

# 双目标优化的动车组单部件预防性维护策略

佟景泉<sup>1</sup>, 强生杰<sup>2</sup>, 何雨畅<sup>3</sup>, 卢艳丽<sup>1</sup>

(1. 广东交通职业技术学院 轨道交通学院, 广东 广州 510650; 2. 华东交通大学 交通运输工程学院, 江西 南昌 330013;  
3. 中国铁路武汉局集团有限公司, 湖北 武汉 430061)

**摘要:** 为研究部件维护难易程度差异对模型维护成本和可用度的影响, 以动车组某机械部件为研究对象, 部件可靠度阈值为决策变量, 采取两参数威布尔分布描述部件故障率演化规律。结合我国现行动车组多级修程修制, 建立了双目标优化的动车组单部件预防性维护策略。在维护方式上实施两级非完美维护, 引入效费比的概念判别部件每次维护方式的选取。综合考虑部件故障部位检测难易程度、部件安装位置、部件拆卸难易程度、部件复杂度这4方面因素, 采取层次分析法量化部件维护难易程度, 研究其对维护成本和可用度的影响。算例分析表明: 考虑维护难易程度的维护模型能够有效降低维护成本和提升可用度, 为动车组维护策略的制定提供了理论参考。

**关键词:** 动车组; 维护难易程度; 决策变量; 两级非完美; 效费比

**中图分类号:** U 266.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-5581(2025)02-0346-05

## Preventive maintenance strategy for single component of electric multiple units with bi-objective optimization

TONG Jingquan<sup>1</sup>, QIANG Shengjie<sup>2</sup>, HE Yuchang<sup>3</sup>, LU Yanli<sup>1</sup>

(1. School of Rail Transit, Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China;  
2. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China;  
3. China Railway Wuhan Group Co., Ltd., Wuhan 430061, Hubei, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of maintenance difficulty degree of component on the maintenance cost and availability of the model. Taking a mechanical component of electric multiple unit (EMU) as the research object, and a component reliability threshold as the decision variable, the two-parameter Weibull distribution is adopted to describe the evolution law of component failure rate, combined with the existing fixed period multi-level imperfect maintenance rule of EMU in China, a preventive maintenance strategy for single component of EMU with bi-objective optimization is established. Bi-level imperfect maintenance is implemented in the maintenance mode and the concept of efficiency-cost ratio is introduced to discriminate the selection of each maintenance method of the component. Considering four factors, the difficulty of detecting parts, the location of parts, the difficulty of disassembling parts and the complexity of parts. Analytic hierarchy process (AHP) is adopted to quantify the maintenance difficulty degree and to study impact on the cost and availability of maintenance. The analysis shows that the maintenance model considering the maintenance difficulty can effectively reduce the maintenance cost and improve the availability, which provides a theoretical reference for the development of the maintenance strategy of EMU.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(72001081); 广东省科技创新战略专项资金资助项目(pdjh2024b571); 广东交通职业技术学院校级科研资助项目(GDCP-ZX-2021-002-N1)

作者简介: 佟景泉(1984—), 男, 讲师, 硕士。E-mail: 571117810@qq.com

**Key words:** electric multiple unit; maintenance difficulty degree; decision variable; bi-level imperfect; efficiency-cost ratio

近年来,我国动车组保有量与高铁运营里程迅速提升,截至2022年底,全国高铁营业里程达到4.2万 km。随着动车组运用规模的不断扩大,动车组维护市场也具有较大空间,制定合理的维护策略对降低维护成本和提高运用效率具有显著作用。

