

高速公路机电设备动态运维评价及 预测性维护

张 毅¹, 陈莎雯¹, 陈 艳¹, 范翔宇¹, 王思祺², 吴 欢², 焦鹏飞³

(1. 浙江高信技术股份有限公司, 杭州 311199; 2. 吉林大学 交通学院, 长春 130022; 3. 辽宁大通公路工程有限
公司, 沈阳 110000)

摘 要: 针对高速公路机电设备在全寿命周期内运维成本高、策略缺乏科学依据的问题, 提出了一种基于质量评价结果的经济性运维措施选择方法。首先, 采用模糊综合评价法对设备的质量状况进行实时评价; 其次, 基于此, 对设备使用总成本进行动态计算, 通过成本对比选取最经济的维修时间点采取不同程度的运维养护措施; 最后, 运用浙江温州、丽水的隧道、主线、收费站等多场景数据, 通过实例分析, 验证了本文方法的可行性和有效性。

关键词: 交通运输规划与管理; 高速公路; 模糊综合评价; 全生命周期成本模型

中图分类号: U49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)01-0170-13

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240711

Dynamic operation and maintenance evaluation and predictive maintenance of mechanical and electrical equipment on highways

ZHANG Yi¹, CHEN Sha-wen¹, CHEN Yan¹, FAN Xiang-yu¹, WANG Si-qi², WU Huan², JIAO Peng-fei³
(1. Zhejiang High-speed Information Engineering Technology Co., Ltd., Hangzhou 311199, China; 2. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. Liaoning Datong Highway Engineering Corporation, Shenyang 110000, China)

Abstract: Aiming at the problems of high operation and maintenance costs and the lack of scientific basis for strategies during the whole life cycle of freeway electromechanical equipment, an economic operation and maintenance measure selection method based on quality evaluation results is proposed. Firstly, the fuzzy comprehensive evaluation method is used to evaluate the quality status of the equipment in real-time. Secondly, based on this, the total cost of equipment usage is dynamically calculated, and then the most economical maintenance time point to implement different degrees of operation and maintenance measures is selected through cost comparison. Finally, the data from the Cihuling Tunnel in Wenzhou, Zhejiang Province was selected as an example to verify the feasibility and validity of this method.

Key words: transportation planning and management; freeways; fuzzy comprehensive evaluation; stands for life-cycle cost model

收稿日期: 2024-06-26.

基金项目: 辽宁省交通科技项目(202302).

作者简介: 张毅(1979-), 男, 教授级高级工程师, 硕士. 研究方向: 交通运输规划. E-mail: zhangyi@zeiet.com

通信作者: 陈莎雯(1997-), 女, 工程师, 硕士. 研究方向: 交通运输规划. E-mail: chenshawen@zeiet.com

0 引言

高速公路作为交通系统关键的组成部分,因其封闭性相对较强且适于中长距离大运量运输的性质,在道路运输方面发挥着重要作用。2020年交通运输部发布了《公路工程质量检验评定标准第二册机电工程》(以下简称《标准》),修订后的《标准》将极大促进公路机电工程质量的提高,提升公路通行效率及安全水平,更好地服务国民经济的发展。2018年,交通运输部发布通知,对《收费公路管理条例(修订草案)》公开征求意见,原因之一是现行条例无法适应高速公路长期养护管理的客观需要。由此可见,保障高速公路通行安全、顺畅,提升运营效益是高速公路运行管控的核心目标,而合理进行高速公路设施设备的养护管理,控制养护、维修和更换费用是其中的重要一环。目前在高速公路机电设备运维管控的实际工作中多存在“以换代修”的情况,不利于节约养护成本、提升运营效益。

由于机电系统的各项设备运行状况受运行环境和后期维护效果的影响较大,有不少学者从日常维护角度入手探讨如何降低设备使用成本。例如,孙晓宁等^[1-3]采用智慧化检测设备及物联网技术等方法,对设备进行动态管理,同时也记录设备运行数据及动态信息,以此来减少设备日常巡检养护的人工费用,提高经济效益^[4]。但这只从局部的角度考虑了设备使用成本,全寿命周期内的总成本更能反映设备使用过程中的所有花费。

对机电设备全寿命周期成本的研究主要采用LCC(Life cycle cost)模型,通过分解全寿命周期内不同阶段对应的不同成本项,计算各阶段的设备成本,从而寻求最经济的运维方案^[5]。如钱宇等^[6]对生命周期成本的构成及分析步骤进行了系统阐述。徐岳等^[7]对新建的桥梁和加固后的桥梁在整个工程中的生命周期造价成本进行了横向对比。陈国锋等^[8]对标准地铁车辆的全寿命周期成本进行分解,分析其全寿命周期的成本构成和影响因素,并根据分析结果明确了降本方向。以上研究均是在全寿命周期的每个或部分阶段只采样一两次进行成本解析和运维方案比选,可选的方案较为固定且有限,是一种粗粒度的、静态的分析评价,而没有对全寿命周期内的各个阶段进行动态采样和细粒度的成本计算。

综上所述,为了保证在设备能正常使用的前

提下,降低全寿命周期内的运营成本,需要结合设备实时质量监测与设备全寿命周期成本计算两方面,寻找设备最经济的运维时间节点及相应的措施,以此来提高设备的产出效益。因此,本文提出基于设备全寿命周期实时质量评价的成本计算和经济评价的方法体系,在兼顾设备质量的同时达到设备全寿命周期总成本最低。本文聚焦于高速公路机电设备,运用浙江温州、丽水的隧道、主线、收费站等多场景数据,首先选用模糊综合评价方法,根据评价设备选取运行类、维护类和故障类3类指标,通过层次分析法得到各指标的权重后构建隶属度函数,建立高速公路关键机电设备的质质量评价体系。在此基础上,建立LCC模型,结合实际数据情况,对高速公路关键机电设备全生命周期实时阶段的成本进行计算,通过成本对比寻找经济的最优运维时间,为高速公路机电设备管理提供参考。

1 基于模糊综合评价法的机电设备质量评价

本文的基本思路如图1所示。

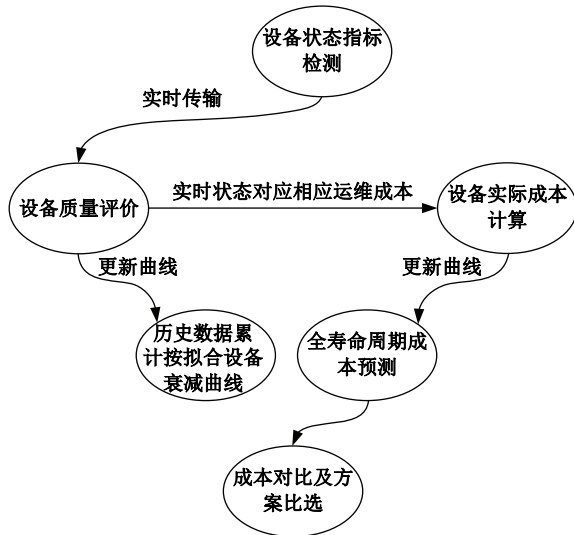


图1 基于全寿命周期质量评估的设备动态经济评价流程
Fig.1 Dynamic economic evaluation process of equipment based on whole life cycle quality assessment

