

基于模糊层次分析法的轨道交通信号设备寿命评价模型

金捷 洪海珠 张雅

(上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 通过结合层次分析法与模糊综合评价, 建立信号设备使用寿命的影响因素树, 进而建立信号设备使用寿命模糊层次评价模型。详细阐述了叶要素量化信息的等级划分和评价过程。多次评价的结果可生成追踪曲线, 进而实现对设备状态的趋势预判, 并提出相应的预警及维护策略建议。以上海轨道交通某设备为例, 验证了该使用寿命模糊层次模型的可操作性和有效性。

关键词 城市轨道交通; 信号设备; 使用寿命; 评判准则; 综合评价

中图分类号 F530.67; U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.014

Lifespan Evaluation Model of Rail Transit Signal Equipment Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process

JIN Jie, HONG Haizhu, ZHANG Ya

Abstract By combining analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation, a tree structure of factors influencing signal equipment lifespan is constructed and the service lifespan fuzzy hierarchy evaluation model of the signal equipment is established. The classification criteria of leaf element state and evaluation process are elaborated. The results of multiple evaluations will generate tracking curves to be used for equipment status trend prediction, and corresponding prevention and maintenance strategies are proposed. The feasibility and validity of the evaluation model has been verified by a case of actual equipment in Shanghai rail transit.

Key words urban rail transit; signal equipment; service lifespan; evaluation criteria; comprehensive evaluation

Author's address Technology Center of Shanghai Shentong Metro Group Co. Ltd., 201103, Shanghai, China

随着我国城市轨道交通客运量的增长, 列车运行间隔不断缩短, 对列车运行控制系统的可用性和可靠性也提出了更高要求。信号设备种类多、数量大、工况复杂, 使用多年后, 不同设备的状态和维护

成本等变化趋势越来越离散。由于现阶段缺乏对信号设备状态评价的体系和工具, 因此, 普遍参照铁路相关规范, 并结合运营维护经验来制定大修改造方案和维修维护策略, 而对设备状态的评价更依赖相关专业人员对个别因素的主观考量, 其评价结果不能综合、有效地反映信号设备实际状态。本文结合层次分析法及模糊综合评价, 提出一种适用于上海轨道交通信号设备使用寿命的评价模型, 并对设备状态进行连续跟踪评价, 以综合评价结果为导向, 对设备状态进行连续追踪及趋势预判, 可在制定设备大修方案和维护策略时, 提供技术辅助和数据支撑。

1 模糊层次评价模型

模糊层次评价模型通过采用层次分析法建立影响因素树型层次结构, 全面梳理设备的影响因素, 通过综合分析多种因素对设备状态进行评价。为弱化主观因素对评价结果的影响, 从设备已有的客观历史数据中提取信息, 划分出叶要素状态等级的取值界线, 建立定性定量相结合的评价准则, 并进行模糊综合评价。该评价模型不仅能对尚未到达使用年限但状态已呈不佳趋势的设备提供对应的维护或更换的预警信息, 又能对到达使用年限但状态仍较好的设备进行使用状态等级评价, 避免了设备过早退役造成的经济浪费。

1.1 层次分析法

层次分析法是一种将复杂问题分解为多目标或准则的优化决策方法^[1]。

如图1所示, 基于层次分析法的权重计算主要步骤有:

1) 对构成评价系统的评价指标要素建立多级递阶的层次结构模型^[1];

2) 对同属一级的要素以上一层的要素为准进

行两两比较,并由评价尺度得到其相对重要度,进而完成判断矩阵的建立;

3)通过计算判断矩阵的特征向量来确定各要素的相对重要度;

