

文章编号: 1006-2467(2022)09-1276-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.104

# 双目标优化的动车组系统多阶段机会维修决策

王 红<sup>1</sup>, 齐彦昆<sup>1</sup>, 何 勇<sup>1</sup>, 杨国军<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 兰州 730070;  
2. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏 常州 213011)

**摘 要:** 为保证在动车组可靠运行的前提下, 尽可能提高其运用效率, 在传统机会维修策略的基础上提出一种双目标优化的多阶段机会维修决策策略. 该策略将维修机会窗口等距划分为多个阶段, 对维修时机位于不同阶段的部件实施差异力度的维修. 针对多部件维修任务分配问题, 提出两名维修人员的任务分配算法, 并将该算法引入到多属性决策中, 使模型具有良好的多属性优化性能. 算例分析验证了多阶段机会维修策略在优化可用度和平均成本率方面的有效性, 同时探究权重因子对模型优化倾向的影响.

**关键词:** 维修策略; 机会维修; 多阶段窗口; 双目标优化; 动车组系统

**中图分类号:** U 279.3 **文献标志码:** A

## Multi-Stage Opportunistic Maintenance Decision-Making for Electric Multiple Unit Systems with Bi-Objective Optimization

WANG Hong<sup>1</sup>, QI Yankun<sup>1</sup>, HE Yong<sup>1</sup>, YANG Guojun<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;  
2. China Railway Rolling Stock Corporation Qishuyan Institute Co., Ltd.,  
Changzhou 213011, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to improve operation efficiency of the electric multiple unit when running reliably, a multi-stage opportunistic maintenance decision strategy with bi-objective optimization is proposed based on the traditional opportunistic maintenance strategy. The window of opportunistic maintenance is equidistantly divided into multiple stages, and components located at different stages are maintained by different efforts. Aimed to solve problem of assigning multiple maintenance tasks of components, an assignment algorithm with two repairpersons is proposed. To further improve the multi-attribute optimization performance of this model, the proposed algorithm is introduced into the multi-attribute decision-making. The numerical example analysis verifies the effectiveness of the multi-stage opportunistic maintenance strategy in optimizing availability and average cost rate. Furthermore, the influence of weight factors on optimization tendency is discussed as well.

**Key words:** maintenance strategy; opportunistic maintenance; multi-stage windows; bi-objective optimization; system of electric multiple unit

收稿日期: 2021-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(72061022), 甘肃省自然科学基金项目(20JR5RA401)

作者简介: 王 红(1968-), 男, 青海省海东市人, 教授, 博士生导师, 现主要从事轨道交通车辆零部件疲劳可靠性及预防性维护策略研究.

电话(Tel.): 0931-4956590; E-mail: wh@mail.lzjtu.cn.

对动车组设备进行合理的预防性维修是保障其可靠运行的重要措施. 虽然对维修策略的优化和改进可以改善设备服役状态和可靠性,同时进一步提高维修策略的经济性,但维修策略的实施会对列车上线运营产生影响. 入库维修和出库运行共同影响动车组列车的整体经济效益,如何进一步制定更为合理的预防性维修策略,在保障其可用度的同时提高运维策略经济性是当前铁路运维部门关注的重点之一.

在面向多部件系统的预防性维修中,常采取机会维修策略<sup>[1-3]</sup>,在减少系统停机次数的同时有效节约维修成本. Ba 等<sup>[4]</sup>将役龄位于机会窗口的部件前移至系统停机时刻,采用更换的方式共同维修. 石冠男等<sup>[5]</sup>采用基于劣化状态空间划分的非完美机会维修策略,将劣化程度相邻近的部件提前至同一时刻维修. Zhou 等<sup>[6]</sup>利用优化机会窗口,确定了机会维修的最佳时机. 综上可知,现有机会维修策略大多将维修时机位于机会窗口的部件前移至系统停机时刻,采用相同力度维修. 然而,除最先到达维修阈值的部件外,其余部件的役龄和维修阈值仍有差距,相同力度下提前送修部件会产生一定的价值浪费<sup>[7]</sup>. 而基于部件实时役龄选取差异的机会维修力度是避免过维修的有效选择<sup>[8]</sup>. Ding 等<sup>[9]</sup>采用基于部件役龄的双阶段机会维修策略,将维修机会窗口划分为两阶段:第一阶段内部件的剩余役龄较少,采取更换的完美维修;第二阶段内部件的剩余役龄较多,采取非完美的维修方式. 相较于传统机会维修策略,双阶段机会维修通过合理安排部件维修力度避免发生过维修. 但是,两阶段的划分不能较好地统筹部件数量较多的动车组系统,无法准确对部件实施相应力度的维修操作.

在改善维修策略经济性的同时,可用度指标也是动车组设备维修策略的关键因素. 咎翔等<sup>[10]</sup>考虑维修时间对策略制定的影响,优化维修任务的调度安排. 杜煜等<sup>[11]</sup>将维修时间设为与维修力度相关联的函数,并对系统可用度进行优化. 但文献<sup>[10-11]</sup>将系统维修时间视为部件维修时间的最大值或累加和,忽略了维修人员数量对系统停机时长的影响. 王海朋等<sup>[12]</sup>考虑维修人员对维修作业的影响,得出系统维修时间随维修人员数量增多而减少的结论. Khatab 等<sup>[13-14]</sup>利用增加维修人员数量以获取系统维修的最短完工时间. 但在机会维修实施过程中,每次参与机会维修的部件数量是不断变化的,即每次停机时的维修任务量不同. 因此,如何合理匹配维修任务数量与维修人员数量,在提高系统可用度的同

时,兼顾维修策略经济性仍有待进一步探究.

