

文章编号:1671-6833(2020)06-0073-06

基于模糊灰理论的 ZPW-2000A 轨道电路风险评估

李德威, 宰祥卫, 张 胜, 孙 彤, 褚俊英, 刘志萍

(北京交通大学海滨学院 轨道交通学院,河北 黄骅 061199)

摘 要: 针对传统铁路信号设备风险分析时存在的数据少、信息量小、精度不高等缺陷,在故障模式影响风险分析(FMECA)的基础上,结合模糊数理论,综合应用灰关联度法、变权综合法,提出了基于模糊灰理论的风险评估方法。该方法将模糊理论与灰理论结合起来,有效降低了对设备大量故障数据的依赖;与传统风险优先级指数(RPN)相比,通过引入变权原理将具有相同 RPN 值的风险识别出来。以 ZPW-2000A 轨道电路为例,分析了其重要设备各故障模式及对应的风险等级,并进行了灰排序。结果表明:基于模糊灰理论的风险评估方法得出的风险优先级指数(RPN)等级比传统方法得到的 RPN 更精细,这种方法很好地识别出了其两大信号故障升级模式,而传统方法只能识别出一种。所提出的方法对风险识别更具有有效性。

关键词: 模糊数理论;变权综合法;风险评估;灰排序

中图分类号: U284 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.06.014

0 引言

铁路信号系统是整个铁路安全运营的大脑,承担着保障列车安全运行的重任。国外在铁路信号安全领域已自成体系,并制定相关标准。我国铁路信号相关安全标准是在借鉴欧标的基础上形成的,与国际上安全风险评价技术还存在差距。其原因是维修资料少、数据利用率低。常用的风险分析方法无法满足铁路信号设备风险分析的需求。如王艺霏^[1]通过对轨道电路载频分析,进行故障判断,但其故障影响因素众多,无法全面反映轨道电路的故障特性;杨杰^[2]利用故障树分析法对轨道电路安全性与可靠性进行研究,与实际检修联系不够紧密;陈星^[3]基于 FCM 方法对轨道电路故障进行研究,但其数据来源仅来自微机监测,数据单一;豆晓东^[4]基于 RBM 的方法来分析轨道电路的预防性维修,存在着数据匮乏、划分不够精细、缺乏对各故障事件之间的关系识别。

而灰色系统理论可以很好地解决数据贫瘠、不确定性的问题^[5]。灰色系统理论可以通过对“有限”信息的挖掘,提取重要的信息,实现对运

行系统行为的正确描述,即灰理论着重研究“外延明确而内涵不明确的对象”。灰色系统理论的优点很好地克服了铁路信号系统少数据、贫信息以及基本故障数据较难获得等缺陷。

笔者在 FMECA 的基础上,结合模糊数理论的特点,提出了基于灰理论的风险优先级综合评价法,并应用于 ZPW-2000A 轨道电路设备单元风险分析中。

1 基于模糊灰理论的风险优先级(RPN)综合评价

风险优先级指数(risk priority number,RPN)是严重度(severity)、发生度(occurrence)、检测度(detection)的乘积,而这 3 个指标由专家根据严重度、发生度、检测度等级表给出,这就带有很大的主观不确定性,很可能因为专家经验的不同导致得出的风险水平与实际不符。因此,本文提出了基于模糊灰理论的风险优先级综合评价法。

1.1 传统的风险优先级指数分析法

传统的风险优先级指数分析法流程如下:

(1)对设备作故障模式影响分析(FMEA);

收稿日期:2020-01-03;修订日期:2020-05-12

基金项目:河北省自然科学基金专项项目(E2016513016);河北省高等教育教学改革研究与实践项目(2019GJJG639)

通信作者:褚俊英(1983—),女,河北沧州人,北京交通大学海滨学院讲师,硕士,主要从事轨道交通控制方面的研究,E-mail:junyingchu@qq.com。

(2) 确定故障模式的严重度 (S)、发生度 (O)、检测度 (D)；

(3) 将严重度 (S)、发生度 (O)、检测度 (D) 3 者相乘计算求得故障模式的风险优先级指数；

(4) 将风险优先级指数进行排序, 风险优先级指数越大风险就越大。

然而这种方法存在几个问题, 首先, S 、 O 、 D 的确定主观成分太大, 不同的专家可能会给出不同的值; 其次, S 、 O 、 D 的简单相乘可能会得到相同的风险优先级指数, 这与实际风险水平不符。 S 、 O 、 D 的等级范围为 1~10, 它们的排列组合共有 1 000 种, 但它们的积只有 120 个不同的值, 因此这样计算的风险优先级指数有着大量的重复, 比如 $80=2\times8\times5=4\times4\times5$, 虽然风险优先级指数相同, 但风险程度明显不同, 如果在风险排序中把这两种情况同等对待, 显然不合理。

