

铁道机车车辆

基于换件修的动车组关键设备 预防性维修策略

熊 律^{1,2}, 刘志龙³

- (1. 广东交通职业技术学院 轨道交通学院, 广东 广州 510650;
2. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070;
3. 中国铁路成都局集团有限公司 重庆车辆段, 重庆 400000)

摘 要: 动车组关键设备执行预防性维修操作时需要整列动车组停止运行, 从而增加了动车组的停机损失。为此, 引入换件修维修理念, 在动车组关键设备到达预防性维修时机时, 使用另一性能完好的设备将其更换下来并维修, 从而克服了因设备预防性维修导致动车组停机损失骤增的不足。文章以动车组关键设备为研究对象, 以预防性维修可靠度阈值为决策变量, 以动车组关键设备一个更换周期内的维修总成本为决策目标, 对其关键设备采取两级非完美维修措施, 分别建立基于换件修的动车组关键设备预防性维修模型和基于非换件修的动车组关键设备预防性维修模型。算例分析结果表明, 基于换件修的预防性维修可靠度阈值的优化结果高于非换件修, 且换件修的维修总成本相比非换件修降低了22.2%。因此, 基于换件修的动车组关键设备预防性维修策略可较大幅度降低设备一个寿命周期内的维修总成本, 并可以使设备保持更高的可靠度水平。

关键词: 动车组; 关键设备; 停机损失; 换件修; 维修总成本; 高速列车

中图分类号: U266.2; U269

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2022)05-0023-05

Preventive maintenance strategy of electric multiple unit critical equipment based on replacement repair

XIONG Lü^{1,2}, LIU Zhilong³

- (1. School of Rail Transit, Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510650, China;
2. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Chongqing Depot, China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chongqing 400000, China)

Abstract: Considering that the entire electric multiple unit (EMU) needs to be withdrawn from service for carrying out preventive maintenance (PM) of the critical equipment, leading to an increase to downtime loss, the concept of replacement repair is proposed in this paper. Specifically, based on the preventive maintenance schedule, the involved critical equipment is replaced with another set of equipment with good performance and then delivered for maintenance, so as to overcome the shortage of sudden increase of service suspension loss caused by preventive maintenance. This paper took the EMU critical equipment as the research object. The preventive maintenance models were built respectively based on replacement repair and non-replacement repair, with the preventive maintenance

收稿日期: 2022-01-19; 修回日期: 2022-08-19

基金项目: 广东省普通高校青年创新人才项目(2020KQNCX161, 2021KQNCX175); 广东省科技创新战略专项资金项目(pdjh2022b0859, pdjh2023b0854, pdjh2023b0857, pdjh2023b0860); 广东交通职业技术学院科研项目(GDCP-ZX-2022-020-N1)

通信作者: 熊 律(1990—), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为轨道交通车辆疲劳可靠性与预防性维修策略;

E-mail: xionglv970@163.com

reliability threshold as the decision making variable, the total maintenance cost of the EMU critical equipment in a replacement cycle as the decision making objective, and applying the 2-level imperfect maintenance measure for the EMU critical equipment. Based on the example analysis, the optimization results of preventive maintenance reliability threshold based on replacement repair are higher than that based on non-replacement repair, and the total maintenance cost of replacement repair is 22.2% lower than that of non-replacement repair. Therefore, the preventive maintenance strategy of the EMU critical equipment based on replacement repair can greatly reduce the total maintenance cost of equipment in a life cycle and can maintain the equipment at a higher reliability level.

