

模糊层次分析法在高速公路机电系统养护评估中的应用

吕叠¹, 李彦强²

(1. 广东省南粤交通阳化高速公路管理处, 广东 茂名 525000; 2. 广东交科检测有限公司, 广东 广州 510550)

摘要: 针对高速公路机电系统中涉及的多种复杂设备和不同部门的技术标准, 构建了多准则、多层次的评估体系。由于维护评估过程中存在模糊性和主观判断的不确定性, 引入了模糊层次分析法。该方法将传统层次分析法与模糊综合评价法相结合, 通过定性和定量相结合, 对高速公路机电系统的维护评估进行综合分析。具体而言, 首先利用 Delphi 法量化定性准则; 然后采用三角隶属函数确定从属程度; 随后使用层次分析法计算权重矩阵; 最后, 基于判断矩阵建立层次模糊评估模型, 并对评估结果进行归一化处理, 以解决维护评估中的不确定性和复杂性。本研究通过模糊层次分析法为高速公路机电系统的养护提供了全面的评估框架。

关键词: 层次分析法; 模糊评估模型; 高速公路机电系统; 养护评估

中图分类号: TM314

文献标识码: A

The Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process in the Maintenance Assessment of Highway Electromechanical System

LÜ Die¹, LI Yanqiang²

(1. Guangdong Nanyue Traffic Yanghua Expressway Management Office, Maoming 525000, Guangdong, China;

2. Guangdong Jiaoke Testing Co., Ltd., Guangzhou 510550, Guangdong, China)

Abstract: Given the involvement of various complex devices and technical standards from different departments in highway electromechanical systems, a multi-criteria, multi-level evaluation system has been constructed. Due to the fuzziness and subjective judgment uncertainties present in the maintenance assessment process, this paper introduces the fuzzy analytic hierarchy process (Fuzzy AHP). This method combines the traditional analytic hierarchy process with the fuzzy comprehensive evaluation method, using both qualitative and quantitative approaches to conduct a comprehensive analysis of the maintenance assessment for highway electromechanical systems. Specifically, the Delphi method is first used to quantify qualitative criteria; then, triangular membership functions are employed to determine the degree of subordination; subsequently, the Analytic Hierarchy Process is applied to calculate the weight matrix; finally, a hierarchical fuzzy evaluation model is established based on the judgment matrix, and the evaluation results are normalized to address the uncertainty and complexity in maintenance assessments. This study provides a comprehensive evaluation framework for the maintenance of highway electromechanical systems through the application of the fuzzy analytic hierarchy process.

Key words: analytical hierarchy process; fuzzy evaluation model; highway electromechanical system; maintenance evaluation.

随着智慧交通建设的不断发展^[1-3], 粤港澳大湾区高速公路机电系统在运行过程中, 逐渐向

复杂化和完善化的方向发展, 系统所需机电设备的数量和类型也越来越多。为了保证系统运行的

收稿日期: 2024-08-09

作者简介: 吕叠, 工程师, 本科, 研究方向为高速公路机电工程建设与维护

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助(编号: 2022B0101070001)

安全质量,有必要采取更优质的调试与养护对策^[4]。高速公路机电系统养护管理是高速公路运营管理工作的一项重要内容,直接影响着高速公路的运营效率和安全性。在养护管理工作中,养护评估起着基础性和关键性的作用。但是,到目前为止,在高速公路机电系统养护评估方面的标准仍主要依据养护检测和技术状况评定,而对机电系统养护的评估没有充分考虑电机设备的特殊性。王振祥^[5]等提出一种基于采集设备的高速公路机电系统信息高度整合的故障检测方法。胡明晖^[6]等首次将物联感知技术应用于高速公路机电系统设施的精细化管理,实现了设备的实时监控和自动数据采集。目前,我国关于高速公路机电工程系统质量检验与评估的标准详细规定了评估的范围、标准和方法^[7-8],为机电工程质量检验与评估提供了指导。

然而,在当前的高速公路机电系统维护评估中,传统的评估方法往往无法准确处理复杂、多维度的养护数据。为了解决这些问题,本文引入了模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, Fuzzy AHP),能够更好地处理定性因素,并通过 Delphi 法量化专家判断,结合三角隶属函数确定权重,最终实现对评估对象的精确评估。

