

考虑维修时间及相关性的串联系统 动态机会维护策略

钱 倩¹, 蒋祖华¹, 杨 振², 胡小才², 刘剑坤¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘要: 针对多部件系统维修过程中涉及部件结构复杂、维修时间长、维修费用高的特点, 提出了预防维修时间、小修时间、结构相关性、经济相关性四重因素影响下的多部件串联系统动态机会维护策略。首先, 以单部件为研究对象, 决策出部件层最优维护周期, 并综合制定系统层试行维修计划; 然后, 基于试行计划, 并考虑部件间相关性的影响, 以节省总成本最大为优化目标建立系统层维护的优化模型; 最后, 应用滚动计划实现对维修计划的动态更新。通过采用遗传算法求解算例, 验证所提出维修策略的必要性和有效性。

关键词: 机会维护; 串联系统; 预防维修时间; 小修时间; 结构相关性; 经济相关性

中图分类号: TH 17 **文献标志码:** A

Dynamic opportunistic maintenance strategy for series systems considering maintenance time and dependence

QIAN Qian¹, JIANG Zuhua¹, YANG Zhen², HU Xiaocai², LIU Jiankun¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of complex structure, long maintenance time and high maintenance cost in the maintenance process of multi-component system, the dynamic opportunity maintenance strategy of multi-component series system was proposed. Four factors were considered in the strategy: preventive maintenance duration, minor repair duration, structural dependence and economic dependence. Firstly, single component was used as a research object. The optimal maintenance period of the component layer was determined, and the system trial maintenance plan was formulated. Then, based on a trail plan and considering the structural dependence and economic dependence, the system-level maintenance optimization model was established with the maximum cost saving as the optimization goal. The rolling plan was applied to achieve dynamic updates of the maintenance plans. Through arithmetic example, this proposed policy is proved to be effective and necessary.

收稿日期: 2021-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72061022); 工信部高技术船舶项目

第一作者: 钱 倩 (1993-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 预防性维护. E-mail: 1046777943@qq.com

通信作者: 蒋祖华 (1966-), 男, 教授. 研究方向: 预防性维护、知识工程. E-mail: zhjiang@sjtu.edu.cn

Keywords: *opportunistic maintenance; series system; preventive maintenance duration (PM-duration); minor repair duration; structural dependence; economic dependence*

由于当前大多数装备系统复杂性高，涉及部件数量多，因此，多部件系统的维护策略优化问题越来越受到关注^[1]。相比于传统单设备部件维护决策问题，多部件系统维护决策更为复杂，近年来也涌现了大量系统层维护模型^[2]，其中广泛应用的为机会维护模型。多部件系统考虑的相关性主要分为3种^[3]：经济相关性、随机相关性(也称为故障相关性)和结构相关性。根据考虑相关性种类的不同，机会维护模型可以分为考虑单一相关性的机会维护模型和考虑联合相关性的机会维护模型。Nguyen等^[4]基于部件间的正向和负向经济相关性建立系统机会维护模型。Wang等^[5]考虑部件间经济相关性，以维修成本最小和系统可用度最高为优化目标建立多部件串联系统机会成组的维护优化模型。苏春等^[6]考虑部件间的经济相关性，将基于滚动计划的动态机会维修策略应用于风电机组维修。Song等^[7]考虑部件间故障相关性与经济相关性，提出具有固定替换间隔的役龄替换策略和固定检查间隔的维护策略。Do等^[8]针对具有故障相关性和经济相关性的两部件系统进行维修决策优化。目前，实际运行系统中存在多种相关性的耦合作用，但相关研究大多考虑单一经济相关性对维护策略的影响。

由于部件结构复杂，维修时间较长，以致于维修时间在系统运行时间内所占比重大，因此，若忽略维修时间的影响，将严重影响系统的维护决策，进而降低维修效率、增加维修成本。但相关系统层维护模型多忽略维修时间对维护策略的影响以达到模型的简化。文献[9-11]均忽略维修时间对于维护策略的影响。文献[12]只考虑预防维修时间影响因素来建立系统维修优化策略。Vu等^[13]考虑了小修时间，但是仅结合经济相关性建立系统维护模型。因为预防维修时间大多可提前确定，故仅考虑预防维修时间的维护模型比较简单。而部件故障发生具有随机性，且部件间存在结构相关性，如何基于联合相关性合理规划小修时间，实现故障次数减少、节省成本升高，具有较大挑战。