综上所述,本文建立了双目标优化的多阶段机会维修决策策略. 首先,阐述了多阶段机会维修策略下部件维修力度的决策原则,建立了与维修力度关联的维修时间和维修成本函数;其次,提出基于两维修人员的部件维修任务分配算法,实现了部件与维修人员的最优匹配;最后,考虑到不同数量维修人员对两类优化目标的影响,采用多属性决策的方法统筹考虑系统层成本和维修时间,根据策略制定方的目标优化需求,动态决策每次维修的人员数量,以此权衡可用度与平均成本率间的关系,并通过算例分析验证了策略的有效性.

1 问题描述与假设

动车组某机械系统由多个部件串联组成,为避免维修时机离散化造成系统频繁停机,对其采取机会维修策略. 在策略执行时,维修操作依托人员实施,若雇佣较多数量维修人员会存在维修任务与维修人员的最优匹配问题,且影响维修的经济性;而较少维修人员又会延长系统维修时间,降低系统可用度. 基于上述分析,做出如下假设:①部件由全新状态投入运营,随着运行时间的增加,部件性能逐渐劣化;②部件之间的故障率函数不存在关联影响;③故障维修仅使部件恢复运行,不改变故障水平,故障维修时间忽略不计;④任一部件未完成维修作业,系统都将处于停机状态.

2 模型建立

2.1 多阶段机会维修策略

2.1.1 多阶段机会窗口划分 机会维修是将维修时机相邻近的部件整合于同一时刻进行维修的策略,旨在归并部件维修时机,减少系统停机次数. 为便于判断各部件维修时机关联性,可采取机会窗口来确定部件的维修集合. 基于第  $i$  次系统机会维修时机  $T_i^F$ ,将窗口区间  $[T_i^F, T_i^F + t_{op}]$  作为整合范围,  $t_{op}$  为机会窗口,对第  $k$  次预防性维修时机  $T_{k,j}^P$  位于窗口区间内的部件  $j$  实施机会维修,否则不进行任何操作.

在传统的单阶段机会维修策略中,对机会窗口  $t_{op}$  内的各部件均采用更换的维修方式,如图 1(a)所示. 在两阶段机会维修策略中,将机会窗口  $t_{op}$  进一步划分为更换窗口  $t_{re}$  和非完美维修窗口  $t_{im}$ ,不同窗口内部件的维修方式存在差异. 预防性维修时机  $T_{k,j}^P$  位于更换窗口内的部件,实施机会更换的完美维修;  $T_{k,j}^P$  位于非完美维修窗口内的部件,实施机会

非完美维修,如图 1(b)所示. 而多阶段机会维修策略如图 1(c)所示,在两阶段机会维修策略的基础上,进一步将非完美维修窗口等距划分为  $P$  个阶段,每阶段的长度为  $t_{im}/P$ ,预防性维修时机位于非完美维修窗口的部件,根据所处阶段数的不同采取变力度机会非完美维修,部件所处的阶段数越低,距离系统机会维修时机  $T_i^F$  越近,维修后部件役龄的改善效果越明显. 部件位于非完美维修窗口的阶段数为

$$b = \text{floor}\left[\frac{(T_{k,j}^p - T_i^F - t_{re})P}{t_{im}}\right] + 1 \tag{1}$$

式中: $b=1, 2, \cdots, P$ ;  $\text{floor}[\cdot]$  表示舍弃括号内数字的小数位,仅取整数位. 为避免过维修与欠维修情况的发生,设置维修力度上限  $\eta_{\max}$  和维修力度下限  $\eta_{\min}$ , 则  $b$  阶段部件的维修力度表示为

$$\eta_b = \eta_{\max} - \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{P} b \tag{2}$$

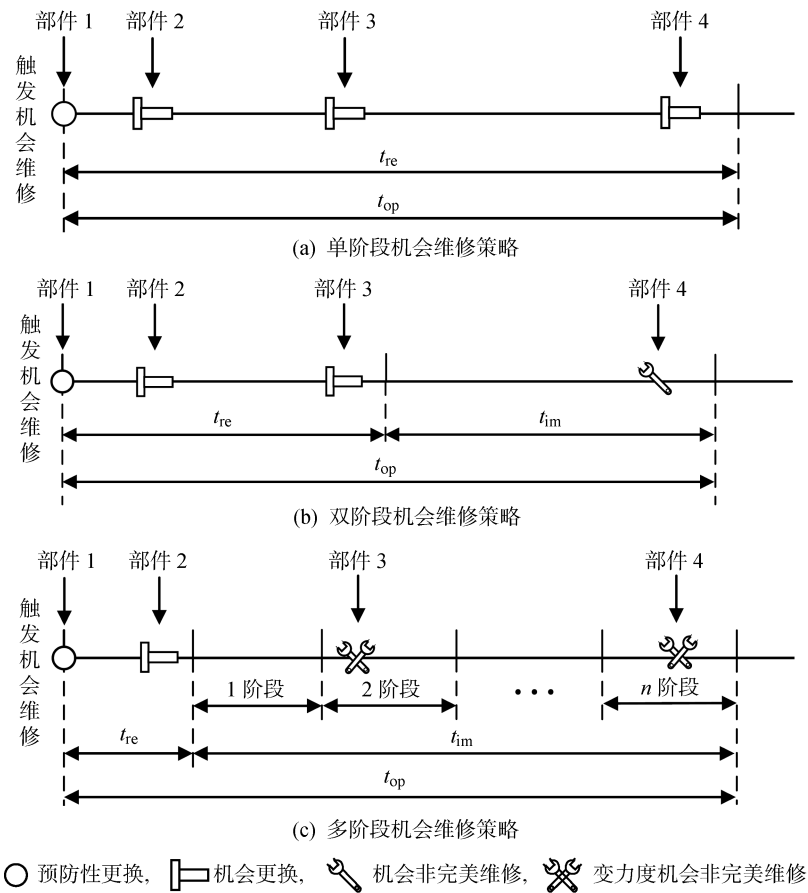


图 1 维修机会窗口示意图

Fig. 1 Schematic diagram of opportunistic maintenance window

**2.1.2 部件的役龄更新** 根据维修策略要求,任一部件的可靠度衰退至既定可靠度阈值  $R_j$  时,对该部件实施预防性更换. 同时,系统内其余部件进行机会维修决策,根据决策结果执行机会更换、变力度机会非完美维修或不维修,并相应地更新部件役龄. 为确保部件维修方式选择的合理性,需判别  $T_i^F$  和  $T_{k,j}^p$  的关系.

