



基于可靠性的动车组关键部件 维修策略优化模型

陈佳玉, 宋冬利, 耿芳东

(西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 针对现行动车组预防性维修中出现的维修不足或过度维修的问题, 文章基于全生命周期管理理念, 重点研究了动车组部件全生命周期运维活动对部件劣化特性与维修策略的影响。在部件层面, 文章提出了考虑季节影响和运行成本的维修策略, 动态反映了部件劣化特性和维修活动之间的演变趋势, 并结合并行量子遗传算法求解最优维修间隔和可靠度等参数; 在系统层面, 通过建立的基于可靠度裕度的预防性机会维修策略, 实现了动态的机会维修窗口, 减少了系统停机次数, 降低了系统长期维护成本。试验结果表明, 与不考虑运行成本和季节影响的维修策略相比, 该策略在保证部件可靠性、系统可用性和计划合理性的同时, 通过实施更加积极的维修措施, 可有效降低动车组维修成本。

关键词: 动车组; 运行成本; 预防性机会维修; 季节影响; 并行量子遗传算法; 高速列车

中图分类号: U292.91⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)01-0058-10

0 引言

在过去的几十年, 高速铁路在中国发展迅速。如今, 高铁服务覆盖了中国94%的省份, 运营的轨道长度超过4万km, 约占全球商业高铁轨道长度的三分之二^[1]。截至2023年底, 中国高铁网络共有动车组4219标准组^[2]。其中, 部分动车组已进入密集维护期, 虽然现行的“五级修”维护体系可以节省维护成本, 但在不考虑停机损失等间接维护成本的情况下, 年维护费用仍占采购成本的10%~15%^[3-4]。因此, 改进现有动车组维修策略意义重大。

目前, 广泛应用的高速列车维护模式以故障修和预防性维修模式为主, 但这种维修模式往往存在着过度修与欠修的问题, 并且高速列车各部件之间存在复杂的维修相关性, 包括经济相关性、结构相关性和随机相关性, 这增加了维护复杂性^[5]。这种复杂性增加了串行系统的维修难度, 一旦某个部件需要维护, 将导

致整个系统停机, 从而增加维护成本。在这种情况下, 在系统层面利用各部件之间的相关性进行多部件机会维修(OM), 可以有效降低系统停机次数, 提高系统可用性, 降低维修经济成本^[6]。文献[7]建立了串行设备的机会维修模型, 该模型在生产系统、风力发电机等设备上广泛应用, 显著降低了设备的维修费用。文献[8-9]分别考虑了生产力、季节对风电机组机会维修模型的影响, 从而决策出更符合生产实际的维修时机。文献[10]基于各部件之间的相关程度, 建立了列车多梯度的机会维修策略。文献[11-12]考虑不同部件可靠度函数的变化趋势, 建立了风电机组的预防性机会维修策略。文献[13]考虑多种维修模式, 结合最小修维修形式建立了列车转向架关键部件的机会维修决策优化模型。文献[14]考虑了拆卸顺序、混合演化因素对维修的影响, 提出了一种基于时间阈值的多部件复杂系统机会维修模型。文献[15]基于动车组多部件系统的维修任务, 建立了考虑人力资源动态配置的机会维修模型。

目前, 相关学者通过考虑各种实际影响因素建立

基金项目: 四川省重大科技专项(2023ZDZX009)

通信作者: 宋冬利, 女, 博士, 高级实验师, 博士生导师, 主要从事列车综合安全评估为维修决策优化方面的研究; E-mail: sdl.cds@126.com

引用格式: 陈佳玉, 宋冬利, 耿芳东. 基于可靠性的动车组关键部件维修策略优化模型[J]. 机车电传动, 2025(1): 58-67.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.007.

Citation: CHEN Jiayu, SONG Dongli, GENG Fangdong. Optimization model for reliability-based maintenance strategies of critical components in electric multiple units[J]. Electric drive for locomotives, 2025(1): 58-67.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.007.

了机会维修优化模型, 运用检修经验表明, 动车组的故障率随不同季节呈现不同的变化规律, 而现有研究缺乏考虑季节因素对其维护影响的相关研究。另外, 关于动车组维修现有研究很少应用全生命周期成本的概念^[6], 并且大部分不考虑部件特性退化对运行成本的影响^[12], 忽略了部件退化过程和维修活动对运行成本的影响, 无法动态反映部件运行状态与其维修活动之间的相关性。

综上所述, 本文以高速动车组为研究对象, 结合动车组实际运行故障数据, 考虑季节因素对动车组关键部件故障率的影响, 从全生命周期管理角度出发, 建立动车组退化特性、维修活动与运行成本之间的动态相关性; 以最小化维护成本为目标, 建立机会维修优化模型; 采用了并行量子遗传算法求解优化模型, 获得最优维护方案, 以提高动车组的维护经济性, 这将为动车组的可靠性维护提供理论依据和实践指导。

1 维修模型

1.1 问题描述

根据高速动车组五级维修体系的规定, CRH3 型动车组多部件串联系统采用四级维修计划 (里程 2.4×10^6 km)。在此维修计划周期内, 在最后阶段进行预防性更换, 而在此之前只进行预防性维修和故障维修^[5]。为了将实际生产因素与动车组的日常维护联系起来, 本文将季节因素纳入动车组关键部件的退化过程分析中。同时, 为了考虑维修活动对部件退化和运行成本的影响, 应用全生命周期成本管理理念和并行量子遗传算法, 为每个部件制定最佳维修计划和机会维修窗口。在系统层面, 利用各部件之间的经济相互依赖性, 实现系统级的多部件联合维修。为了使研究更加明确, 做出以下假设: ①动车组系统在初始状态由 m 个部件组成, 并且各部件之间的故障率是独立的, 服从双参数威布尔分布; ②部件在维护计划周期内共进行 N 次维护, 只有最后一次为预防性更换, 其余为预防性维修和故障小修; ③相同级别的维修占用的维修资源是相同的, 由此产生的消耗成本是相同的; ④部件的任何维修活动都会导致系统停机; ⑤故障小修对部件的退化趋势无影响。

1.2 维修方式

全生命周期管理原则贯穿动车组维护全过程, 除了关注维修部件本身, 还重点关注维护方式和运行成本。为了解决部件退化趋势的可变性, 在部件层次区分不同维修对象的退化参数, 并引入季节影响因子来修正故障率, 采用多种维护模式优化动车组部件的维修策略。

考虑到动车组的服役寿命应服从非负连续性变化

规律, 采用双参数威布尔分布来描述其部件故障率的演化规律, 故障率函数可定义为

$$\lambda'_{i,1}(l) = \frac{\beta_i}{\theta_i} \cdot \left(\frac{l}{\theta_i} \right)^{\beta_i - 1} \quad (1)$$

在部件故障率函数中引入季节影响因子 s_i , 以描述季节对部件退化规律的影响, s_i 的取值可通过季节对部件的故障影响情况求取, 修正后的故障率函数为

$$\lambda_{i,1}(l) = s_i \cdot \frac{\beta_i}{\theta_i} \cdot \left(\frac{l}{\theta_i} \right)^{\beta_i - 1} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{i,1}(l)$ 为故障率函数; β_i 、 θ_i 分别为部件 i 的形状参数和尺寸参数。