曹蕾等<sup>[1]</sup>采取威布尔分布描述 k-out-of-n 系统的部件层故障率演化规律,以维护成本率最小化为目标,求解各部件预防性维护周期。李聪波等<sup>[2]</sup>为实现机床设备维护和车间调度方案的相互协调,基于威布尔分布确定设备故障率演化规律。周炳海等<sup>[3]</sup>采取部件可靠性判别部件维护时机,以总成本最优为目标建立多部件生产系统预防性维护模型。赵斐等<sup>[4]</sup>对退化至预定可靠度阈值的系统采取不完美维护,以确定系统维护周期。柳剑等<sup>[5]</sup>以目前农机装备故障或退化数据为依据,分析系统退化状态与装备任务可靠性之间的关联影响。上述文献基于部件故障率演化规律和可靠度阈值优化维护决策模型,取得了较好的效果。

现有维护策略优化大多将维护活动视为降低部件故障率水平的手段,忽略了维护活动自身对维护策略制定的影响。动车组列车作为多学科交融的集成系统,各部件的材料、结构、功能差异显著,维护时难易程度相差较大。张成光<sup>[6]</sup>考虑维护难易程度和资源配置情况对维护模型选择的影响。孙妍婷<sup>[7]</sup>将维护难易程度视为评判设备重要度的影响因素。齐彦昆等<sup>[8]</sup>考虑不同部件维护难易程度差异对维护成本的影响,建立了两级非完美维护方式的多部件系统预防性维护模型。上述文献的研究大多关注于优化维护成本,其对追求经济效益与运用效率的铁路运维而言不够全面。随着维护难度的上升,部件维护所需的时间也在增加,进而影响到部件的可用度。

轮对直接承载车辆对钢轨传递的重量,通过轮轨作用力,保障列车的直行和回转运行。随着动车组运行速度的提升,轮对与轨道相互作用力逐渐增大,进而易产生车轮多边形化、轮对剥离、擦伤、扁疤等故障。王少敏<sup>[9]</sup>通过分析动车组轮对维修故障数据,确定轮对故障分布规律,进一步构建基于威布尔分布的故障率演化模型。合理地制定轮对维护策略对降低维护成本和提升可用度具有重要作用。本文以部件维护成本和可用度为优化目标,

以可靠度为约束条件,结合我国动车组现行的多级别修程修制,建立两级非完美维护模型。在此基础上,综合考虑部件故障部位检测难易程度、部件安装位置、部件拆卸难易程度、部件复杂度这4方面因素,运用层次分析法量化维护难易程度,进而研究其对维护成本和可用度的影响。

## 1 维护模型的建立

### 1.1 故障率演化规律建模

为保障部件在运行过程中具有良好的服役状态,预设置可靠度阈值  $R_{\min}$ , 要求部件全生命周期内的可靠度均高于  $R_{\min}$ , 使部件发生故障的风险可控,

$$R_i = \exp\left[-\int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt\right] \geq R_{\min} \quad (1)$$

式中:  $T_i$  为部件第  $i-1$  至  $i$  次预防性维护的时间间隔;  $\lambda_i(t)$  为部件第  $i-1$  至  $i$  次预防性维护间隔的故障率函数;  $i$  的取值范围为  $1 \leq i \leq n$ ,  $n$  为部件在维护策略规划期内的维护次数;  $t$  为本次运行区间的任意时刻。

为描述部件的故障率随服役时间延长逐渐增加的实际情况与修复效果随维护次数增多而逐渐减弱的特征,采取混合故障率演化模型表示部件故障率的演化规律,

$$\lambda_{i+1}(t) = b_i \lambda_i(t + a_i T_i) \quad (2)$$

式中:  $a_i$  为役龄递减因子;  $b_i$  为故障率递增因子;  $i$  为维护次数。

### 1.2 维护方式判别方法

基于我国动车组多级别维护体系,将采取初级维护和高级维护这2种维护方式。受维护成本、维护时间等因素的影响,高级维护对部件故障率的修复效果要明显优于初级维护,但维护过程中消耗的各类资源,如维护成本和维护时间等,也显著多于初级维护。为便于部件维护方式的选取,引入维护方式选择因子  $A_i$ :