- 4)进行一致性检验;
- 5)分层获得同层各要素之间的相对重要度,并计算各级要素关于总体的综合重要度;
- 6)完成综合一致性检验。

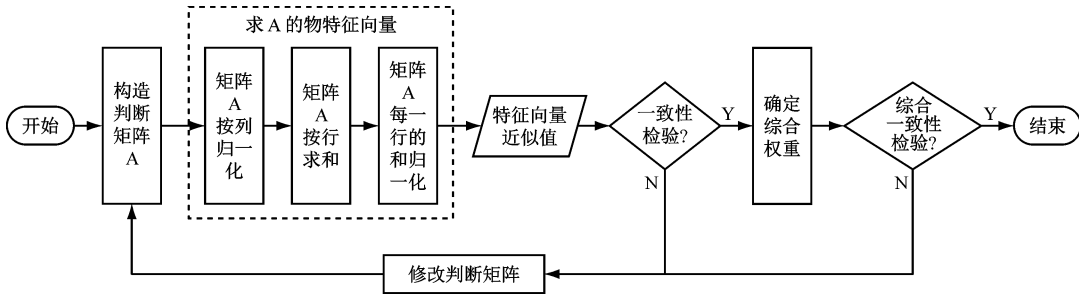


图 1 基于层次分析法的权重计算流程图

根据《铁路信号维护规则》,大修方案的制定要遵照“一般信号设备大修周期为 15 年”的规定,制定维护周期要满足设备动作次数及使用时间的相关要求。通过层次分析法建立的影响因素树型结构,能对评价对象的状态进行全方位评价,相比现阶段仅针对单一因素或个别因素来对设备状态进行评价的结果更加全面和准确。

1.2 模糊综合评价

模糊综合评价是将众多边界不清、不易定量的影响因子定量化,从多个因子对被评价对象所属等级状况进行综合评价的一种方法^[2]。基于模糊综合评价的具体步骤如下:

- 1)确定被评价对象因素集合;
- 2)确定评价等级的评语集及隶属函数;
- 3)逐一对被评价对象的每个因素进行隶属度量化,生成模糊关系矩阵 R ;
- 4)采用层次分析法分别得到分层递阶模型中所有要素的综合重要度向量^[2];
- 5)计算模糊综合评价结果向量 B ;
- 6)由每层评价级对应的评价尺度及标量值,对综合评价算子进行计算。

在融合模糊综合评价中,结合现有的信号设备寿命相关规范要求和上海轨道交通运营维护经验,建立一套基于“优、良、中、差”四个等级的叶要素评价准则。通过对所有叶要素进行状态评价,得到评价对象的综合评价结果。这种评价方式能大幅削弱单个叶要素状态对评价结果的极端影响。

2 设备寿命状态评价

对设备寿命状态进行评价时,通过层次分析法自上而下构建评价对象的影响因素树及计算综合权重系数,结合模糊综合评价分析叶要素状态,并自下而上计算,得到兼具定性与定量分析的被评价对象设备状态隶属度,进而连续跟踪评价、预判。设备寿命状态评价流程如图 2 所示。

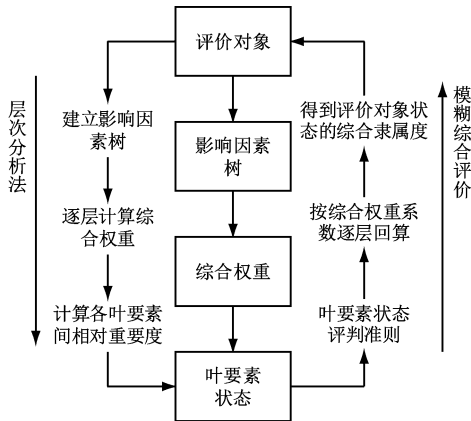


图 2 设备寿命状态评价流程图

2.1 建立影响因素树

基于层次结构建立影响因素树。第一层定义为 A 层,为当前评价对象;第二层定义为 B 层,分为经济寿命(B_1)、物理寿命(B_2)和技术寿命(B_3)等 3 个评价维度;第三层起对每个评价维度的影响因素进行逐层细分。位于最底层的各影响因素为叶要素,需对其进行状态评价。

2.2 计算权重系数

进一步确定影响因素判断矩阵,自上向下计算权重系数。根据影响因素树形结构,每两个连续层

之间可形成 1 个影响因素判断矩阵。如表 1 所示，其中 a_{ij} 表示 i 元素与 j 元素相对重要度之比。

表 1 A-B 层间要素权重判断矩阵表			
A	B_1	B_2	B_3
B_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}
B_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}
B_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}