1.2 基于模糊灰理论的风险优先级综合评价法

基于模糊灰理论的风险优先级综合评价法流程如下：

- (1) 系统各部件作 FMEA 分析；
- (2) 参照欧洲 EN50126 标准对严重度、发生度、检测度的描述进行模糊等级的划分；
- (3) 按步骤(2)划分的模糊等级确定系统各故障模式的严重度、发生度、检测度；

(4) 对各模糊等级进行反模糊化处理, 得到模糊脆性系数；

(5) 通过灰理论求出 S 、 O 、 D 系数, 依据变权综合原理求取各系数的权重, 将各关联系数与对应的权重相乘, 再将各乘积求和从而得到风险优先级指数；

(6) 对风险优先级指数排序, 并对较大的 RPN 采取一定的预防措施, 降低设备的风险。 基于灰理论的风险优先级综合评价流程图如图 1 所示。

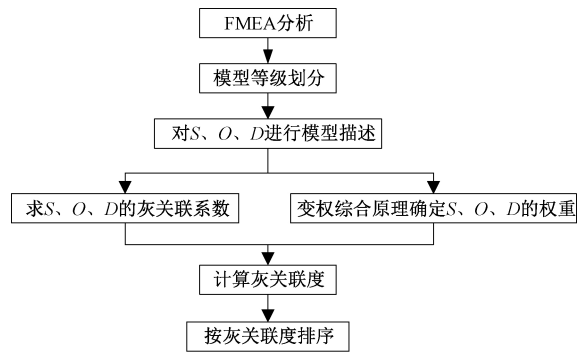


图 1 灰 RPN 评价流程

Figure 1 Grey RPN evaluation process

1.3 模糊等级划分及模糊等级的反模糊化

依据文献[6], 常规风险优先级指数各指标等级如表 1 所示。

表 1 严重度、发生度、检测度等级划分

Table 1 The classification of severity, occurrence and detection

等级	严重度		发生度		检测度	
	描述	标准	描述	标准	描述	标准
1	很低	不足以导致人员伤害	较低	不太可能发生	很高	大部分都能检测到
2	低	故障引起人员轻度伤害	低	在寿命期某时可能发生	高	基本可以检测
3	高	故障引起人员严重伤害	高	发生多次, 危害经常出现	低	偶尔能检测到
4	很高	故障造成人员死亡	较高	频繁的出现	很低	几乎不能检测到

采用文献[7]的三角模糊隶属度函数法, 将模糊语义分别描述为很低、较低、低、中等、高、较高、很高。其模糊隶属度函数如图 2 所示。

通过对图 2 中的 7 个模糊语义反模糊化运算, 求得反模糊脆性系数 $K(X)^{[8]}$ 。

$$K(X) = \frac{\sum_{i=0}^n (b_i - c)}{\sum_{i=0}^n (b_i - c) - \sum_{i=0}^n (a_i - d)}$$

(1)

式中: $c=0$ 为隶属度函数的起点; $d=13$ 为隶属度函数的最大值; a_0 为每个模糊语义所对应的下边界; b_0 为每个模糊语义所对应的上边界; 而 $a_i=b_i$ 对应模糊语义的中间值。

以模糊语义“较低”为例, 由上图可知, $a_0=2$,

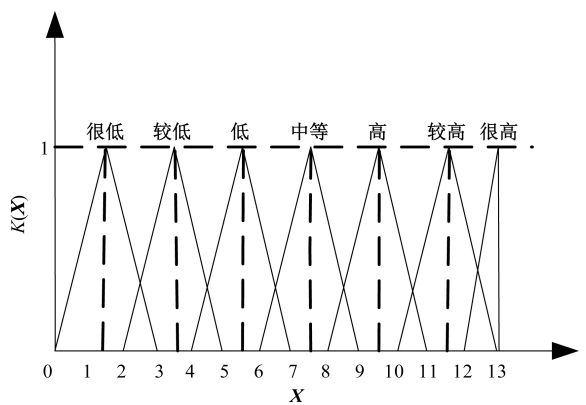


图 2 模糊隶属度函数

Figure 2 Membership function

$b_0=5, a_1=b_1=3.5, c=0, d=13$, 代入式(1)有 $K(X)=0.293$; 同样的方法, 可以计算出其他反模糊脆性系数, 具体数据如表 2 所示。

