this proposed policy is proved to be effective and feasible.

收稿日期:2018-06-15

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: 司国锦(1995-), 女, 陕西省西安市人, 博士, 主要研究方向为制造系统的可靠性建模与维护决策.

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.

Key words: opportunistic maintenance; leasehold service network; profit optimization; multi-location operation and maintenance

在当今日益激烈的市场竞争和快节奏的工业环境中,原始设备制造商(OEM)发展的新趋势是通过产品服务外包将生产线租赁给多区域分布的制造企业,并通过外包运维服务增加盈利^[1].在租赁化制造行业中,租赁产线不仅可为制造企业(承租方)节省大量的投资,而且能够获得专业的运维服务,从而使制造企业能够更加专注于生产;而为制造企业提供覆盖产线全租赁周期的外包维护服务,可使设备供应商(出租方)在获得新的利润增长点的同时,加强与制造企业的联系.作为制造系统的重要组成部分,租赁设备的健康状态和维护规划直接影响着系统的可靠性与运维成本.随着多设备整体租赁行业的兴起,租赁产线的成组维护优化需要进一步整合系统结构依赖与租赁利润之间的影响因素^[2-3].此外,设备供应商还需要为多区域客户(产线)提供广域运维服务.因此,面向租赁服务网络的调度策略必须具有能够整合租赁服务需求、维护资源约束、拓展传统维护决策理论和机会维护策略的能力,以确保租赁服务网络运行的稳定性及运维的经济性.

目前,租赁维护模型已经成为学术界的研究热点,但相关研究多以单机系统为研究对象.Yeh等^[4]提出一种采用故障率降低法的租赁设备维护方案,并由此得出单设备最优预知维护策略,将预期总成本降到最低.金琳等^[5]针对单台租赁设备,提出将等周期与变周期策略相结合的多阶段预知维护策略,并以OEM维护成本最低为优化目标,确定各阶段的最优维护周期.对于多设备租赁维护建模则需要进一步分析各台设备间的依赖性,利用设备维护停机机会,实现成组维护整合优化.Xia等^[6]针对串联租赁系统,将维护停机作为决策契机,提出结合租赁特征的租赁利润优化(LPO)策略,实时分析非修设备的预知维护提前损益,动态规划租赁产线组合维护.在当前的租赁服务网络运维中,发生故障后预约OEM派员进行维护往往会造成重大的停产损失,因此一般建议实施等周期维护,如每千小时或每半个月进行预知维护(PM).Goel等^[7]针对进行定期维护的电力网络,以停机时间最短和维护成本最低为联合目标制定维护人员的调度方案.Boland等^[8]针对服务网络的维护调度问题,提出一种网络节点存储的变周期维护策略,并以网络总流量最大为优化目标安排维护作业.崔维伟等^[9]针对单设备系统,

提出一种综合考虑生产调度以及设备维护的联合决策模型,并设计了遗传算法进行优化求解.Lopez-Santana等^[10]针对分布于不同区域的单设备组成的维护网络,考虑设备的预知和事后维护,提出一种综合考虑设备维护与人员调度两阶段的迭代求解算法.

上述研究仅考虑了由单设备组成的租赁网络,且普遍进行的是等周期维护调度决策,并未涉及面向多设备、多产线、多工厂的多区域租赁产线群组的动态维护调度策略.本文提出一种网络租赁利润优化(NLPO)调度策略,在设备层和系统层实施交替机会维护决策的基础上,进一步综合考虑多区域租赁产线群组间的维护能力、人员派遣、运输成本以及延时惩罚对调度决策的影响;拓展租赁网络的概念,确保多区域产线群组的预知维护服务,动态输出总运维成本最小的全局维护调度方案.

1 问题描述

广域运维问题主要针对多类型设备组成的串联租赁产线群组,旨在实现全球化运维下承租方维护服务的统筹优化调度,并提出设备层、系统层、网络层动态交互的3层机会维护调度策略.通过交替求解3层优化模型,动态输出全局维护调度方案,有效提高租赁设备的可靠性并降低设备供应商的成本.3层交互的机会维护调度策略的建模框架如图1所示,各层的交互决策优化流程如下:

(1) 针对设备层中的多类型制造设备,研究其健康衰退趋势,并综合考虑内部维护效果因素和外部环境工况因素,建立设备层的成本率模型,实时贯序输出各台设备的预知维护周期.

(2) 针对系统层中的串联租赁产线,循环获取各台设备的预知维护时间间隔,利用LPO策略计算非修设备的租赁利润结余(LPS)并输出组合维护集,生成各租赁产线的维护需求.

(3) 针对设备供应商遍及多区域工厂的服务对象,实时获取各租赁产线的维护需求并且生成维护计划.根据NLPO调度策略,整合租赁服务网络各节点的组合维护契机并且对各租赁产线制定维护调度决策,输出全局决策优化所得到的最优维护调度方案,以指导技术人员提前安排设备备件并实施运维作业.