1 高速公路机电系统养护评价的特性分析

当评价指标很多时,层次分析法的思维一致性很难保证,而将模糊法和层次分析法优势结合起来的模糊层次分析法可以弥补这个缺陷。通过两两元素比较判断矩阵,整合的模糊层次分析法改进了传统层次分析,可靠性得到显著提高。

1.1 养护评估的层次结构

模糊层次分析法的关键是建立层次结构模型。第一步是建立递阶层次结构,进行构造比较判断矩阵,接下来在单准则下排序和一致性检验,最后择优。这种结构能够客观地反映目标、准则、对象的彼此关系,使复杂问题清晰化,选出最优方案。通常情况下,高速公路建设项目建立递阶层次结构模型被划分为单位项目、分部工程和分项工程。作为一个特殊的单位项目,高速公路机电系统包括多个分部工程,如通信设施、收费设施、监控和照明设施等^[1]。而每个分部工程又由多个分项工程组成。在评估过程中,最后一级的多准则成为了评估的突破点(见图1)。

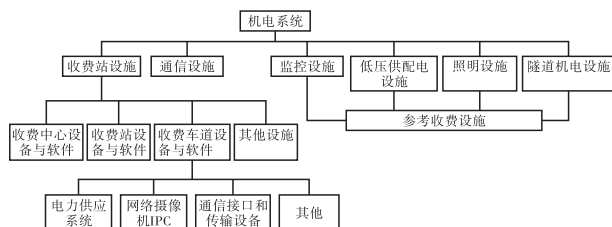


图1 养护评估的层次结构

1.2 评估标准的模糊性

养护评估是一个系统化、多准则的决策过程,涉及定性和定量因素,需要进行多种目标的权衡和选择。由于机电设备存在运行环境、操作工况、维护保养等方面的差异,养护评估在定性和定量因素方面均存在一定模糊性和不确定性。人类的经验和判断通常以语言和模糊的模式进行表达,而在评估过程中,模糊性和不确定性的存在,可能会导致不准确的判断。因此,可以将主观判断更好地表示为定量数据,然后再通过模糊集合理论的评估方法对这种数据集进行精炼^[9-11]。

2 模糊层次分析法

2.1 评估层次结构

评估层次结构过程的核心是将整个高速公路机电系统分解为一个层次结构,其中目标(高速公路机电系统)位于顶层,标准(如收费设施等分部工程)和子标准(如收费车道的设备和软件)位于中间层和子层,指标(如网络摄像机IPC)位于层次结构的最底层,高速公路机电系统评估层次结构如图2所示。

2.2 识别因子集 U

影响评估对象价值的各种因素组成了因素集合,可以表示为 $U_n = \{U_{n1}, U_{n2}, U_{n3}, U_{n4}, \dots, U_{nm}\}$ 或 $U_{ni} = \{U_{ni1}, U_{ni2}, U_{ni3}, U_{ni4}, \dots, U_{nip}\}$ (见图2)。本研究对广东省某线路的机电系统养护评估进行了详细探讨。在该案例中,着重分析了收费车道和软件这个子准则级别下的7个性能准则。测试数据来自养护日志和例行监测记录,包括电力供应系统、IPC、通信接口和传输设备等关键设备的维护频次、故障率和平均维修时间。经过统计分析,确保了数据的可靠性和代表性(见表1),统计数据清单见表2。通过表1,可以直观了解各类设备在收费车道系统中的运行情况,这些数据来源于现场测试结果,并且具有可靠的统计分析,以支持本研究结论。

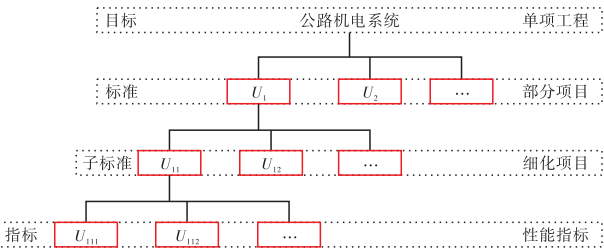


图2 评估层次结构

表1 高速公路收费车道机电设备运行及维护统计数据				
编号	性能指标	维护频次/ (次/年)	故障 率/%	平均维修 时间/h
1	电力供应系统	12	5	2
2	IPC	8	15	3
3	通信接口和传输设备	10	3	1.5
4	运行环境	6	20	4
5	电气安全装置	10	10	2.5
6	附属设施	9	12	3
7	收费软件	7	8	2

