

文章编号: 1674—8247(2021)05—0017—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.004

基于 AHP-熵权法的 400 km/h 高速铁路接触网 可信度评价

谢晨琳¹ 于 龙¹ 陈 可^{1,2} 王 健¹

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:本文综合考虑了影响接触网可信度的因素,构建了接触网可信度评价体系,并以我国某高速铁路接触网系统为例,整理和归纳电气化铁路实际运行过程中的接触网状态数据。通过 AHP-熵权法求得接触网的线路打分,根据打分结果对电气化线路进行等级划定,得到接触网线路的可信度等级和排名。本文对影响接触网可信度的主要评价指标进行分析,并提出了预防故障和接触网维修的建议,给出了提高接触网可信度的思路,对 400 km/h 高速铁路接触网的运营和维护具有重要意义。

关键词:接触网; 400 km/h; 可信度; 层次分析法; 熵权法

中图分类号:U225 **文献标志码:**A

Credibility Evaluation of 400 km/h High-speed Railway Overhead Contact System based on AHP-entropy Weight Method

XIE Chenlin¹ YU Long¹ CHEN Ke^{1,2} WANG Jian¹

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In this paper, the factors affecting the credibility of the overhead contact system are considered comprehensively, and the evaluation system of catenary credibility is constructed. Furthermore, the state data of the overhead contact system in the actual operation of the electrified railway are sorted and summarized with a case study of the overhead contact system of the high-speed railway in China. The credibility grade and ranking of the overhead contact system line are obtained by classifying the electrified line according to the score of the overhead contact system line obtained by using the AHP-entropy weight method. In this paper, the main evaluation indexes affecting the credibility of the overhead catenary system are analyzed, and suggestions on fault prevention and catenary maintenance are put forward, and ideas for improving the credibility of the overhead catenary system are given, which is of great significance to the operation and maintenance of the overhead catenary system in 400 km/h high-speed railway.

Key words: overhead catenary system; 400 km/h; credibility; analytic hierarchy process; entropy weight method

在高速铁路牵引供电系统中,接触网大部分沿铁路线架设于露天的户外环境中,极易发生故障或受到外界环境因素的影响^[1]。因此,接触网的运行维护成

为铁路维护工作的重中之重。

目前,铁路部门主要通过铁路供电安全检测监测系统(6C 系统)对接触网进行监测,采用阈值比较的

收稿日期:2021-03-01

作者简介:谢晨琳(1998-),女,硕士研究生。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技开发计划(KSNQ202056)

引文格式:谢晨琳,于龙,陈可,等.基于 AHP-熵权法的 400 km/h 高速铁路接触网可信度评价[J].高速铁路技术,2021,12(5):17-22.

XIE Chenlin, YU Long, CHEN Ke, et al. Credibility Evaluation of 400 km/h High-speed Railway Overhead Contact System based on AHP-entropy Weight Method [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5):17-22.

方法对接触网零部件状态进行判断。但这种数据处理手段无法充分利用接触网的监测数据,挖掘出其背后隐藏的信息,更无法发现接触网零部件状态的变化趋势。因此,对接触网状态监测数据进行综合分析评估,发现接触网状态的变化趋势,为维修决策提供技术支持,是当前接触网运维亟需开展的研究课题。

近年来,不少现代综合评价方法被应用到接触网的健康评价研究中^[2]。赵峰等^[3]通过 GO-FLOW 法对接触网系统进行了可靠性分析,研究发现定位装置和接触悬挂对接触系统的整体可靠性影响较大。张卫东^[4]等利用状态空间法和网络法建立了接触网机械、电气磨损的可靠性模型,分别对单边供电和双边供电时的供电臂可靠性进行了分析。王贞^[5]等对三种不同天气环境下接触网各个元件的故障率和修复率进行了建模及修正,定量分析了天气状态对接触网可靠性的影响。刘仕兵^[6]等提出了基于灰色聚类理论的接触网健康状态综合评估模型,但是该模型评估指标较少,评估结果不能表征接触网整体的运行状态。