第  $i$  次系统机会维修时机  $T_i^F$  由系统内部件剩余役龄的最小值  $t_{\min}^{sy}$  决定,  $t_{\min}^{sy}$  可联合下式求出:

$$t_j^{sy} = t_{k,j}^p - t_j^{yl} \tag{3}$$

$$t_{\min}^{sy} = \min(t_j^{sy}) \tag{4}$$

式中:  $t_j^{sy}$  为部件  $j$  的剩余役龄;  $t_j^{yl}$  为部件  $j$  的累计役

龄;  $t_{k,j}^p$  为部件  $j$  第  $k-1$  次与  $k$  次预防性维修的时间间隔. 在既定可靠度阈值  $R_j$  的限制下,  $t_{k,j}^p$  由下式求出,即

$$R_j = \int_0^{t_{k,j}^p} \lambda_j(t) dt \tag{5}$$

式中:  $\lambda_j(t)$  为部件  $j$  的故障率函数. 在第  $i-1$  次系统机会维修时机的基础上,第  $i$  次系统机会维修时机更新为

$$T_i^F = T_{i-1}^F + t_{i-1}^l + t_{\min}^{sy} \tag{6}$$

式中:  $t_{i-1}^l$  为第  $i-1$  次系统的停机维修时间.

部件预防性维修时机  $T_{k,j}^p$  主要受剩余役龄  $t_j^{sy}$  的影响,即

$$T_{k,j}^p = T_{i-1}^F + t_{i-1}^l + t_j^{sy} \quad (7)$$

在准确描述  $T_i^F$  和  $T_{k,j}^p$  的基础上,判别两者的关系,进而采取相应的维修方式更新部件的累计役龄,具体过程为

$$t_j^{yl} = \begin{cases} 0, & T_i^F \leq T_{k,j}^p \leq T_i^F + t_{re} \\ (1 - \eta_b) t_j^{yl}, & T_i^F + t_{re} < T_{k,j}^p \leq T_i^F + t_{re} + t_{im} \\ t_j^{yl}, & T_i^F + t_{re} + t_{im} < T_{k,j}^p \end{cases} \quad (8)$$

## 2.2 系统维修成本

**2.2.1 部件层维修成本** 部件层维修成本由预防性维修成本和故障维修成本构成.传统的预防性维修成本建模常假设成本值为定参数,事实上,部件的维修效果与维修成本的投入相关联,随着成本投入的增加,部件的修复效果愈加明显.同时,随着维修次数的上升,部件的修复难度增加,在同等修复效果下,维修次数较多的部件所需成本更高.综上所述,借鉴文献[15]中函数描述变维修力度下部件的预防性维修成本,可表示为

$$c_{k,j}^p = c_j^p \frac{k f_1 \sqrt{\eta_{k,j}}}{e_1} \quad (9)$$

式中:  $c_{k,j}^p$  为部件  $j$  第  $k$  次预防性维修的成本;  $c_j^p$  为部件  $j$  的更换成本;  $\eta_{k,j}$  为部件  $j$  第  $k$  次维修的力度,且  $0 < \eta_{k,j} < 1$ ;  $e_1$  和  $f_1$  为成本参数.

部件运行过程中发生临时故障,实施故障维修操作使部件恢复运行,部件  $j$  第  $k$  次的故障维修成本可表示为

$$c_{k,j}^{cr} = c_j^{cr} \int_0^{t_j^{yl}} \lambda_j(t) dt \quad (10)$$

式中:  $c_j^{cr}$  为部件  $j$  的单位故障维修成本.

**2.2.2 系统层维修成本** 系统层维修成本由维修人员雇佣成本和场地占用成本构成.部件的维修作业依托维修人员实施,雇佣维修人员会产生相应成本,可表示为

$$c_i^{le} = c_{le} n_i^{le} \quad (11)$$

式中:  $n_i^{le}$  为第  $i$  次系统维修时雇佣维修人员的数量;  $c_{le}$  为单位维修人员的雇佣成本.

维修时产生场地占用成本,第  $i$  次系统维修的场地占用成本可表示为

$$c_i^{run} = c_{run} t_i^l \quad (12)$$

式中:  $c_{run}$  为单位时间的场地占用成本.

**2.2.3 维修总成本** 动车组系统的维修总成本由部件层维修成本和系统层维修成本构成,可表示为

$$C_{sys} = C_p + C_{cr} + C_{le} + C_{run} \quad (13)$$

式中:  $C_p$  为系统内各部件预防性维修成本总和,与系统部件数量  $m$  和各部件维修次数  $n^{j,1}$  相关;  $C_{cr}$  为

各部件故障维修成本总和,与  $m$  和  $n^{j,1}$  相关;  $C_{le}$  为雇佣维修人员成本总和,与系统停机次数  $n_2$  和雇佣维修人员数量  $n_i^{le}$  选择相关;  $C_{run}$  为场地占用成本总和,受系统停机次数  $n_2$  和系统维修时间  $t_i^l$  的影响.