1.1 评价体系建立

1.1.1 评价指标选取

鉴于机电设备运行状态评价这一问题的复杂性,在选取评价指标时,借助对交通行业专家、隧道运营管理人员和工程师的调查和对相关国家标准的查阅,确定机电设备运行状态的评价应从机

电设备的运行状况、设备维护管理和设备的故障情况 3 个方面来建立评价指标体系。其中,设备的运行状况类指标是评价设备质量最重要的指标,维护管理状况类指标是表征设备运维情况的重要指标,故障情况类指标是辅助维护管理类指标判断运维情况的指标^[9]。

第一层为评价目标:机电系统运行状况。第二层为 3 个方面:机电设备的运行状况、维护管理状况和故障情况。第三层为细化后的评价因素层,包含具体的指标。

1.1.2 评价指标取值

机电设备运行状态评价指标体系中定量指标与定性指标共存,具体进行单指标值的测算及评价时,应参照国家、行业制定的相关规范标准,如《公路工程质量检验评定标准》《公路网运行监测与服务暂行技术要求》《公路隧道养护技术规范》《公路隧道交通工程设计规范》等,将关于机电系统各方面的设计、施工、运营等标准、规范进行总结,以作为评价的参考,方便评价工作的进行。

(1)定量指标测评。定量指标(如电压、电流、故障率等)的测评应采用定量评价方法,以现场实测的数据为基础进行推算,再结合国家相关标准进行处理。

(2)定性指标测评。定性指标的测评由专家组结合国家相关标准与个人经验进行,在现场观察、查询历史运行记录的基础上,对要评价的指标给出合理的评分区间。具体实施定性指标的测算与评价时,指标打分采用集值统计法,由专家组在现场观测的基础上对其状况进行打分。对某一具体指标,由专家组结合个人专业经验,参考该指标的评分参考表,对要评价的指标进行打分。打分方法采用区间法,即每个专家用一个分值区间来评测某个指标,评分标准可参考表 1。

表 1 指标评分标准

Table 1 Criteria of indicator scoring

分类	非常健康	比较健康	中等	不太健康	非常不健康
等级	1	2	3	4	5
评分值区间	[90,100]	[80,90)	[60,80)	[30,60)	[0,30)

1.2 评价指标权重确定

确定权重方法有 3 种加权方法,包括客观加权、主观加权和组合加权。其中,主观加权法是一种研究者根据主观价值判断分配指标权重的方法。主观加权法中最具代表性的方法为层次分析

法,具体流程图如图 2 所示。

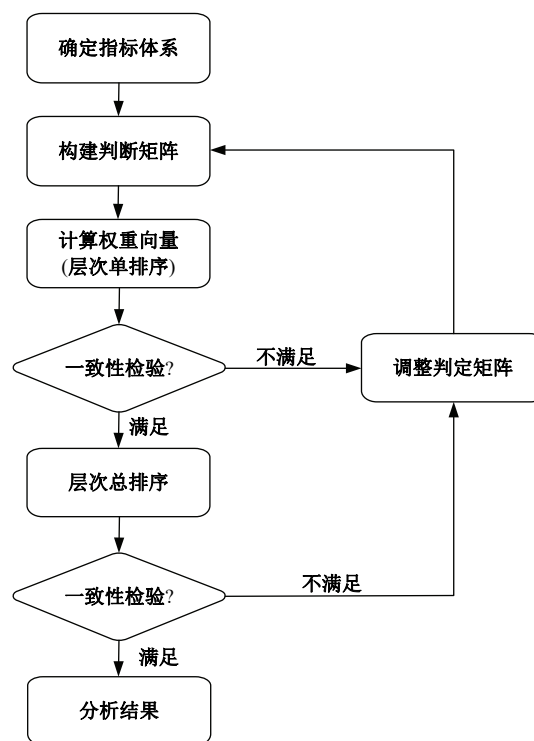


图 2 层次分析法流程图

Fig. 2 Flow chart of analytic hierarchy process

根据建立的评估指标体系每个级别中每个因素的组成,可以给每个因子赋予权重系数,在进行模糊综合评价时,权重就可以对最终的评价结果产生更大的影响,不同的权重就能够求得不同的结果,设定的权重为:

$$W = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} \quad (1)$$

$$B_i = \{u_{1i}, u_{2i}, \dots, u_{ni}\} \quad (2)$$

$$C_{ij} = \{u_{1ij}, u_{2ij}, \dots, u_{nij}\} \quad (3)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; n$ 为总的因素数。

通过比较每个评估元素并根据其重要性完成评级来提高准确度。 C_{ij} 为因素 i 与因素 j 重要性比较结果,按两两比较结果构成的矩阵称作判断矩阵。

构建完判断矩阵后还要完成一致性校验, n 阶一致阵的唯一非零特征根为 n , n 阶正互反阵 A 的最大特征根 $\lambda \geq n$, 当且仅当 $\lambda = n$ 时, A 才是一致矩阵。

用 $\lambda - n$ 可以衡量 A 的一致性,原因是 λ 连续的依赖为 a_{ij} , 表现为 λ 比 n 大的越多, A 的不一致性越严重;反之, λ 与 n 越接近,表明一致性越好。一致性指标用 CI 计算。被比较因素对上层某因

素影响作用的权向量用最大特征值对应的特征向量表明,其不一致程度越大,造成的判断误差越大。因而,可以用 $\lambda - n$ 数值的大小来衡量 A 的不一致程度。定义一致性指标,公式为:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (4)$$

$CI=0$,有完全的一致性; CI 接近于0,有满意的一致性; CI 越大,不一致性越严重。

对于 CI 的大小衡量,引入随机一致性指标 RI ,公式为:

$$RI = \frac{CI_1 + CI_2 + \dots + CI_n}{n} \quad (5)$$

式中:判断矩阵的阶数关系到随机一致性指标 RI ,通常情形下,矩阵阶数越多,随机一致性就会出现越多偏离的可能性。一般情况下,如果 $CR < 0.1$,就可以判定矩阵通过一致性检验,反之就说明不具有满意一致性,判定矩阵没有通过一致性检验。