上述研究大多忽略预防维修时间和小修时间对维护策略的影响，且普遍仅基于经济相关性来

进行系统层维护决策，并未涉及考虑多相关性、多维修时间、多成本划分的复杂系统动态维护策略。本文提出一种综合考虑预防维修时间、小修时间、结构相关性、经济相关性因素影响下的多部件系统动态机会维护策略。首先建立部件层短期维护计划决策模型，求解单部件最优预防维护周期。根据部件层的决策结果初步制定试行维修计划，进一步综合考虑部件之间结构相关性、经济相关性对于维护决策的影响，拓展系统维修节省成本划分方法，以维护成本最小化为目标，制定系统层长期维护决策方案。

1 问题描述与假设

针对由 n 个部件组成的串联系统，综合考虑部件间经济相关性和结构相关性，以及预防性维护时间和故障维修时间对于维修策略的影响，进行系统层维护计划的动态决策优化。系统内各部件从全新开始运转，即各部件初始可靠度为“1”。考虑预防性维护(PM)与故障维修(小修)(CM)作为维修手段。

以系统维修成本最小化为优化目标，并应用动态计划，将长期计划与短期计划相结合，为该多部件串联系统制定动态机会维护策略，并根据实际的情况，作如下假设：

- a. 系统内各部件故障率函数服从尺寸参数为 η ，形状参数为 β 的两参数威布尔分布；
- b. 部件之间是故障独立的^[13]，即一个部件失效不会对其他部件造成影响；
- c. 在预防维护时刻对部件采用完美维护，即对部件执行更换操作；在预防维护周期内部件发生故障采用小修，小修仅使部件恢复运转，不改变其失效率^[14]；
- d. 系统结构复杂，维修时间耗时较长，故预防维修时间和小修时间不可忽略^[13]；
- e. 维修资源足以满足所有维修任务的要求。

2 考虑相关性及维修时间的系统动态机会维修策略

本文采用动态机会维修策略，在部件层进行

成本优化, 得到每个部件的最优预防性维修周期。在此基础上制定试行维修计划, 保证每个部件至少预防性维修一次。对具有经济相关和结构相关的系统层分组维修的成本建模, 在此基础上对于系统层的分组进行优化。最终完成系统层最优维修计划的制定。

2.1 部件层维护优化

考虑由不同部件*i*(*i* = 1, 2, ..., *n*)组成的多部件串联系统。*T_i*定义为部件*i*的预防维护间隔期, 在部件的故障率函数建模中, 一般选用威布尔分布对各部件故障率进行描述, 所以在预防维护周期内部件*i*的故障率函数λ_{*i*}(*t*)为

$$\lambda_i(t) = \frac{\beta_i}{\eta_i} \left(\frac{x_i}{\eta_i} \right)^{\beta_i - 1} \tag{1}$$

式中: β_{*i*}, η_{*i*}分别为部件*i*服从的威布尔分布的形状参数和尺寸参数, 且β_{*i*}>1, η_{*i*}>0; *x_i*是到时间*t*为止, 部件*i*的总运行时间, 严格来说, 只有当部件从全新开始运转且维修时间忽略不计时, *x_i* = *t*。

部件层的决策目标是最小化单位时间内部件的维护成本。当部件*i*的年龄达到阈值*T_i*时, 对部件进行预防性维护操作; 若在预防维护周期内部件发生故障, 则采用小修, 使得部件恢复运转, 但是失效率不变。记*C_i*(*T_i*)为部件*i*在单个预防性维护周期内的维修成本率, 可以表示为

$$C_i(T_i) = \frac{C_{pi} + C_{ci}F(0, T_i)}{T_i + \omega_{pi} + \omega_{ci}F(0, T_i)} \tag{2}$$

式中: *C_{pi}*为部件*i*单次预防维护成本; *C_{ci}*为部件*i*单次故障小修成本; *F*(0, *T_i*)为部件*i*在预防维护周期*T_i*内发生故障次数; ω_{*pi*}为部件*i*单次预防维护时长; ω_{*ci*}为部件*i*单次故障小修时长。