式(13)可改写为

$$C_{sys} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n^{j,1}} (c_{k,j}^p + c_{k,j}^{cr}) + \sum_{i=1}^{n_2} (n_i^{le} c_{le} + t_i^l c_{run}) \quad (14)$$

## 2.3 系统维修时间和维修人员数量决策

**2.3.1 部件维修时间** 部件维修时间通常与维修力度的选择和部件已实施的维修次数具有直接关联.一般而言,维修力度越大,维修作业的内容越繁杂与精细,所消耗的时间也越长.此外,随着维修次数的增加,部件的修复作业愈加困难,维修时间也需要延长.因此,基于文献[11]的研究成果,部件的维修时间可表示为

$$t_{k,j}^l = \frac{e_{2,j} \sqrt{\eta_{k,j}}}{f_2^{k-1}} \quad (15)$$

式中:  $t_{k,j}^l$  为部件  $j$  第  $k$  次预防性维修的时间;  $e_{2,j}$  和  $f_2$  为时间参数.

**2.3.2 系统维修时间和分配算法** 部件的维修作业依托维修人员实施,通过对待维修部件集  $O_i = \{t_{k,1}^l, t_{k,2}^l, \dots, t_{k,w}^l\}$  的修复,使部件役龄缩减.在维修过程中,系统维修时间有待维修部件集  $O_i$  中的部件个数  $w$  和维修人员数量  $n_i^{le}$  相关.根据  $w$  和  $n_i^{le}$  的数量关系,可分为以下两种情况.

**情况1** 当  $w \geq 1$  和  $n_i^{le} = 1$  时,待维修部件集  $O_i$  中所有部件的维修作业均由1人完成,因此,系统维修时间  $t_i^l$  为  $O_i$  中部件维修时间的累加和,可表示为

$$t_i^l = \sum_{j'=1}^w t_{k,j'}^l \quad (16)$$

式中:  $j'$  为待维修部件序号.

**情况2** 当  $w \geq 2$  和  $n_i^{le} = 2$  时,需将待维修部件分配至2名维修人员,根据短板效应,系统维修时间以耗时较长的维修人员为准,表达式为

$$t_i^l = \max\{t_{i,1}^g, t_{i,2}^g\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} t_{i,1}^g &= \sum_{j'=1}^v t_{k,j'}^l \\ t_{i,2}^g &= \sum_{j'=v+1}^w t_{k,j'}^l \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中:  $j' = 1, 2, \dots, v, \dots, w$ ;  $t_{i,1}^g$  和  $t_{i,2}^g$  分别为第  $i$  次系统维修时维修人员1和维修人员2的维修时间.

为实现待维修部件与维修人员的最优匹配,将模型转化为动态规划算法中的子集和问题,与传统求解思路不同,子集和仅为理论最优解,其实现具有未知性. 为获取实际最优解,本文在理论最优解  $t_i^l = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^w t_{k,j}^l$  附近迭代寻求实际最优解. 其算法流程如图 2 所示,分析步骤如下.

**步骤 1** 利用式(15)确定  $O_i$  中各部件维修时间,并依据时间长短排序.

**步骤 2** 为便于求解,将优化目标  $\min(t_i^l)$  转化为  $\min(|t_{i,1}^g - t_{i,2}^g|)$ , 如图 3 所示.

**步骤 3** 确定算法的理论逻辑出口  $t_i^l$ , 即  $t_{i,1}^g - t_{i,2}^g = 0$ , 为便于表示,令  $t_i^l = |t_{i,1}^g - t_{i,2}^g|$ .

**步骤 4** 根据动态规划算法中的子集和问题进行求解.

**步骤 5** 判定是否存在满足出口条件  $t_i^l$  的可行解,若存在则执行下一步,否则通过下式更改逻辑出口  $t_i^l$ , 返回步骤 4.

$$t_i^l = t_i^l + t'$$

(19)

式中:  $t'$  为最小时间单位.

**步骤 6** 采取逆推法确定部件维修任务分配方案.

**步骤 7** 根据分配方案计算两维修人员的维修时间,并通过式(18)确定系统维修时间  $t_i^l$ .

**2.3.3 维修人员数量决策** 根据维修方与运营方的需求,维修策略的目标函数通常设为平均成本率最小和可用度最大. 维修人员作为承载系统维修作业的主体,其雇佣数量的选择直接影响系统层成本和系统维修时间. 因此,采取多属性决策方法,综合考虑成本和时间因素决策维修人员的数量.

由于系统层成本  $c_i^{le} + c_i^{run}$  和系统维修时间  $t_i^l$  的量纲不同,采用归一化方法处理两类属性不同的参数,即

$$\left. \begin{aligned} v_i^c &= (c_i^{le} + c_i^{run})_{n_i^{le}} / \max((c_i^{le} + c_i^{run})_{n_i^{le}}) \\ v_i^t &= t_{i,n_i^{le}}^l / \max(t_{i,n_i^{le}}^l) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中:  $v_i^c$  为雇佣  $n_i^{le}$  名维修人员归一化后的系统层成本;  $v_i^t$  为雇佣  $n_i^{le}$  名维修人员归一化后的系统维修时间. 其中,  $1 \leq n_i^{le} \leq 2$ . 整合两类属性值,构造  $\rho_i^1$  和  $\rho_i^2$  分别为第  $i$  次雇佣 1 名和 2 名维修人员的决策因子,可表示为

$$\left. \begin{aligned} \rho_i^1 &= \omega_1 v_{i,1}^c + \omega_2 v_{i,1}^t \\ \rho_i^2 &= \omega_1 v_{i,2}^c + \omega_2 v_{i,2}^t \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中:  $\omega_1$  为成本权重因子;  $\omega_2$  为时间权重因子,有  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ . 当  $\omega_1 = 1$  和  $\omega_2 = 0$  时,维修模型为平均