表 2 反模糊脆性系数
Table 2 Anti fuzzy brittleness coefficient

模糊语义	反模糊脆性系数
很低	0.155
较低	0.293
低	0.431
中等	0.569
高	0.707
较高	0.845
很高	0.963

1.4 变权综合原理

变权综合原理的方法既考虑到各基本要素的重要程度, 又考虑了要素的目标值。这两方面的优势同时体现在可变的权重中^[9-10]。

定义 1 作映射

$S:[0,1]^m \rightarrow [0,1]^m, X \rightarrow S(X) = (S_1(X), \cdots, S_m(X)),$

其中, X 是变权的要素, $S(X)$ 是 m 维惩罚型变权向量(即变权权重), 若满足如下公理:

- (1) $x_i \geq x_j \rightarrow S_i(X) \leq S_j(X)$;
- (2) $S_j(X) (j=1, 2 \cdots, m)$ 对每个变元连续;
- (3) 对任何常权向量 $W=(w_1, \cdots, w_m)$, 则称

式(2)为变权公式:

$$W(X) = \frac{(w_1 S_1(X), \cdots, w_m S_m(X))}{\sum_{j=1}^m (w_j S_j(X))} = \frac{W \cdot S_j(X)}{\sum_{j=1}^m (w_j S_j(X))}.$$
(2)

如果 $x_i \geq x_j \rightarrow S_i(X) \geq S_j(X)$, 则 S 为激励型变权。由于状态变权向量构造形式的多样化, 可以得到不同的变权公式:

$$w_j(x_1, \cdots, x_m) = \frac{\frac{w_j}{x_j}}{\sum_{j=1}^m \frac{w_j}{x_j}}.$$
(3)

状态变权向量 $S(X) = (x_1^{-1}, \cdots, x_m^{-1})$, 在此基础上, 将均衡函数 $B(x_1, \cdots, x_m) = \sum_{j=1}^m x_j^\alpha (\alpha \geq 0)$ 引入到变权综合中, 此时 $S_j(X) = \frac{\partial B}{\partial x_j}$, 因此, 可得到意义更明确的变权公式:

$$w_j(x_1, \cdots, x_m) = \frac{w_j x_j^{\alpha-1}}{\sum_{i=1}^m w_i x_i^{\alpha-1}}.$$
(4)

本文中, (x_1, \cdots, x_m) 常权 $w_j = 1/3$, 当 $0 \leq \alpha < 1$ 时, $w_j(x_1, \cdots, x_m)$ 为负指数函数, 每个变元 x_j 满足惩罚性; 当 $\alpha > 1$ 时, $w_j(x_1, \cdots, x_m)$ 为正指数函数, 关于每个变元 x_j 满足激励性。我们需要根据实际数据对 $S、O、D$ 3 个变量进行权重的增加或者惩罚。

1.5 灰关联系数法

灰关联法是灰理论重要方法之一, 它依据系统内各因素间相同或相异程度来衡量各因素间相关联的程度。它既不需要数据满足常见的分布规律, 对样本数据的多少也没有苛刻的要求。但灰关联度法需要满足一定的条件, 即关联系数的规范性, 序列之间的接近性等^[11], 实际问题一般满足这个条件。下面给出灰关联法的实施步骤及相关公式。

(1) 建立比较矩阵。假设系统有 m 种故障模式, 分别记为 X_1, X_2, \cdots, X_m , 其中, X_i 表示第 i 种故障模式, 由于每种故障模式有 $S、O、D$ 3 个变量, 所以第 i 种故障模式的序列可表示为: $X_i = (x_i = (1), x_i = (2), x_i = (3))$, 其中 $x_i = k (k=1, 2, 3)$ 表示对 $S、O、D$ 3 个变量的模糊评价, 可由式(1)计算得到。从而获得 m 种故障模式的比较矩阵。

$$X_i(k) = \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \\ \vdots \\ X_m(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(1), x_1(2), x_1(3) \\ x_2(1), x_2(2), x_2(3) \\ \vdots \\ x_m(1), x_m(2), x_m(3) \end{bmatrix}.$$
(5)