其中, 维修成本用维修人员成本率*C_{la}*来进行表示, 则

$$C_{pi} = C_{la}\omega_{pi} \tag{3}$$

$$C_{ci} = C_{la}\omega_{ci} \tag{4}$$

因为部件故障率函数服从威布尔分布, 所以*F*(0, *T_i*)可写作

$$F(0, T_i) = \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt = \left(\frac{T_i}{\lambda_i} \right)^{\beta_i} \tag{5}$$

通过式(2)~(5), 可得维修成本率为

$$C_i(T_i) = \frac{C_{la}\omega_{pi} + C_{la}\omega_{ci} \left(\frac{T_i}{\lambda_i} \right)^{\beta_i}}{T_i + \omega_{pi} + \omega_{ci} \left(\frac{T_i}{\lambda_i} \right)^{\beta_i}} \tag{6}$$

对上述最优成本率*C_i*(*T_i*)求导, 即d*C_i*(*T_i*)/d*T_i*|_{*T_i*=*T_i*^{*} = 0, 可得每个部件的最优预防维护周期*T_i*^{*}, 其中*T_i*^{*}又被称为部件*i*的名义预防维修周期, 被用来制定试行维修计划的维修执行时间。}

2.2 试行维修计划

基于部件的名义预防维修周期, 可进行确定部件的试行维修时间间隔[*t_b*, *t_e*], 如图1所示, 其中, *t_b*表示当前时刻, 而*t_e*的确定要保证所有部件在该时间间隔内至少预防维护一次^[14]。

记*t_{ij}*(*j* ≥ 1)表示部件*i*的第*j*次试行预防维护时刻, 则

$$t_{i1} = T_i^* + d_i^1 + t_b - t_{is} \tag{7}$$

$$t_{ij} = t_{i(j-1)} + \omega_{pi} + d_i^j + T_i^*, j > 1 \tag{8}$$

$$t_e = \max_{i=1, \dots, n} t_{i1} \tag{9}$$

式中: *t_{is}*表示上一次维修完成后至*t_b*的工作时间, 那么*t_b* - *t_{is}*就是上一次维修完成的时间点; *d_i*¹表示部件*i*在时间间隔(*t_b*, *t_{i1}*)中的累计停机维修时间, 上一次维修完成时间与预计维修间隔、累积停机时

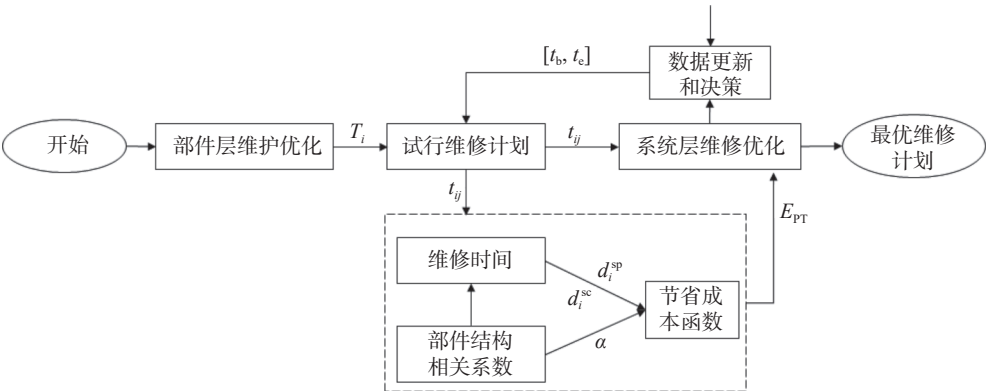


图 1 考虑维修时间和结构相关性的维修计划动态更新

Fig.1 Dynamic maintenance plan considering maintenance duration and structural dependence

间之和即为下一次维修的时刻; $t_{i(j-1)}$ 表示部件*i*的第*j*-1次试行预防维护时刻; d_i^j 表示部件*i*在时间间隔 $(t_{i(j-1)}, t_{ij})$ 中的累计停机维修时间, 有

$$d_i^1 = \omega_{ci} F(t_b, t_{i1}) \quad (10)$$

$$d_i^j = \omega_{ci} F(t_{i(j-1)}, t_{ij}) \quad (11)$$

2.3 系统维修成本建模

在系统层考虑多个部件之间存在的结构相关性和经济相关性, 在试行维修计划的基础上, 建立维护计划调整下的节省成本模型, 对串联系统中各个部件的维护作业进行动态优化调整。其中, 多个部件同时维修可以节省固定的维修成本, 部件之间具有经济相关性; 多个结构上有关联的部件同时维修可以节省维修时间, 部件之间具有结构相关性。