由多位专家对各层次的权重判断矩阵打分后，对每个元素进行汇总统计，得到综合权重结果。综合权重能够量化反应评价对象各影响因素之间的相对重要度。

2.3 叶要素状态评价

叶要素状态评价即通过分析历史数据，结合既有规范和维护经验，对评价对象的叶要素进行全面评价，其评价原则是能使叶要素状态评价结果更准确，降低主观因素的影响。

首先，甄别出叶要素是否存在量化信息；然后，结合历史数据，按故障数据或成本数据等叶要素量化信息的分布规律，将量化信息按取值划分状态等级；之后，根据量化信息等级，实现设备使用寿命评价从单一定性分析到定量、定性综合分析的转变。最后，随着量化信息不断的积累，通过将模型评价结果与设备实际状态进行对比，反复调整修正界线取值，使评价结果更加精准、细化。其中，状态等级可划分为优、良、中、差，也可依据设备的实际情况灵活划分为优、差，或优、中、差等。

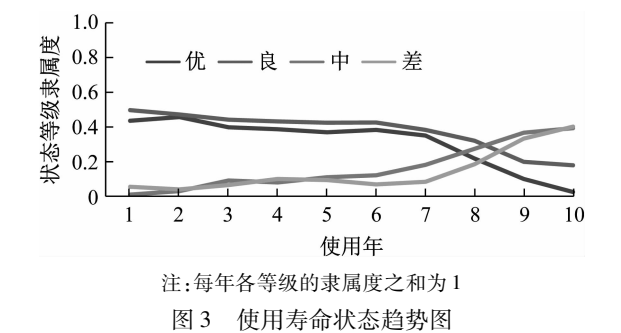
本文结合全网各条运营线主要设备的多年历史数据和维护经验，以及对应的运营里程，折算成以“次/(万车·km)”为单位的故障发生率，并形成一套适用于全国各线路的量化评价指标。其中，某信号设备的“一般故障发生率”状态等级划分如表 2 所示。

表 2 某信号设备一般故障发生率的状态等级	
状态等级	一般故障发生率/(次/(万车·km))
优	1
良	1~3
中	3~5
差	5

对于无量化信息的叶要素，先综合多领域专家对叶要素等级的评价结果，再由模糊综合评价算子计算出单个叶要素的隶属度。

2.4 寿命评价与预警

对每个叶要素的状态以优、良、中、差等 4 个状态等级的隶属度进行评价，通过权重系数逐层回算，最终得到评价对象的状态。进一步连续跟踪评价多年后，可获得使用寿命状态等级趋势图。某叶要素的使用寿命状态等级趋势如图 3 所示。



以图 3 为例，观察与分析趋势图，可对被评价设备的使用寿命状态作出评价及预警。

- 1) 前期评判结果的隶属度值变化相对平稳，其中，优、良等级的隶属度略下降，中、差等级的隶属度略上升，评判对象的使用寿命状态在该阶段相对稳定。
- 2) 后期评判结果的隶属度值波动相对较大，评判对象的使用寿命状态在该阶段出现快速衰退现象。
- 3) 当趋势图中优等级与良等级曲线明显下降，且优等级曲线与中等级曲线交叉时，可以发出维护预警；当良等级曲线与中等级曲线交叉时，可发出更换预警；当良等级曲线与差等级曲线交叉时，可发出强制更换预警。

3 案例分析

在上海轨道交通网内，选择应用广泛且具有典型性的实际设备为例，验证该评价模型的有效性和可操作性。为使对模型的验证更全面、有效，本文采用已投用一定年限、具备历史维护数据的某线路轨道电路设备作为对象进行验证。