Keywords: electric multiple unit (EMU); critical equipment; downtime loss; replacement repair; total maintenance cost; high-speed train

0 引言

生产设备的修程修制是不断积累经验,不断发展而走向成熟的,从维修思想到检修手段的细微优化都需要科学的理论指导和反复实践来验证。随着动车组列车检修领域市场化程度的不断加深,如何保证其在安全可靠运行的前提下降低其维修成本是一个值得研究的问题。实际上,动车组列车不仅采购价格昂贵,而且日常的维修保养费用也是一笔巨大的开支^[1]。因此,动车组列车的维修机制逐渐得到学者们的重视,并取得了一系列的成果^[2-3]。文献[4]基于现行的分级检修制度,将预防性维修(PM)方式分为多个等级,提出了一种动车组部件多级非完美预防性维修策略,并对不同级别非完美维修措施对设备性能的改善程度进行了量化分析。文献[5]针对高速铁路接触网系统维修过程中可能出现的维修资源不足和运行过程中可能出现的风险状况,以维修资源和风险为约束,建立了一种接触网系统预防性维修计划决策模型,可为高速铁路供电检修作业提供理论支持。为了探究不同运量需求影响下动车组复杂系统成组维护策略,文献[6]基于故障链理论分析部件间故障传递过程,构建了考虑运量需求的动车组多设备系统动态成组模型,从而实现对动车组多设备系统维修作业计划的动态调整。文献[7]针对动车组部件存在维修成本高、故障危害大等特点,通过引入机会维修理念,对关联部件进行联合维修作业,从而达到降低动车组系统停机次数的目的,进而降低动车组多设备系统的维修总成本。文献[8]为了确定动车组子系统最佳预防性维修周期,在可用度最大的前提下,提出了一种采用蒙特卡罗方法对子系统的寿命分布、预防性维修时间分布、事后维修时间分布进行抽样计算的求解方案。文献[9]通过计算和分析我国高速列车部件之间的维修关系网络的节点平均度、平均路径长度、网络密度及网络集聚系数,从而揭示该网络的拓扑特征。以上文献从多个角度阐述了动车组列车的维修策略模型,然而鲜有文献对动车组列车关键部件换件修进行建模分析。实际上,德国ICE高速列车和法国TGV高速列车的维修保养理论都蕴含

有换件修的理念^[10]。对动车组大部件采用换件修方式,是在维修中心卸下大部件,并更换上性能完善的相同大部件,将更换下来的大部件送往工厂进行维修。本文基于混合式故障率演化规则,引入换件修维修理念,分别建立动车组设备非换件修维修策略模型和换件修维修策略模型,并通过算例分析对这两种维修策略进行对比分析,进而验证所提出维修策略的有效性。

1 预防性维修策略建模

设备可靠性与故障率之间的函数关系表达式^[11]为

$$R = \exp\left[-\int_0^{L_1} \lambda_1(l)dl\right] = \exp\left[-\int_0^{L_2} \lambda_2(l)dl\right] = \dots = \exp\left[-\int_0^{L_i} \lambda_i(l)dl\right] \quad (1)$$

式中: i 表示第 i 个PM周期, λ_i 表示故障率函数; L_i 表示里程间隔。

1.1 两级非完美维修故障率演化模型

采用文献[12]中的故障率演化模型,维修前后设备故障率函数表达式为

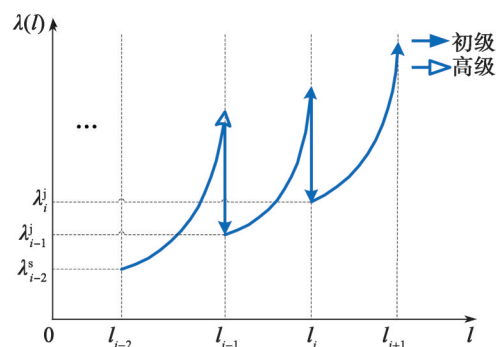
$$\lambda_{i+1}(l) = b_i \lambda_i(l + a_i L_i), \quad 0 < l \leq L_{i+1} \quad (2)$$

式中: a_i 为役龄递减因子; b_i 为故障率递增因子。

设备在第 $i+1$ 个维修周期内的故障率函数为

$$\lambda_{i+1}(l) = \prod_{k=1}^i b_k \lambda_1\left(l + \sum_{k=1}^i a_k L_k\right) \quad (3)$$