表2 收费车道设备和软件的养护测试数据						
编号	性能指标	评价				
		1#	2#	3#	4#	5# 结果/%
1	电力供应系统	✓	✓	✓	✓	✓ 100
2	IPC	✓	✓	×	×	✓ 60
3	通信接口和传输设备	✓	✓	✓	✓	✓ 100
4	运行环境	✓	×	✓	×	✓ 60
5	电气安全装置	✓	✓	×	✓	✓ 80
6	附属设施	✓	×	✓	✓	✓ 80
7	收费软件	✓	×	✓	✓	✓ 80

因此, 为收费车道设置的因素被确定为如式(1)所示:

$$U_{11} = \{U_{111}, U_{112}, \dots, U_{117}\} = (100, 60, 100, 60, 80, 80, 80)$$
 (1)

2.3 确定评估集 V

评估集汇集了所有可能的评判结果, 可以表示为 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_m\}$ 。考虑到人类心理的语义尺度, 确定了一个5级的模糊评分, 分别表示为“非常差”“差”“中等”“好”和“非常好”, 用于表示模糊评估结果。对于传统的二进制逻辑中的“相当差”和“相当好”, 分别赋予了0和100的分数。通过 Delphi 方法的处理, 客观地量化了评估集合 $V = \{\text{非常差, 差, 中等, 好, 非常好}\}$ 中的因素 (见表3)。

表3 评价结果分级

等级	非常差	差	中等	好	非常好
分数	[0, 20)	[20, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100)

2.4 识别判断矩阵 R

在模糊集合 V_j 上确定了模糊判断矩阵 R , 其中 r_{ij} 表示因素 U_i 对因素 V_j 的隶属度。考虑到人类定性评估的不确定性, 通过使用相应的三角函数(2)~(6)定义了评估结果的5个等级, 如图3所示。在这个过程中, 使用模糊判断矩阵来计算因素 U_i 对因素 V_j 的隶属度, 并将其转换成数值, 以表示评估结果的等级。

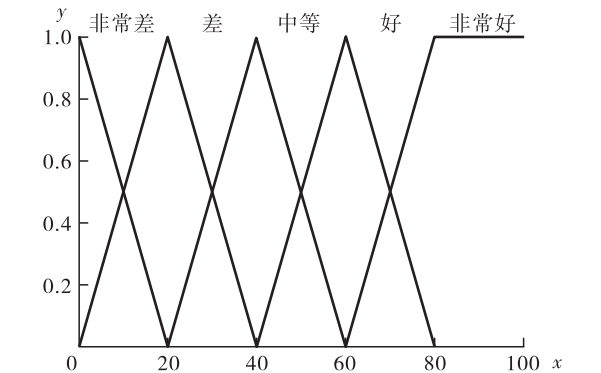


图3 三角函数评估结果

在某些情况下直接给出隶属度是很困难的, 本文在二元对比排序法的基础上, 确定两个元素相应的隶属度, 最终排列出大小, 再经过数学方法加工得到所需隶属函数, 利用梯形模糊分布进行计算。

$$y_1 = \begin{cases} 1 & x < 0 \\ (20 - x)/20 & 0 \leq x < 20 \\ 0 & x \geq 20 \end{cases} \quad (2)$$

$$y_2 = \begin{cases} x/20 & 0 \leq x < 20 \\ (40 - x)/20 & 20 \leq x < 40 \\ 0 & x \geq 40, x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$y_3 = \begin{cases} 0 & x < 20, x \geq 60 \\ (x - 20)/20 & 20 \leq x < 40 \\ (60 - x)/20 & 40 \leq x < 60 \end{cases} \quad (4)$$

$$y_4 = \begin{cases} 0 & x < 40, x \geq 80 \\ (x - 40)/20 & 40 \leq x < 60 \\ (80 - x)/20 & 60 \leq x < 80 \end{cases} \quad (5)$$

$$y_5 = \begin{cases} (x - 60)/20 & 60 < x < 80 \\ 1 & x \geq 80 \\ 0 & x \leq 60 \end{cases} \quad (6)$$