3.1 轨道电路的影响因素树

基于层次分析法，对案例进行影响因素分析，构建评价对象的影响因素树形结构，如图 4 所示。

3.2 各因素的综合权重

分别从信号专业技术、运营操作、现场维护、财务管理及理论方法研究等多个专业领域邀请 30 余名专家，对各层次的分项判断矩阵进行相对重要度

打分。对打分结果进行汇总统计,得到综合权重结果表如表 3 所示。

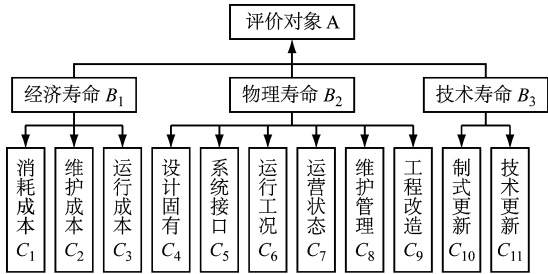


图 4 案例设备的使用寿命层次结构图

表 3 某线路某子系统使用寿命综合权重表

A 层	B 层		C 层		综合权重
	要素	权重	要素	权重	
评价对象 A	B ₁	0.274	C ₁	0.247	0.067 7
			C ₂	0.425	0.116 5
			C ₃	0.328	0.089 9
	B ₂	0.398	C ₄	0.158	0.062 9
			C ₅	0.108	0.043 0
			C ₆	0.195	0.077 6
			C ₇	0.151	0.060 1
			C ₈	0.227	0.090 3
			C ₉	0.161	0.064 1
	B ₃	0.328	C ₁₀	0.429	0.140 7
			C ₁₁	0.571	0.187 3

3.3 轨道电路状态评价与趋势分析

对每个叶要素进行状态评价,并按照自下向上的原则逐层反算,得到案例的使用寿命状态隶属度值。连续 5 年(2012—2016 年)的综合评价结果,如表 4 所示。

表 4 连续 5 年使用寿命隶属度表

状态等级	隶属度				
	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
优	0.456	0.359	0.298	0.188	0.025
良	0.512	0.492	0.397	0.345	0.239
中	0.020	0.115	0.234	0.356	0.498
差	0.012	0.034	0.071	0.111	0.238

注:每年各等级的隶属度之和为 1

根据连续 5 年的评价结果,形成如图 5 所示的案例设备的使用寿命状态趋势图。

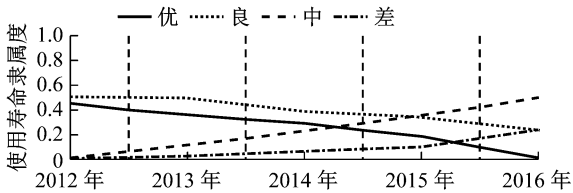
1)图 5 中的优等级曲线与良等级曲线呈下降趋势,而中等级曲线与差等级曲线则呈上升趋势。

可见,该子系统的使用寿命状态正趋于不佳。

2)优等级曲线与中等级曲线在 2014 年产生交叉,优等与良等的隶属度之和远高于中等与差等的隶属度之和。可见,设备状态仍较好,故对该设备作出维护预警,即增加对该设备的维护频次。

3)良等级曲线与中等级曲线在 2015 年产生交叉。因此,虽优等级与良等级的隶属度之和略高于中等级与差等级的隶属度之和,但根据变化趋势,应对该设备作出更换预警,即建议对该设备开展部件修的必要性研究。

4)良等级曲线与差等级曲线在 2016 年产生交叉,且中等级与差等级的隶属度之和远高于优等级与良等级的隶属度之和。可见,设备状态出现不佳的趋势,故对该设备作出强制更换预警,即建议提前开展对该设备的大修改造方案研究。



注:每年各等级隶属度之和为 1

图 5 轨道电路设备使用寿命状态趋势图

3.4 趋势验证

与该线路后续多年实际设备状态变化和维修、改造情况进行对比发现,评价结果形成的趋势预判相对准确,所提出的策略建议在后续运营维护实施过程中也得到了相应验证。

4 结语

本文结合层次分析法和模糊综合评价,建立模糊层次评价模型,本文采用上海轨道交通轨道电路设备验证了模糊层次评价模型的有效性。该模型可为信号设备的维护及大修改造提供有效的数据支撑,对信号设备使用寿命状态评价更科学、合理,使信号设备在其生命周期内更安全稳定地运行。

参考文献

[1] 孙宏才,田平,王莲芬. 网络层次分析法与决策科学[M]. 北京:国防工业出版社,2011.

[2] 杜栋,庞庆华,吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京:清华大学出版社,2008.

[3] 李章杨,陆国政,虞翊,等. 高铁信号关键设备使用寿命评价方法[J]. 铁道通信信号,2017,53(10):1.

(收稿日期:2019-05-18)