本文对设备采取两级非完美维修方式,即初级维修和高级维修两种方式。两级非完美维修的故障率演化模型如图1所示。



(a) 运行里程达到 l_i 时应用初级维修

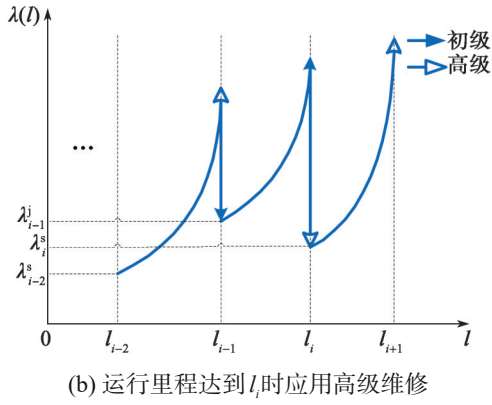


图1 两级非完美维修故障率演化规则

Fig. 1 Failure rate evolution rule of 2-level imperfect PM

引入维修方式选择因子 θ_i

$$\theta_i = \begin{cases} 0, & \text{初级维修} \\ 1, & \text{高级维修} \end{cases} \quad (4)$$

两级非完美维修策略下, 设备的役龄递减因子 a_i 和故障率递增因子 b_i 的表达式如下:

$$a_i = (1 - \theta_i) \delta_i^j + \theta_i \delta_i^s \quad (5)$$

$$b_i = (1 - \theta_i) \varepsilon_i^j + \theta_i \varepsilon_i^s \quad (6)$$

式中: δ_i^j 和 δ_i^s 分别表示初级维修和高级维修的役龄递减因子, 且有 $0 < \delta_i^s < \delta_i^j < 1$; ε_i^j 和 ε_i^s 分别表示初级维修和高级维修的故障率递增因子, 且有 $1 < \varepsilon_i^s < \varepsilon_i^j$ 。

1.2 维修方式选择

假设预防性维修前后设备的故障率为 λ_i^- 和 λ_i^+ , 则故障率的改善值为 $\Delta\lambda_i = \lambda_i^- - \lambda_i^+$ 。 λ_i^- 和 λ_i^+ 的表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i^- &= \lambda_i(L_i) = b_{i-1} \lambda_{i-1}(L_i + a_{i-1} L_{i-1}) \\ \lambda_i^+ &= \lambda_{i+1}(0) = b_i \lambda_i(a_i L_i) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: L_i 和 L_{i-1} 分别表示第 i 个和第 $i-1$ 个 PM 周期的里程间隔。

以效费比作为非完美维修方式的决策依据, 初级维修和高级维修的效费比可表示为:

$$\rho_i^j(l_i) = \frac{c_j}{\Delta\lambda_i^j} \quad (8)$$

$$\rho_i^s(l_i) = \frac{c_s}{\Delta\lambda_i^s} \quad (9)$$

式中: c_j 和 c_s 分别表示初级维修和高级维修的成本。

式(4)可进一步表示为

$$\theta_i = \begin{cases} 0, & \rho_i^s(l) \geq \rho_i^j(l) \\ 1, & \rho_i^s(l) < \rho_i^j(l) \end{cases} \quad (10)$$

2 非换件修策略下维修总成本建模

2.1 PM 成本

PM 成本计算公式为

$$C_p = \sum_{i=1}^{N-1} [c_i^m(l_i) + c_i^c(l_i)] \quad (11)$$

式中: $c_i^m(l)$ 和 $c_i^c(l)$ 分别为维修成本和场地占用成本, 计算公式分别对应式(12)和式(13)。

$$c_i^m(l) = (1 - \theta_i) c_j + \theta_i c_s \quad (12)$$

$$c_i^c(l) = \tau [(1 - \theta_i) t_j + \theta_i t_s] \quad (13)$$

式中: τ 为场地占用成本率; t_j 和 t_s 分别表示初级维修和高级维修的时间。

2.2 停机成本

停机成本计算公式为

$$C_d = \zeta \left[\sum_{i=1}^{N-1} (t_j + t_s) + t_r \sum_{i=1}^N \int_{l_{i-1}}^{l_i} \lambda_i(l) dl \right] \quad (14)$$