$$A_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (3)$$

当  $A_i = 0$  时,部件采取初级维护;  $A_i = 1$  时,部件采取高级维护。维护方式选择因子  $A_i$  决定了维护时部件故障率函数的役龄递减因子和故障率递增因子,分别为

$$a_i = (1 - A_i) a_i^{\text{pr}} + A_i a_i^{\text{su}} \quad (4)$$

$$b_i = (1 - A_i) b_i^{\text{pr}} + A_i b_i^{\text{su}} \quad (5)$$

式中： $a_i^{\text{pr}}$ 、 $a_i^{\text{su}}$ 分别为初级维护与高级维护的役龄递减因子； $b_i^{\text{pr}}$ 、 $b_i^{\text{su}}$ 分别为初级维护与高级维护的故障率递增因子。

为判别部件维护方式，采取效费比的概念进行维护方式决策，效费比主要受维护成本和故障率改善量的影响，

$$\begin{cases} \lambda_i^- = \lambda_i(T_i) = b_{i-1} \lambda_{i-1}(T_i + a_{i-1} T_{i-1}) \\ \lambda_i^+ = \lambda_{i+1}(0) = b_i \lambda_i(a_i T_i) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\lambda_i^-$ 、 $\lambda_i^+$ 分别为维护前部件故障率水平与维护后部件故障率水平。

初级维护和高级维护的效费比分别为

$$\varphi_i^{\text{pr}}(t) = \frac{c_{\text{pr}}}{\lambda_i^- - \lambda_i^+} = \frac{c_{\text{pr}}}{b_{i-1} \lambda_{i-1}(T_i + a_{i-1} T_{i-1}) - b_i \lambda_i(a_i T_i)} \quad (7)$$

$$\varphi_i^{\text{su}}(t) = \frac{c_{\text{su}}}{\lambda_i^- - \lambda_i^+} = \frac{c_{\text{su}}}{b_{i-1} \lambda_{i-1}(T_i + a_{i-1} T_{i-1}) - b_i \lambda_i(a_i T_i)} \quad (8)$$

式中： $c_{\text{pr}}$ 、 $c_{\text{su}}$ 分别为初级维护成本与高级维护成本。

维护方式选择因子 $A_i$ 可进一步表示为

$$A_i = \begin{cases} 0, & \varphi_i^{\text{su}} \geq \varphi_i^{\text{pr}} \\ 1, & \varphi_i^{\text{su}} < \varphi_i^{\text{pr}} \end{cases} \quad (9)$$

### 1.3 维护难易程度评价函数

受部件材料、结构、功能等方面的影响，维护时的难易程度具有明显差异。为量化评价动车组部件的维护难易程度，采取层次分析法进行建模。关于动车组部件维护难易度的影响因素，主要考虑以下4个因素<sup>[9-11]</sup>：

- (1) 部件的故障部位检测难易程度；
- (2) 部件的安装位置；
- (3) 部件的拆卸难易程度；
- (4) 部件的复杂度。

为便于部件维护难易程度的量化，引入维护难易程度因子 $\gamma$ 。上述4种因素分别按检测难度、安装位置、拆卸难易程度、复杂度在1~10区间进行评分。部件维护难易度的影响因素采取层次分析法进行求解。

首先，构造各影响因素之间的判别矩阵：

$$E = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mm} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中： $u_{m_1 m_2}$ 为第 $m_1$ 行影响因素相比较于第 $m_2$ 列影响因素的比值。