假设共有 k 个季节, 每个季节的故障数量为 n_k , 故障里程为 t_i , 则季节影响因子为

$$s_{i,j} = \frac{\left(\sum_{n=1}^{n_j} t_{i,n} \right) / n_j}{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{n=1}^{n_j} t_{i,n} \right) / \sum_{j=1}^k n_j} \quad (3)$$

为了准确反映部件 i 在实际生产中的维修效果, 引入服役寿命回退因子 $a_{i,u}$ 和故障率增长因子 $b_{i,u}$, 则部件故障率演化模型可表示为

$$\lambda_{i,u+1}(l) = b_{i,u} \lambda_{i,u}(l + a_{i,u} L_{i,u}), \quad 0 < l < L_{i,u+1} \quad (4)$$

其中, $0 < a_{i,u} < 1$, $b_{i,u} > 1$, $a_{i,u}$ 和 $b_{i,u}$ 的值可通过历史运维数据拟合得到。

考虑中国高速动车组现有维护机制, 基于不完美维修策略, 将动车组维护级别分为初级修 (junior PM) P_1 和高级修 (senior PM) P_h 两级, 并假设高级修维护效果优于初级修, 即 $0 < a_{i,u}^h < a_{i,u}^l < 1$, $1 < b_{i,u}^h < b_{i,u}^l$ 。其中, $a_{i,u}^l$ 、 $a_{i,u}^h$ 分别为初级修和高级修对应的服役寿命回退因子; $b_{i,u}^l$ 、 $b_{i,u}^h$ 分别为初级修和高级修对应的故障率增长因子。

基于式(4), 一般情况下, 部件故障率的变化规律可整体表示为: 随着每一次的维修, 部件故障率的变化率曲线会更陡峭, 即 $\lambda_{i,u-1}^- < \lambda_{i,u}^- < \lambda_{i,u+1}^-$; 初级修后的故障率大于上一次高级修, 即 $\lambda_{i,u-2}^h < \lambda_{i,u-1}^l$ 。就初级修和高级修本身而言, 经过 P_1 后, $\lambda_{i,u-1}^l < \lambda_{i,u}^l$, 经过 P_h 后, 故障率大于上一次高级修后故障率, 即 $\lambda_{i,u-2}^h < \lambda_{i,u+1}^h$ 。其中, $\lambda_{i,u}^-$ 、 $\lambda_{i,u}^l$ 分别为第 u 次检修之前和经过初级修后的故障率; $\lambda_{i,u}^h$ 为第 u 次检修经过高级修后的故障率。但加入季节影响因子后, 随着服役寿命的累积, 季节性环境因素对故障率动态变化起到了显著的调节作用, 从而难以简单服从传统的故障率演变规律。当季节影响因子大于1时, 故障率变化更快, 会导致更短的维修间隔和更多的维修次数; 当季节影响因子小于1时, 故障率变化放缓, 维修间隔变长, 对应的维修次数减少, 具体规律如图1所示, 但实际情况会更加复杂, 季节影响因子交替变化, 维修间隔和维修次数也会呈现动态变化。

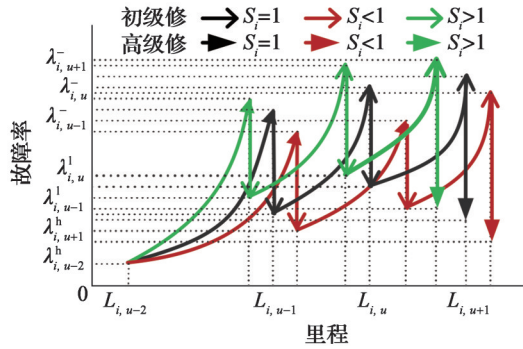


图1 故障率变化曲线

Fig. 1 Variation curve of failure rate

部件故障率的变化可反映不同维修方式对部件退化趋势的影响,为在模型中明显区分维修级别,引入一个维修级别决策因子 $\omega_{i,u}$,定义为

$$\omega_{i,u} = \begin{cases} 0, & \text{初级修(junior PM)} \\ 1, & \text{高级修(senior PM)} \end{cases} \quad (5)$$

因此,服役寿命回退因子 $a_{i,u}$ 和故障率增长因子 $b_{i,u}$ 分别为:

$$a_{i,u} = (1 - \omega_{i,u})a_{i,u}^l + \omega_{i,u}a_{i,u}^h \quad (6)$$

$$b_{i,u} = (1 - \omega_{i,u})b_{i,u}^l + \omega_{i,u}b_{i,u}^h \quad (7)$$

为避免动车组零部件的浪费和过度使用,需要构建全生命周期管理体系,贯穿部件从新造使用到报废的服役全过程。全生命周期管理最重要的指标是部件的服役寿命。因此,本文结合已建立的部件维修策略,建立动车组等效服役寿命模型,具体如下:

$$\left. \begin{aligned} L_{i,u} &= L_{i,u-1} + a_{i,u-1}l_{i,u-1} \\ L_i &= L_{i,N} \\ L_{i,1} &= l_{i,1} \\ L_{i,u} &\leq 240 \\ u &\geq 2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: L_i 为部件 i 的服役寿命; $L_{i,u}$ 为部件 i 在第 u 次的维修周期; $l_{i,u-1}$ 为第 $u-1$ 次的维修间隔。

部件 i 的运行成本 $C_{oc}^{(i)}$ 与部件的服役寿命和运行状态动态相关,可定义为

$$C_{oc}^{(i)} = c_{oc}^{(i)}L_i = c_{oc}^{(i)}\left[l_{i,1} + \sum_{u=2}^N(a_{i,u-1}l_{i,u-1})\right] \quad (9)$$

式中: $c_{oc}^{(i)}$ 为部件 i 每万公里的运行成本。

由于不同维修方式的经济成本及其对故障率产生的影响都不同^[17],本文基于效费比确定部件的维修级别。根据故障率演化模型,预防维修前的故障率 $\lambda_{i,u}^-$ 和维修后的故障率 $\lambda_{i,u}^+$ 可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{i,u}^- &= \lambda_{i,u}(L_{i,u}) = b_{i,u-1}\lambda_{i,u-1}(l_{i,u} + a_{i,u-1}l_{i,u-1}) \\ \lambda_{i,u}^+ &= \lambda_{i,u+1}(0) = b_{i,u}\lambda_{i,u}(a_{i,u}l_{i,u}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

那么,故障率改进值 $\Delta\lambda_{i,u}$ 为

$$\Delta\lambda_{i,u} = \lambda_{i,u}^- - \lambda_{i,u}^+ \quad (11)$$

考虑运行成本对维护方式的影响,改进后的效费比计算公式为:

$$\omega_{i,u}^l(l_{i,u}) = \frac{c_i^{(i)} + C_{oc}^{(i)}}{\Delta\lambda_{i,u}^l} = \frac{c_i^{(i)} + C_{oc}^{(i)}}{b_{i,u-1}\lambda_{i,u-1}(l_{i,u} + a_{i,u-1}l_{i,u-1}) - b_{i,u}\lambda_{i,u}(a_{i,u}l_{i,u})} \quad (12)$$

$$\omega_{i,u}^h(l_{i,u}) = \frac{c_h^{(i)} + C_{oc}^{(i)}}{\Delta\lambda_{i,u}^h} = \frac{c_h^{(i)} + C_{oc}^{(i)}}{b_{i,u-1}\lambda_{i,u-1}(l_{i,u} + a_{i,u-1}l_{i,u-1}) - b_{i,u}^h\lambda_{i,u}(a_{i,u}^h l_{i,u})} \quad (13)$$