式中: ζ 表示单位时间停机损失。

2.3 故障修复成本

故障修复成本计算公式为

$$C_r = (c_r + \tau t_r) \sum_{i=1}^N \int_{l_{i-1}}^{l_i} \lambda_i(l) dl \quad (15)$$

式中: c_r 和 t_r 分别为单位故障维修成本和维修时间。

2.4 更换成本

当动车组设备到达其寿命终点时, 对其执行更换操作。更换成本不仅包括更换操作成本, 而且更换导致的设备剩余寿命浪费成本也包括在内, 具体计算式为

$$C_g = c_u + c_a + \tau t_u \quad (16)$$

式中: c_u 表示更换操作成本; c_a 为更换浪费成本; t_u 为更换操作时间。

故设备一个寿命周期内的维修总成本表达式为

$$C = C_p + C_d + C_r + C_g \quad (17)$$

3 换件修策略下维修总成本建模

3.1 预防性换件修成本

在换件修策略下, 由于设备每次到达 PM 时机时, 都要对其执行换件操作, 故设备每次执行 PM 时会增加一项更换操作成本。预防性换件修成本计算公式为

$$C_p^* = \sum_{i=1}^{N-1} [c_i^m(l_i) + c_i^c(l_i) + c_u] \quad (18)$$

式中: $c_i^m(l)$ 、 $c_i^c(l)$ 和 c_u 分别为维修成本、场地占用成本和换件操作成本。

由于对某同一设备, 对其执行换件操作的成本始终相同, 与对其采取何种非完美维修措施无关, 故取更换操作成本 c_u 为定值。

3.2 故障修复成本

故障修复成本计算公式为

$$C_r^* = (c_r + \tau t_r) \sum_{i=1}^N \int_{l_{i-1}}^{l_i} \lambda_i(l) dl \quad (19)$$

3.3 更换成本

更换成本计算公式为

$$C_g^* = c_u + c_a + \tau t_u \tag{20}$$

故设备一个寿命周期内的维修总成本表达式为

$$C^* = C_p^* + C_r^* + C_g^* \tag{21}$$

4 算例分析

威布尔分布广泛应用于机械电子产品的故障率描述，其表达式为

$$\lambda_1(l) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{l}{\eta} \right)^{\beta-1} \tag{22}$$

式中： $\lambda_1(l)$ 为设备的初始故障率函数； β 为形状参数； η 为生命特征参数。

取 $\beta=3$ ， $\eta=100$ ，其他参数的取值参照文献[11, 13]，具体如表1所示。

基于换件修和非换件修的动车组关键设备PM策略

的优化结果如表2所示，其中维修级别序列“0”代表初级维修，维修级别序列“1”代表高级维修。图2和图3分别是两种维修策略下维修总成本和PM可靠度阈值之间的关系曲线图。

表1 维修参数

Table 1 Maintenance parameters

参数项目	参数值	参数项目	参数取值
$c_j/\text{元}$	300	t_j/h	8
$c_s/\text{元}$	600	t_s/h	15
$c_t/\text{元}$	3 000	t_t/h	10
$c_u/\text{元}$	100	t_u/h	5
$c_a/\text{元}$	1 000	$\tau/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	10
$\xi/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	50	$l_{\max}/10^4\text{km}$	240
a_j	$\frac{i}{3i+7}$	a_s	$\frac{i}{5i+7}$
b_j	$\frac{12i+1}{8i+1}$	b_s	$\frac{12i+1}{11i+1}$

表2 换件修PM策略和非换件修PM策略的优化结果

Table 2 Optimization results of PM strategies based on replacement repair and non-replacement repair