在第*u*个系统试行维修时间间隔内, 当其中一个部件最先到达预防维护时间点 t_{ij} 时, 将此作为系统层的维护机会点, 管理者需要决策是否需要将剩余非修部件的预防维护作业提前至 t_{ij} 一起实施, 以避免系统的频繁维护。对于非修部件, 若和当前部件组合 G_l 一起进行维护, 节省的费用 $E_P(G_l) > 0$, 则将非修部件维护作业提前加入至当前维护集合。因此, 将一个试行维修时间间隔内的*n*个部件分成*k*组, 每组部件用 $G_l (l = 1, 2, \dots, k)$ 表示, 则该阶段内的系统维修任务可表示为成组集合*GS*, 其中 $G_1, G_2, \dots, G_k$ 是*GS*的互斥子集。每次预防性维护都是将一个组合 G_l 中的所有部件同时更换, 每组部件同时维护可节省的成本被划分为以下3部分:

a. 维修准备节省成本, 记为 S_{G_l} , 这是开展维护工作前的准备成本, 包括维护工具成本、维护人员运输成本、拆装成本等, 当几个部件同时维护时这部分成本只需要花一份。

$$S_{G_l} = \sum_{i \in G_l} S_i - \max_{i \in G_l} S_i \quad (12)$$

式中, S_i 表示部件*i*的维修准备成本。

b. 惩罚成本, 记为 P_{G_l} : 是指由于提前某些部件维修计划会导致部件工作寿命未被充分利用, 或延迟某些部件维修计划会导致部件故障风险增加而付出一定的惩罚成本, 参考文献[13], 计算如下:

$$P_{G_l} = \sum_{i \in G_l} \{C_{ci} [F(0, t_{ij}) - F(0, t_{G_l})] - C_i(T_i)(t_{ij} - t_{G_l})\} \quad (13)$$

式中, t_{G_l} 表示 G_l 的维护周期。惩罚成本 P_{G_l} 所得一般为负值, 在总费用中起反作用。

c. 停机损失节省成本, 记为 D_{G_l} , 这是多个部件同时进行预防性维护时可节省系统的停机时间, 进而降低的总停机成本。由于部件间存在结构相关性, 则对某个部件进行维修时, 需要对其他部件进行拆解, 因此多个部件同时维修可节省一部分维修时间。针对此种相关性, 每个部件*i*的维修时间可分为两部分: 仅属于该部件不可分摊的拆装时间 d_i^r , 共同维修时由于结构相关性可分摊的拆装时间 d_i^{sc} , 其中“-”为p表示预防性维护, “-”为c表示故障小修。用相关系数 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ 表示各部件之间结构相关性强弱: $\alpha = 0$ 表示各部件之间无结构相关性; $\alpha = 1$ 表示部件之间存在强结构相关性, 此时维修时间为

$$\sum_{i \in G_l} d_i^r + \max_{i \in G_l} d_i^{sc}$$

则停机损失节省成本计算公式如下:

$$D_{G_l} = C_u \alpha \left[\left(\sum_{i \in G_l} d_i^{sp} - \max_{i \in G_l} d_i^{sp} \right) + F(0, t_{G_l}) \left(\sum_{i \in G_l} d_i^{sc} - \max_{i \in G_l} d_i^{sp} \right) \right] \quad (14)$$

式中, C_u 表示系统单位停机损失成本。

所以, G_l 的总节省费用记为 $E_P(G_l)$, 其值为

$$E_P(G_l) = S_{G_l} + D_{G_l} + P_{G_l} \quad (15)$$

2.4 系统维护优化策略

上述系统层维修成本随着分组方式的不同而变化, 因此本节进行系统层分组的优化。假设*H*代表系统中部件的集合, 将短期时间间隔 $[t_b, t_e]$ 内*H*中的*n*个部件分成*k*组, 每组部件用 $G_l (l = 1, 2, \dots, k)$ 表示, 则系统维修任务可表示为成组集合*GS*, 其中

$$\begin{cases} G_m \cap G_n = \emptyset, \forall m \neq n \\ G_1 \cup G_2 \cup \dots \cup G_k = H \end{cases} \quad (16)$$