式中: $\omega_{i,u}^l(l_{i,u})$ 、 $\omega_{i,u}^h(l_{i,u})$ 分别为部件 i 在第 u 个预防性维修周期执行初级修和高级修的效费比; $\Delta\lambda_{i,u}^l$ 、 $\Delta\lambda_{i,u}^h$ 分别为执行初级修和高级修的故障率改进值; $c_i^{(i)}$ 和 $c_h^{(i)}$ 分别为执行初级修和高级修的管理成本。

效费比越小,意味着达到相同维护效果所需的运维成本越低。因此,式(5)可表示为:

$$\omega_{i,u} = \begin{cases} 0, & \omega_{i,u}^l(l_{i,u}) \leq \omega_{i,u}^h(l_{i,u}) \\ 1, & \omega_{i,u}^l(l_{i,u}) > \omega_{i,u}^h(l_{i,u}) \end{cases} \quad (14)$$

1.3 预防性机会维修优化模型

根据部件维修类型,维护成本可分为5部分,分别为预防性维修成本 $C_p^{(i)}$ 、机会维修成本 $C_o^{(i)}$ 、故障小修成本 $C_m^{(i)}$ 、更换成本 $C_r^{(i)}$ 和停机损失 $C_d^{(i)}$ 。

1) 预防性维修成本

预防性维修成本 $C_p^{(i)}$ 主要包括维修费用和固定维修费用,其中固定维修费用包括使用与维修活动相关的工具、场地等的费用,可以定义为

$$C_p^{(i)} = \sum_{u=1}^{N-1} [c_p^{(i)}(l_{i,u}) + c_f^{(i)}(l_{i,u})] \quad (15)$$

式中: $c_p^{(i)}(l_{i,u})$ 为部件 i 在第 u 次维修时产生的维修费用; $c_f^{(i)}(l_{i,u})$ 为第 u 次维修时的固定维修费用。

根据不同维护等级,可具体表示为:

$$c_p^{(i)}(l_{i,u}) = (1 - \omega_{i,u})c_{p,l}^{(i)} + \omega_{i,u}c_{p,h}^{(i)} \quad (16)$$

$$c_f^{(i)}(l_{i,u}) = (1 - \omega_{i,u})c_{f,l}^{(i)} + \omega_{i,u}c_{f,h}^{(i)} \quad (17)$$

式中: $c_{p,l}^{(i)}$ 、 $c_{p,h}^{(i)}$ 分别为部件 i 初级修和高级修的维修费用; $c_{f,l}^{(i)}$ 、 $c_{f,h}^{(i)}$ 分别为初级修和高级修的固定维修费用。

2) 机会维修成本

预防性机会维修是指利用一个部件的停机维修时间,对其他未达到维修时机但在维修窗口内的部件进行维修^[5]。机会维修通常基于预防性维修求解的决策变量来确定,比如可靠度阈值、维护时间等^[18]。基于部件的历史维修数据可知,不同部件在相同的役龄区间,可靠度的变化率不同^[19],可有效体现不同部件的退化演变规律差异性。另外,由于维修时机的提前或者延长对部件的经济性与安全性都有一定程度的影响^[20],因此无法准确判断时间窗口是应大于“0”,还是应小于“0”。

综上所述,本文假设每个部件皆存在独立的机会

维修窗口, 引入可靠度裕度 $\Delta R_{i,u}$, 以经济成本为目标, 以可靠度为安全性的衡量指标, 充分考虑不同部件的可靠度变化趋势, 将机会维修窗口 $\tau_{i,u}$ 与可靠度函数斜率结合, 具体可表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{i,u} &= \frac{\Delta R_{i,u}}{|k_{i,u}|} = l_{i,u}^p - l_{i,u}^o \\ \Delta R_{i,u} &= R_{i,u}^o - R_{i,u}^p \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中: $k_{i,u}$ 为部件当前可靠度函数在 $R_{i,u}^p$ 时的斜率; $l_{i,u}^p$ 为 $R_{i,u}^p$ 对应的维修时机; $l_{i,u}^o$ 为 $R_{i,u}^o$ 对应的维修时机。

为准确表示机会维修窗口带来的机会维修效应, 将维修间隔以机会维修窗口为界限分隔开来, 假设 $t_{u,1}^{(i)} = \min(l_{i,u}^p, l_{i,u}^o)$, $t_{u,2}^{(i)} = \max(l_{i,u}^p, l_{i,u}^o)$, 且在 $l_{i,u}^o$ 时刻, 故障率变化规律与 $l_{i,u}^p$ 相同, 具体规律如图2所示。

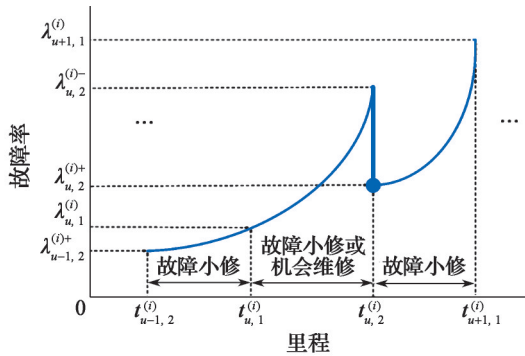


图2 机会维修故障率变化

Fig. 2 Variation of failure rate under opportunistic maintenance strategy

按照区段划分建立维修成本模型, 具体如下:

①在区间段 $(t_{u-1,2}^{(i)}, t_{u,1}^{(i)})$ 内, 需进行故障小修。故障小修的次数为

$$N_{m1,u}^{(i)} = \int_{t_{u-1,2}^{(i)}}^{t_{u,1}^{(i)}} \lambda_{i,u-1}(l) dl \quad (19)$$

②在区间段 $(t_{u,1}^{(i)}, t_{u,2}^{(i)})$ 内, 存在2种可能的维修方式: 一种是因为部件本身发生故障产生的故障小修, 在此期间内没有其余部件发生故障或预防性维修; 另一种是部件在此区间段内没有发生故障, 但其他部件在此期间发生故障或者进行预防性维修, 使部件产生机会维修。对此, 引入故障概率密度函数 $f_{i,u}(l)$ 和机会维修概率密度函数 $h_{i,u}(t, t_1)$ 来分别表示这2种事件发生的可能性。

部件 i 的机会维修概率密度函数可通过其他部件的故障维修概率 λ_{m_j} 或者预防性维修概率 λ_{p_j} 来表示, 具体如下:

$$h_{i,u}(t, t_{u,1}^{(i)}) = \delta_i \exp[-\delta_i(t - t_{u,1}^{(i)})] \quad (20)$$

$$\delta_i = \sum_{j \neq i}^M \lambda_{m_j} = \sum_{j \neq i}^M \lambda_{p_j} = \sum_{j \neq i}^M \frac{1}{\theta_j} \quad (21)$$