在用求和法计算判定矩阵的最大特征根和相应的特征向量时,是依次沿递阶层次结构从上至下逐层计算,就可以计算得到指标层对应于最高层的相对重要性的排序值。计算过程为:

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^n \bar{w}_{ij} \quad (6)$$

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i} \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 。

根据式(6)(7),近似特征向量为:

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad (8)$$

计算最大特征根公式为:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i} \quad (9)$$

则第 k 层对第一层的组合权向量为:

$$W_{(k)} = w_{(k)} \cdot w_{(k-1)}, k=3, 4, \dots, s \quad (10)$$

则最下层(第 S 层)对最上层的缀组合权向量公式为:

$$W_{(S)} = w_{(s)} \cdot w_{(s-1)} \cdots w_{(3)} w_{(2)} \quad (11)$$

根据判断矩阵计算出机电设备中各项检测指标的权重,得到各层级指标的综合权重值。

1.3 设备质量评价

1.3.1 模糊综合评价法

高速公路机电设备系统是一个运行工况不确定的复杂系统,评价时需要考虑其中不能量化的部分,而模糊综合评价是一种在处理不确定性或

模糊性问题时常用的方法,它能够将不确定性因素量化,并将其考虑在评价或决策过程中,从而更全面地反映事物的真实情况,因此,本文选用模糊综合评价法进行质量评价^[10]。

仅从一个因素评估以确定评估对象对评估集 V 的隶属程度称为单因子模糊评估,然后,确定从单个因子获得评估对象对每个级别子集的隶属度,并获得模糊关系矩阵,公式为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: r_{ij} 为某个被评价指标隶属于模糊子集的隶属度; $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。

隶属度的计算公式如下:

(1)当实测指标值位于左端属于1级的隶属度为:

$$r_{i1} = \begin{cases} 1, x \leq x_1 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, x_1 < x < x_2 \\ 0, x \geq x_2 \end{cases} \quad (13)$$

(2)当实测指标值位于中间属于 j 级的隶属度为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, x \leq x_i \\ \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}, x_{i-1} < x < x_i \\ \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i}, x_i < x < x_{i+1} \\ 0, x \leq x_{i-1} \text{ 或 } x \geq x_{i+1} \end{cases} \quad (14)$$

(3)当实测指标值位于右端属于5级的隶属度为:

$$r_{i5} = \begin{cases} 1, x \geq x_n \\ \frac{x - x_{n-1}}{x_n - x_{n-1}}, x_{n-1} < x < x_n \\ 0, x \leq x_{n-1} \end{cases} \quad (15)$$

如果采用合适的合成算子将权重 W 与模糊关系矩阵 R 合成得到被评价对象的评价向量 B , R 中不同的行反映了被评价对象从不同的因素看对评价指标体系各等级子集的隶属程度,即综合评价向量 B ,则评价模型为:

$$B = W \cdot R = \begin{matrix} & \begin{matrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{matrix} \\ \begin{matrix} (w_1, w_2, \dots, w_n) \\ (b_1, b_2, \dots, b_m) \end{matrix} & \end{matrix} = \quad (16)$$

式中: b_j 为评估对象的模糊子集整体的隶属度。

1.3.2 建立模型

首先确定指标权重集 W 和评判矩阵 R , 然后才可以对评价模型进行构造, 公式为:

$$B = W \cdot R \quad (17)$$

或为:

$$(b_1, b_2, \dots, b_m)_{1 \times n} = (w_1, w_2, \dots, w_n)_{1 \times n} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (18)$$

在各自权重系数 w_i 的调控下, n 个指标因素与 m 个评价等级融合, 然后得到综合的评判集 B 。 b_i 表明 m 个指标因子符合相对应的权重 w_i , 通过综合评判使整个母系统评估为 i 等级的数值。

1.3.3 模糊评判

根据公路检测系统的层次构架, 评价系统可以分为 3 层(目标层、决策层和方案层), 模糊评价方法运用多层次方法。

(1) 一级评价, 公式为:

$$B_i = W_i \cdot R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}) \quad (19)$$

式中: i 为准则层第 i 项指标; n 为准则层第 i 项指标下所有子指标个数。

(2) 二级评价, 公式为:

$$B = W \cdot R = W \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

该系统评价集建立在 5 种等级的评价方法之上, 即评价集 $V = \{\text{非常不健康 } v_1, \text{ 不太健康 } v_2, \text{ 中等 } v_3, \text{ 比较健康 } v_4, \text{ 非常健康 } v_5\}$, 即 $V = \{30, 60, 80, 90, 100\}$ 。最终评判结果为 $G = B \cdot V^T$, 最后, 依据 G 值所在的评价赋值区间, 即可判断出设备的健康状态。

根据模型计算出的机电设备健康状态值, 可知机电设备处于何种健康状态。根据机电设备的健康状态, 确定宜采取的运维管理办法, 分别进行相应的决策和处理(包括维修时机和维修类型),

各等级对应的运维建议如表 2 所示。

表 2 机电设备健康状态等级表

Table 2 Health status level table for electromechanical equipment

等级	健康等级	评价赋值	评价描述	运维建议
1	非常健康	[90, 100]	评价指标得分等级为优秀, 设备发生异常的可能性非常小	定期巡检, 进行正常养护
2	比较健康	[80, 90)	评价指标得分等级为良好, 设备发生异常的可能性较小	进行正常维护并对损坏设备及时小修
3	中等	[60, 80)	评价指标得分等级为中等, 设备发生异常的概率在正常值范围	实施专项工程中修, 并于工程未实施前加强日常巡查, 必要时采用交通管理措施
4	不太健康	[30, 60)	评价指标得分等级为中下, 设备发生异常的可能性较大	立刻大修, 保证设备各系统的功能
5	非常不健康	[0, 30)	评价指标得分等级为差, 设备发生异常的可能性非常大	报废处理

2 基于 LCC 理论的机电设备经济性运维建议的提出

针对设备管理在企业管理中的重要性, 伴随经济的快速发展、信息化技术的广泛普及及现代设备技术水平的提高, 要使设备管理跟上时代的步伐, 仅局限于设备维护理念开发的传统设备管理系统, 不能全方位满足企业发展要求。为了及时了解设备的最佳养护维修、更换及退役时机, 降低机电系统设备的全生命周期运维投资成本, 拟为设备或系统在运行使用与故障维修以及更新改造等活动中, 对关系到未来其他费用的决策, 提供有效的信息, 以确定经济效益最优的决策方案, 在机电系统设备全生命周期质量综合评价的基础上, 建立“检测-评估-决策”的系统设备运维经济性投入评价体系。设备全寿命周期费用管理是从设备的长期经济效益出发, 全面考虑设备的规划、设计、制造、购置、安装、运行、维修、改造、更新, 直至报废的全过程, 使 LCC 最小的一种管理理念和方法。LCC 管理的核心内容是从一开始就把工作做好, 对设备项目或系统进行 LCC 分析, 并进行决策。