当前,接触网各项指标缺乏统一的评价标准导致难以对其评价结果进行较为客观的对比分析,且现有研究主要围绕中低速铁路开展评价,对 400 km/h 及以上高速铁路接触网可信度评价的研究较少。

本文全面考虑质量评价指标、质量鉴定指标、可用性指标、维修性指标等接触网运行过程的健康指标,采用层次分析和熵权法作为接触网系统评分和等级划定的依据^[7],构建 400 km/h 高速铁路接触网评价指标体

系,对 400 km/h 高速铁路接触网可信度进行综合评价,并给出提高接触网可信度的思路。

1 接触网可信度评价模型的构建

1.1 接触网可信度评价模型

接触网可信性是指接触网在运行过程中的可靠性、可用性和可维修性。可信性是接触网运行质量的决定性因素,可用铁路运行过程中接触网的各项指标参数对其进行描述。

评价指标的选取遵循目的性原则、科学性原则、系统性原则、层次性原则、可量化原则和时效性原则。

质量评价即依据接触网各指标参数值是否位于合理区间或偏离合理区间的程度,对接触网系统的总体质量进行评价。质量评价需考察几何指标、平顺性指标和受流性能指标。

质量鉴定即通过对接触网设备及零部件的故障强度、缺陷等级等进行综合统计分析,掌握接触网整体技术状态。质量鉴定需考察故障强度和一级故障比例两个指标。

可用性评价即对接触网系统在规定区间、规定工况下持续供电的能力进行评价。可用性评价需考察中断供电频率和中断供电平均时间。

维修性评价即在规定程序和可使用资源下,评价接触网系统或零部件恢复原有状态或工况的能力。维修性评价需考察修复率和平均修复时间。

接触网可信度评价模型如图 1 所示。

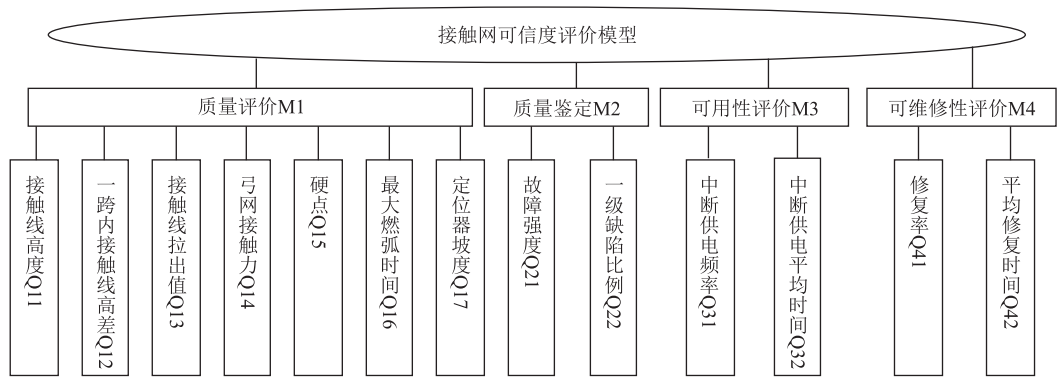


图 1 接触网可信度评价模型图

1.2 接触网可信度评价步骤

构建接触网可信度评价的具体步骤如图 2 所示。其中,层次分析法的基本原理是对评价体系进行分解,形成具有阶梯性的排列结构,接着对评价指标的主观判断进行量化,最后确定各指标的权重。熵权法是一种客观赋权法,通过分析每个影响因子指标的相关度

和每个影响因子提供的信息量来确定指标权重。层次分析法为主观因素对结果的影响过大,而熵权法能避免人为因素的干扰,综合两种方法的优缺点,将 AHP-熵权法相结合来确定权重。对一级指标仅采用层次分析法赋权,对二级评价指标权重采用 AHP-熵权法。