(2) 建立参考矩阵。故障模式的风险大小是相对一定的参考标准而言的, 从系统可靠度角度考虑, 参考矩阵的选择应以故障模式的各变量最优或最差值作为标准^[12]。为方便计算, 本文选取最优值作为参考标准, 即参考矩阵 X_0 为零矩阵。这样计算的灰关联度在排序时, 数值越小风险越高。

(3) 灰关联系数的计算。由文献[13]可得出各故障模式变量与参考基准的灰关联系数为:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}.$$
(6)

式中: $\xi \in (0, 1)$ 为分辨系数。

(4) 计算灰关联度。基于 $S、O、D$ 对评价各故障模式风险时的影响不同, 对各变量引入变权系数, 记为 $\beta_i (i=1, 2, 3)$, 再结合变权原理得到改进的灰关联度公式为:

$$\gamma(X_0,X_i)=\beta_1\gamma(x_0(1),x_i(1))+\beta_2\gamma(x_0(2),x_i(2))+\beta_3\gamma(x_0(3),x_i(3))。$$

(7)

其中 $\beta_i(i=1,2,3)$ 需要根据变权综合原理进行计算。

(5)风险排序。灰关联度越小,风险越高。对高风险的故障模式采取一定的预防性措施,降低风险发生率。

2 ZPW-2000A 轨道电路风险分析

ZPW-2000A 无绝缘移频轨道电路是在法国 UM71 轨道电路的基础上引进、消化、吸收、再创新的结果。与之相比,ZPW-2000A 轨道电路解决了调谐区的断轨检查,减少了调谐区的死区长度,实现了对调谐单元断线故障的检查,通过系统参数优化,提高了轨道电路的传输长度。ZPW-2000A 轨道电路采用1 700~2 600 Hz 载频

段、具有 FSK 制式轨道电路传输特性,其主要参数及计算机技术满足主体机车信号的自动闭塞及超速防护系统要求。其系统结构如图 3 所示。

3 基于灰理论的铁路信号系统风险评判

首先对 ZPW-2000A 轨道电路进行 FMECA 分析^[14],利用模糊集表示各故障模式的严重度(S)、发生度(O)、检测度(D);再根据灰关联系数法和变权综合原理求得各故障模式的风险优先级指数。由于篇幅关系,这里只分析发送器和接收器的部分故障模式,其 FMECA 如表 3。

根据表 3 对各故障模式下的严重度(S)、发生度(O)、检测度(D)的模糊表述,以及表 2 中各模糊语义所对应的反模糊化脆性系数,可建立如下比较矩阵:

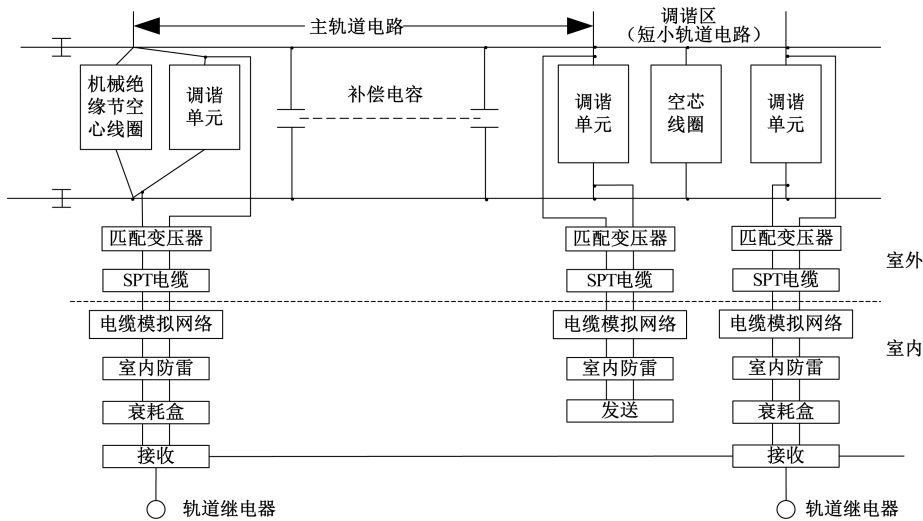


图 3 ZPW-2000A 轨道电路
Figure 3 ZPW-2000A track circuit

表 3 ZPW-2000A 轨道电路 FMECA 分析表
Table 3 ZPW-2000A track circuit FMECA analysis

子系统	功能故障模式	故障原因	严重度	发生度	检测度
发送器	无法产生移频信号	电路板老化或故障	很低	较高	低
	移频信号发生错误(降级模式)	电路中 CAN 通信到 CPU 中间故障误码	很低	较低	高
	移频信号发生错误(升级模式)	电路中 CAN 通信到 CPU 中间故障误码	很高	较低	高
	移频信号功率过低	功放板电路老化或故障	很低	高	低
	移频信号功率稍低	功放板电路老化或故障	很低	较高	低
接收器	轨道移频信号无法被接收	接收器电路老化或故障	很低	较高	低
	主轨道移频信号解调错误(升级模式)	接收器电路老化或故障	很高	较低	低
	主轨道移频信号解调错误(降级模式)	接收器电路老化或故障	很低	较高	低
	小轨道移频信号无法被接收	接收器电路老化或故障	很低	较高	低
	小轨道移频信号解调错误	接收器电路老化或故障	很低	较高	低

$$X = \begin{bmatrix} 0.155 & 0.155 & 0.963 & 0.155 & 0.155 & 0.155 & 0.963 & 0.155 & 0.155 & 0.155 \\ 0.845 & 0.293 & 0.293 & 0.707 & 0.845 & 0.845 & 0.293 & 0.845 & 0.845 & 0.845 \\ 0.431 & 0.707 & 0.707 & 0.431 & 0.431 & 0.431 & 0.431 & 0.431 & 0.431 & 0.431 \end{bmatrix}^T。$$

为方便计算,这里标准序列取零矩阵,分辨系数 ξ 通常取 0.5,则:

$$\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| = 0.155;$$
$$\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| = 0.963。$$

由式(6)可知,灰关联系数为:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{0.155 + 0.5 \times 0.963}{x_i(k) + 0.5 \times 0.963}。 \quad (8)$$

从而可求得严重度、发生度、检测度的灰关联系数 $\gamma_s, \gamma_o, \gamma_d$;以第 1 个故障模式不能产生移频信号为例,其严重度为很低,发生度为较高,检测度为低,因此其对应的脆性系数为 $x_1(1)=0.155, x_1(2)=0.845, x_1(3)=0.431$,则由式(8)可计算

各因素的灰关联系数为: $\gamma_s = 1, \gamma_o = 0.48, \gamma_d = 0.698$ 。由式(4)可求得各因素变权权重,因为 3 个因素中的任意一个过大,都会使得设备处于较高危险水平,即它们的权重应是激励型的,即 $\alpha>$

$$1^{[15]}, \text{这里 } \beta_1 = \frac{1}{1 + 0.48^{2.5-1} + 0.698^{2.5-1}} =$$
$$0.522, \alpha=2.5, \text{同理, } \beta_2=0.174, \beta_3=0.304, \text{所以}$$

第 1 个故障模式对应的灰关联度为 $\beta_1 \times \gamma_s + \beta_2 \times \gamma_o + \beta_3 \times \gamma_d=0.82$ 。最后将所有故障模式的灰关联度数值按照升序排列,灰关联度数值越小风险越高。各故障模式的灰理论 RPN 排序与传统 RPN 排序如表 4 所示。

表 4 各故障模式的灰排序与常规风险优先级指数排序

Table 4 Grey ranking of each failure mode and conventional RPN sequencing

模式 序号	γ_s	γ_o	γ_d	β_1	β_2	β_3	灰关联度	灰理论 RPN 排序	传统 RPN 排序
1	1	0.48	0.698	0.522	0.174	0.304	0.82	4	1
2	1	0.822	0.536	0.468	0.349	0.183	0.853	5	4
3	0.441	0.822	0.536	0.205	0.521	0.274	0.666	1	3
4	1	0.536	0.698	0.506	0.199	0.295	0.819	3	2
5	1	0.48	0.698	0.522	0.174	0.304	0.82	4	1
6	1	0.48	0.698	0.522	0.174	0.304	0.82	4	1
7	0.441	0.822	0.698	0.181	0.46	0.359	0.709	3	1
8	1	0.48	0.698	0.522	0.174	0.304	0.82	4	1
9	1	0.48	0.698	0.522	0.174	0.304	0.82	4	1
10	1	0.48	0.698	0.522	0.174	0.304	0.82	4	1