模型	PM可靠度 阈值 R	维修总成本 $C/\text{元}$	PM成本 $C_p/\text{元}$	停机损失 $C_d/\text{元}$	故障维修 成本 $C_f/\text{元}$	维修里程间隔序列/ 10^4km	维修级别序列
换件修	0.81	10 324	3 730	0	5 444	60-48-34-22-16-10-30	0-0-0-0-0-1-0
非换件修	0.49	13 274	1 140	2 559	8 425	90-70-50	0-0-0

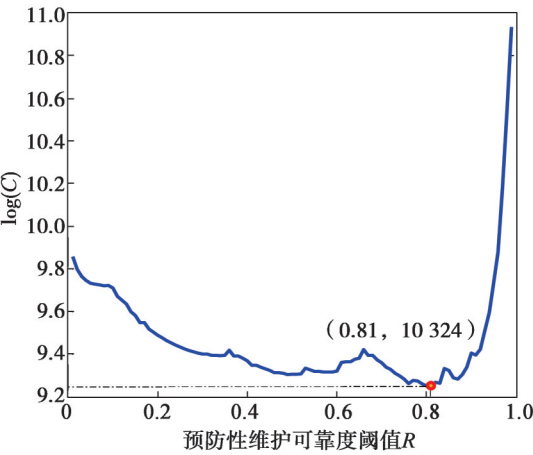


图2 换件修PM策略的优化结果

Fig. 2 Optimization results of PM strategy based on replacement repair

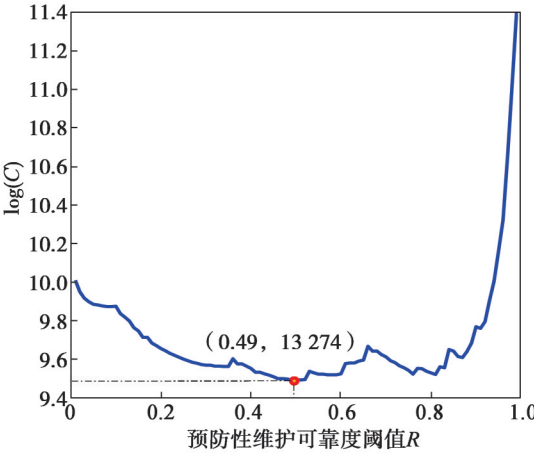


图3 非换件修PM策略的优化结果

Fig. 3 Optimization results of PM strategy based on non-replacement repair

分析表2可知：

① 基于换件修PM策略的PM可靠度阈值 R 的优化结果高于非换件修PM策略，且换件修的维修总成本为10 324元，比非换件修的维修总成本降低了22.2%，这说明换件修PM策略相比于非换件修PM策略不仅可使动车组设备保持更高的可靠度水平，而且可以降低动车组设备的维修总成本。换件修PM策略的故障修复成本低于非换件修PM策略，且其停机损失为0，故尽管

换件修PM策略的PM成本高于非换件修PM策略，但是其维修总成本仍低于非换件修PM策略。

② 在动车组设备一个寿命周期内，换件修PM策略对设备执行了7次预防性维修，其中高级维修1次，初级维修6次，而非换件修PM策略对设备执行了3次预防性维修，且维修方式皆为初级维修。这导致换件修PM策略的预防性维修成本远高于非换件修PM策略。同时，由于换件修PM策略对设备在一个寿命周期

内执行了更多次的PM措施, 所以换件修PM策略的故障修复成本低于非换件修PM策略。

③在换件修PM策略下, 动车组设备到达预防性维修时机, 会立即为其更换一个性能状态良好的相同设备, 从而动车组设备在执行预防性维修措施期间, 动车组仍可继续运行, 因此换件修PM策略相比非换件修PM策略可大幅降低动车组列车的停机损失。

5 结论

本文以动车组关键设备为研究对象, 对基于换件修的动车组PM策略进行建模分析。得出以下结论:

①基于换件修的动车组关键设备PM策略可较大幅度降低设备在一个寿命周期内的维修总成本, 并可以使设备保持更高的可靠度水平。

②换件修PM策略会导致较高的预防性维修成本, 但是由于其预防性维修执行得更为频繁, 使其故障维修成本较非换件修PM策略大幅降低, 且由于换件修PM策略相对于非换件修PM策略不会导致设备的停机损失, 所以换件修PM策略能更好地满足动车组维修的经济性需求。

参考文献:

- [1] 张卫华, 李权福, 宋冬利. 关于铁路机车车辆健康管理与健康状态修的思考[J]. 中国机械工程, 2021, 32(4): 379-389.
ZHANG Weihua, LI Quanfu, SONG Dongli. Thoughts on health management and condition-based maintenance of rolling stocks[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(4): 379-389.
- [2] 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.
- [3] 李杰. 基于RCM的CRH5G型高寒动车组维修策略研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020.
LI Jie. Research on maintenance strategy of CRH5G alpine EMU based on RCM[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020.
- [4] 熊律, 王红. 风险视角下的动车组部件多级非完美维修策略[J]. 中国机械工程, 2021, 32(4): 399-406.
XIONG Lv, WANG Hong. Multi-level imperfect maintenance strategy for EMU components from perspective of failure risks[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(4): 399-406.
- [5] 刘琛, 陈民武, 宋雅琳, 等. 高速铁路接触网系统风险评估与维修计划优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(2): 205-213.
LIU Chen, CHEN Minwu, SONG Yalin, et al. Research on optimization of maintenance plan for high-speed railway catenary system based on risk assessment[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(2): 205-213.
- [6] 杨国军, 王红, 何勇, 等. 故障及经济相关下动车组系统动态成组维护策略[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 31-37.
YANG Guojun, WANG Hong, HE Yong, et al. Dynamic group maintenance strategy of EMU system under failure and economic dependence[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(1): 31-37.
- [7] 王红, 熊律, 何勇, 等. 考虑故障风险的动车组部件机会维修优化策略[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 79-85.
WANG Hong, XIONG Lv, HE Yong, et al. Optimization of opportunistic maintenance for electric multiple unit component considering failure risk[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 79-85.
- [8] 赵泽平, 姚建伟, 张可新. 基于可靠性理论制定动车组子系统最佳预防维修周期的方法研究[J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(4): 85-89.
ZHAO Zeping, YAO Jianwei, ZHANG Kexin. Study of method to calculate the best preventive maintenance period for EMU's subsystem based on reliability theory[J]. Railway Locomotive & Car, 2014, 34(4): 85-89.
- [9] 宗刚, 张超, 刘文芝. 网络视角下高速列车部件维修关系网络复杂性研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 105-108.
ZONG Gang, ZHANG Chao, LIU Wenzhi. Study on complexities in relational network of component maintenance for high-speed train in network perspective[J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 105-108.
- [10] 焦凤川, 王斌杰. 动车组运用与维护[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2012: 74-83.
JIAO Fengchuan, WANG Binjie. Operation and maintenance of EMU[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2012: 74-83.
- [11] 王红, 熊律, 杜维鑫, 等. 考虑故障风险的动车组部件预防性维护优化建模[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 123-129.
WANG Hong, XIONG Lv, DU Weixin, et al. Optimization of preventive maintenance for component of electric multiple unit with consideration of failure risk[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 123-129.
- [12] LIN D M, ZUO M J, YAM R C M. Sequential imperfect preventive maintenance models with two categories of failure modes[J]. Naval Research Logistics, 2001, 48(2): 172-183.
- [13] 刘志龙, 王红, 杜维鑫, 等. 基于效费比的地铁车辆设备预防性维护决策优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(1): 146-151.
LIU Zhilong, WANG Hong, DU Weixin, et al. Preventive maintenance decision optimization for metro vehicle equipment based on cost-effectiveness[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(1): 146-151.