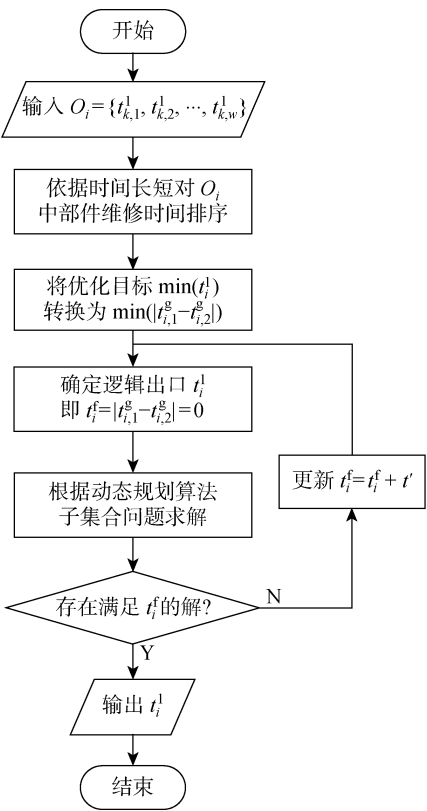


图 2 多部件维修任务分配算法流程  
Fig. 2 Flow chart of multi-component maintenance task assignment algorithm

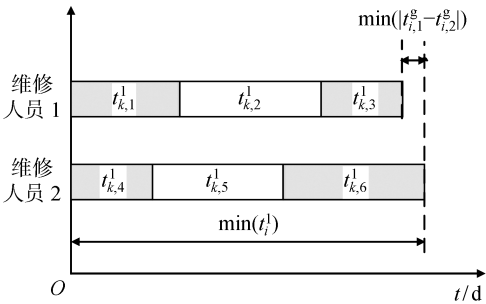


图 3 两维修人员维修任务分配图  
Fig. 3 Maintenance task assignment chart with 2 repairpersons

成本率模型; 当  $\omega_1 = 0$  和  $\omega_2 = 1$  时, 维修模型为可用度模型; 当  $\omega_1 = 0.5$  和  $\omega_2 = 0.5$  时, 维修模型为考虑平均成本率和可用度的综合模型, 根据  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分配值的大小, 反映模型的优化倾向.

利用下式决策每次系统维修时维修人员的数量, 即

$$n_i^{le} = \begin{cases} 1, & \rho_i^1 \geq \rho_i^2 \\ 2, & \rho_i^1 < \rho_i^2 \end{cases} \quad (22)$$

2.4 目标函数

由上述分析可知, 在多阶段机会维修策略中, 维修力度的选择和维修人员数量的决策对模型中维修

成本和维修时间均有影响. 因此,综合考虑成本和时间因素以平均成本率  $H$  和可用度  $A$  为优化目标,表达式分别为

$$H = C_{\text{sys}} / (T_{\text{end}} - \sum_{i=1}^{n_2} t_i^1)$$

(23)

$$A = \frac{1}{T_{\text{end}}} (T_{\text{end}} - \sum_{i=1}^{n_2} t_i^1)$$

(24)

式中:  $T_{\text{end}}$  为维修策略规划期.

目标函数的求解流程如图 4 所示,分析步骤如下.

**步骤 1** 输入各部件威布尔参数  $\alpha_j$  (形状参数) 和  $\beta_j$  (尺寸参数)、可靠度阈值  $R_j$ 、成本参数  $c_j^p$ 、 $c_j^{cr}$ 、 $c_{le}$ 、 $c_{run}$ 、 $e_1$  和  $f_1$ , 时间参数  $e_{2,j}$  和  $f_2$ , 机会窗口  $t_{op}$ , 维

修力度上、下限  $\eta_{\max}$  和  $\eta_{\min}$ , 成本和时间权重因子  $\omega_1$  和  $\omega_2$ , 系统的累计服役役龄  $T = 0, i = 0$ .

**步骤 2** 求解式(5)获取各部件的预防性维修间隔  $t_{k,j}^p$ , 并通过式(6) 和式(7) 更新  $T_i^F$  和  $T_{k,j}^p$ .

**步骤 3** 根据式(8)采取相应的维修方式,更新部件役龄  $t_j^{v1}$ , 并计算部件维修成本  $c_{k,j}^p$ 、 $c_{k,j}^{cr}$  和维修时间  $t_{k,j}^1$ .

**步骤 4** 运用多属性决策方法计算  $\rho_i^1$  和  $\rho_i^2$ , 并比较大小关系决策维修人员数量.

**步骤 5** 结合步骤 3 中部件的维修成本和维修时间以及步骤 4 中决策的维修人员数量,计算第  $i$  次系统维修的系统维修时间  $t_i^1$  和系统层成本  $c_i^{lc} + c_i^{run}$ .

**步骤 6**  $T = T + T_i^F$ , 判断  $T > T_{\text{end}}$ , 若成立则执行下一步; 否则,  $i = i + 1$ , 返回步骤 2.

**步骤 7** 根据式(23)和式(24), 求解目标函数  $H$  和  $A$ .

3 算例分析

为验证上述模型的有效性,以动车组服从威布尔分布的某机械系统为例进行分析,即

$$\lambda_j(t) = \frac{\alpha_j}{\beta_j} \left( \frac{t}{\beta_j} \right)^{\alpha_j - 1}$$

(25)

根据文献[16-17]对威布尔分布的研究,设定部件的参数值如表 1 所示. 同时取维修人员雇佣成本  $c_{le} = 1\,800$  元,单位时间场地占用成本  $c_{run} = 100$  元,成本参数  $e_1 = 1$ 、 $f_1 = 0.25$ , 时间参数  $f_2 = 0.95$ , 机会窗口  $t_{op} = 18$  d, 维修力度上、下限分别为  $\eta_{\max} = 0.9$ 、 $\eta_{\min} = 0.5$ , 规划期  $T_{\text{end}} = 365$  d.