设评定等级的指标集为 $U = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$, x 表示评定得分; V 表示定性评价的评语论域 $= (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5)$, 分别表示非常差、差、中等、好、非常好。通过打分, 给出 U, V 上每个因素对 (x, y) 指定的隶属度。

将因子集 $U_{11} = (100, 60, 100, 60, 80, 80, 80)$ 纳入上述三角形函数中, 模糊判断矩阵 R_{11} 计算如式 (7) 所示:

$$R_{11} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}_{7 \times 5} \quad (7)$$

2.5 计算权重集 W

在这个阶段, 采用一个 9 点模糊语义差异量

表的问卷, 评估指标包括电力供应系统、IPC、通信接口和传输设备、运行环境、电气安全装置、附属设施和收费软件, 以评估每个因素的相对重要性。量表中的评价选项包括“绝对重要”“非常重要”“相当重要”“相对重要”“无评价”“相对不重要”“相当不重要”“非常不重要”和“绝对不重要”。邀请 20 位高速公路机电系统维修领域的专家, 让他们在问卷中对收集到的每个评估标准指定相对重要性, 并确定收费车道设备和软件的权重设置。本次调查结果的统计数据见表 4。

评价标准权重的计算方法如式 (8) 所示。

表 4 各指标权重的调查结果

编号	评估指标	每个重要量表 i 的专家数 N_i								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	电力供应系统 (W_{111})	0	0	3	1	0	6	4	1	5
2	IPC (W_{112})	0	1	2	3	1	1	5	4	3
3	通讯接口和传输设备 (W_{113})	0	0	2	2	1	2	6	5	2
4	运行环境 (W_{114})	4	2	2	1	3	4	1	1	2
5	电气安全装置 (W_{1105})	0	2	0	4	0	5	3	4	3
6	附属设施 (W_{116})	0	2	2	2	3	4	2	2	3
7	收费软件 (W_{117})	1	1	2	1	3	5	3	2	2

$$W_{11m} (m = 1, \dots, 7) = \frac{\sum_{i=1}^9 N_i \cdot i}{\sum_{i=1}^9 N_i} \quad (8)$$

在归一化之后, 收费车道设备和软件等子标准级别的权重设置如式 (9) 所示。

$$W_{11} = \{W_{111}, W_{111}, \dots, W_{117}\} = (0.16, 0.15, 0.16, 0.11, 0.15, 0.14, 0.13) \quad (9)$$

3 评估结果

3.1 综合评判结果 B

模糊综合评判结果 B 是基于权重集合 W 和判断矩阵 R 对因子集合 U 进行关联得出的。具体来说, 首先利用层次分析法 (AHP) 确定评价指标的权重集 W ; 然后根据模糊判断矩阵 R , 将各个指标元素分别映射到隶属函数上从而确定因子集合 U 。例如, 对于收费车道设备和软件等子标准级别的评判结果 B_{11} 可以综合表示为式 (10):

$$B_{11} = W_{11} \times R_{11} = (0, 0, 0, 0.26, 0.74) \quad (10)$$

类似地, 可以综合得出收费站设备和软件等子标准级别的评判结果 B_{12} 、收费中心的评判结果 B_{13} 以及其他因素的评判结果 B_{ij} 。较低级别的标准或子标准的评判矩阵是其下属评判结果的综

合。因此, 可以获得层次结构中每个级别的所有标准的评判结果。例如, 收费设施标准级别的评判结果 B_1 是基于权重集合 W_1 以及该级别下从属因素的重要性所形成的评判矩阵 R_1 , 再通过综合这些结果得到的。

$$B_1 = W_1 \times R_1 = W_1 \times \begin{pmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ B_{13} \\ \dots \\ B_{1m} \end{pmatrix}_{m \times 5} = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}) \quad (11)$$

对于标准级别中其他因素的评判结果 B_i 的综合过程与 B_1 相同。最终, 顶层的综合评估结果向量 B 反映了整个电机化系统的养护状态, 可以基于标准级别的结果和所有部分项目的重要性权重集合 W 来综合得到一个具有 5 个维度的向量。

$$B = W \times R = W \times \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \dots \\ B_6 \end{pmatrix}_{6 \times 5} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) \quad (12)$$