2.1 LCC 理论建模

$$LCC = CI + CO + CM + CF + CD \quad (21)$$

式中: LCC 为全寿命周期成本; CI (Cost of invest-

ment)为投资成本,即设备购买投入成本;CO(Cost of operation)为运行成本,包括设备能源消耗成本等;CM(Cost of maintenance)为养护成本,包括设备巡检、保养费用;CF(Cost of fault)为维修成本(故障成本);CD(Cost of disposal)为报废成本(退役成本)。

2.1.1 投资成本(CI)

设备投资成本通常包括设备的购置、安装、调试的支出成本以及招标采购过程中的其他费用。设备由供应商直送项目现场,运输费用含在购置价格中。其中设备购置费指设备的采购价格;安装工程费指设备的安装和调试等费用;其他费用是指设备招标采购过程中的其他费用,包括项目设计费、项目管理费等。

$$CI = CI_1 + CI_2 + CI_3 + CI_4 \quad (22)$$

式中:CI₁为设备购置价格;CI₂为设备施工安装费用;CI₃为设备调试费用;CI₄为招标采购过程中的其他费用。

在具体计算中,CI₄建议按照一定计提系数计提,计提系数可以参考历史数据,根据项目中设计、监理、法人管理等费用占其他费用的比例算出。

即:

$$CI = CI_1 + CI_2 + CI_3 + CI_4 = (CI_1 + CI_2 + CI_3) \times (1 + \alpha) \quad (23)$$

式中: α 为计提系数。

2.1.2 运行成本(CO)

设备运行成本主要包括能耗费用、运行巡视人员费用及相关管理费用。其中,能耗费用指设备运行产生的能耗(电)费用;运行巡视人员费用指负责巡视的工作人员的工资、补贴等费用总和;相关管理费用指企业运营过程中发生的与设备运行管理相关的费用。

$$CO = CO_1 + CO_2 + CO_3 \quad (24)$$

式中:CO₁为能耗(电)费用;CO₂为运行巡视人员费用;CO₃为运行相关管理费用。

2.1.3 养护成本(CM)

养护成本指维持或改善设备与系统的安全性、可靠性、可控性、经济性和环保性,使其能够长期处于安全可用状态,效益接近最佳状态而进行的检查、维护和修理工作所耗用的成本。主要包括定期检修、状态检修(日常巡检和经常性检修)及定期更换设备费用(如电源插件等)。

$$CM = CM_1 + CM_2 + CM_3 + CM_4 \quad (25)$$

式中:CM₁为定期检修费用;CM₂为状态检修费用(日常巡检和经常性检修);CM₃为定期更换设备费用(如电源插件等);CM₄为零备件或设备的仓储费用。

2.1.4 维修成本(CF)

维修成本是指因为设备故障而需要支出的成本费用,包括故障修复所消耗的人工、材料、机械台班费用,可通过统计设备数量及历年故障及后续修复数据记录获取。

2.1.5 报废成本(CD)

报废成本主要指在设备寿命期末,拆除旧有的设备及基础所发生的工程费用基础减去旧设备残值冲抵安装工程拆除费用,即:

$$CD = CX - CR \quad (26)$$

式中:CX为拆除旧有的设备及报废所需的费用;CR为设备残值。

2.2 成本数据处理

2.2.1 设备现值

考虑到由于设备在整个使用过程中其效能是变化的,在设备使用的前几年,设备处于较新状态,效能较高;在设备使用的后几年,特别是在设备快要更新前,效能较低,为企业提供的效益相对较低。因此,在设备使用的前几年分摊的折旧费应该比后几年多一些,这样能更好地反映设备效能的变化。因此,本文采用定律递减余额法对设备进行折旧。

首先,根据设备的使用年限、原始价值、残值计算设备的折旧率,公式如下:

$$d = 1 - \sqrt[T]{\frac{S}{K_0}} \quad (27)$$

式中: d 为设备折旧率; K_0 为设备的原始价值; S 为设备残余价值; T 为设备最佳使用年限。

设备使用了 m 天的净值为:

$$K_m = K_0(1 - d)^m \quad (28)$$

式中: m 为设备已使用天数。

2.2.2 预估维修成本

结合历史维修经验以及维修数据,统计分析各个设备的维修费用,对各个设备的维修费用进行预估,得到的结果如表3所示。

2.3 设备经济性运维建议的提出

本模型的目的是在保证设备正常功能、精度要求的前提下,以经济性最优为原则确定什么时间点进行维修、什么样的维修类型最合适。

首先,根据生命值曲线函数计算每个分数段

表 3 设备预估维修费用

Table 3 Estimated maintenance cost of equipment

项目	质量分数/分				
	90~100	80~90	60~80	30~60	0~30
维修建议	巡检养护	小修	中修	大修	报废
维修费用	0	设备原值× (2%~5%)	设备原值× (8%~15%)	设备原值× (30%~40%)	重新购入设备 花费

对应的时间点,找到对应时间点的设备现值、运营成本及养护成本,再依据不同质量分数的等级加上不同等级的维修费用,可以预估得到日常运维养护、小修、中修和大修 4 种不同阶段的总成本费用方案。比较设备现值和运营成本与维修成本之和,若设备现值小于运营成本与维修成本之和,则需要在此之前进行对应的维修。设备进行维修后,生命值函数曲线在维修时间点发生波动,生命曲线更新后,重复寻找新的最优维修方案步骤如图 3 所示。

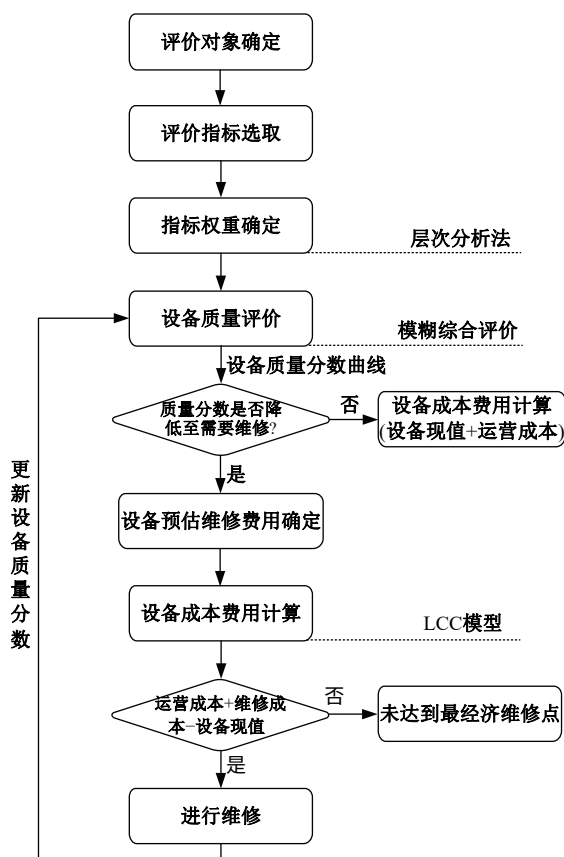


图 3 模型交互作用示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model interaction