表 1 部件参数  
Tab. 1 Factors of components

部件	$\alpha_j$	$\beta_j$	$R_j$	$c_j^p$ /元	$c_j^{cr}$ /元	$e_{2,j}$ /d
1	2.5	100	0.75	1 000	2 200	1.1
2	3.2	108	0.80	1 100	2 400	0.7
3	3.1	150	0.85	600	1 500	0.9
4	3.2	149	0.85	700	1 900	0.6
5	2.3	85	0.75	500	1 200	1.2
6	2.6	100	0.70	400	1 000	0.8

3.1 不同模型下的策略对比

为充分体现多阶段机会维修策略的有效性,本文参照文献[9]设置了单阶段维修策略(采取更换的机会维修)和双阶段机会维修策略(采取更换和非完美的机会维修). 以平均成本率和可用度为目标,在平均成本率模型、可用度模型和综合模型下进行对

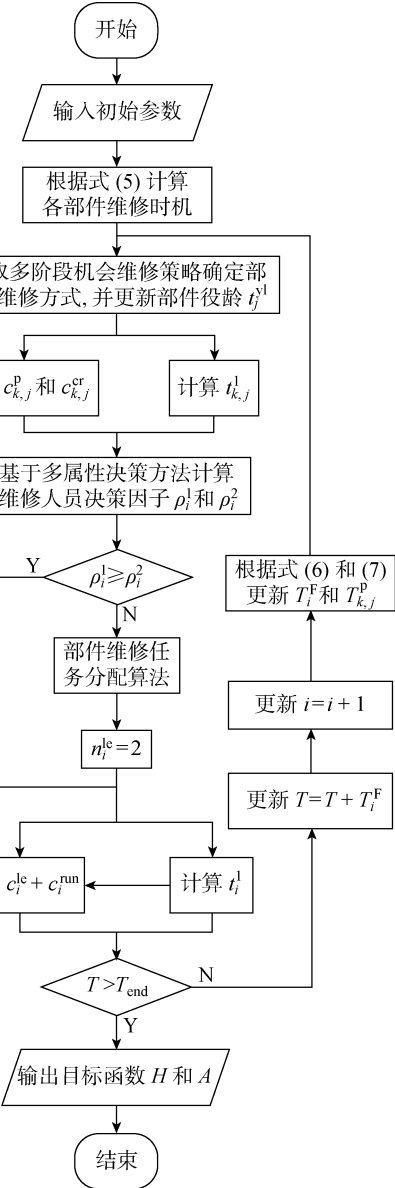


图 4 目标函数求解流程

Fig. 4 Flow chart of obtaining objective function

比分析. 3 种策略的机会窗口  $t_{op}$  相同, 优化双阶段机会维修策略的维修力度  $\eta$  和多阶段机会维修策略的阶段数  $P$ , 结果如图 5 所示.

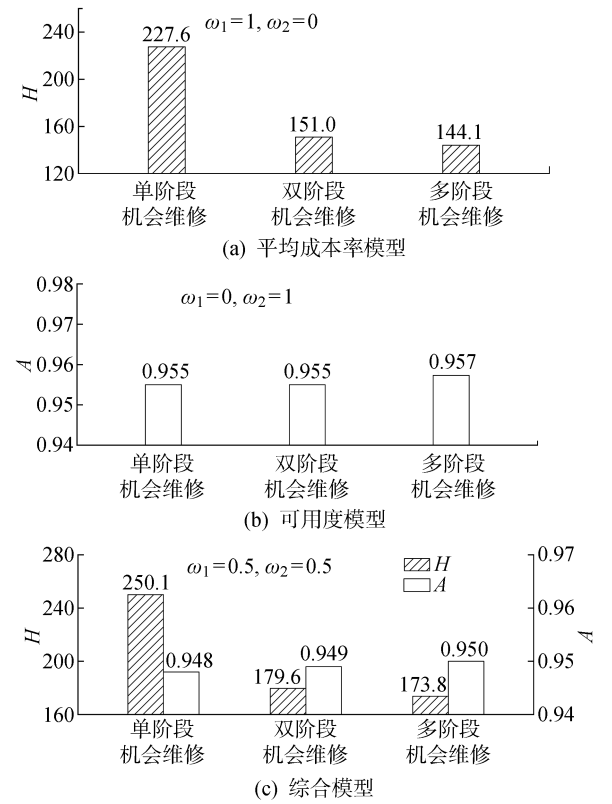


图 5 3 种策略的比较分析  
Fig. 5 Comparative analysis of 3 strategies

在平均成本率模型中, 如图 5(a) 所示, 优化后非完美维修力度  $\eta=0.6$ , 阶段数  $P=4$ , 多阶段机会维修的平均成本率明显低于对比策略, 更具有经济效益; 在可用度模型中, 如图 5(b) 所示, 优化后非完美维修力度  $\eta=0.8$ , 阶段数  $P=4$ , 多阶段机会维修的可用度虽具有优势, 但效果较弱; 在综合模型中, 如图 5(c) 所示, 优化后非完美维修力度  $\eta=0.85$ , 阶段数  $P=4$ , 多阶段机会维修的两目标均优于两种对比策略, 且平均成本率优势更明显.

此外, 分析可知, 多阶段机会维修策略在可用度上的优化效果较弱, 单阶段和双阶段机会维修策略具有较高的可用度水平, 原因是单阶段和双阶段机会维修中全部或较大部分采取更换的完美维修, 部件性能一直处于较好状态, 维修间隔较长. 但更换操作会造成维修成本的大量浪费, 导致平均成本率较高. 综上可知, 多阶段机会维修策略相较于传统机会维修策略可以以更少的平均成本率使系统保持较高的可用度水平. 多阶段机会维修策略在综合模型中的优化结果如表 2 所示, 预防性更换和更换窗口内部件的阶段数视为 0.