问题求解的核心在于寻找最佳的分组方式 $G_l (l = 1, 2, \dots, k)$, 遵循数学规范, 决策变量设定为 $x_{il} (i \in H, l = 1, 2, \dots, k)$:

$$x_{il} = \begin{cases} 1, \text{部件} i \text{属于} G_l \\ 0, \text{部件} i \text{不属于} G_l \end{cases} \quad (17)$$

故系统内所有部件节省总成本为各组节省成本之和, 其值 E_{PT} 为

$$E_{PT} = \sum_{l=1}^k E_P(G_l, t_{G_l}) = \sum_{l=1}^k (S_{G_l} + D_{G_l} + P_{G_l}) \quad (18)$$

因此, 系统级维修优化问题可被划分为两个子问题: 寻找最优划分组合问题和每组部件最优维护周期决策问题。其中划分组合为 $GS^* = \{G_1^*, G_2^*, \cdots, G_k^*\}$, 每组最优维护周期为 $T_{GS}^* = [t_{G_1}^*, t_{G_2}^*, \cdots, t_{G_k}^*]$, 从而使得系统在短期时间间隔内的总节省成本最大。因此, 由以上各部分建模, 得到系统级维修优化模型为

$$E_{PT}(GS^*, T_{GS}^*) = \max E_{PT}(GS, T_{GS}) = \max \sum_{l=1}^k E_P(G_l, t_{G_l}) \quad (19)$$

决策变量均为 0-1 变量, 此模型通过遗传算法进行求解得到优化后的多部件系统层维护计划, 具体结果见下文。

3 实例计算

为验证上述优化模型的有效性, 以某机械系统(含 9 个部件)为例进行分析, 各部件串联。

系统单位停机损失成本为 $C_u = 3\,000$ 元/d, 维修人员成本率为 $C_{la} = 300$ 元/d。假设部件故障率函数满足两参数威布尔分布, 相应参数及维护相关参数如表 1 所示(费用参数单位均为元, 时间参数单位均为 d)。

3.1 部件层维护优化

不考虑部件间经济相关性和结构相关性的影

响, 根据上文要求对系统内各部件进行维修优化, 并通过设置小修时间 $\omega_{ci}(i = 1, 2, \cdots, n)$ 值, 分别得到仅考虑预防维修时间(即 $\omega_{ci} = 0$)和同时考虑预防维修时间和小修时间两种情况下的各部件最优维护周期、对应最优维修成本率及维修时刻, 如表 2 所示。

表 2 中, $T_i^*(PM)$ 表示仅考虑预防维修时间情况下的部件最优维护周期, $T_i^*(PM\&CM)$ 表示同时考虑预防维修时间和小修时间情况下的部件最优预防维护周期, 其他同理。由表 2 可得, 当同时考虑 PM 和 CM 时, $t_e = \max_{i=1, \cdots, n} t_{i1} = 435$, 故可确定试行维修时间间隔为 $[0, 435]$ 。根据表 2 所得的各部件最优维护间隔期 T_i^* , 在只考虑预防维修时间、同时考虑预防维修时间和小修时间两种情况下, 系统各个部件的预防维护时刻点示意图分别如图 2 和 3 所示。

从表 2 可见, 相对于只考虑预防维修时间的情况, 同时考虑预防维修时间和小修时间能够保证达到更优的部件级维护计划, 其中每个部件的替换周期值提前了 35.55%~73.56%, 总维修成本率降低了 21.99%。为了进一步明确小修时间对于部件维护优化的影响, 以部件 3 为例, 固定其他参数值不变, 将部件 3 小修时间依次设置为 0.5 的整数倍(即 $\omega_{ci} = 0.5k, k = 1, \cdots, 10$), 计算不同小修维修时间下的部件最优维修周期和对应所节省维修成本率(与只考虑预防维修时间相比), 所得结果如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 可知, 随着小修时间的增加, 部件 3 的最优维护周期逐渐减小, 且部件 3 节省成本率逐渐升高, 说明当部件复杂性越高, 小修时