3 实例分析

本文实例选择浙江金丽温高速丽水段为试

点。金丽温高速公路是浙江省交通建设规划中“两纵两横十八连三绕三通道”的重要一横,该路段于 2005 年 12 月通车。其中丽水段全段里程 127.8 km,包含 9 个收费站、牛廷岭隧道、缙云-洪渡-丽水北路段等多场景。随着高速公路沿线的设备数量与日俱增,在日常营运管理中,机电设备的日常维护存在诸多问题,例如 ETC 门架设备故障发现不够及时,无法通过营运数据反哺设备故障的预判;交通监控相关设备复杂、规格型号多、故障难定位;对于配发电房整体运维情况的展示不够直观,关键设备的故障及寿命诊断不精确、不全面,缺少精细化成本管控。本实例选择 UPS 不间断电源作为研究对象。

UPS 不间断电源,其主要作用是保证负载的不间断运行。在 UPS 不间断电源系统运行过程中,若发生断电情况,主机所带的蓄电池必须在短时间内向逆变器提供足够的直流电能,保证负载能够得到持续的供电。因此,UPS 不间断电源是高速公路关键设备,以 UPS 为例对模型进行应用分析。

3.1 质量评价

本文采用模糊综合评价法,从设备的运行效率、维护状况以及故障情况 3 个方面考虑,构建的 UPS 设备运行状况评价指标体系如图 4 所示。

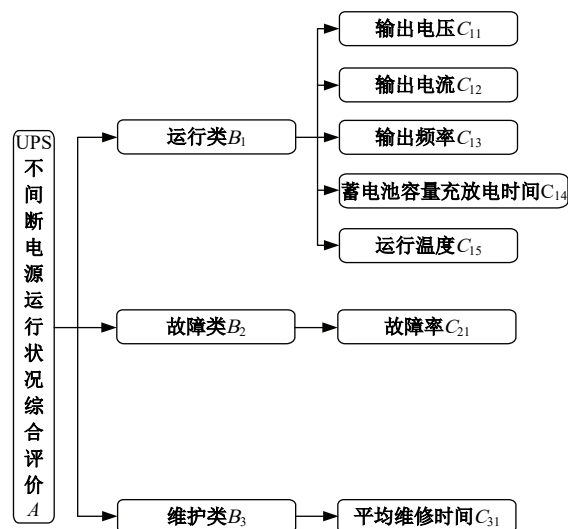


图 4 UPS 设备指标体系结构图

Fig. 4 UPS equipment indicator system structure diagram

3.1.1 单指标测算及评价标准

当具体进行单指标值的测算及评价时,应参照国家、行业制定的规范标准,如《不间断电源设

备》(GB/T 7260.3—2003)等,将关于设备各方面的运行、设计等标准、规范进行总结,以作为评价的参考,方便评价工作的进行。

本研究将对评价指标体系中的指标逐个分析,对具体每个评价指标的评价内容及评分标准做进一步的调整和完善,以作为评价的参考。评分标准可参考表4。

(1)输出电压。根据《不间断电源设备UPS》(GB/T 7260.3—2003)标准^[11],输出电压的持续波动范围若无其他说明,稳态运行时,其偏差不超过额定电压值的±2%,结合实际得到输出电压的评价标准如表5所示。

(2)输出电流。在文献[11]里的负载功率因数范围内,不间断电源的额定输出电流的波动范围不超过±5%,得到输出电流的评价标准如表6所示。

表 4 指标评分标准

Table 4 Criteria of indicator scoring

分类	非常健康	比较健康	中等	不太健康	非常不健康
等级	1	2	3	4	5
评分值区间	[90,100]	[80,90)	[60,80)	[30,60)	[0,30)

表 5 输出电压评价标准

Table 5 Evaluation criteria of output voltage

评级等级	输出电压实测值/V	评分区间/分
1	[217.8,222.2]	[90,100]
2	[213.4,217.8) or (222.2,226.6]	[80,90)
3	[209,213.4) or (226.6,231]	[60,80)
4	[198,209) or (231,242]	[30,60)
5	<198 or >242	[0,30)

表 6 输出电流评价标准

Table 6 Evaluation criteria of output current

评级等级	输出电流实测值/A	评分区间/分
1	[10.89,11.11]	[90,100]
2	[10.67,10.89)or(11.11,11.33]	[80,90)
3	[10.45,10.67)or(11.33,11.55]	[60,80)
4	[9.9,10.45)or(11.55,12.1]	[30,60)
5	<9.9 or >12.1	[0,30)

(3)输出频率。根据文献[11],UPS设备稳态运行的输出频率和偏差应在规定值的1%以内,得到输出频率的评价标准如表7所示。

(4)蓄电池容量及充放电时间。蓄电池容量不同,充放电的时间也会有所差异。设备使用时

间越长,其放电时间则会越短,完好率越低。因此,依据UPS满电时放电所需的时长,得到蓄电池充放电的评价标准如表8所示。

(5)运行温度。根据文献[11],设备在运行时的日平均温度不超过30℃,年平均温度不超过25℃,得到运行温度的评价标准如表9所示。

表 7 输出频率评价标准

Table 7 Evaluation criteria of output frequency

评级等级	输出频率实测值/Hz	评分区间/分
1	[49.8,50.2]	[90,100]
2	(50.2,50.5] or [49.5,49.8)	[80,90)
3	(50.5,50.8] or [49.2,49.5)	[60,80)
4	(50.8,51] or [49,49.2)	[30,60)
5	>51 or <49	[0,30)

表 8 蓄电池容量及充放电时间评价标准

Table 8 Evaluation criteria of battery capacity and charging and discharging time

评级等级	蓄电池容量及充放电时间实测值/h	评分区间/分
1	[2.5,3)	[90,100]
2	[2,2.5)	[80,90)
3	[1.5,2)	[60,80)
4	[1,1.5)	[30,60)
5	<1.5	[0,30)

表 9 运行温度评价标准

Table 9 Evaluation criteria of operating temperature

评级等级	运行温度实测值/℃	评分区间/分
1	≤26	[90,100]
2	(26,30]	[80,90)
3	(30,35]	[60,80)
4	(35,40]	[30,60)
5	>40	[0,30)