式中: M 为系统中部件的个数。

因此, 在区间段 $(t_{u,1}^{(i)}, t_{u,2}^{(i)})$ 内, 故障小修的次数可以表示为

$$N_{m2,u}^{(i)} = \int_{t_{u,1}^{(i)}}^{t_{u,2}^{(i)}} f_{i,u}(l) \left[1 - \int_0^l h_{i,u}(k, t_{u,1}^{(i)}) dk \right] dl \quad (22)$$

机会维修的次数可以表示为

$$N_{\alpha,u}^{(i)} = \int_{t_{u,1}^{(i)}}^{t_{u,2}^{(i)}} h_{i,u}(l, t_{u,1}^{(i)}) \left[1 - \int_0^l f_{i,u}(k) dk \right] dl \quad (23)$$

机会维修费用为

$$C_o^{(i)} = \sum_{u=1}^{N-1} [c_p^{(i)}(l_{i,u}) + c_f^{(i)}(l_{i,u})] N_{\alpha,u}^{(i)} \quad (24)$$

3) 故障小修成本

在整个维护计划期内, 故障小修成本为

$$C_m^{(i)} = (c_m^{(i)} + c_{mf}^{(i)}) \sum_{u=1}^N (N_{m1,u} + N_{m2,u}) \quad (25)$$

式中: $c_m^{(i)}$ 为部件 i 的单个故障小修费用; $c_{mf}^{(i)}$ 为固定故障小修费用; $N_{m1,u}$ 为采用式(19)求得的部件 i 的故障小修次数; $N_{m2,u}$ 为采用式(22)求得的部件 i 的机会维修次数。

4) 更换成本

通常在维护计划期结束时, 需要进行部件更换。更换成本主要包括部件更换费用和固定更换费用, 其可表示为

$$C_r^{(i)} = c_r^{(i)} + c_{rf}^{(i)} \quad (26)$$

式中: $c_r^{(i)}$ 为部件 i 的更换费用; $c_{rf}^{(i)}$ 为固定更换费用。

5) 停机损失

停机成本 $C_d^{(i)}$ 包括预防性维修 $c_{pd}^{(i)}$ 、故障维修 $c_{md}^{(i)}$ 和更换造成的运营活动停止带来的收入损失 $c_{rd}^{(i)}$, 则停机成本为

$$C_d^{(i)} = c_{pd}^{(i)} + c_{md}^{(i)} + c_{rd}^{(i)} \quad (27)$$

其中, 预防性维修 $c_{pd}^{(i)}$ 为

$$c_{pd}^{(i)} = \sum_{u=1}^{N-1} [(1 - w_{i,u}) c_{pd,l}^{(i)} + w_{i,u} c_{pd,h}^{(i)}] \quad (28)$$

式中: $c_{pd,l}^{(i)}$ 、 $c_{pd,h}^{(i)}$ 分别为初级修和高级修的停机损失。

综上所述, 在整个计划维护周期内部件的维修费用 $C^{(i)}$ 为

$$C^{(i)} = C_o^{(i)} + C_p^{(i)} + C_m^{(i)} + C_r^{(i)} + C_d^{(i)} \quad (29)$$

以维修费用最小为目标, 获得各部件的最佳预防维修可靠度 $R_p^{(i)}$ 、维修间隔 $l_{i,u}$ 和可靠度裕度 $\Delta R_{i,u}$ 。

2 基于并行量子遗传算法的优化方案

2.1 并行量子遗传算法流程

本文建立的维修优化模型是多参数、多约束、非线性的数学模型。对于这种规模较大的模型优化问题, 一般采用近似求解的方法确定其最优解, 其中量子遗传算法是一种非常有效的优化求解方法。但传统的量子遗传算法容易陷入局部最优解, 为了提升算法的整体搜索性能, 达到更优的解, 提出并行量子遗传算法。通过引入多种群策略, 可实现一种多种群二进制算术优化算法。其中, 多种群策略为将整个种群划分为4个

规模相同的子种群，每个子种群独立进行迭代，并通过通信策略进行交流。通信“策略一”表示为算法每执行 M 次迭代，用子种群 1 和子种群 2 的最优个体替换最差个体，用子种群 3 和子种群 4 的最优个体替换最差个体；通信“策略二”表示为算法每执行 N 次迭代，每个子种群的最差个体被全局最优个体替换。增加通信策略能够更有效地利用个体间的信息，提高求解速度和解的质量，图 3 为通信策略的示意图。

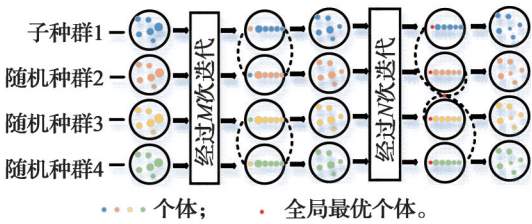


图 3 通信策略

Fig. 3 Communication strategies

基于以上策略，实现并行量子遗传算法，主要流程如图 4 所示。

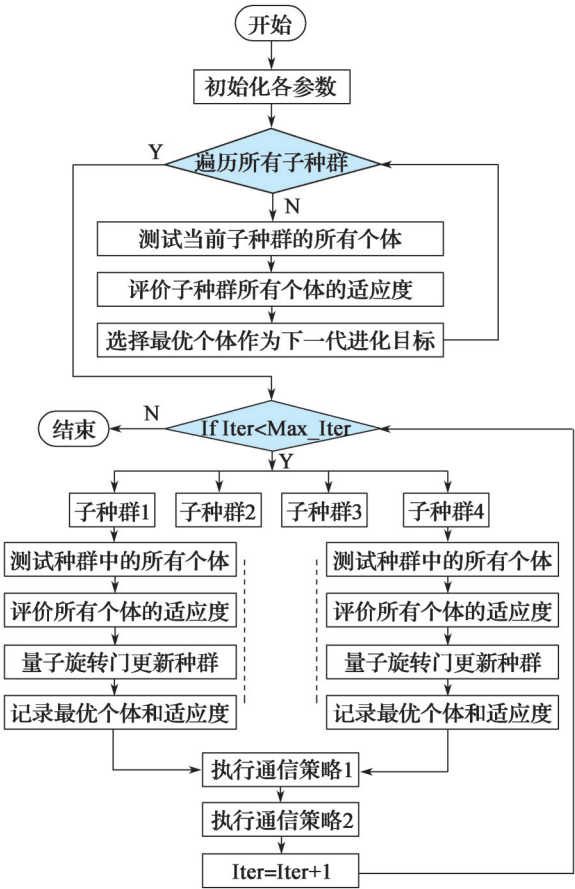


图 4 并行量子遗传算法工作流程

Fig. 4 Process flow of parallel quantum genetic algorithm

2.2 维修模型求解过程

本文建立的预防性机会维修求解模型是多决策变量的复杂问题，其求解过程如下：

①整理分析部件历史故障数据，得到各种维修费

用、季节影响因子和退化参数。

②根据单部件预防性维修机会模型，应用并行量子遗传算法求解单部件最优预防性维修间隔、维修方式和可靠度裕度等。

③求解各部件机会维修窗口，得到各部件机会维修区间。

④记录先达到预防性维修间隔的部件 i ，判别在此时刻是否有其他部件 j 的机会维修区间与其重合。若存在，则将部件 i 与其他部件进行联合机会维修；否则，部件 i 单独维修。