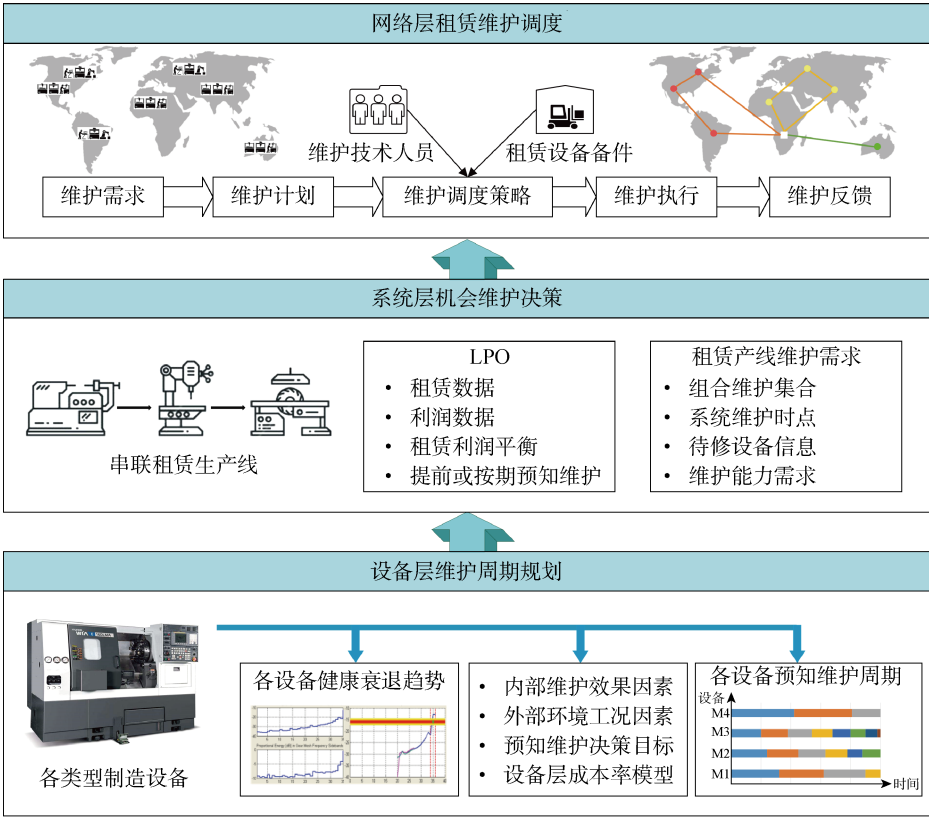


图 1 3 层机会维护调度策略框架图

Fig. 1 Illustration of triple-level opportunistic maintenance optimization policy

2 租赁设备的贯序动态预知维护

考虑由不同类型设备 $M_j (j = 1, 2, \dots, J)$ 组成的租赁网络(产线群组). 预知维护间隔 T_{ij} 定义为两个连续预知维护之间的运行周期, 即 T_{ij} 表示第 j 个租赁设备在第 i 个设备层维护周期的运行周期. 若租赁设备在运行时发生故障, 则需要实施小修作业以恢复正常运行状态, 但不改变其故障率. 在租赁设备的健康衰退建模中, 综合考虑内部维护效果和外部环境工况因素, 引入役龄残余因子和环境影响因子, 则设备 M_j 在第 i 次预知维护后的衰退演化函数 $\lambda_{(i+1)j}(t)$ 的表达式为

$$\lambda_{(i+1)j}(t) = \begin{cases} \frac{m_j}{\eta_j} \left(\frac{t}{\eta_j} \right)^{m_j-1}, & i = 0 \\ \epsilon_{ij} \lambda_{ij}(t + a_{ij} T'_{ij}), & i > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_j 和 η_j 为 M_j 的可靠性参数, 采用 Weibull 函数描述各台设备的初始故障率($i = 0$); ϵ_{ij} 为环境影响因子, $\epsilon_{ij} > 1$; a_{ij} 为役龄残余因子, $0 < a_{ij} < 1$; T'_{ij} 为网络层反馈更新的预知维护周期.

设备层的决策目标为最小化单位时间内设备的维护成本. 租赁设备 M_j 在第 i 个维护周期中的维护成本率 c_{ij} 可以表示为

$$c_{ij} = \frac{C_{pij} + C_{tij} \int_0^{T_{ij}} \lambda_{ij}(t) dt}{T_{ij} + T_{pij} + T_{tij} \int_0^{T_{ij}} \lambda_{ij}(t) dt} \quad (2)$$

式中: C_{pij} 为预知维护作业成本; C_{tij} 为小修作业成本; T_{pij} 为预知维护作业时长; T_{tij} 为小修作业时长. 式(2)的分子表示整个维护周期的总维护成本(预知维护成本和小修成本之和); 分母表示当前维护周期的时间总和. 通过对上述维护成本率 c_{ij} 求导, 即 $dc_{ij}/dT_{ij} = 0$, 可贯序输出每台租赁设备的最佳预知维护时间间隔 T_{ij}^* .

3 租赁产线的组合机会维护优化

在系统层考虑广域租赁网络中的多设备租赁产线, 利用产线内一台设备的预知维护停机契机, 分析租赁串联产线中剩余非修设备维护作业提前对租赁利润的影响, 计算对应的租赁利润增益(LPA)和租赁利润损减(LPR), 并将所得的 LPS 作为决策依据, 对产线中各台设备的维护作业进行动态优化调度.