表 1 系统各部件相关参数
Tab.1 Related parameters of various components

部件	S_i	ω_{pi}	ω_{ci}	d_i^p	d_i^c	d_i^{sp}	d_i^{sc}	β_i	λ_i	t_{is}
1	300	3.0	2.5	1.5	1.0	0.5	0.3	2.05	353	365.1
2	450	1.0	0.8	0.5	0.4	0.2	0.1	2.00	210	350
3	350	1.5	1.0	1.0	0.5	0.3	0.2	1.80	220	355
4	400	2.0	1.5	1.0	0.8	0.5	0.3	1.90	230	383
5	500	2.0	1.5	1.0	0.8	0.5	0.3	1.85	186	285
6	250	2.5	2.0	1.5	1.0	0.6	0.4	2.10	217	300
7	360	1.5	1.0	0.8	0.5	0.2	0.2	2.15	263	330
8	290	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	2.20	170	375
9	340	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	1.95	180	310

表 2 部件级维护优化值

Tab.2 Individual maintenance optimization results

部件	$T_i^*(\text{PM})$	$T_i^*(\text{PM\&CM})$	$t_{i1}(\text{PM})$	$t_{i1}(\text{PM\&CM})$	$t_{i2}(\text{PM\&CM})$	$C_i(T_i)(\text{PM})$	$C_i(T_i)(\text{PM\&CM})$
1	575.0	365.1	209	0	—	22.95	18.95
2	680.2	420.5	239	35	—	24.18	20.03
3	650.5	400.5	308	46	—	23.34	19.20
4	705.4	520.4	343	117	410	19.45	16.55
5	538.6	358.6	370	220	—	29.60	24.60
6	595.3	432.6	383	283	—	30.56	22.00
7	905.1	637.3	591	331	—	28.35	26.15
8	755.8	435.2	612	400	—	22.13	18.24
9	600.4	490.4	556	435	—	27.96	21.60
$\sum_{i=1}^9 C_i(T_i)$	—	—	—	—	—	228.52	187.32

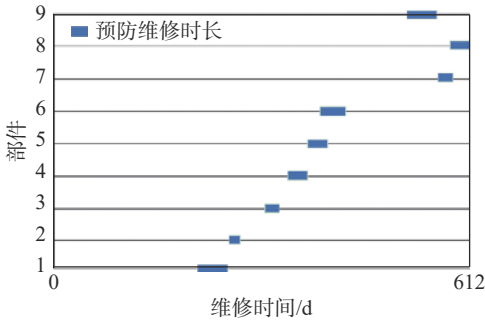


图 2 各部件维修时间 (PM)

Fig. 2 Maintenance time of each component (PM)

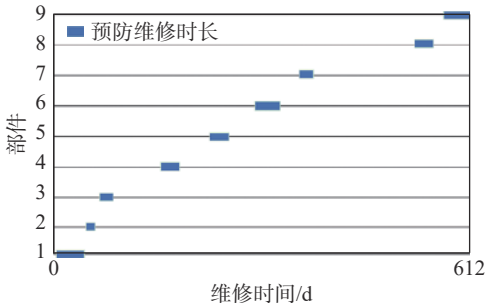


图 3 各部件维修时间 (PM & CM)

Fig. 3 Maintenance time of each component (PM & CM)

间越长时, 考虑小修时间对于维护策略的有效性越高。

3.2 考虑相关性及维修时间的系统层维修优化

分别考虑以下 3 种情况:

情况 1(S_1) 同时考虑预防维修时间和小修时间影响, 只考虑部件间存在经济相关性, 不考虑部件间结构相关性影响^[13], 求解划分组合和预防维护周期的最佳组合, 以及对应的系统节省总费用。