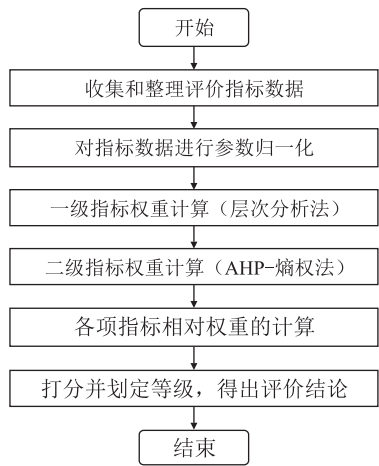


图2 接触网可信用度评价步骤图

2 接触网可信用度评价

2.1 原始数据归一化

对原始指标进行数据归一化是进行接触网可信用度评价的基础。归一化能消除不同指标维度造成的差异,即将带有单位的各项指标转化为无量纲的0~1之间的数据。评价指标可分为“极大型”指标、“极小型”指标、和“区间型”指标^[8-9]。

(1)“极大型”指标的归一化公式为:

$$x_{gi} = \frac{x_i - x_l}{x_h - x_l} (i = 1, 2, \cdots, m)$$
 (1)

(2)“极小型”指标的归一化公式为:

$$x_{gi} = \frac{x_h - x_i}{x_h - x_l} (i = 1, 2, \cdots, m)$$
 (2)

(3)“区间型”指标的归一化公式为:

$$x_{gi} = \begin{cases} 1 - \frac{d_1 - x_i}{\max(d_1 - x_l, x_h - d_2)} & x_i < d_1 \\ 1 & x_i \in [d_1, d_2] \\ 1 - \frac{x_i - d_2}{\max(d_2 - x_l, x_h - d_2)} & x_i > d_2 \end{cases}$$
 (3)

式中: x_i ——评价体系中一项评价指标的第*i*个原始参数值;
 x_h ——该指标参数的极大值;
 x_l ——该指标参数的极小值;
 x_z ——该参数中间分界值,一般等于最优值;
 x_{gi} ——评价体系中一项评价指标的第*i*个原始参数值经归一化后的数值;
 d_1 ——评价指标最佳取值范围的下限;
 d_2 ——评价指标最佳取值范围的上限;

m ——评价指标的采样数。

根据指标特征对其进行归一化方法分类,评价指标隶属度分类如表1所示。

表1 评价指标的归一化方法分类表

评价指标类型	接触网可信用度评价指标
“区间型”指标	接触线高度、弓网接触力、定位器坡度
“极大型”指标	修复率
“极小型”指标	硬点、最大燃弧时间、平均修复时间、接触线拉出值、一跨内接触线高差、故障强度、一级缺陷比例、中断供电频率、中断供电平均时间

采用上述归一化法对高速铁路接触网的原始数据做归一化处理,以一年四个季度作为划分,对某高速铁路接触网原始数据的归一化标准值进行统计,如表2、表3所示。

表2 接触网质量评价指标的归一化标准值表

季度	Q11 /mm	Q12 /mm	Q13 /mm	Q14 /N	Q15 /(m/s ²)	Q16 /ms	Q17 /(°)
2016J1	1	0.933 1	1	0.895 5	1	1	1
2016J2	1	0.307 7	0.874 0	1	1	0.923 1	1
2016J3	0.331 6	1	0.189 0	1	1	1	1
2016J4	1	1	0.173 2	1	1	1	1
2017J1	1	1	0.692 9	1	1	1	1
2017J2	1	1	0.661 4	1	1	1	1
2017J3	0	0.849 5	0	1	0	1	1
2017J4	1	0.759 2	1	0	1	1	0
2018J1	0.196 1	0.709 0	0.716 5	1	1	1	1
2018J2	0.017 8	0.775 9	0.535 4	1	1	1	1
2018J3	0.177 4	0.755 9	1	1	1	1	1
2018J4	0.511 6	0	0.322 8	1	1	1	1
2019J1	0.496 4	1	0.834 6	1	1	1	1
2019J2	1	1	0.456 7	1	1	0	1
2019J3	0.446 5	1	0.275 6	1	1	1	1
2019J4	1	1	0.511 8	1	1	1	1