在第 u 个系统层周期中, 当其中一台设备最先到达预知维护作业时点 t_{ij} 时, 以此作为系统层的维护优化时点 $t_u = \min\{t_{ij}\}$. 对于其他非修设备而言, 设备供应商需要决策是否可以将它们的预知维护作

业提前至时点 t_u 一起实施,以避免对同一租赁产线的频繁维护.对于一台非修设备,若预知维护作业提前导致的 LPA 大于 LPR,则将该维护作业提前加入时点 t_u 的当前组合维护集合 GP_u .

对于产线中其他非修设备,其预知维护提前导致的第 u 个系统层周期的租赁利润增益 LPA_{ju} 由设备租金增益 LPA_{ju}^R 和失效控制增益 LPA_{ju}^M 组成,

$$LPA_{ju}^R = T_{p_{ij}} \kappa_j \quad (3)$$

$$LPA_{ju}^M = \left[\int_0^{T_{ij}^*} \lambda_{ij}(t) dt - \int_0^{T_{ij}^* - (t_{ij} - t_u)} \lambda_{ij}(t) dt \right] C_{ij} \quad (4)$$

式中: κ_j 为租金率; T_{ij}^* 为设备层输出的维护时间间隔; $T_{ij}^* - (t_{ij} - t_u)$ 为预知维护提前时实际的维护时间间隔.

另一方面,非修设备的预知维护作业提前,可能也会出现 LPR,主要包括频繁维护损减 LPR_{ju}^P 和加速折旧损减 LPR_{ju}^D ,

$$LPR_{ju}^P = \frac{t_{ij} - t_u}{T_{ij}^* - (t_{ij} - t_u)} C_{p_{ij}} \quad (5)$$

$$LPR_{ju}^D = \delta_j \frac{t_{ij} - t_u}{T_L} (V_j^S - V_j^E) \quad (6)$$

式中: $t_{ij} - t_u$ 为设备最佳预知维护时间间隔与产线维护优化时点的差值; T_L 为整个租赁合同期; δ_j 为折旧率系数; $V_j^S - V_j^E$ 为租赁始末的设备价值折旧.

在此基础上,可获得每台非修设备 M_j 的 LPS_{ju} ,并以此作为是否在系统层时点 t_u 提前预知维护作业的判据,

$$LPS_{ju} = LPA_{ju} - LPR_{ju} =$$

$$LPA_{ju}^R + LPA_{ju}^M - LPR_{ju}^P - LPR_{ju}^D \quad (7)$$

若 $LPS_{ju} > 0$,说明该设备预知维护提前导致的 LPA 大于 LPR,可将该设备的预知维护作业提前至当前的组合维护时点 t_u ;反之,则无需提前进行预知维护.综上,出租方可以根据租赁产线的系统层决策时点 t_u ,通过计算每台非修设备的预知维护作业提前对应的 LPS 是否为正,来量化判断多少个预知维护作业 $\forall W(j, t_u) = 1$ 被提前加入 GP_u .由此可以得出系统层维护契机时点 t_u 的维护作业调度决策为

$$W(j, t_u) = \begin{cases} 1, & LPS_{ju} > 0 \\ 0, & LPS_{ju} \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

安排 $\forall W(j, t_u) = 1$ 的设备加入当前的 GP_u ,出租方一次性派遣维护团队同时执行维护作业.对于串联产线 L_z 而言, GP_u 的执行时长 T_{uz}^{\max} 为该组合维护集中最长的设备预知维护作业时长,即 $T_{uz}^{\max} = \max\{T_{p_{ij}}\}$, $\forall W(j, t_u) = 1$. GP_u 的维护能力需求 s_{uz} 为该组合维护集里的设备总数.针对出租方提供维护服务的广域分布租赁产线,基于 GP_u 生成的成组

维护方案,在考虑按照租赁合同签订的维护时间窗窗宽 w_z 的情况下,触发维护团队及资源广域调度规划.对于第 u 个系统层周期,维护时间窗的窗顶 b_{uz} 等于系统层维护契机时点 t_u ,即 $b_{uz} = t_u$.维护时间窗的窗底 a_{uz} 等于系统层维护契机时点 t_u 减去维护时间窗窗宽 w_z ,即 $a_{uz} = t_u - w_z$.

4 租赁网络的全局运维调度策略

4.1 数学模型

基于图论建立网络层的 NLPO 调度策略模型.假设 $G = (V, A)$ 为有向图, $V = \{0, V_1, \dots, V_Z\}$ 为产线承租点集,点 0 代表广域运维中心; $L = \{L_1, L_2, \dots, L_Z\}$ 代表所需提供维护服务的多区域产线,每个承租点租赁一条串联产线,同时每个承租点对应一个二维位置坐标 $V_z = (x_z, y_z)$; 有向弧集 $A = \{(V_z, V_{z'}) \mid V_z, V_{z'} \in V, V_z \neq V_{z'}\}$ 代表租赁网络中任意两点之间的有效连接.对于每一条租赁产线 $L_z \in L$,对应 GP_u 的 T_{uz}^{\max}, s_{uz} 及维护时间窗 $[a_{uz}, b_{uz}]$ 由系统层 LPO 策略输出.设维护团队集合 $T^M = \{T_1^M, T_2^M, \dots, T_K^M\}$,根据调度策略维护团队 $T_k^M (k = 1, 2, \dots, K)$ 于各租赁产线的维护时间窗内实施组合维护作业.各维护团队的最大维护能力为 Q_k ,承租点 $V_z, V_{z'}$ 之间的调度时间 $t_{zz'}$ 等于调度距离除以单位速率,

$$t_{zz'} = \sqrt{(x_z - x_{z'})^2 + (y_z - y_{z'})^2} / 1$$

为了使建立的调度模型更容易表述,对模型进行如下假设:

- (1) 出租方共有 K 个维护团队,负责 Z 个承租点(租赁产线)的维护任务;
- (2) 出租方根据需求指派维护团队,期初无遗留任务;
- (3) 维护任务一旦开始,则连续服务直至完成,服务过程不允许中断;
- (4) 当维护团队早于时间窗窗底到达,需等待时间窗开启才能开始服务;
- (5) 各个租赁产线需要的维护能力不同,具体由系统层 LPO 策略输出;
- (6) 维护团队所需备件需及时运至各租赁点.

租赁网络调度模型使用二元变量 $X_{zz'k}$ 定义各个维护团队的调度决策:若 $X_{zz'k} = 1$,维护团队 $T_k^M \in T^M$ 依次执行承租点 $V_z, V_{z'}$ 的组合维护作业;若 $X_{zz'k} = 0$,则不进行组合维护作业.同时,使用时间变量 t_{zd}^B 定义当前第 d 个网络层周期的承租点 V_z 的实际开始维护时间.若租赁产线 L_z 的 T_{uz}^{\max}, s_{uz} 及 $[a_{uz}, b_{uz}]$ 已经由系统层输出,则可构建租赁网络调

度模型.

根据上述模型假设与变量说明,团队运输成本(C_t)、维护服务成本(C_w)、延时惩罚成本(C_p)、人员派遣成本(C_v)、总运维成本(C_d)及总运维成本之和(C_{all})可分别表示为

$$C_t = \sum_{k=1}^K \sum_{z=0}^Z \sum_{z'=0}^Z C_{zz'} X_{zz'k} \quad (9)$$

$$C_w = \sum_{k=1}^K \sum_{z=0}^Z \sum_{z'=0}^Z (C_k^S (T_u^{\max} + \max\{t_{zd}^B, a_{uz}\})) X_{zz'k} \quad (10)$$

$$C_p = \sum_{k=1}^K \sum_{z=0}^Z \sum_{z'=0}^Z (C^d \max\{0, t_{zd}^B - b_{uz}\}) X_{zz'k} \quad (11)$$

$$C_v = \sum_{k=1}^K \sum_{z=1}^Z C_k^F X_{0zk} \quad (12)$$

$$C_d = C_t + C_w + C_p + C_v \quad (13)$$

$$C_{all} = \sum_d C_d \quad (14)$$

式中: $C_{zz'}$ 为承租点 $V_z, V_{z'}$ 之间的调度成本; C_k^S 为承租点 $V_z, V_{z'}$ 之间的单位时间服务成本; C^d 为承租方点 $V_z, V_{z'}$ 之间的单位时间惩罚成本; C_k^F 为维护团队 k 所需的单次派遣成本.

基于网络层 NLPO 调度策略的描述,建立联合优化数学模型. 目标函数:

$$\begin{aligned} \min C_d = & \sum_{k=1}^K \sum_{z=0}^Z \sum_{z'=0}^Z C_{zz'} X_{zz'k} + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{z=0}^Z \sum_{z'=0}^Z (C_k^S (T_u^{\max} + \max\{t_{zd}^B, a_{uz}\})) X_{zz'k} + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{z=0}^Z \sum_{z'=0}^Z (C^d \max\{0, t_{zd}^B - b_{uz}\}) X_{zz'k} + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{z=1}^Z C_k^F X_{0zk} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^K \sum_{z'=0}^Z X_{zz'k} = 1, \quad \forall V_z \in V \quad (16)$$

$$\sum_{z=0}^Z X_{zz'k} - \sum_{o=0}^Z X_{z'ok} = 0, \quad (17)$$

$$\forall L_{z'} \in L, \quad \forall T_k^M \in T^M$$

$$\sum_{z=1}^Z X_{0zk} = 1, \quad \forall T_k^M \in T^M \quad (18)$$

$$\sum_{z=1}^Z X_{z0k} = 1, \quad \forall T_k^M \in T^M \quad (19)$$

$$\sum_{z=0}^Z \sum_{z'=0}^Z (X_{zz'k} s_{uz}) < Q_k, \quad \forall T_k^M \in T^M \quad (20)$$

$$X_{zz'k} \in \{0, 1\} \quad (21)$$

$$\forall V_z, V_{z'} \in V, \quad \forall T_k^M \in T^M$$

式(16)保证了每个租赁点均会被服务,且只被维护

团队服务1次;式(17)确保维护团队完成承租点 V_z 的维护任务后,从承租点 V_z 出发去下一个需要维护的租赁产线;式(18)和(19)表明了每支维护团队从运维中心出发,服务完成之后返回运维中心;式(20)限制了维护周期内每个维护团队的维护能力. 通过求解上述模型,得出维护团队广域调度方案,包括维护团队调度路径 RT_d 和总运维成本 C_d .