⑤进行下一步判断。

⑥反复执行步骤④和步骤⑤，直至部件超出计划维修规划期范围。

3 实例验证

3.1 参数设置

选取某动车组转向架系统 4 个串联部件的退化特征和维修策略进行实例分析。参考文献[5, 21]选取部件参数，其中初级修役龄回退因子 $a_1 = \frac{u}{6u+7}$ ，高级修役龄回退因子 $a_h = \frac{u}{7u+7}$ ，初级修故障率增长因子 $b_1 = \frac{12u+1}{8u+1}$ ，高级修故障率增长因子 $b_h = \frac{12u+1}{11u+1}$ 。各部件的劣化参数和维护成本设置如表 1 所示。

表 1 维修参数

Table 1 Maintenance parameters

项目参数	部件 1	部件 2	部件 3	部件 4	
形状参数 β_i	1.39	1.68	1.21	1.43	
尺度参数 θ_i	73.37	110.68	79.11	83.85	
预防性维修/元	$c_{p, l}^{(i)}$	500	750	550	450
	$c_{f, l}^{(i)}$	450	450	450	450
	$c_{p, h}^{(i)}$	750	1 300	1 000	680
	$c_{f, h}^{(i)}$	600	600	600	600
故障维修/元	$c_m^{(i)}$	3 500	5 000	4 000	2 500
	$c_{mf}^{(i)}$	1 500	1 500	1 500	1 500
更换维修/元	$c_r^{(i)}$	600	800	700	500
	$c_{rf}^{(i)}$	400	400	400	400
停机损失/元	$c_{pd, l}^{(i)}$	500	500	500	500
	$c_{pd, h}^{(i)}$	700	700	700	700
	$c_{md}^{(i)}$	1 500	1 500	1 500	1 500
	$c_{rd}^{(i)}$	600	600	600	600

通过对历史数据进行分析，可得到不同季节对故障的影响，为全面细致讨论环境因素的变化，这里的季节影响因子为不同月份影响因子。图 5 为各部件在不同季节发生故障的里程箱型图。由图 5 可看出，不同季

节故障里程分布差异明显, 因此有必要考虑引入季节影响因子。

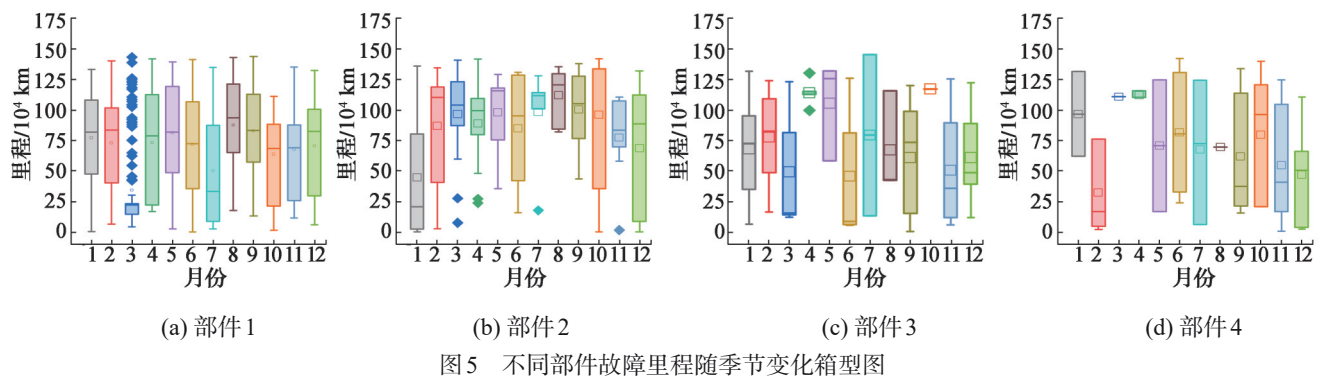


图 5 不同部件故障里程随季节变化箱型图

Fig. 5 Box plots of the failure mileage varying with seasons of different components

设置季节影响因子参数如表 2 所示。

表 2 不同部件季节影响因子

Table 2 Seasonal influence factors of various components

月份	部件 1	部件 2	部件 3	部件 4
1	1.21	0.55	1.00	1.51
2	1.14	1.07	1.14	0.50
3	0.54	1.18	0.72	1.74
4	1.15	1.09	1.68	1.75
5	1.28	1.20	1.55	1.11
6	1.13	1.04	0.67	1.28
7	0.79	1.21	1.17	1.06
8	1.38	1.37	0.99	1.09
9	1.30	1.23	0.90	0.96
10	1.00	1.18	1.73	1.25
11	1.06	0.95	0.74	0.85
12	1.11	0.84	0.90	0.73

3.2 单部件机会维修优化策略

为验证所提出预防性机会维修策略的有效性, 对部件采取不同的单位运行成本 $c_{oc}^{(i)}$, 其中 “ $c_{oc}^{(i)}=0$ ” 表示未考虑运行成本, 对应的预防性维修策略优化结果和未考虑季节影响的策略对比结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 引入季节影响因子后, 各部件的维修计划发生了显著变化, 维护成本均有不同程度的涨幅, 一方面是由于季节影响因子波动带来的故障率波动, 随之带来的是故障小修成本的增长, 另一方面是由于维修方式的改变带来的预防性维修成本的变化。但在保证部件可靠运行的前提下, 考虑运行成本对预防性机会维修的影响是增加维修计划中高级维修的次数或高级修时间的提前, 以确保部件在维修阶段获得更好的维修效果, 相应地, 这也降低了部件的维修成本。采用这种方法, 各部件的维修成本均有一定程度的下

表 3 不同 $c_{oc}^{(i)}$ 运行各部件的预防性机会维修策略优化结果

Table 3 Optimization results of preventive opportunistic maintenance strategies for various components operating at different $c_{oc}^{(i)}$

部件	$c_{oc}^{(i)}$ /元	维修级别		$R_p^{(i)}$		$c^{(i)}$ /元	
		@none	@ s_i	@none	@ s_i	@none	@ s_i
1	0	0-0-0-0-0-0-0-0-0-0	0-0-0-0-0-0-0-1-0-0-0-0	0.769	0.761	39 879	48 915
	200	1-1-1-1-1-1-1-1-1	1-1-1-1-1-1-1-1-1	0.777	0.762	38 581	44 214
	400	1-1-1-1-1-1-1-1-1	1-1-1-1-1-1-1-1-1	0.776	0.763	38 669	43 632
	600	1-1-1-1-1-1-1-1-1	1-1-1-1-1-1-1-1-1	0.775	0.763	38 656	43 640
2	0	0-0-0-0-0	0-0-0-0-0	0.751	0.726	26 700	33 047
	200	0-1-1-1	1-1-1-0	0.722	0.745	27 146	30 947
	400	1-1-1-1	1-1-1-1	0.740	0.717	27 024	35 123
	600	1-1-1-1	1-0-1-1-1	0.744	0.754	26 650	31 941
3	0	1-1-1-1-1-1-1-1-1-1	0-0-0-0-0-0-1-0-1-1-0-1-0	0.783	0.788	46 209	49 285
	200	1-1-1-1-1-1-1-1-1	1-1-1-1-1-1-1-0-1	0.761	0.751	44 173	46 186
	400	1-1-1-1-1-1-1-1-1	1-1-1-1-1-1-1-0-1	0.759	0.752	44 094	46 857
	600	1-1-1-1-1-1-1-1-1	1-1-1-1-1-1-1-0-1	0.761	0.752	44 009	44 240
4	0	0-0-0-0-0-0-0-0-0	0-0-0-1-0-0-0-0-1	0.735	0.742	29 432	32 140
	200	1-1-1-1-1-1	0-1-1-1-1-1	0.720	0.744	28 039	27 145
	400	1-1-1-1-1-1	0-1-1-1-1-1	0.720	0.744	28 058	26 392
	600	1-1-1-1-1-1	1-1-1-1-1-1	0.720	0.725	28 024	31 632