表 2 综合模型优化结果  
Tab. 2 Integrated model optimization results

系统维修 时机/d	维修部件 序号	部件于机会 窗口的阶段数
49	1, 5	3, 0
69	2, 3, 4, 6	0, 4, 4, 0
94	1, 5	0, 1
122	2, 3, 4, 5, 6	4, 0, 0, 3, 4
157	1, 2, 5, 6	0, 2, 0, 2
208	1, 2, 3, 4, 5, 6	3, 0, 0, 0, 0, 0
253	1, 5	0, 1
279	2, 3, 4, 5, 6	0, 4, 4, 4, 0
315	1, 3, 5	0, 4, 0
336	2, 4, 6	4, 0, 4

3.2 模型优化倾向分析

在多阶段机会维修策略的模型建立过程中, 权重因子  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的选择影响了模型的优化倾向. 因此, 为了验证  $\omega_1$  和  $\omega_2$  对策略的影响程度, 令部件其余参数保持不变, 选取不同  $\omega_1$  和  $\omega_2$  值, 计算结果如表 3 和表 4 所示. 3 种模型的目标优化倾向明显不同: 平均成本率模型 ( $\omega_1=1, \omega_2=0$ ) 的平均成本率远低于其余两种模型; 可用度模型 ( $\omega_1=0, \omega_2=1$ ) 的可用度更具优势; 综合模型 ( $\omega_1=0.5, \omega_2=0.5$ ) 的两类优化目标处于中间值. 因此, 对模型中权重值的选取应根据实际优化需求确定.

为进一步探讨权重因子值变化对维修策略双目标的影响, 以 0.01 为单位, 调整权重因子值, 若调整

表 3 模型的平均成本率变化趋势  
Tab. 3 Trend of average cost rate of model

模型	$H$				
	$P=2$	$P=3$	$P=4$	$P=5$	$P=6$
平均成本率模型	145.5	144.9	144.1	148.8	151.6
综合模型	191.8	189.9	173.8	181.9	175.2
可用度模型	204.8	194.4	187.6	190.7	193.4

表 4 模型的可用度变化趋势  
Tab. 4 Trends of availability of model

模型	$A$				
	$P=2$	$P=3$	$P=4$	$P=5$	$P=6$
平均成本率模型	0.922	0.919	0.920	0.917	0.914
综合模型	0.945	0.952	0.950	0.950	0.944
可用度模型	0.954	0.955	0.957	0.956	0.954

后优化结果无变化,则不显示该权重值下方案,结果如表 5 所示.由表 5 可知,随着  $\omega_1$  值的减小,系统的累计维修时间  $\sum_{i=1}^{n_2} t_i^l$  逐渐缩短,进而导致系统的可用度上升.同时,雇佣维修人员成本  $C_{le}$  也随之增加,总成本  $C_{sys}$  上升明显,导致平均成本率逐渐上升.综上所述可知,权重因子值的调整对维修策略的优化结果具

有重要意义.因此,在实际工程中,当策略制定方对列车可用度提出较高要求时,可选择  $\omega_2$  取值较高的方案 7;当策略制定方要求列车维修具有较低的平均成本率时,可选择  $\omega_1$  取值较高的方案 1.根据维修策略制定方对可用度和平均成本率的不同需求程度,相应调整  $\omega_1$  和  $\omega_2$  因子的值,选取不同的维修方案.

表 5 不同权重因子对维修策略的影响  
Tab.5 Influence of different weight factors on maintenance strategy

方案	权重因子值	$C_{le}$ /元	$C_{sys}$ /元	$\sum_{i=1}^{n_2} t_i^l$ /d	$H$	$A$	维修人员数量选择序列
1	$\omega_1=1,\omega_2=0$	19 800	48 373	29.24	144.1	0.920	(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)
2	$\omega_1=0.55,\omega_2=0.45$	19 800	49 996	26.74	147.8	0.927	(1,1,1,1,1,2,1,1,1,1)
3	$\omega_1=0.53,\omega_2=0.47$	23 400	53 366	23.25	156.2	0.936	(1,1,1,1,2,2,1,2,1,1)
4	$\omega_1=0.52,\omega_2=0.48$	25 200	55 064	21.59	160.3	0.941	(1,1,1,2,2,2,1,2,1,1)
5	$\omega_1=0.50,\omega_2=0.50$	30 600	60 273	18.23	173.8	0.950	(1,2,2,2,2,2,2,2,1,1)
6	$\omega_1=0.44,\omega_2=0.56$	34 200	63 767	16.18	182.8	0.956	(2,2,2,2,2,2,2,2,2,1)
7	$\omega_1=0,\omega_2=1$	36 000	65 537	15.58	187.6	0.957	(2,2,2,2,2,2,2,2,2,2)

为验证不同维修人员数量对维修成本和维修时间的影响,以综合模型第 6 次系统维修为例,分别选取 1 名维修人员和 2 名维修人员对比分析,结果如表 6 所示.2 名维修人员比 1 名维修人员的维修成本增加了 67.2%,维修时间缩减了 49.5%.

为验证所提算法的有效性,选取上述案例与枚举法对比分析,算法的分配结果如图 6 所示,与枚举

法最优解的结果完全一致,验证了所提算法在解决此类问题上的有效性.

4 结论

(1) 提出多阶段机会维修策略,该策略从维修力度的视角出发,根据机会决策时部件在机会窗口的位置,对部件实施差异力度的维修,并通过与传统机会维修策略的对比分析,验证了所提策略的有效性.

(2) 针对 2 名维修人员的维修任务分配问题,提出一种维修人员和维修任务的最优分配算法,通过与枚举法最优解的对比分析,验证了所提算法的有效性.