表3 接触网质量鉴定、可用性评价和维修性评价指标的归一化标准值表

季度	Q21 /(次/km)	Q22	Q31 (次/km)	Q32 /min	Q41	Q42 /d
2016J1	0.966 8	0.873 8	0.905 3	1	0.071 4	0.529 7
2016J2	0.962 7	0.7757	0.810 6	0.376 5	0.007 7	0
2016J3	0.663 9	0.401 8	0.905 3	1	0.102 0	0.640 6
2016J4	0.892 1	0.340 0	1	1	0.004 3	0.636 6
2017J1	0.962 7	0.663 5	0.968 4	0.198 6	0.003 1	0.911 3
2017J2	0.990 6	0.495 3	0.142 9	0	0.000 8	0.974 2
2017J3	0.539 9	0.217 1	0	0.507 3	1	0.733 7
2017J4	0.760 6	0.722 9	0.678 6	1	0.115 6	0.948 5
2018J1	0.253 5	0.035 0	0.892 9	1	0.009 6	0.737 5
2018J2	0	0	0.678 6	0.127 7	0.030 0	0.848 0
2018J3	0.051 6	0.040 5	0.714 3	0.635 0	0	0
2018J4	0.469 5	0.017 3	0.750 0	0.896 0	0.002 7	0.902 4
2019J1	0.813 6	0.128 2	1	1	0.005 1	0.576 3
2019J2	0.830 6	0.495 3	0.871 1	1	0.033 2	0.741 9
2019J3	0.305 4	0.125 9	0.742 2	1	0.028 6	0.209 1
2019J4	0.932 2	0.747 6	0.742 2	1	0.000 5	0.845 4

2.2 指标权重的计算

采用层次分析法对一级指标进行赋权^[10],根据各项评价指标的相对重要性构建判断矩阵。停电跳闸是接触网最为严重的事故之一,故其可用性位居一级评价指标重要性之首。维修性是故障发生后的补救措施,故其相对重要性较低^[11]。构造一级指标的两两标度取值如表 4 所示。

表 4 一级指标两两标度取值表

一级评价指标	质量评价	质量鉴定	可用性评价	维修性评价
质量评价	1	1	1/3	7
质量鉴定	1	1	1/3	7
可用性评价	3	3	1	9
维修性评价	1/7	1/7	1/9	1

由表 4 可得判断矩阵 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/3 & 7 \\ 1 & 1 & 1/3 & 7 \\ 3 & 3 & 1 & 9 \\ 1/7 & 1/7 & 1/9 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

一级评价指标共四项,平均随机一致性指标 $R.I.=0.89$,最大特征根 $\lambda_{max}=4.09$,求得 $C.R.=0.03$,小于 0.10,故一级评价指标基于层次分析法的权重确定符合一致性检验。

层次分析权重计算方法为是判断矩阵进行层次单排序,即计算出某一层次指标相对于上一层评价指标的相对权重^[12]。根法的权重计算公式为:

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{M_i}}{\sum_{j=1}^n \sqrt[n]{M_j}} (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (5)$$

通过式(5)可得一级评级指标的权重,如表 5 所示。

表 5 接触网可信用一级评价指标权重表

指标	质量评价	质量鉴定	可用性评价	维修性评价
权重	0.217 2	0.217 2	0.527 2	0.038 4

采用层次分析法对质量评价二级指标进行赋权,综合比较二级指标的相对重要性,得到质量评价二级指标的判断矩阵 R_1 :

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/3 & 3 & 3 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1/5 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ 3 & 5 & 1 & 5 & 5 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1 & 1/5 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1/5 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1/5 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1/7 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

阶数为 7 时,平均随机一致性指标 $R.I.=1.36$,最大特征根 $\lambda_{max}=7.12$,求得 $C.I.=0.019\ 8$, $C.R.=$

0.014 5,小于 0.1。因此,质量评价指标基于层次分析法的权重计算通过一致性检验。

由式(5)即可得质量评价二级指标的权重如表 6 所示。

表 6 质量评价指标层次分析法主客观权重表

指标	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17
AHP 权重	0.214 6	0.084 6	0.412 7	0.084 6	0.084 6	0.084 6	0.034 2