降,最低降幅为9.61%、3.35%、4.93%、1.58%,最高降幅为10.80%、6.35%、10.24%、17.88%。另外,如“部件1”所示,在优化后可靠性阈值相近的条件下,可明显看出成本节约效果显著。

图6(a)为“部件4”的运行成本“ $c_{oc}^{(4)}=0$ ”和“ $c_{oc}^{(4)}=200$ ”时,考虑季节影响因子和未考虑季节影响因子的故障率演化规律对比图。由图6(a)可知,当“ $c_{oc}^{(4)}=0$ ”时,考虑季节因素的维修计划在部件服役里程达到121万km后,故障率开始下降,达到163万km后,经过维修后的故障率显著低于未考虑季节因素的维修计划,并在接下来的维护中,维修间隔开始延长,而且节省了1次维修;当“ $c_{oc}^{(4)}=200$ ”时,在服役里程达到76万km后,考虑季节因素的维修计划的故障率开始下降,到达97万km维修后,故障率整体低于未考虑季节因素的维修计划,经济效益更加显著。另外,由于季节影响因子的加入,初级修与高级修的维护效果并不符合传统规律,这也进一步验证了前述的猜测。图6(b)为“部件4”考虑季节影响因子不同单位运行成本 $c_{oc}^{(i)}$ 的故障率对比图。由图6(b)可知,当“ $c_{oc}^{(4)}=0$ ”时,达到规划维修期时的故障率均高于其他策略,相比之下,考

虑运行成本的维护计划由于前期的积极维护,后期故障率均能够维持在较低水平。综上所述,对于考虑季节影响因素的动车组维护优化方案,本文建议在考虑部件服役性能退化特性的前提下,在服役寿命前期实施更积极的维修措施,比如增加高级修次数或者增加定期检查次数,虽然在短期内会增加维护成本,但从长期维护来看,可以显著降低设备故障率和延长后期维修间隔。

3.3 系统级预防性机会维修优化结果

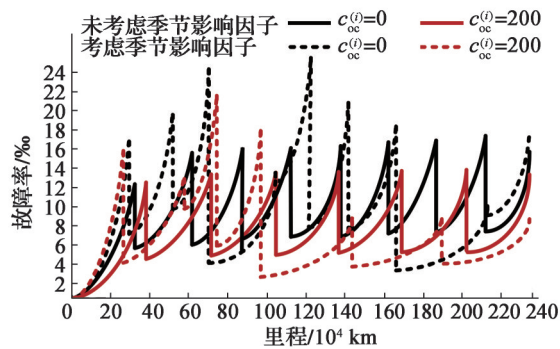
根据表3中各部件在不同运行成本下对应的最优可靠度裕度,可获得各部件在各预防性维修节点对应的机会维修窗口,具体结果如表4所示,图7为“部件3”在不同维修策略下 $\tau_{i,u}$ 的变化。由表4可知,在不同维修策略下,由于对应的最优预防性维修可靠度和可靠度裕度不同,各维修阶段的机会维修窗口差异较大。另外,通过引入可靠度裕度,机会维修窗口实现了动态变化。

根据表4机会维修窗口的计算结果,综合各部件运行成本,选择 $c_{oc}^{(i)}=200$ 计算优化结果安排系统级预防性

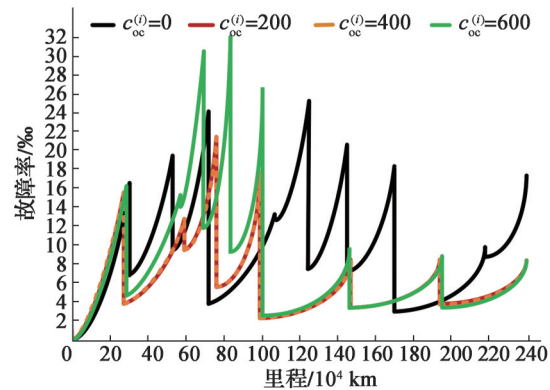
表4 不同 $c_{oc}^{(i)}$ 运行下的各部件的 $|\tau_{i,u}|$

Table 4 $|\tau_{i,u}|$ of various component operating at different $c_{oc}^{(i)}$

部件	$c_{oc}^{(i)}$ /元	维修间隔/ 10^4 km	$c^{(i)}$ /元	ΔR	$ \tau_{i,u} /10^4$ km
1	0	25.2-17.9-13.3-13.9-13.8-24.3-23.4-16.4-23.1-13.9-12.1-17.2-13.3	48 915	-0.012 700	1.100 0-0.836 0-0.630 0-0.648 0-0.651 0-1.119 0-1.108 0-0.792 0-1.080 0-0.674 0-0.576 0-0.803 0-0.641 0
	200	25.0-22.3-14.6-24.3-19.5-23.5-20.5-29.1-18.2-40.2	44 214	-0.004 440	0.387 0-0.362 0-0.244 0-0.392 0-0.326 0-0.386 0-0.341 0-0.474 0-0.310 0-0.647 0
	400	25.0-22.3-14.6-24.3-19.5-23.5-20.4-19.0-18.2-40.2	43 632	-0.000 758	0.066 0-0.061 9-0.041 7-0.067 0-0.055 7-0.066 0-0.058 3-0.081 0-0.053 0-0.111 0
	600	25.0-22.3-14.6-24.3-19.5-23.5-20.5-29.1-18.2-40.2	43 640	0.000 413	0.036 0-0.033 7-0.022 7-0.036 5-0.030 3-0.035 9-0.031 8-0.044 1-0.028 9-0.060 2
2	0	80.2-42.8-33.0-39.6-32.3	33 047	-0.016 500	3.390 0-2.010 0-1.540 0-1.810 0-1.530 0
	200	76.2-58.5-23.9-34.3	30 947	-0.014 800	3.070 0-2.540 0-1.120 0-1.470 0
	400	82.0-51.9-43.3-36.6	35 123	0.015 500	3.180 0-2.190 0-1.830 0-1.560 0
	600	76.2-58.5-23.9-34.3	31 941	0.008 950	3.070 0-2.540 0-1.120 0-1.470 0
3	0	23.9-10.4-13.4-20.1-9.6-27.4-10.5-9.5-23.5-20.5-23.1-22.5-23.0	49 285	-0.000 412	0.043 7-0.020 1-0.025 3-0.038 0-0.018 9-0.051 3-0.020 9-0.018 2-0.044 2-0.039 4-0.044 1-0.043 2-0.044
	200	27.8-22.3-22.2-27.3-24.0-21.9-27.1-40.9-9.8	46 186	-0.011 700	1.268 0-1.051 0-1.048 0-1.284 0-1.142 0-1.043 0-1.281 0-1.923 0-0.496 0
	400	27.8-22.2-22.2-27.2-23.9-21.8-27.0-40.8-9.8	46 857	0.010 100	1.090 0-0.904 0-0.901 0-1.100 0-0.982 0-0.896 0-1.100 0-1.650 0-0.427 0
	600	27.8-22.2-22.2-27.2-23.9-21.8-27.0-40.8-9.8	44 240	-0.001 780	0.192 0-0.159 0-0.159 0-0.194 0-0.173 0-0.158 0-0.194 0-0.291 0-0.075 0
4	0	29.5-23.5-18.7-35.5-16.8-21.3-25.1-47.5	32 140	-0.000 692	0.059 0-0.049 9-0.040 4-0.074 1-0.037 6-0.045 5-0.053 9-0.099 8
	200	26.9-32.1-17.7-22.8-48.0-46.8	27 145	0.005 030	0.428 0-0.534 0-0.310 0-0.384 0-0.795 0-0.803 0
	400	26.9-32.1-17.7-22.8-48.0-46.8	26 392	-0.001 710	0.146 0-0.182 0-0.105 0-0.131 0-0.270 0-0.273 0
	600	28.5-28.1-13.6-13.2-16.2-46.5-48.8	31 632	-0.001 010	0.086 3-0.089 5-0.045 5-0.043 0-0.052 2-0.145 4-0.159 0