(6)故障率。故障率是指设备发生故障时停止运行累计时间除以总运行时间,依据电子化数据库中UPS设备的故障情况,得到故障率的评价标准如表10所示。

(7)平均维修时间。平均维修时间是指累计单次维修时间除以维修次数,依据电子化数据库中UPS设备的维修时长记录,得到平均维修时间的评价标准如表11所示。

表 10 故障率评价标准

Table 10 Evaluation criteria of failure rate

评级等级	故障率实测值	评分区间/分
1	[0,0.01)	[90,100]
2	[0.01,0.03)	[80,90)
3	[0.03,0.05)	[60,80)
4	[0.05,0.08)	[30,60)
5	>0.1	[0,30)

表 11 平均维修时间评价标准

Table 11 Evaluation criteria of average repair time

评级等级	平均维修时间实测值/d	评分区间/分
1	[0,2)	[90,100]
2	[2,5)	[80,90)
3	[5,10)	[60,80)
4	[10,20)	[30,60)
5	>20	[0,30)

3.1.2 层次分析法确定权重

本研究制作了UPS设备的专家打分表,由专家结合个人经验,通过下一层级指标对上一层级指标的重要程度进行打分以此确定指标权重,最终取所有专家对某指标打分的平均值作为该指标的权重,得到各指标的权重如下:

$$A=[B_1, B_2, B_3]=[0.78, 0.11, 0.11] \quad (29)$$

$$B_1=[C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}]=[0.17, 0.17, 0.18, 0.34, 0.13] \quad (30)$$

$$B_2=[C_{21}]=[1] \quad (31)$$

$$B_3=[C_{31}]=[1] \quad (32)$$

3.1.3 模糊综合评价法确定质量分数

由电子化数据库可知,UPS设备的各项检测数据值如表12所示。

表 12 UPS设备指标巡检实测值

Table 12 Actual measured values of UPS equipment indicators during inspection

指标	巡检日期	
	2022年2月16日	2022年7月1日
输出电压/V	220	220
输出电流/A	11	11
输出频率/Hz	50	50
蓄电池及充放电时间/h	3.20	1.85
运行温度/℃	15	25
故障率	0.007	0.007
平均维修时间/d	1.5	1.5

(1)计算UPS设备在2022年2月16日的质量分数

依据UPS设备当天的实测数据,根据隶属度函数可求出各指标某时刻的实测值处于该指标各等级的隶属度,得到模糊矩阵为:

$$R_1=\begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \\ C_{15} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$R_2=[C_{21}]=[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (34)$$

$$R_3=[C_{31}]=[0.5 \ 0.5 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (35)$$

得到一级模糊结果为:

$$U_1=B_1 \cdot R_1=[0.15 \ 0.15 \ 0.15 \ 0.3 \ 0.25] \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}=[0.85, 0.15, 0, 0, 0] \quad (36)$$

$$U_2=B_2 \cdot R_2=[1][1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]=[1, 0, 0, 0, 0] \quad (37)$$

$$U_3=B_3 \cdot R_3=[1][0.5 \ 0.5 \ 0 \ 0 \ 0]=[0.5, 0.5, 0, 0, 0] \quad (38)$$

得到二级模糊结果为:

$$U=A \cdot R=[0.8, 0.1, 0.1] \begin{bmatrix} 0.85 & 0.15 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}=[0.83, 0.17, 0, 0, 0] \quad (39)$$

得出UPS设备在2022年2月16日的质量分数为:

$$G=U \cdot V^T=[0.83, 0.17, 0, 0, 0] \begin{bmatrix} 100 \\ 90 \\ 80 \\ 60 \\ 30 \end{bmatrix}=98.3 \quad (40)$$

因此,UPS设备在2022年2月16日的质量分数为98.3分,评价等级为1级,设备处于非常健康状态,只需进行定期巡检,做好养护工作即可。

(2)计算UPS设备在2022年7月1日的质量分数

依据 UPS 设备当天的实测数据,得到模糊矩阵为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \\ C_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$R_2 = [C_{21}] = [0.3 \quad 0.7 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (42)$$

$$R_3 = [C_{31}] = [0.25 \quad 0.75 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (43)$$

得到一级模糊结果为:

$$\begin{aligned} U_1 &= B_1 \cdot R_1 = \\ [0.192 \quad 0.180 \quad 0.184 \quad 0.315 \quad 0.129] \times \\ &\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \\ &[0.407, 0.278, 0.2205, 0.0945, 0] \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} U_2 &= B_2 \cdot R_2 = [1][1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] = \\ &[0.3, 0.7, 0, 0, 0] \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} U_3 &= B_3 \cdot R_3 = [1][0.5 \quad 0.5 \quad 0 \quad 0 \quad 0] = \\ &[0.25, 0.75, 0, 0, 0] \end{aligned} \quad (46)$$

得到二级模糊结果为:

$$\begin{aligned} U &= A \cdot R = \\ &[0.669, 0.225, 0.106] \times \\ &\begin{bmatrix} 0.407 & 0.278 & 0.2205 & 0.0945 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.75 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \\ &[0.366, 0.423, 0.148, 0.063, 0] \end{aligned} \quad (47)$$

得出 UPS 设备在 2022 年 7 月 1 日的质量分数为:

$$\begin{aligned} G &= U \cdot V^T = \\ &[0.366, 0.423, 0.148, 0.063, 0] \begin{bmatrix} 100 \\ 90 \\ 80 \\ 60 \\ 30 \end{bmatrix} = 90.29 \end{aligned} \quad (48)$$

因此,UPS 设备在 2022 年 7 月 1 日的质量分数为 90.29 分,评价等级为 1 级,设备处于非常健康状态,只需进行定期巡检,做好养护工作即可。

3.2 经济评价

根据实际数据获取情况,对 LCC 模型进行调整,试点路段中,各个设备全生命周期的成本投入主要包括 4 个部分:一是设备的购置成本;二是设备的运营成本,包括了 LCC 基础模型中的运行成本和养护成本,总体称为运营成本,涉及相关的能耗费用及巡检等人员费用;三是设备的维修费用,其中除了与 LCC 基础模型中维修成本一致这一成本项外,将设备处于报废更新阶段涉及的更新设备的费用作为报废阶段的预估维修费用;四是设备的现值,即设备所剩残值,设备成本不涉及设备的拆除费用。

根据上述修改,本实例经济评价模型具体如下:

$$LCC = CI + COM + CF - CR \quad (49)$$

式中:CI 为设备的购置成本;COM 为设备的运营成本,包括运维养护相关人员工资和设备能耗费用;CF 为设备的预估维修费用,在结合历史数据的基础上预估每台设备的预计维修费用,以预估维修费用占用设备原值的比例表示;CR 为设备现值,即台账中设备购置费通过加速折旧的方式得到设备残值。