质量鉴定、可用性评价和维修性评价只有两项二级指标,采用层次分析法即可较准确地得到权重分配。当阶数为二阶时,判断矩阵具有完全一致性,平均随机一致性指标 $R.I.$ 只是形式上的,此时, $C.R.=0$ 。

构造质量鉴定指标和维修性评价指标的判断矩阵 R_2 和 R_4 的计算公式为:

$$R_2 = R_4 = \begin{bmatrix} 1 & 9 \\ 1/9 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

中断供电频率和中断供电平均时间各占可用性评价一半的权重,利用权重公式计算得到各自的权重。质量鉴定、可用性评价和维修性评价指标权重如表 7 所示。

表 7 质量鉴定、可用性评价和维修性评价指标权重表

指标	Q21	Q22	Q31	Q32	Q41	Q42
权重	0.9	0.1	0.5	0.5	0.9	0.1

使用熵权法计算评价指标权重的步骤^[13-14]为:

(1) 构建评价指标原始数据归一化矩阵,设有 n 个待评价的样本, m 项评价指标。构建待评价样本的相应评价指标原始数据矩阵为 $R = (r_{ij})_{n \times m}$,如式(8)所示。

$$R = (r_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (8)$$

其中, r_{ij} 表示的是第 i 个待评价样本的第 j 项评价指标归一化后的值。

(2) 第 i 个待评价样本的第 j 项评价指标的特征值比重 p_{ij} 如式(9)所示。

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} (i = 1, 2, 3, \cdots, n, j = 1, 2, 3, \cdots, m) \quad (9)$$

(3) 第 j 个评价指标的熵值 e_j 如式(10)所示。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad (10)$$

(4) 第 j 个评价指标的熵权 w_j 如式(11)所示。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j}, (j = 1, 2, 3, \cdots, m)$$

(11)

对质量评价指标进行熵权法计算以求得客观权重,将接触网归一化后的质量评价指标原始数据依次带入式(8)~式(11),可得客观权重如表 8 所示。

表 8 质量评价指标熵权法客观权重表

指标	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17
熵权	0.315 7	0.118 3	0.232 1	0.083 7	0.083 3	0.083 5	0.083 3

组合权重 w_k 为主观权重 w_{k-AHP} 和客观权重 $w_{k-Entropy}$ 的线性组合,如式(12)所示。

$$w_k = 0.6w_{k-AHP} + 0.4w_{k-Entropy}$$

(12)

质量评价二级指标的 AHP 权重、熵权和组合权重如表 9 所示。

表 9 质量评价二级指标权重表

指标	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17
w_{k-AHP}	0.214 6	0.084 6	0.412 7	0.084 6	0.084 6	0.084 6	0.034 2
$w_{k-Entropy}$	0.315 7	0.118 3	0.232 1	0.083 7	0.083 3	0.083 5	0.083 3
w_k	0.255 1	0.098 1	0.340 4	0.084 3	0.084 1	0.084 2	0.053 8

将质量评价指标下的二级指标按权重大小排序,结果如表 10 所示,从表 10 可以看出,质量评价指标中权重最大的指标为拉出值。

表 10 质量评价二级指标权重排序表

质量评价二级指标	组合权重	权重排序
拉出值	0.340 4	1
接触线高度	0.255 1	2
跨内高差	0.098 1	3
弓网接触力	0.084 3	4
最大燃弧时间	0.084 2	5
硬点	0.084 1	6
定位器坡度	0.053 8	7

将二级指标权重与其对应的一级指标权重相乘,即可得到二级评价指标的总权重。高速接触网可信度二级评价指标总权重如表 11 所示。

表 11 接触网可信度二级评价指标总权重表

指标	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17
权重	0.055 4	0.021 3	0.073 9	0.018 3	0.018 3	0.018 3	0.011 7
指标	Q21	Q22	Q31	Q32	Q41	Q42	
权重	0.195 5	0.021 7	0.263 6	0.263 6	0.034 5	0.003 8	