通过表 4 对各故障模式的灰理论 RPN 排序与传统 RPN 排序,不难发现,传统的 RPN 排序只有 4 个等级而本文的灰理论 RPN 排序有 5 个风险等级,从而表明灰关联法更加精细。在灰关联分析方法计算过程中,通过引入变权综合原理来确定各指标的权重,其作用可由故障模式 1、7 得出。用传统方法求得它们有相同的 RPN 值,其风险水平相同,但引入变权之后,可以发现它们的风险水平明显不同。故障模式 7 为主轨道移频信号解调错误(升级模式),故障模式 1 为无法产生移频信号。升级模式对铁路信号是致命的,显然根据灰关联度法及变权原理得出的风险排序更加符合实际。同样由故障模式 3 可以发现,用灰关联法计算的风险等级为 1 级,而传统的 RPN 计算的风险等级为 3 级,故障模式 3 是产生错误的移频

信号(升级模式),显然,灰关联度法能够很好地识别高风险故障模式。

4 结论

基于铁路信号系统的安全运营特点,结合灰关联度法、变权综合法、模糊数理论,对信号系统的严重度、发生度、检测度进行风险等级划分,在此基础上提出了铁路信号系统风险优先级综合评价法。给出了其具体实施流程,并以 ZPW-2000A 轨道电路为例,进行了详细的风险分析,结果表明其比传统的 RPN 方法具有更高的精度,更符合现场实际情况。该方法可在铁路信号安全领域推广使用,使铁路信号系统风险分析更加科学,精度也更接近实际,为进一步制定有效的维修策略提供依据。

参考文献:

- [1] 王艺霏. 基于 LabVIEW 的 ZPW-2000A 型轨道电路故障诊断系统设计[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- [2] 杨杰. ZPW-2000A 型轨道电路可靠性与安全性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [3] 陈星. 基于 FCM 的 ZPW-2000A 轨道电路故障分类研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [4] 豆晓东. 基于 RBM 分析的 ZPW-2000A 轨道电路预防性维修方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [5] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 7 版. 北京: 科学出版社, 2014.
- [6] 单娜. 基于 FMEA 和 RCM 的客专 ZPW2000A 轨道电路设备维修研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [7] GEORGES H M. 车载自组网中车辆定位导航的混合协作定位和融合技术[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [8] 秦娜, 金炜东, 黄进, 等. 高速列车转向架故障信号的聚合经验模态分解和模糊熵特征分析[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(9): 1245-1251.
- [9] 汪培庄. 因素空间理论: 机制主义人工智能理论的数学基础[J]. 智能系统学报, 2018, 37(54): 37-54.
- [10] 王灵芝. 以可靠性为中心的高速列车设备维修决策支持系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [11] 马庚华, 杜牧青, 张小丽. 不确定因素下的综合运输网络容量可靠性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(1): 1-6.
- [12] ARNO R, DOWLING N, SCHUERGER R J. Equipment failure characteristics and RCM for optimizing maintenance cost[J]. IEEE transactions on industry applications, 2016, 52(2): 1257-1264.
- [13] 张亚东, 郭进, 单娜. 铁路信号系统风险严重度综合评判[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(5): 758-762.
- [14] 易高明, 蒋艳. 基于目标相对重要性的模糊多目标进化算法[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(6): 272-278.
- [15] 彭涛. 基于灰色关联度分析法的电网评价体系建模仿真[J]. 电子设计工程, 2018, 26(20): 114-118.

Risk Assessment of ZPW-2000A Track Circuit Based on Fuzzy Grey Theory

LI Dewei, ZAI Xiangwei, ZHANG Sheng, SUN Tong, CHU Junying, LIU Zhiping

(Rail Transit Institute, Beijing Jiaotong University Haibin College, Huanghua 061199, China)

Abstract: Considering the lack of data, poor information and low precision in the risk analysis of traditional railway signal equipment, The fuzzy number theory was introduced in this paper based on the failure mode effects and criticality analysis (FMECA), introduction. The application of grey correlation degree method, and the variable weight comprehensive method proposes were integrated into this risk assessment method based on the fuzzy gray theory. This method combined fuzzy theory and gray theory, could effectively reduce the dependence on a large amount of equipment failure data. Compared with the traditional risk priority index (RPN), the risk with the same RPN value could be identified by introducing the variable weight principle. Taking the ZPW-2000A track circuit as an example, the failure modes of its important equipment and the corresponding risk levels were analyzed, and the gray ranking was performed. The results showed that the risk priority index (RPN) level obtained by the risk assessment method based on fuzzy gray theory was more refined than that obtained by the traditional method (RPN). This method could well identify its two major signal failure escalation modes. The traditional method could only identify one of them. Therefore, the method proposed was more effective for risk identification.

Key words: fuzzy number theory; variable weight comprehensive method; risk assessment; gray ranking