(a) 部件4故障率变化对比曲线($c_{oc}^{(i)}=0$ 和 $c_{oc}^{(i)}=200$)



(b) 部件4故障率变化对比曲线(考虑季节影响因子)

图6 部件4故障率变化对比曲线

Fig. 6 Comparison curve of variation in failure rate for component 4

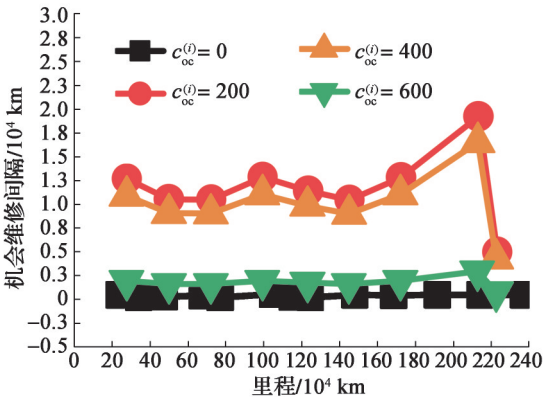


图7 部件3机会维修间隔

Fig. 7 Opportunistic maintenance interval of component 3

机会维修, 各部件的维护计划如图8所示。图9为单部件预防性维修计划, 单部件维修计划与系统级预防性机会维修计划对比见表5。与单部件预防维修策略相比, 系统级预防性机会维修策略通过在机会维修窗口内调整部件的维护时间, 对部件进行成组的维护, 达到降低系统维护成本的目的。通过利用机会维修分组的好处, 系统中除“部件4”外其他所有部件的维护费用均在下降, 一般来说, 机会维修的次数越多, 节省的维修费用就越多, 但由于维修间隔和季节影响因子的变化, 部件停机费用的减少不足以平衡故障维修费用的增加, 因此造成“部件4”总维护费用增长。最后, 通过预防性机会维修策略, 系统停机次数从29次减少到13次, 使系统维护总成本降低5 779元(降幅达4.05%), 在保证系统可靠性运行的同时, 达到了优化系统维护成本的目的。

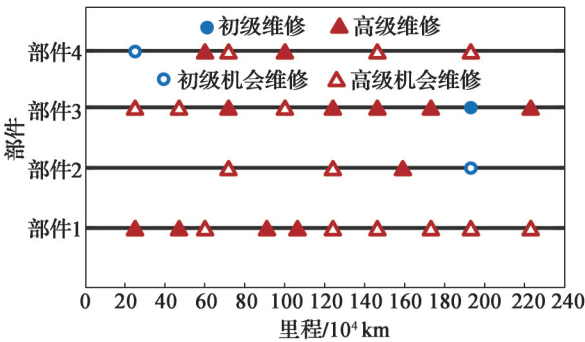


图8 系统级预防性机会维修计划

Fig. 8 Preventive opportunistic maintenance plan at system level

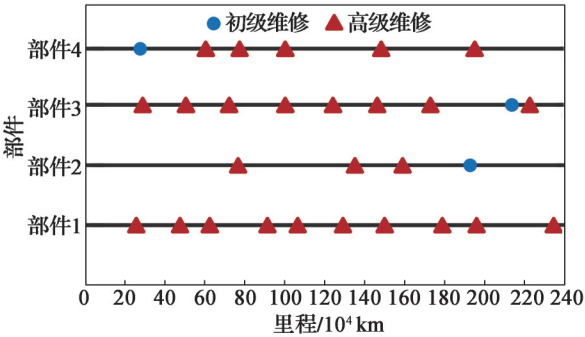


图9 单部件预防性维修计划

Fig. 9 Preventive maintenance plan at component level

表5 维修计划对比

Table 5 Comparison of maintenance plans

部件	单部件维修			系统级预防性机会维修				
	维修计划/ 10^4 km	初级修	高级修	费用/元	维修计划/ 10^4 km	初级修	高级修	费用/元
1	25.0–47.3–61.9–86.2–105.7–129.2–149.3–178.4–196.6–236.8	0	10	44 936	25.0–47.3–59.0–86.2–105.7–123.6–145.5–172.6–192.9–223.3	0	4	41 444
2	76.2–134.7–158.6–192.9	1	3	25 503	72.3–123.6–158.6–192.9	0	1	19 159
3	27.8–50.1–72.3–99.6–123.6–145.5–172.6–213.5–223.3	1	8	47 358	25.0–47.3–72.3–99.5–123.6–145.5–172.6–213.5–223.3	1	5	44 817
4	26.9–59.0–76.7–99.5–147.5–194.3	1	5	24 747	25.0–59.0–72.3–99.5–145.5–192.9	0	2	31 345

4 结论

针对动车组维修领域存在的缺乏考虑季节因素对其维护效果影响的问题,本文基于全生命周期管理理念,以维修经济性为核心,综合维修方式、维修成本和季节影响等多个方面,考虑维修活动和部件退化特性的相互作用,将运行成本与等效服役里程动态关联,并结合可靠度演变规律,建立了基于可靠度裕度的预防性机会维修模型,通过应用并行量子遗传算法求解各维修参数,并利用动车组转向架关键部件故障数据验证模型和算法的可行性。结果表明,该维修优化模型显著降低了系统停机次数 55.2%,节约了总体维修成本 4.05%,从而有效改善了动车组维修经济性。

虽然当前的维修优化模型考虑了季节因素对维修效果的影响,但处理方式未能充分捕捉季节变化的复杂性,因此后续的研究工作将致力于细化季节因素的量化方法,以便能更加有效地制定针对性的维修优化策略。

参考文献:

- [1] WANG Jiaxi. Maintenance scheduling at high-speed train depots: an optimization approach[J]. Reliability engineering & system safety, 2024, 243: 109809.
- [2] 中国国家铁路集团有限公司. 中国国家铁路集团有限公司 2023 年统计公报[EB/OL]. (2024-03-01) [2024-11-21]. http://www.china-railway.com.cn/xwzx/zhxw/202403/t20240315_134819.html. China Railway. 2023 statistical bulletin of China Railway [EB/OL]. (2024-03-01) [2024-11-21]. http://www.china-railway.com.cn/xwzx/zhxw/202403/t20240315_134819.html.
- [3] LIN Boliang, WU Jianping, LIN Ruixi, et al. Optimization of high-level preventive maintenance scheduling for high-speed trains[J]. Reliability engineering & system safety, 2019, 183: 261-275.
- [4] FOURIE C J, TENDAYI T G. A decision-making framework for effective maintenance management using life cycle costing(LCC)in a rolling stock environment[J]. The south African journal of industrial engineering, 2016, 27(4): 142-152.
- [5] LI J, WANG H, XIONG L, et al. Strategy optimization of multi-component system opportunity maintenance for electric multiple units from a lean maintenance perspective[J]. IEEE access, 2023, 11: 89478-89487.
- [6] LIU Gehui, CHEN Shaokuan, JIN Hua, et al. Optimum opportunistic maintenance schedule incorporating delay time theory with imperfect maintenance[J]. Reliability engineering & system safety, 2021, 213: 107668.
- [7] 周晓军, 沈炜冰, 奚立峰, 等. 一种考虑修复非新的多设备串行系统机会维护动态决策模型[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(5): 769-773.
- [8] ZHOU Xiaojun, SHEN Weibing, XI Lifeng, et al. A dynamic opportunistic preventive maintenance model for a multi-unit series system with consideration of imperfect maintenance effect[J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2007, 41(5): 769-773.
- [9] PAPADOPOULOS P, COIT D W, EZZAT A A. Seizing opportunity: maintenance optimization in offshore wind farms considering accessibility, production, and crew dispatch[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2022, 13(1): 111-121.
- [10] SU Chun, HU Zhaoyong, LIU Yang. Multi-component opportunistic maintenance optimization for wind turbines with consideration of seasonal factor[J]. Journal of central south university, 2020, 27(2): 490-499.
- [11] 贺德强, 张小振, 陈彦君, 等. 基于可靠性的列车预防性多梯度机会维修策略[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(2): 544-555.
- [12] HE Deqiang, ZHANG Xiaozhen, CHEN Yanjun, et al. Preventive multi-level opportunity maintenance strategy for train based on reliability[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2023, 29(2): 544-555.
- [13] 程宏波, 汪兴, 孙楠楠, 等. 基于区间数学的接触网预防性机会维修方法研究[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(4): 124-130.
- [14] CHENG Hongbo, WANG Xing, SUN Nannan, et al. Research on preventive opportunity maintenance method of catenary based on interval mathematics[J]. Journal of east China jiaotong university, 2019, 36(4): 124-130.
- [15] CHENG Hongbo, CAN Yufan, WANG Jiaxin, et al. A preventive, opportunistic maintenance strategy for the catenary system of high-speed railways based on reliability[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2019, 234(10): 1149-1155.
- [16] YUAN Qinghe, JIN Zhenzhen, JIA Shun, et al. An improved opportunity maintenance model of complex system [J]. Advances in mechanical engineering, 2019, 11(4): 1-19.
- [17] LIU C, PANG R Y, HAN C, et al. Research on opportunity maintenance strategy of wind turbines based on incomplete maintenance[J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2021, 1043(2): 022051.
- [18] 刘晓祖, 王红, 何勇, 等. 考虑人力资源动态配置的动车组系统机会维修模型[J/OL]. 机械科学与技术: 1-9 (2023-03-16) [2025-01-01]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230137>.
- [19] LIU Xiaozu, WANG Hong, HE Yong, et al. Opportunistic maintenance model of electric multiple unit system considering dynamic allocation of human resources[J/OL]. Mechanical science and technology for aerospace engineering: 1-9 (2023-03-16) [2025-01-01]. <https://doi.org/10.13433/j>.

- cnki.1003-8728.20230137.
- [16] JUN H K, KIM J H. Life cycle cost modeling for railway vehicle[C]//IEEE. 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Seoul: IEEE, 2007: 1989-1994.
- [17] 胡道畅, 欧阳中辉, 陈青华, 等. 基于可靠度和效费比的特种车辆维修策略优化方法[J]. 兵工自动化, 2021, 40(7): 72-77.
- HU Daochang, OUYANG Zhonghui, CHEN Qinghua, et al. Optimization method of special vehicle maintenance strategy based on reliability and cost effectiveness ratio[J]. Ordnance industry automation, 2021, 40(7): 72-77.
- [18] ZHOU Xiaojun, SHI Kailong. Capacity failure rate based opportunistic maintenance modeling for series-parallel multi-station manufacturing systems[J]. Reliability engineering & system safety, 2019, 181: 46-53.
- [19] 赵洪山, 张路朋. 基于可靠度的风电机组预防性机会维修策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3777-3783.
- ZHAO Hongshan, ZHANG Lupeng. Preventive opportunistic maintenance strategy for wind turbines based on reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3777-3783.
- [20] 王红, 刘志龙, 杜维鑫, 等. 基于多种维护方式的地铁车辆设备预防性维护策略及维护模型[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(4): 108-114.
- WANG Hong, LIU Zhilong, DU Weixin, et al. Preventive maintenance strategy and model for metro vehicle equipment based on various maintenance methods[J]. China railway science, 2016, 37(4): 108-114.
- [21] 王红, 刘晓祖, 何勇, 等. 基于动态时间窗的动车组系统两级非完美机会维修策略[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2023: 1-18 (2023-11-15) [2025-01-01]. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2023.0310>.
- WANG Hong, LIU Xiaozu, HE Yong, et al. Bi-level imperfect opportunity maintenance strategy of electric multiple unit system based on dynamic time window[J/OL]. Computer integrated manufacturing systems, 2023: 1-18 (2023-11-15) [2025-01-01]. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2023.0310>.

Optimization model for reliability-based maintenance strategies of critical components in electric multiple units

CHEN Jiayu, SONG Dongli, GENG Fangdong

(State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: To address the issues of under-maintenance or over-maintenance in current preventive maintenance practices for electric multiple units (EMU), this study focuses on investigating the influences of full lifecycle maintenance and operational activities of EMU components on their degradation characteristics and maintenance strategies, under the framework of a full lifecycle management approach. At the component level, a maintenance strategy considering seasonal influences and operational costs was proposed, to dynamically reflect the evolving trends in component degradation characteristics associated with maintenance activities. In addition, a parallel quantum genetic algorithm was incorporated to calculate parameters such as the optimal maintenance interval and reliability. At the system level, a preventive opportunistic maintenance strategy based on reliability margins was established to create dynamic opportunistic maintenance windows, thereby reducing system downtime occurrences and lowering long-term system maintenance costs. The experimental results indicate that, compared to maintenance strategies without considering operational costs and seasonal influences, the proposed strategies effectively reduces maintenance costs for EMUs by implementing more proactive maintenance measures, while ensuring component reliability, system availability, and planning rationality.

Keywords: electric multiple unit (EMU); operating costs; preventive opportunistic maintenance; seasonal influences; parallel quantum genetic algorithm; high speed train