其次，计算判别矩阵 $E$ 的最大特征根，代入齐次线性方程组，求解最大特征根对应的特征向量，归一化处理后即为对应矩阵权重值 $\alpha_j$ 。

维护难易程度因子可表示为

$$\gamma = \sum_{j=1}^m p_j \alpha_j \quad (11)$$

式中： $\gamma$ 为维护难易程度因子； $p_j$ 为第 $j$ 个影响因素的评分； $\alpha_j$ 为第 $j$ 个影响因素的权重值。

## 2 目标函数

### 2.1 维护成本建模

(1) 预防性维护成本：预防性维护成本是指动车组根据修程修制在预定维护时机进行维护活动所需的成本，可表示为

$$C_p = \sum_{i=1}^n [(1 - A_i) c_{\text{pr}} + A_i c_{\text{su}}] \quad (12)$$

式中： $c_{\text{pr}}$ 为初级维护成本； $c_{\text{su}}$ 为高级维护成本。

(2) 故障维护成本：故障维护成本是指动车组在运行过程中发生随机性故障进行临时维护所需的成本。考虑到部件的维护难易程度，可表示为

$$C_r = \gamma c_r \sum_{i=1}^n \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \quad (13)$$

式中： $c_r$ 为单位故障维护成本； $\sum_{i=1}^n \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt$ 为部件小修次数。

综上所述，在维护策略规划期内，部件的维护总成本为

$$C = C_p + C_r \quad (14)$$

### 2.2 可用度建模

(1) 预防性维护时间：预防性维护时间是指动车组根据修程修制在预定维护时机进行维护活动所需的时间，可表示为

$$T_p = \sum_{i=1}^n [(1 - A_i) t_{\text{pr}} + A_i t_{\text{su}}] \quad (15)$$

式中： $t_{\text{pr}}$ 、 $t_{\text{su}}$ 分别为初级维护与高级维护所需的时间。

(2) 故障维护时间：故障维护时间是指动车组在运行过程中发生随机性故障进行临时维护所需的时间。考虑到部件的维护难易程度，可表示为

$$T_r = \gamma t_r \sum_{i=1}^n \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \quad (16)$$

式中： $t_r$ 为单位故障维护时间。

维护总时间由预防性维护时间和故障维护时间组成,可表示为

$$T = T_p + T_r \tag{17}$$

综上所述,在维护策略规划期内,部件的可用度为

$$A = \frac{T_{\text{plan}} - T}{T_{\text{plan}}} \tag{18}$$

式中: $T_{\text{plan}}$ 为部件维护策略规划期。

### 3 算例分析

以动车组轮对为研究对象,引用文献[9]对轮对历史故障数据进行拟合研究,进一步优化部件维护策略。威布尔分布广泛应用于机械电子设备的故障率描述,动车组轮对作为机械部件,其故障率亦服从威布尔分布,其表达式为

$$\lambda_i = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t_i}{\eta} \right)^{\beta-1} \tag{19}$$

式中: $\beta$ 、 $\eta$ 分别为威布尔分布的特征参数与尺寸参数,取 $\beta = 3.2$ , $\eta = 149$ 。

部件的其他维护参数值选取见表1。在描述高级维护优于初级维护部件修复效果的同时,考虑到随着维护次数的增加,修复效果逐渐减弱的实际情况,设定初级维护和高级维护的故障率递增因子分别为 $b_i^{\text{pr}} = \frac{12i+1}{8i+1}$ , $b_i^{\text{su}} = \frac{12i+1}{11i+1}$ ;初级维护和高级维护的役龄递减因子分别为 $a_i^{\text{pr}} = \frac{i}{3i+7}$ , $a_i^{\text{su}} = \frac{i}{5i+7}$ 。

表1 部件维护参数

Tab.1 Component maintenance parameters			
参数	数值	参数	数值
初级维护成本 $c_{\text{pr}}/\text{元}$	550	初级维护时间 $t_{\text{pr}}/\text{d}$	1
高级维护成本 $c_{\text{su}}/\text{元}$	950	高级维护时间 $t_{\text{su}}/\text{d}$	3
单位故障成本 $c_r/\text{元}$	2150	单位故障时间 $t_r/\text{d}$	2

专家对部件维护难易程度各影响因素之间的判别基于式(10)可获得矩阵:

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1/2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 1/3 & 2/3 \\ 2 & 3 & 1 & 6 \\ 1/3 & 3/2 & 1/6 & 1 \end{pmatrix} \tag{20}$$