2.3 确定可信度打分及等级

线路打分公式如式(13)、式(14)所示。

$$Q_i = \sum_{k=1}^n W_k x_{ik}$$

(13)

$$W_k = W_j w_{jk}$$

(14)

式中: W_k ——二级评价指标 k 占整个接触网可信度评价系统的权重;

x_{ik} ——第 i 条铁路线的二级评价指标 k 归一化后的值;

W_j ——一级评价指标 j 占整个接触网可信度评价系统的权重; w_{jk} 指一级评价指标 j 所包含的二级指标 k 的权重,即直接利用 AHP-熵权法求得的权重。

根据接触网可信度评价结果的打分 Q_i 对电气化铁路接触网系统进行可信度等级划分,划分依据如表 12 所示。

表 12 接触网可信性等级划分表

接触网可信度评价结果打分	可信度评价结果打分对应等级划分
[0.9,1]	优
[0.8,0.9)	良
[0.7,0.8)	中
[0.6,0.7)	合格
[0,0.6)	差

某高速铁路接触网的可信度打分及等级结果如表 13 所示。

表 13 高速铁路接触网可信度打分及等级表

季度	质量评价	质量鉴定	可用性评价	维修性评价	可信度打分	线路排名	等级
2016J1	0.213 9	0.208 0	0.502 3	0.004 5	0.928 6	1	优
2016J2	0.191 7	0.205 0	0.312 9	0.000 3	0.710 0	8	中
2016J3	0.120 2	0.138 5	0.502 3	0.006 0	0.767 0	7	中
2016J4	0.156 1	0.181 8	0.527 2	0.002 6	0.867 7	3	良
2017J1	0.194 5	0.202 6	0.307 6	0.003 6	0.708 4	9	中
2017J2	0.192 2	0.204 4	0.037 7	0.003 8	0.438 0	14	差
2017J3	0.066 4	0.110 3	0.133 7	0.037 3	0.347 7	15	差
2017J4	0.182 1	0.164 4	0.442 5	0.007 6	0.796 6	6	中
2018J1	0.145 5	0.050 3	0.499 0	0.003 2	0.698 0	10	合格
2018J2	0.123 7	0.000 0	0.212 6	0.004 3	0.340 5	16	差
2018J3	0.166 4	0.011 0	0.355 7	0.000 0	0.533 1	13	差
2018J4	0.118 8	0.092 2	0.433 9	0.003 6	0.648 4	12	合格
2019J1	0.177 1	0.161 8	0.527 2	0.002 4	0.868 5	2	良
2019J2	0.158 7	0.173 1	0.493 3	0.004 0	0.829 1	5	良
2019J3	0.133 0	0.062 4	0.459 3	0.001 8	0.656 5	11	合格
2019J4	0.181 1	0.198 5	0.459 3	0.003 3	0.842 1	4	良

从表 13 可以看出,2016J1、2016J4、2019J1、2019J2、2019J4 的可信度评分均大于 0.8,说明这些季度线路的接触网可信度良好。2016J2、2016J3、2017J1、2017J4 的评价结果介于 0.7 到 0.8 之间,其原因在于这几个季度线路原始数据的接触线拉出值偏离最佳区间较远,线路燃弧现象较多。2017J2、2017J3、2018J2、2018J3 四个季度的可信度打分低于 0.6,可信度较差。

3 结束语

本文全面考虑了影响接触网可信度的因素,构建了接触网可信度评价体系,将 AHP 和熵权法应用到高

速铁路接触网可信度评价中,并对我国某高速铁路接触网近四年的故障和维修数据进行分析。结果表明,在质量评价指标中,拉出值对接触网可信度的影响最大。因此,在接触网的运营维护过程中,需重点做好接触线拉出值的检测和维护工作,使接触线拉出值处于理想区间内,这对提高接触网可信度具有重要意义。

我国南方地区每年第二、三季度降水较多,极易出现雷雨等恶劣天气,建议铁路部门在雨季做好接触网的检修和维护,确保防雷设施安全有效地工作,这也有利于提高接触网的可信度。