4.2 算法流程

设备供应商基于 LPO 策略获得系统层的成组维护集,并实时生成多区域分布的各租赁产线维护需求. 在网络层按需制定维护团队的动态调度策略,提供实时有效且经济可行的维护调度方案. 面向租赁服务网络广域运维的3层交互决策优化流程如图2所示.

(1) 顺序拉动设备层维护周期. 从第1个设备层维护周期($i=1$)开始,由式(2)实时计算 T_{ij}^* .

(2) 系统层组合机会时点选取. 根据设备层的输出,分析设备 M_j 在系统层预定的维护时点,即 $t_{ij} = T_{ij}^*$ ($j=1, 2, \dots, J$). 对于1条租赁产线,单台设备的预知维护可以为其他非修设备提供组合维护机会. 即从第1个系统层维护周期($u=1$)开始,通过 $t_u = \min\{t_{ij}\}$ 选择系统层的组合维护时点进行机会维护 LPO 决策.

(3) 系统层租赁成本结余计算. 基于 t_u ,实时计算各租赁产线中非修设备的 LPS_{ju} . 若 $LPS_{ju} = LPA_{ju} - LPR_{ju} > 0$,将该设备的预知维护作业提前至当前 t_u ($M_j \in GP_u$).

(4) 各租赁产线组合维护安排. 通过对各台非修设备 LPS_{ju} 的计算,确定进行提前预知维护的设备. 安排 $\forall W(j, t_u) = 1$ 的设备加入租赁产线组合维护集 GP_u ,并得到租赁产线的 T_{uz}^{\max}, s_{uz} 及 $[a_{uz}, b_{uz}]$.

(5) 循环输入产线组合维护集合. 从第1个网络层维护周期($d=1$)开始,从系统层实时地获取各租赁产线 L_z 的 T_{uz}^{\max}, s_{uz} 及 $[a_{uz}, b_{uz}]$,同时获取待修设备信息与产线位置信息.

(6) 网络层维护调度方案发布. 对于各租赁产线,通过平衡服务需求和资源约束之间的供需矛盾,以 C_d 为目标函数,生成维护团队的最优调度方案.

(7) 各租赁设备维护时点更新. 根据网络层的实际维护团队调度情况,更新租赁设备 M_j ($j=1, 2, \dots, J$) 的维护时点 t_{ij} . 若 $W(j, t_u) = 0$,则无需提前进行租赁设备的预知维护作业,更新后的维护时点 $t_{ij} = t_{ij} + T_{uz}^{\max}$;若 $W(j, t_u) = 1$,则提前进行租赁