求解上述矩阵的最大特征根,代入齐次线性方程组,求解最大特征根对应的特征向量,即为各影响因素的权重值。对各影响因素进行评分,进一步代入式(11),可获得维护难易程度因子 $\gamma = 3.4618$ 。以可靠度阈值 $R_{\text{min}}$ 为决策变量,部件维护成本和可用度为优化目标,在 $0 \leq R_{\text{min}} \leq 0.97$ 决策范围内,以0.01为搜索步长,分别获取部件的维护成本(图1)与可用度随可靠度阈值 $R_{\text{min}}$ 变化曲线(图2),优化结果见表2。

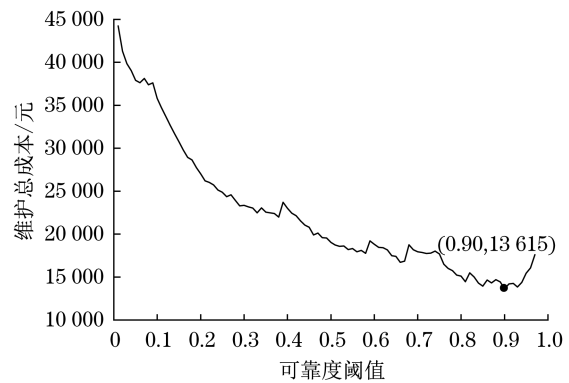


图1 不同可靠度阈值下维护总成本

Fig.1 Total maintenance cost under different reliability thresholds

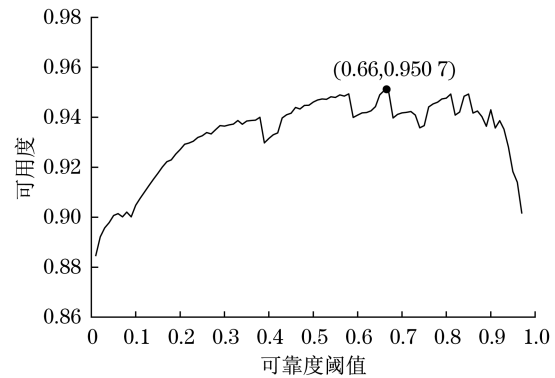


图2 不同可靠度阈值下可用度

Fig.2 Availability under different reliability thresholds

表2 优化结果

Tab.2 Optimization results

最优目标	$R_{\text{min}}$	维护间隔时间序列/d	维护级别序列	$C/\text{元}$	$C_p/\text{元}$	$C_r/\text{元}$	$A$	$T_p/\text{d}$	$T_r/\text{d}$	故障小修次数
$C$	0.90	74-136-184-219-243-258-294-323-342	0-0-0-0-1-0-0-1	13 615	6 300	7 315	0.943 0	14.0	6.8	0.98
$A$	0.66	113-208-282-336	0-0-0-0	16 714	2 750	13 964	0.950 7	5.0	13.0	1.87

结合图1、图2和表2分析可知:当 $R_{\min} = 0.90$ 时,部件的维护总成本最优;当 $R_{\min} = 0.66$ 时,部件的可用度最优。进一步分析可知,当可靠度阈值选取较低时,允许部件上线服役时间较长,预防性维护次数较少,部件故障小修次数较多,进而导致故障维护成本较高和故障维护时间较长,使维护策略的维护总成本偏高,且可用度偏低。当可靠度阈值选取过高时,允许部件上线服役时间较短,预防性维护次数较多,部件故障小修次数较少,进而导致预防性维护成本较高和预防性维护时间较长,使维护策略的维护总成本偏高,且可用度偏低。

通过分析维护级别序列可知,维护前期大多采取初级维护,而在维护后期部件故障率水平较高,适当采取高级维护具有更好的修复效果。为进一步分析维护难易程度 $\gamma$ 对维护成本和维护时间的影响,在基于表2优化可靠度阈值的前提下,选取不同 $\gamma$ 值进行分析,优化结果见表3、表4。