(3) 权重因子  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的合理取值对系统的维修人员数量决策具有重要作用.  $\omega_1$  取值较高,则雇佣较少的维修人员,有利于策略的平均成本率优化;反之,则会提高系统的可用度,增加雇佣维修人员的数量.

(4) 在动车组实际运营过程中,运营旺季对列车可用度需求较高,可选择可用度模型制定策略,使列车尽可能上线服役;运营淡季动车组用车需求较低,可选择平均成本率模型制定策略,使列车的维修策略更具经济性,降低运营成本.

表 6 维修人员数量对比结果

Tab.6 Comparison results of number of maintenance repairperson

序号	维修人员数量	$c_k^e+c_k^{em}$ /元	$t_k^l$ /d
1	1	230 5	5.05
2	2	385 5	2.55

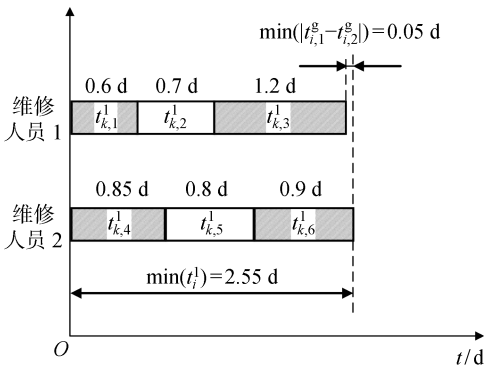


图 6 方案 2 中维修任务与维修人员分配

Fig. 6 Assignment of components and maintenance repairperson in Option 2

参考文献:

[1] PENG H, ZHU Q S. Approximate evaluation of



- average downtime under an integrated approach of opportunistic maintenance for multi-component systems[J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2017, 109(7): 335-346.
- [2] SI G J, XIA T B, ZHU Y, *et al.* Triple-level opportunistic maintenance policy for leasehold service network of multi-location production lines[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2019, 190 (10): 106519.
- [3] ZHOU B H, QI Y, LIU Y W. Proactive preventive maintenance policy for buffered serial production systems based on energy saving opportunistic windows [J]. **Journal of Cleaner Production**, 2019, 253: 119791.
- [4] BA H T, CHOLETTE M E, BORGHESEANI P, *et al.* Opportunistic maintenance considering non-homogenous opportunity arrivals and stochastic opportunity durations [J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2017, 160: 151-161.
- [5] 石冠男, 张晓红, 曾建潮. 考虑非完美维修的多部件系统劣化状态空间划分建模[J]. **计算机集成制造系统**, 2018, 24(11): 2759-2769.
- SHI Guannan, ZHANG Xiaohong, ZENG Jianchao. Deterioration state space partition method for multi-unit systems with imperfect maintenance actions[J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2018, 24 (11): 2759-2769.
- [6] ZHOU X J, YU M Q. Semi-dynamic maintenance scheduling for multi-station series systems in multi-specification and small-batch production[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2020, 195: 106753.
- [7] SHI H, ZENG J C. Real-time prediction of remaining useful life and preventive opportunistic maintenance strategy for multi-component systems considering stochastic dependence[J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2016, 93(3): 192-204.
- [8] ABDOLLAHZADEH H, ATASHGAR K, ABBASI M. Multi-objective opportunistic maintenance optimization of a wind farm considering limited number of maintenance groups[J]. **Renewable Energy**, 2016, 88 (4): 247-261.
- [9] DING F F, TIAN Z G. Opportunistic maintenance for wind farms considering multi-level imperfect maintenance thresholds[J]. **Renewable Energy**, 2012, 45: 175-182.
- [10] 胥翔, 陈春良, 张仕新, 等. 考虑时间不确定性的战时装备维修任务调度方法[J]. **机械工程学报**, 2018, 54(24): 226-232.
- ZAN Xiang, CHEN Chunliang, ZHANG Shixin, *et al.* Task scheduling method for wartime equipment maintenance considering time uncertainty[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2018, 54(24): 226-232.
- [11] 杜煜, 李雨青, 张秀芳, 等. 考虑广义时间价值的串行退化生产系统维护更新策略[J]. **上海交通大学学报**, 2020, 54(5): 465-472.
- DU Yu, LI Yuqing, ZHANG Xiufang, *et al.* Preventive maintenance and replacement policy for series deteriorating production system considering generalized time value[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2020, 54(5): 465-472.
- [12] 王海朋, 段富海, 马骏. 复杂系统的选择性维修模型和求解算法[J]. **北京航空航天大学学报**, 2020, 46 (12): 2264-2273.
- WANG Haipeng, DUAN Fuhai, MA Jun. Selective maintenance model and its solving algorithm for complex system[J]. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, 2020, 46(12): 2264-2273.
- [13] KHATAB A, DIALLO C, VENKATADRI U, *et al.* Optimization of the joint selective maintenance and repairperson assignment problem under imperfect maintenance[J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2018, 125: 413-422.
- [14] DIALLO C, VENKATADRI U, KHATAB A, *et al.* Optimal joint selective imperfect maintenance and multiple repairpersons assignment strategy for complex multicomponent systems[J]. **International Journal of Production Research**, 2019, 57 (13): 4098-4117.
- [15] DUAN C Q, DENG C, WANG B R. Multi-phase sequential preventive maintenance scheduling for deteriorating repairable systems[J]. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2019, 30(4): 1779-1793.
- [16] 王灵芝, 徐宇工, 张家栋. 基于设备有效度和可靠度的预防修经济优化模型[J]. **机械工程学报**, 2010, 46(4): 163-168.
- WANG Lingzhi, XU Yugong, ZHANG Jiadong. Preventive maintenance economic optimization model based on equipment availability and reliability[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2010, 46 (4): 163-168.
- [17] 王少敏. 动车组转向架关键零部件的故障规律及维修策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- WANG Shaomin. Research on failure regularity and maintenance strategy of key components of EMU bogie[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.