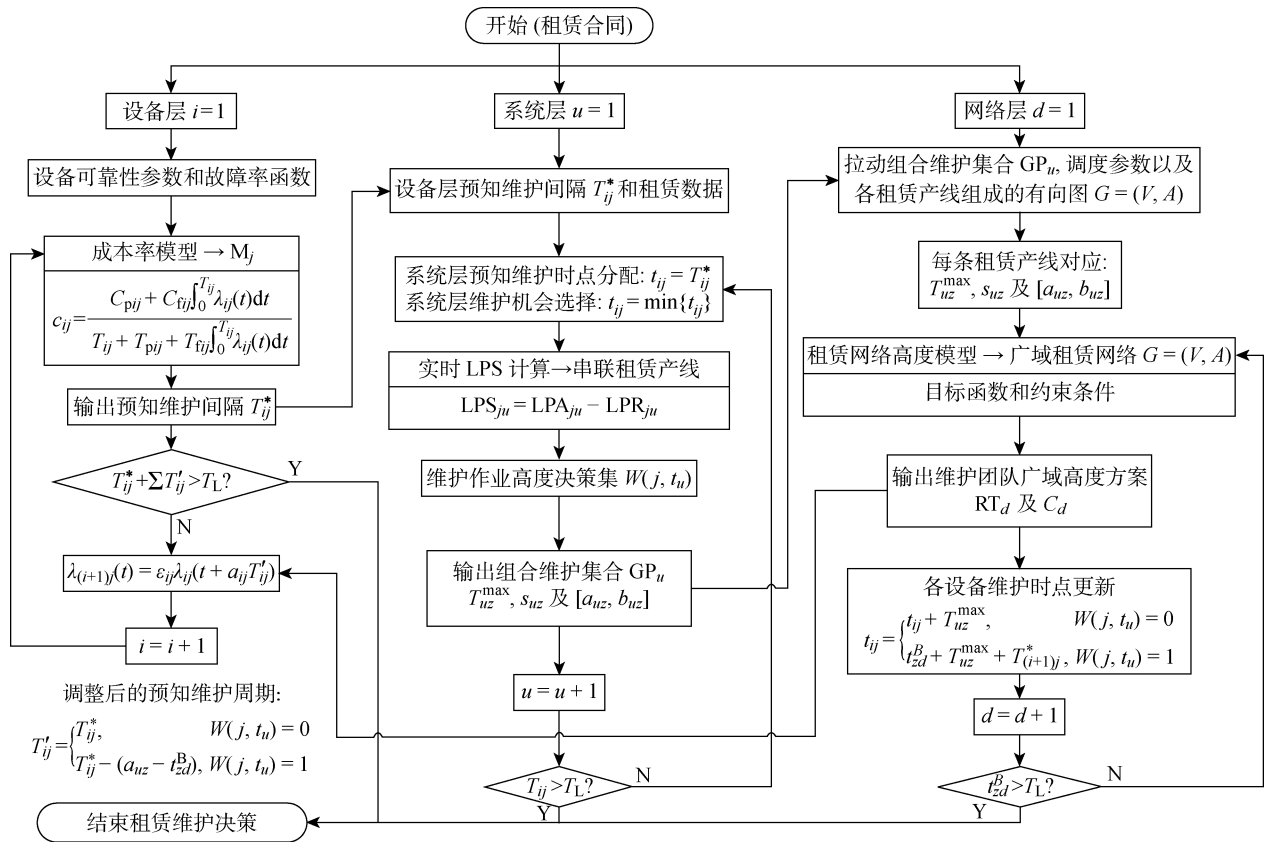


图 2 NLPO 维护调度策略的流程图

Fig. 2 Flowchart of opportunistic maintenance based on NLPO

设备的预知维护作业,更新后的维护时点 $t_{ij} = t_{zd}^B + T_{uz}^{\max} + T_{(i+1)j}^*$.

(8) 各租赁设备维护周期更新. 因为网络层的调度决策改变了各台租赁设备的预知维护周期,所以需要对新设备层周期进行更新. 若 $W(j, t_u) = 0$,更新后的预知维护周期 $T'_{ij} = T_{ij}^*$;若 $W(j, t_u) = 1$,更新后的预知维护周期 $T'_{ij} = T_{ij}^* - (a_{uz} - t_{zd}^B)$,并将实际维护周期反馈回设备层以进行下一周期的预知维护规划.

(9) 租赁产线租赁期到期检查. 判断新的网络层预定维修时点是否超出产线合同期 T_L 的范围. 如果是,则结束租赁产线维护的动态调度决策;否则回到步骤(5)拉动下一个网络层维护机会,进入下一个维护周期.

5 算例分析

为了验证面向租赁化制造行业的 NLPO 维护调度策略的有效性,以分布在不同地理位置的 4 条租赁产线为验证对象. 每条产线由 3 台不同类型的租赁设备构成,各台设备具有健康状态独立性和失效模式差异性的技术特点. 贯序利用租赁产线组合

维护机会,实时分析租赁网络总运维成本,动态规划维护团队优化调度方案,验证所提出的维护调度策略在降低设备供应商总运维成本上的有效性. 租赁设备的维护数据如表 1 所示. 租赁产线按照租赁合同签订的租赁数据如表 2 所示.

利用 NLPO 维护调度策略获得的第 1 个网络层各租赁产线维护周期($d=1$)的输出方案如表 3 所示. 得出在第 1 个网络层周期,需要两支维护团队,一支团队服务承租点 1,另一支团队按顺序服务承租点 2,3,4. 同时总运维成本为 1 803 美元. 各租赁产线的 T_{uz}^{\max}, s_{uz} 及 $[a_{uz}, b_{uz}]$ 是根据实时的系统层 LPO 决策制定的,对应的 LPA 与 LPR 的计算结果如表 4 所示.

根据上述 NLPO 调度策略的算法流程,网络层第 4 个维护周期($d=4$)和第 10 个维护周期($d=10$)的调度方案分别如表 5 和 6 所示. 需要指出的是,对于租赁点 1 的第 4 个网络层维护周期,在同时满足系统层 LPO 策略生成的维护需求和租赁合同的时间窗约束下,择优将 3 台设备同时输入组合维护的维护时间窗.

在各产线群组的租赁合同期内,网络层各个维护周期最优调度方案所对应的总运维成本如图 3 所

表 1 租赁设备的维护数据

Tab.1 Maintenance parameters of various leased machines

L_z	M_j	(m_j, η_j)	(a_{ij}, ϵ_{ij})	$T_{p_{ij}}/\text{h}$	$T_{t_{ij}}/\text{h}$	$C_{p_{ij}}/\text{\$}$	$C_{t_{ij}}/\text{\$}$
L_1	M_1	(3.1,4 000)	(0.025,1.035)	20	66	6 500	18 000
	M_2	(1.8,4 400)	(0.016,1.042)	25	74	8 000	30 000
	M_3	(2.5,5 500)	(0.018,1.044)	14	48	6 000	17 000
L_2	M_4	(2.1,3 200)	(0.023,1.054)	10	38	3 400	8 800
	M_5	(1.9,3 400)	(0.038,1.032)	12	68	9 600	28 000
	M_6	(2.3,5 600)	(0.048,1.041)	8	18	4 000	6 800
L_3	M_7	(1.9,3 400)	(0.038,1.032)	12	68	9 600	28 000
	M_8	(1.7,6 500)	(0.036,1.052)	10	22	9 800	16 000
	M_9	(2.3,5 600)	(0.048,1.041)	8	18	4 000	6 800
L_4	M_{10}	(3.1,4 000)	(0.025,1.035)	20	66	6 500	18 000
	M_{11}	(1.8,4 400)	(0.016,1.042)	25	74	8 000	30 000
	M_{12}	(3.3,3 900)	(0.015,1.039)	15	30	7 000	20 000