表3 不同 $\gamma$ 值下维护成本组成变化

Tab.3 Changes in maintenance cost composition under different values

方案	$\gamma$	$C_r/\text{元}$	$C/\text{元}$	$C_r$ 在 $C$ 中占比/%
1	4.461 8	9 429	15 729	59.95
2	3.461 8	7 315	13 615	53.73
3	2.461 8	5 202	11 502	45.23

表4 不同 $\gamma$ 值下维护时间组成变化

Tab.4 Changes in maintenance time composition under different values

方案	$\gamma$	$T_r/\text{d}$	$T/\text{d}$	$T_r$ 在 $T_p+T_r$ 中占比/%
1	4.461 8	16.74	21.74	77.00
2	3.461 8	12.99	17.99	72.21
3	2.461 8	9.24	14.24	64.88

分析表3和表4可知,相比于方案2和方案3,方案1的 $C_r$ 和 $T_r$ 明显更高,且 $C_r$ 和 $T_r$ 分别在 $C$ 和 $A$ 中占比更突出。这是由于维护难易程度因子对部件的故障维护成本和故障维护时间具有直接显著影响,且故障维护成本和故障维护时间分别在维护总成本和维护总时间中占据较大比例,因此对维护难易程度因子的研究对部件的维护总成本和可用度优化具有显著作用。

不同 $\gamma$ 值部件的 $R_{\min}$ - $C$ 和 $R_{\min}$ - $A$ 曲线分别如图3、图4所示。随着 $R_{\min}$ 取值的逐渐增大,不同 $\gamma$

值的维护总成本和可用度差距逐渐减小。这是由于 $R_{\min}$ 取值较小时,部件故障次数较多,导致 $\gamma$ 取值较大方案的 $C_r$ 和 $T_r$ 较高;而随着 $R_{\min}$ 取值逐渐增大,部件故障次数逐渐减少,预防性维护成本和预防性维护时间分别在维护总成本和维护总时间中逐渐突出,使得不同 $\gamma$ 值的维护总成本和可用度差距逐渐减小。

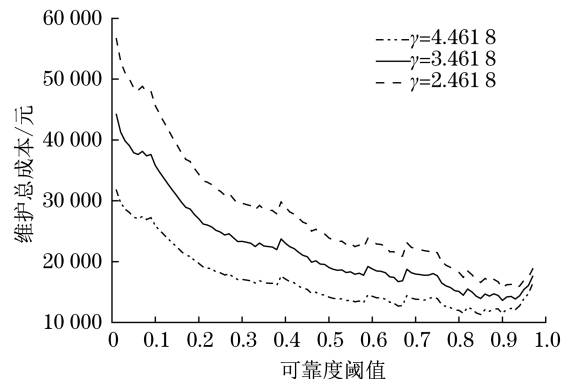


图3 不同 $\gamma$ 下 $R_{\min}$ - $C$ 曲线

Fig.3  $R_{\min}$ - $C$  curves under different  $\gamma$

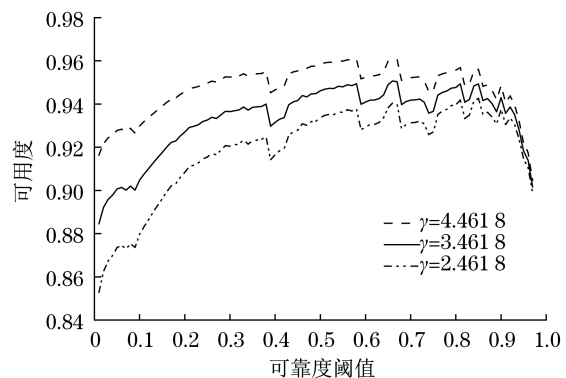


图4 不同 $\gamma$ 下 $R_{\min}$ - $A$ 曲线

Fig.4  $R_{\min}$ - $A$  curves under different  $\gamma$

## 4 结论

(1) 本文采取两级非完美的维护方式,部件服役前期采取初级维护即可满足可靠度要求,而服役后期故障率水平较高,需采取高级维护保障轮对的可靠度水平,贴合维护现场情况。