情况 2(S_2) 只考虑预防维修时间影响, 并考虑部件间结构相关性和经济相关性影响, 设定不同结构相关系数, 分别求解对应的各组合节省费用和系统节省总费用。

情况 3(S_3) 同时考虑预防性维修时间和小修时间影响, 并考虑部件间结构相关性和经济相关

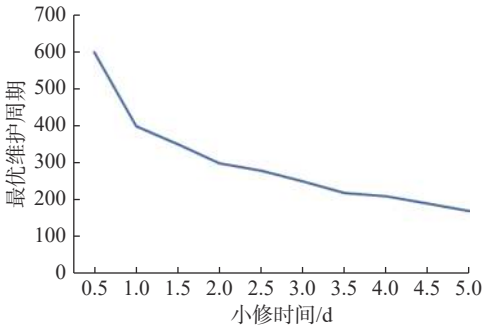


图 4 不同小修时间下最优维护周期

Fig. 4 Optimal replacement cycle under different CM durations

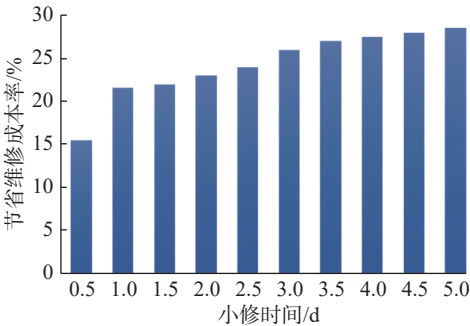


图 5 不同小修时间下节省维修成本率

Fig. 5 Additional cost saving rate under different CM durations

性的影响, 设定不同结构相关系数, 分别求解对应的各组合节省费用和系统节省总费用。

以上 3 种情况均采用系统机会维护策略, 并应用遗传算法分别进行求解。观察到当情况 3 中的相关系数 α 取 0 时, 情况 3 将退化为情况 1。

情况 1 的最优分组结构如表 3 所示, 系统各个部件的预防维护时刻点示意图如图 6 所示。

图 6 绘制了不考虑结构相关性时各部件进行维护的维修时刻。从表 3 可知, 当部件间存在经济相关性时, 与单独对各部件进行维修优化相比, 利用机会维护策略将多个部件进行组合维护可有效节省系统维修成本, 其中系统节省总成本为 2724.35 元, 节省成本率为 14.09%。

情况 2 和 3 中同时考虑结构相关性和经济相关性进行维修计划的优化, 表 4 显示了在考虑不同维修时间情况下, 设置不同结构相关系数时系统节省总费用。

从表 4 中数据可发现, 部件间结构相关性对维修费用的节省有较大作用, 系统节省总成本随着部件间结构相关系数的增加而递增。从情况 3 对应的数据可知, 当部件间结构相关系数为 0.4 时, 运用本文的系统级优化策略可节省总成本 5492.19 元, 与不考虑部件间相关性情况相比, 降低成本率为 4.58%; 与仅考虑经济相关性情况(此时结构相关系数为 0)相比, 维修成本降低 7619.4 元。

综合情况 2 和 3 来看, 在同一结构相关系数

表 3 考虑经济相关性的最优分组

GS^*	t_{G_i}/d	$E_P(G_i)/d$	节省成本率/%
$G_1 = \{1, 2, 3\}$	33.50	783.26	4.53
$G_2 = \{4, 5, 6, 7\}$	260.70	1 360.55	7.21
$G_3 = \{8, 9\}$	424.25	580.54	2.35
$\sum_{i=1}^3 G_i$	—	2 724.35	14.09

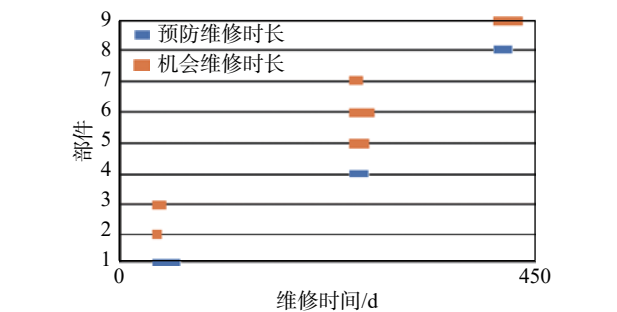


图 6 各部件维修时间

Fig. 6 Maintenance time of each component

表 4 不同相关系数下节省费用

Tab.4 Cost savings under different correlation coefficients

S_j	α	$E_P(G_1)/\text{元}$	$E_P(G_2)/\text{元}$	$E_P(G_3)/\text{元}$	$E_{PT}/\text{元}$
S_2	0	513.35	1060.45	380.22	1954.02
	0.2	830.23	1350.20	701.30	2881.73
	0.4	1100.20	1700.35	1100.23	3900.78
	0.8	1800.12	2615.13	2025.50	6440.75
	1.0	2155.15	3006.18	2210.65	7371.98
S_3	0	783.26	1360.55	580.54	2724.35
	0.2	1230.45	1800.20	1012.30	4042.95
	0.4	1712.34	2279.35	1500.50	5492.19
	0.8	3001.20	3315.67	2825.50	9142.37
	1.0	3450.33	3683.27	3210.15	10343.75