表 2 各租赁产线的租赁数据

Tab.2 Lease parameters of various leased production lines

z	$t_{zz'}/\text{h}$					V_z	M_j	$V_j^S/\text{\$}$	$V_j^E/\text{\$}$	$\kappa_j/(\text{\$}\cdot\text{h}^{-1})$	δ_j	w_z/h
	$z'=0$	$z'=1$	$z'=2$	$z'=3$	$z'=4$							
0	0	56	69	71	72	(0,0)	—	—	—	—	—	—
1	56	0	100	79	126	(−28,48)	M_1	700 000	660 000	14	0.11	50
							M_2	960 000	860 000	18	0.15	
							M_3	520 000	400 000	16	0.13	
2	69	100	0	140	98	(−47,50)	M_4	400 000	350 000	10	0.12	50
							M_5	860 000	700 000	20	0.22	
							M_6	330 000	250 000	18	0.16	
3	71	79	140	0	101	(50,50)	M_7	860 000	700 000	20	0.22	50
							M_8	750 000	600 000	22	0.28	
							M_9	330 000	250 000	18	0.16	
4	72	126	98	101	0	(51,−50)	M_{10}	700 000	660 000	14	0.11	50
							M_{11}	960 000	860 000	18	0.15	
							M_{12}	600 000	550 000	12	0.14	

表 3 第 1 个网络层维护周期的调度方案

Tab.3 Optimization scheme at the 1st network-maintenance cycle

L_z	$s_{uz}/\text{台}$	a_{uz}	b_{uz}	T_{uz}^{max}/h	RT_1	$C_1/\text{\$}$
L_1	2	2 219	2 269	25	0→1→0	
L_2	2	1 899	1 949	12		
L_3	1	2 009	2 059	12	0→2→3→4→0	1 803
L_4	3	2 153	2 203	25		

表 4 第 1 个网络层维护周期的 LPO 决策
Tab. 4 LPO programming at the 1st network-maintenance cycle

L_z	M_j	t_{ij}	t_{uz}	LPA/ \$	LPR/ \$	LPS/ \$	$W(j, t_{uz})$	T_{vij}/h	GP_u	T_{uz}^{max}/h
L_1	M_1	2 269		—	—	—	1	20		
	M_2	2 384	2 269	1 345	478	867	1	25	{1,2}	25
	M_3	3 086		2 531	2 692	—161	0	14		
L_2	M_4	1 949		—	—	—	1	10		
	M_5	2 059	1 949	1 382	704	678	1	12	{4,5}	12
	M_6	3 969		2 889	5 224	—2 335	0	8		
L_3	M_7	2 059		—	—	—	1	12		
	M_8	6 062	2 059	12 895	25 746	—12 851	0	10	{7}	12
	M_9	3 969		2 800	4 730	—1 930	0	8		
L_4	M_{10}	2 269		576	207	369	1	20	{10,11,12}	25
	M_{11}	2 384	2 203	1 842	771	1 071	1	25		
	M_{12}	2 203		—	—	—	1	15		

表 5 第 4 个网络层维护周期的调度方案
Tab. 5 Optimization scheme at the 4th network-maintenance cycle

L_z	$s_{uz}/台$	a_{uz}	b_{uz}	T_{uz}^{max}/h	RT_4	$C_4/\$$
L_1	3	6 148	6 151	25	0→1→3→0	4 301
L_2	3	7 371	7 421	12		
L_3	2	7 743	7 793	12	0→2→4→0	
L_4	3	8 554	8 604	25		

表 6 第 10 个网络层维护周期的调度方案
Tab. 6 Optimization scheme at the 10th network-maintenance cycle

L_z	$s_{uz}/台$	a_{uz}	b_{uz}	T_{uz}^{max}/h	RT_{10}	$C_{10}/\$$
L_1	1	14 760	14 810	14	0→2→0	9 120
L_2	3	16 707	16 757	12		
L_3	2	17 841	17 891	12	0→1→3→4→0	
L_4	3	20 141	20 191	25		