(2) 维护难易程度较高部件的可靠度阈值变动对维护成本和可靠度的影响更为突出,制定动车组维护策略时应更关注此类部件,适当调整可靠度阈值,更好地满足运营方和维护方对维护成本和可用度的差异化需求。

(下转第355页)

- 动振动控制研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5): 116-122.
- [2] 陈林,王亚南,程昊,等. 基于空间稀疏先验的冲击载荷识别频域非凸稀疏正则化方法[J]. 振动与冲击, 2024, 43(14): 148-155, 188.
- [3] 周盼,张权,率志君,等. 动载荷识别时域方法的研究现状与发展趋势[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(1): 6-11.
- [4] 殷红,石咏荷,彭珍瑞,等. 修正-联合正则化的冲击载荷识别与响应重构[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(5): 1029-1039.
- [5] 刘军江,乔百杰,王亚南,等. 基于空间-频域联合稀疏的复合材料结构冲击载荷识别[J]. 机械工程学报, 2024, 60(11): 85-94.
- [6] 何文博,许步锋,冯振宇,等. 利用冗余扩展余弦字典的复杂动载荷识别研究[J]. 振动工程学报, 2024, 37(3): 512-521.
- [7] 乔百杰,陈雪峰,刘金鑫,等. 机械结构冲击载荷稀疏识别方法研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 81-89.
- [8] 张景,张方,姜金辉. 采用分离变量法的载荷位置识别技术研究[J]. 振动工程学报, 2021, 34(3): 584-591.
- [9] 张方,朱德懋. 基于广义正交域的一种动载荷识别方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1996, 28(6): 755-760.
- [10] GUNAWAN F E, HOMMA H, MORISAWA Y. Impact force estimation by quadratic spline approximation[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2008, 2(8): 1092-1103.
- [11] HU N, FUKUNAGA H, MATSUMOTO S, et al. An efficient approach for identifying impact force using embedded piezoelectric sensors[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34: 1258-1271.
- [12] 邱雨晴,王磊,王晓宇,等. 基于改进函数拟合法的冲击载荷识别研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(3): 157-166.
- [13] QIAO B, ZHANG X, LUO X, et al. A force identification method using cubic B-spline scaling functions [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 337: 28-44.

## (上接第 350 页)

### 参考文献:

- [1] 曹蕾,安向昕,夏唐斌,等. k-out-of-n 系统机会维护与库存控制多层次优化策略[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(3): 285-296.
- [2] 李聪波,王睿,寇阳,等. 考虑设备预维护的柔性作业车间调度节能优化方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 220-230.
- [3] 周炳海,侍雨,张于贤. 考虑质量的退化生产系统可用性中心维护决策[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 814-820.
- [4] 赵斐,李鑫,郭明. 考虑不完美维护的视情维护和备件订购联合策略优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(10): 1413-1421.
- [5] 柳剑,王世友,李巧菲. 基于任务多样性的农机装备维护策略研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S2): 69-74, 218.
- [6] 张成光. 考虑多种维修模式的城市轨道交通关键设备维护检修技术研[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- [7] 孙妍婷. 动车组关键零部件维修决策模型的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
- [8] 齐彦昆,王红,何勇,等. 考虑维修难易度的动车组预防性维护策略[J]. 兰州交通大学学报, 2020, 39(6): 73-77.
- [9] 王少敏. 动车组转向架关键零部件的故障规律及维护策略研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
- [10] 薛朝改,谷雨,曹武军,等. 多部件重要度系统机会维修策略的优化[J]. 机械设计与制造, 2022(2): 116-119, 125.
- [11] 林柏梁,沈姚铭,王忠凯,等. 带资金预算约束的动车组高级修计划优化研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(9): 1-8.