下, 与仅考虑预防维修时间情况相比, 同时考虑预防维修时间和小修时间时系统节省费用进一步增加。当部件间结构相关系数为 0.4 时, 情况 3 的系统节省总成本比情况 2 的系统节省总成本高 1591.41 元, 且两情况下的系统节省总成本差值随着结构相关系数的增加而递增, 说明同时考虑小修时间和部件间结构相关性能够有效节省系统维修成本, 验证了本文考虑预防维修时间、小修时间、结构相关性和经济相关性多重因素时, 维修优化策略在经济上具有优势。因此, 在复杂的多部件系统维护中, 需考虑多重影响因素建立维修优化模型, 进而实现更加科学合理的决策优化。

4 结束语

本文针对复杂多部件系统制定机会维修优化策略时考虑因素的局限性, 建立了考虑预防维修时间、小修时间、结构相关性与经济相关性因素影响下的多部件串联系统动态机会维护模型。以某复杂机械系统为研究对象, 以系统多部件维修节省成本最大(即维修成本最小)为优化目标, 建立考虑多种维修时间和相关性的动态机会维护模型, 并采用遗传算法进行优化求解。从算例优化结果可知, 与现有的考虑单一部件相关性及忽略小修时间的系统维修优化模型相比, 本文提出的 4 重因素影响下的机会维护策略可以动态调整系统维修策略, 从而有效降低系统总维修成本, 该策略更符合实际应用情况。下一步将拓展已有相关性, 考虑更多相关性影响下的系统机会维护模型

与策略。

参考文献:

- [1] LIANG Z L, PARLIKAD A K. Predictive group maintenance for multi-system multi-component networks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 195: 106704.
- [2] DE JONGE B, SCARF P A. A review on maintenance optimization[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 285(3): 805–824.
- [3] THOMAS L C. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems[J]. *Reliability Engineering*, 1986, 16(4): 297–309.
- [4] NGUYEN K A, DO P, GRALL A. Multi-level predictive maintenance for multi-component systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 144: 83–94.
- [5] WANG J H, ZHANG X H, ZENG J C. Optimal group maintenance decision for a wind farm based on condition-based maintenance[J]. *Wind Energy*, 2021, 24(12): 1517–1535.
- [6] 苏春, 陈武. 考虑部件经济相关性的风力机系统状态维修优化 [J]. *东南大学学报 (自然科学版)*, 2016, 46(5): 1007–1012.
- [7] SONG S L, COIT D W, FENG Q M, et al. Reliability analysis for multi-component systems subject to multiple dependent competing failure processes[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2014, 63(1): 331–345.
- [8] DO P, ASSAF R, SCARF P, et al. Modelling and application of condition-based maintenance for a two-component system with stochastic and economic dependencies[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, 182: 86–97.
- [9] YANG L, ZHAO Y, MA X B. Group maintenance scheduling for two-component systems with failure interaction[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 71: 118–137.
- [10] MISHRA A K, SHRIVASTAVA D, VRAT P. An opportunistic group maintenance model for the multi-unit series system employing Jaya algorithm[J]. *Opsearch*, 2020, 57(2): 603–628.
- [11] NGUYEN T, DELOUX E, DIEULLEZ L. Maintenance policies for an heterogeneous two-component system with stochastic and economic dependencies[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(12): 787–792.
- [12] DO P, VU H C, BARROS A, et al. Maintenance grouping for multi-component systems with availability constraints and limited maintenance teams[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 142: 56–67.
- [13] VU H C, DO P, BARROS A. A study on the impacts of maintenance duration on dynamic grouping modeling and optimization of multicomponent systems[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, 67(3): 1377–1392.
- [14] 胡家文, 蒋祖华, 韩李杰. 工况时变下设备预防维护策略 [J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(5): 736–741, 749.

(编辑: 丁红艺)