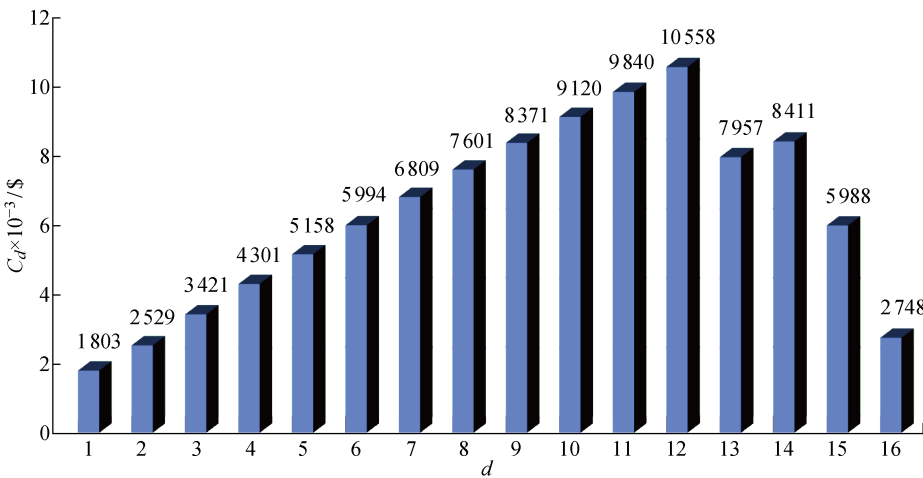


图 3 网络层贯序各周期总运维成本
Fig. 3 Operation and maintenance costs of sequential network-maintenance cycles

示. 由图可知, 在合同初期, 出租方的总运维成本随着时间的增加而递增, 证明由役龄老化导致产线群组的运维投入不断攀升. 在合同后期, 随着多区域租赁产线逐渐期满, 运维对象的减少导致了租赁网络

节点数的减少, 因而总运维成本整体有所降低.
通过与独立按期预知维护策略(IPM)和不考虑网络层优化的 LPO 策略进行比较, 验证了 NLPO 调度策略在经济上具有优势. 图 4 所示为上述调度

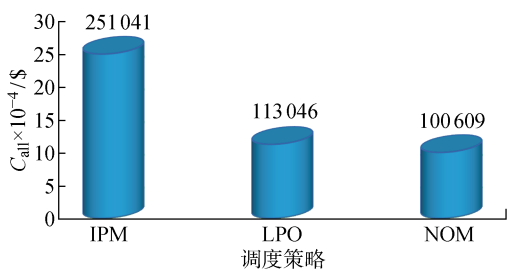


图 4 不同调度策略的总运维成本比较

Fig. 4 Total operation and maintenance costs comparison of different policies

策略的总运维成本的比较结果。

6 结语

针对设备供应商对租赁产线群组提供的运维服务中存在的广域运维问题,提出一种 3 层机会维护调度策略.在满足设备层与系统层决策服务时间窗的基础上,以广域布局的租赁产线群组为运维对象,以最小化出租方的总运维成本为目标函数,建立平衡服务需求和资源约束之间供需矛盾的 NLPO 调度策略数值模型,并对其进行优化求解.算例计算结果表明,与现有的 2 种维护调度策略模型计算出的总运维成本相比,本文提出的 3 层机会维护调度策略可以动态地规划维护调度策略,从而有效降低总运维成本,因此更符合实际应用的需求.所提出的模型可以根据不同承租方的实际维护需求,对 3 层机会维护调度策略进行适当调整,以适用于各类不同现场的租赁化生产.该模型可拓展应用于远洋船舶、电信装备和风机电场运维等行业的广域运维.

参考文献:

[1] ZHANG Z N, LIU G, JIANG Z C, *et al.* A cloud-based framework for lean maintenance, repair, and overhaul of complex equipment[J]. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 2015, 137 (4): 040908.

[2] JIN X N, NI J. Joint production and preventive maintenance strategy for manufacturing systems with stochastic demand[J]. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 2013, 135(3): 031016.

[3] 陶辛阳,夏唐斌,奚立峰. 基于健康指数的预防性维

护与多目标生产调度联合优化建模[J]. **上海交通大学学报**, 2014, 48(8): 1170-1174.

TAO Xinyang, XIA Tangbin, XI Lifeng. Health-index-based joint optimization of preventive maintenance and multi-attribute production scheduling[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2014, 48 (8): 1170-1174.

[4] YE H R H, KAO K C, CHANG W L. Optimal preventive maintenance policy for leased equipment using failure rate reduction[J]. **Computers and Industrial Engineering**, 2009, 57(1): 304-309.

[5] 金琳,黄开敏,周晓军. 租赁设备的多阶段预防性维护策略及优化[J]. **计算机集成制造系统**, 2013, 19 (12): 2947-2953.

JIN Lin, HUANG Kaimin, ZHOU Xiaojun. Multi-period preventive maintenance policy and optimization for leased equipment[J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2013, 19(12): 2947-2953.

[6] 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.

[7] GOEL A, MEISEL F. Workforce routing and scheduling for electricity network maintenance with downtime minimization[J]. **European Journal of Operational Research**, 2013, 231(1): 210-228.

[8] BOLAND N, KALINOWSKI T, KAUR S. Scheduling network maintenance jobs with release dates and deadlines to maximize total flow over time: Bounds and solution strategies[J]. **Computers and Operations Research**, 2015, 64: 113-129.

[9] 崔维伟,陆志强. 单机系统的生产调度与预防性维护的集成优化[J]. **上海交通大学学报**, 2012, 46(12): 2009-2013.

CUI Weiwei, LU Zhiqiang. Integrating production scheduling and preventive maintenance planning for a single machine [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2012, 46(12): 2009-2013.

[10] LOPEZ-SANTANA E, AKHAVAN-TABATABAEI R, DIEULLE L, *et al.* On the combined maintenance and routing optimization problem [J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2016, 145: 199-214.

(本文编辑:石易文)