3.2 过程评价结果

通过使用加权平均方法,可以将高速公路机电化系统养护评估的最终结果处理为0到100的分数。为了表示必要程度,选择了“非常差”“差”“中等”“良好”和“非常好”5个等级,并将其作为备选集合 V 。因此,最终结果可以通过以下公式进行处理。

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = (20, 40, 60, 80, 100) \quad (13)$$

$$v = (\sum_{j=1}^5 b_j \cdot v_j) / (\sum_{j=1}^5 b_j) \quad (14)$$

例如,若最终结果 $v=95$,那么机电化系统的运行状态接近于非常好;若 $v=65$,则接近于中等,表示需要对某些方面进行中等程度的检查。

4 结论

本研究采用模糊层次分析法为高速公路机电系统养护评估提供了一种创新方案,克服了传统层次分析法在应对复杂、多准则问题时的局限性,有效应对了评估过程中存在的复杂性与模糊性挑战。通过Delphi法收集并量化专家意见,结合实际养护数据,建立了具有实用价值的综合评估模型;以广东省某高速公路为案例,较好地解决了传统评估方法中容易出现的模糊判断与矛盾问题。

该方法的多准则评估特性使其在其他领域具有潜在应用价值,如城市交通系统中的流量管理和设施维护,工业自动化中的设备维护和故障预

测,能源管理中的设备监控与优化决策,以及医疗决策支持中的诊断与资源分配,展现出广泛的推广前景。

参考文献:

- [1]王鑫涛.高速公路机电系统分析[J].黑龙江科学,2022,13(6):88-90.
- [2]魏会峰.高速公路机电养护管理信息系统设计与实现[J].科技创新与应用,2024,14(22):116-119.
- [3]门昌灏.高速公路机电系统设备管理问题及优化方法分析[J].中国高新科技,2023(6):62-64.
- [4]张智超.高速公路机电系统运维养护管理[J].交通世界,2022(Z1):223-224.
- [5]王振祥,邵宗翰.基于无线射频的高速公路机电设备运行故障智能识别方法[J].自动化与仪器仪表,2019(11):52-55.
- [6]胡明晖.基于物联感知技术的高速公路机电设施设备精细化管理系统[J].海峡科技与产业,2019(12):51-53.
- [7]刘诗瀚.高速公路机电工程质量控制要点[J].广东公路交通,2020,46(4):36-38.
- [8]段国钦,孙穗.高速公路机电系统运行与维护手册[M].北京:人民交通出版社,2006:68-70.
- [9]孙洋,俞俊平,戴红涛,等.基于模糊层次分析法的公路隧道病害危害程度评价[J].南昌工程学院学报,2022,41(6):23-28.
- [10]朱杰.高速公路隧道机电设施养护检测技术[J].住宅与房地产,2019(34):195.
- [11]周晓旭,王玉强,白磊.高速公路机电设施运营期养护质量评价方法研究[J].山西交通科技,2019(5):92-95.

(上接第6页)

参考文献:

- [1]杨普新.养生条件对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响[J].中外公路,2023,43(4):250-255.
- [2]王梦浩,王朝辉,高璇,等.公路路面乳化沥青冷再生技术综述[J].材料导报,2023,37(7):50-60.
- [3]廖晨曦,苏敏,陈楚鹏.养生时间对乳化沥青冷再生混合料性能的影响[J].广东交通职业技术学院学报,2022,21(3):1-4,16.
- [4]刘秘强,韦万峰.养生时间对冷再生混合料路用性能的影响研究[J].西部交通科技,2023(6):53-55.
- [5]沈安琪.广东地区高速公路改扩建工程乳化沥青厂拌冷再生技术应用研究[J].广东交通职业技术学院学报,2021,20(1):29-32,50.
- [6]徐世法,房聪,张绍源,等.养生条件对冷拌冷铺改性乳化沥青混合料强度增长规律的影响研究[J].北京建筑大学学报,2022,38(4):24-31.
- [7]何伟南.乳化沥青冷再生混合料劈裂强度影响因素分析[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(8):73-76.