3.2.1 数据处理

(1)能耗费用。设备的能耗费用主要来自设备的用电消耗,试点路段所能提供的相关数据是路段整体的用电费用,将不属于关键机电设备的耗电根据功率比例等剥离后,根据设备用电的比例,将每月的电费分摊至各设备。

(2)运维人员工资。试点路段提供的是运维人员数量及其平均工资,将运维人员工资总和根据设备巡检时间占比分摊至各设备。

3.2.2 质量分数曲线

与质量评价相结合,纵坐标为质量分数,横坐标为时间,记录设备的生命状态,结合历史巡检数据及维修记录对标质量评价规则,标定出设备的质量分数曲线,如图 5 所示。

3.2.3 设备现值及运营成本计算

利用数据处理的结果,计算出设备的现值逐月递减的结果,并绘制出设备现值曲线,如图 6 所

示;将数据处理后得到设备使用过程中的能耗费用、运维人员工资叠加得到设备的运营成本。

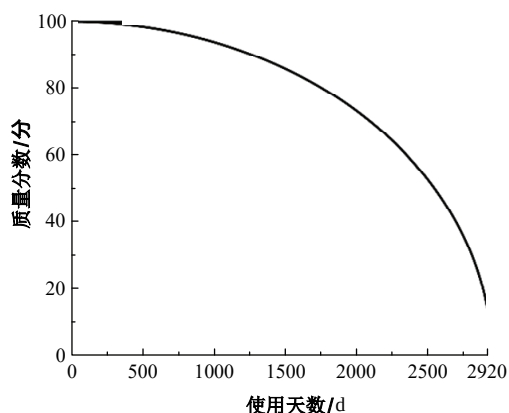


图 5 UPS 不间断电源的质量分数曲线

Fig. 5 Quality score curve of UPS

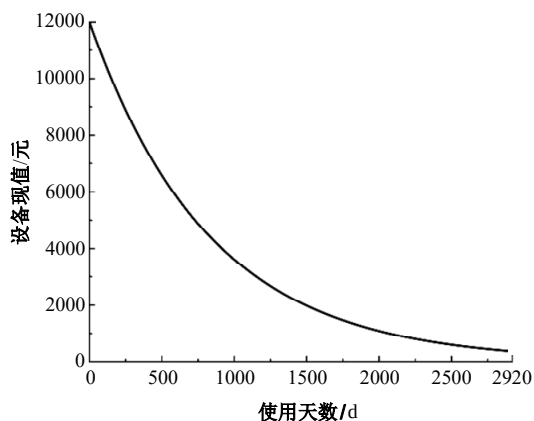


图 6 UPS 不间断电源的设备现值曲线

Fig. 6 Equipment present value curve of UPS

3.2.4 维修点确定

根据质量分数与维修建议之间一一对应的关系,分别确定不同质量分数对应不同时间点进行不同类型维修的成本费用,对比各方案选取最优解(见表 13)。

选取 UPS 不间断电源为例,此设备不同维修操作的预估维修费用如表 13 所示。

表 13 UPS 不间断电源的预估维修费用占比

Table 13 Estimated maintenance cost proportion of UPS

项目	质量分数/分				
	90~100	80~90	60~80	30~60	0~30
维修建议	巡检养护	小修	中修	大修	报废
维修预估费用/元	0	设备原值×3%	设备原值×10%	设备原值×35%	12 000

首先根据生命值曲线函数计算每个分数段中值对应的时间点,找到对应时间点的设备现值、运营成本及养护成本,再确定不同维修方法

的预计花费成本,最终计算总成本。将运营成本、养护成本及维修成本之和与设备现值作差,当数值大于 0 时,则设备的残值比运维养护此设备的成本低,因此,在此之前一天是最经济的维修点。

通过对比计算结果可知,在使用了 1 864 d 进行中修是最经济的维修点。

设备经过维修后,设备质量分数得到提高,更新设备质量分数后,继续进行总成本计算,寻找新的最经济维修点。

如图 7~图 9 所示,以 UPS 不间断电源为例,在 1 864 d 进行中修后,质量分数提高。

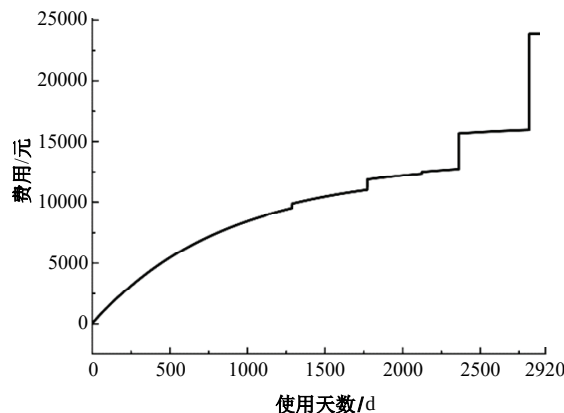


图 7 UPS 不间断电源的总成本曲线

Fig. 7 Total cost curve of UPS

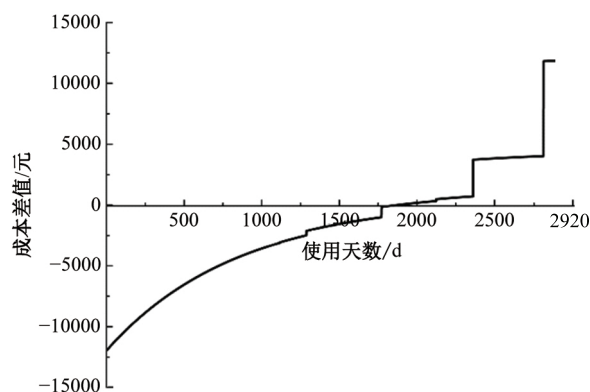


图 8 UPS 不间断电源的运维成本与设备现值之间的对比

Fig. 8 Comparison between operation and maintenance costs and present value of equipment of UPS