参考文献:

- [1] 董昭德,李岚. 接触网工程与设计[M]. 北京:科学出版社,2014.
- DONG Zhaode, LI Lan. Engineering and Design of the Overhead Catenary System[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] 卿三惠,李雪梅,卿光辉. 中国高速铁路的发展与技术创新[J]. 高速铁路技术, 2014, 5(1): 1-7.
- QING Sanhui, LI Xuemei, QING Guanghui. Development and Technical Innovation of China's High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2014, 5(1): 1-7.
- [3] 赵峰,梁丽,王思华. 基于 GO-FLOW 法的高速铁路接触网系统可靠性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 351-356.
- ZHAO Feng, LIANG Li, WANG Sihua. A Reliability Evaluation of High Speed Railway Overhead Contact Systems Based on the GO-FLOW Methodology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 351-356.
- [4] 张卫东,贺威俊. 电力牵引接触网系统可靠性模型研究[J]. 铁道学报, 1993, 15(1): 31-38.
- ZHANG Weidong, HE Weijun. A Study on the Reliability Model of the Contact System in Electric Traction [J]. Journal of the China Railway Society, 1993, 15(1): 31-38.
- [5] 王贞,林圣,冯珂,等. 考虑天气状态的接触网可靠性评估方法研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(10): 49-56.
- WANG Zhen, LIN Sheng, FENG Ding, et al. Research on Reliability Evaluation Method for Catenary System Considering Weather Condition [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(10): 49-56.
- [6] 刘仕兵,朱雪龙,张艳伟,等. 基于灰色聚类 and 组合赋权法的高速铁路接触网健康状态评估研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(7): 57-63.
- LIU Shibing, ZHU Xuelong, ZHANG Yanwei, et al. Research on Health Status Assessment of High-speed Railway Catenaries Based on Gray Clustering and Combination Assigning Method [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(7): 57-63.
- [7] 刘润恺,于龙,陈德明. 基于 AHP-熵权法的高铁接触网可信性评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(8): 1882-1889.
- LIU Runkai, YU Long, CHEN Deming. Research on Dependability Evaluation of High-speed Railway Catenary Based on AHP-Entropy Method [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(8): 1882-1889.
- [8] 王广月,刘健. 基于组合权重的灰色关联度方案决策模型及其应用[J]. 工业建筑, 2004, 34(4): 61-65.
- WANG Guangyue, LIU Jian. Grey Relative Degree Decision Making Model Based on Combinatorial Weight and Its Application [J]. Industrial Construction, 2004, 34(4): 61-65.
- [9] 边瑛. 军队中心医院知识资本评价研究[D]. 重庆:第三军医大学, 2009.
- BIAN Ying. Study on Evaluation System of Intellectual Capital in Military Central Hospital [D]. Chongqing: Third Military Medical University, 2009.
- [10] BEYNON M. DS/AHP Method: a Mathematical Analysis, Including an Understanding of Uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 140(1): 148-164.
- [11] T. L. Saaty. 层次分析法—在资源分配、管理和冲突分析中的应用 [M]. 北京:煤炭工业出版社, 1998.
- T. L. Saaty. Analytic Hierarchy Process-application in Resource Allocation, Management, and Conflict Analysis [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1998.
- [12] 王莲芬,许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京:中国人民大学出版社, 1990.
- WANG Lianfen, XU Shubai. Introduction to Analytic Hierarchy Process [M]. Beijing: China Renmin University Press, 1990.
- [13] HUA Shang, LING Bao. The Fuzzy Integrative Evaluation Model and Empirical Study of Enterprise Strategy Risk Based on AHP-Entropy Combination Weight Method [C]//2010 International Conference on Management Science & Engineering 17th Annual Conference Proceedings. Melbourne, VIC, Australia. IEEE, 2010: 334-341.
- [14] WANG Shouxiang, GE Leijiao, CAI Shengxia, et al. Hybrid Interval AHP-Entropy Method for Electricity User Evaluation in Smart Electricity Utilization [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(4): 701-711.