如图 10 所示,根据新的质量分数曲线,计算新各项成本,重复上述步骤,寻找零点,确定最经济的维修点。

由图 11 可知,新的最经济的维修操作为在 2 092 d 时进行小修。

3.3 评价结果

通过计算 5 次维修后设备的寿命长度及总成

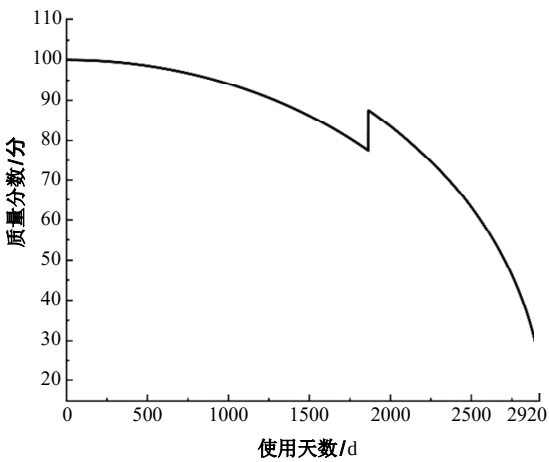


图 9 更新后的 UPS 不间断电源质量分数曲线

Fig. 9 Updated equipment present value curve of UPS

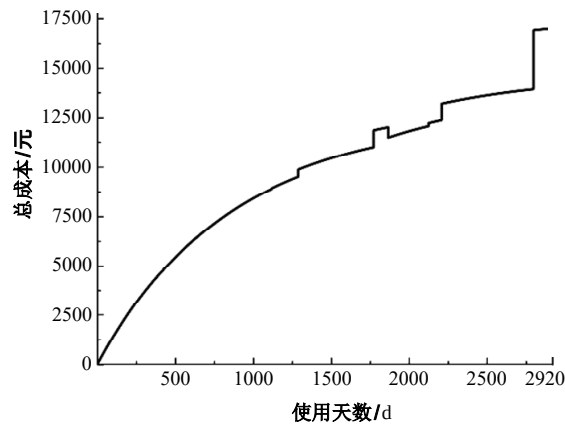


图 10 更新后的 UPS 不间断电源总成本曲线

Fig. 10 Updated total cost curve of UPS

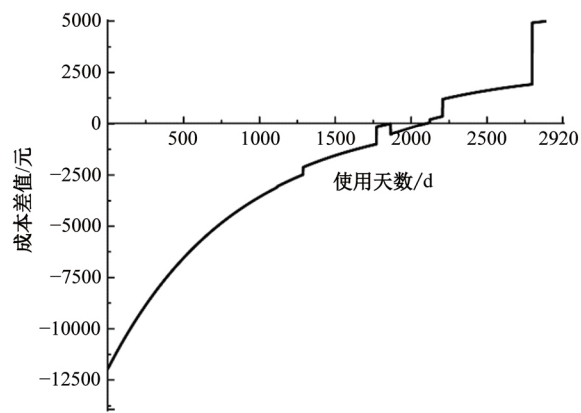


图 11 更新后 UPS 不间断电源的运维成本与设备现值之间的对比

Fig. 11 Updated comparison between operation and maintenance costs and present value of equipment of UPS

本情况,对比可以发现,采用本模型对设备进行运维管理,不仅可以延长设备的使用寿命,还能增加经济效益,即降低设备的运维养护成本投入。维修后的经济增益及设备寿命如表 14 所示。

表 14 维修后的经济增益及设备寿命

Table 14 Economic gain and equipment lifespan after maintenance

维修次数	维修日	维修类型	经济增益/%	设备全寿命周期/d
0	—	—	—	2 816
1	1 864	中修	5.62	3 250
2	2 092	小修	9.65	3 734
3	2 350	小修	12.92	4 286
4	2 774	小修	13.98	4 839
5	3 311	小修	13.76	5 300

4 结束语

本文深入研究了高速公路关键机电设备全生命周期质量分析和成本管理,采用 LCC 基本模型,结合模糊综合评价法和层次分析法,形成了一套系统性的基于设备质量评价结果的经济性运维措施选择方法。采用动态数据采集,在时间层面实现了细粒度的成本计算,有利于开展更及时的运维操作,从预防的角度提高设备的效益。通过详细介绍评价方法、基本模型、算法建模、数据收集与处理,以及经济性分析,为高速公路关键机电设备管理提供了科学决策的方法。最终,通过实例分析的验证,展示了模型的可行性和实用性,为设备管理提供了全方位、科学化的经济决策支持。

参考文献:

[1] 孙晓宁. 高速公路机电设备智慧运维分析[J]. 工程建设与设计, 2023(14): 91-93.
Sun Xiao-ning. Analysis of intelligent operation and maintenance of expressway electromechanical equipment[J]. Construction & Design for Engineering, 2023(14): 91-93.

[2] 雷汉伟. 高速公路机电设备健康状态物联监测与智能诊断[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(1): 173-176.
Lei Han-wei. IoT monitoring and intelligent diagnosis system for the health status of mechanical and electrical equipment on highway[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2024, 20(1): 173-176.

[3] 陈征. 公路隧道机电系统技术状况综合评价模型[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(9): 156-159.
Chen Zheng. Comprehensive evaluation model of electromechanical systems in highway tunnels[J]. Microcomputer Applications, 2022, 38(9): 156-159.

[4] 晋春杰, 许宏勇, 彭文, 等. 高速公路机电设备智

- 能运行监测系统研究[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(2): 178-180, 204.
- Jin Chun-jie, Xu Hong-yong, Peng Wen, et al. Research on intelligent operation monitoring system of expressway electromechanical equipment[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2024, 20(2): 178-180, 204.
- [5] Brom A E, Belova O V, Sissinio A. Lifecycle costs for energy equipment: FMECA & lifecycle costing models as "decision making" tools for cost reduction during the whole equipment life[J]. Procedia Engineering, 2016, 152: 173-176.
- [6] 钱宇, 黄智贤, 江燕斌. 化工产品的生命周期成本分析[J]. 化工进展, 2006, 25(2): 126-130.
- Qian Yu, Huang Zhi-xian, Jiang Yan-bin. Life cycle costing of the chemical products[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2006, 25(2): 126-130.
- [7] 徐岳, 武同乐. 梁加固工程生命周期成本横向对比分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(3): 30-34.
- Xu Yue, Wu Tong-le. Comparative analysis of life-cycle cost for bridges strengthening[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2004, 24(3): 30-34.
- [8] 陈国锋, 蔡勋, 蔡岳辰, 等. 我国标准地铁车辆的全寿命周期成本构成及控制[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(4): 5-8.
- Chen Guo-feng, Cai Xun, Cai Yue-chen, et al. Whole lifecycle cost composition and control of standard metro vehicle in China[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(4): 5-8.
- [9] 林中质. 高速公路机电设备智能管理技术研究[D]. 西安: 长安大学信息工程学院, 2018.
- Lin Zhong-zhi. Study on intelligent management technology of expressway electromechanical equipment[D]. Xi'an: School of Information Engineering, Chang'an University, 2018.
- [10] 赵公豪, 刘鸿鹏, 袁单, 等. 基于模糊综合评价的电动汽车充电安全风险评估[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4): 300-307.
- Zhao Gong-hao, Liu Hong-peng, Yuan Dan, et al. Electric vehicle charging safety risk assessment method based on fuzzy integrated evaluation[J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(4): 300-307.
- [11] GB/T 7260.3—2003. 不间断电源设备(UPS)第3部分: 确定性能的方法和试验要求[S].