

文章编号:1005-0523(2019)04-0075-06

基于多元联系数集对分析法的道口安全评价

李明华,陈艳亭,周新力

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:铁路道口安全是保证铁路运营安全管理的重要环节,然而其影响因素众多,管理困难,致使相关事故仍难防范。针对铁路道口事故频发,分析了引发道口事故安全的人、车辆、道口特性、安全防护装置、环境5个方面的主要因素,构建了道口安全评价指标体系。并引入多元联系数集对分析原理,建立了多元联系数集对分析法在道口安全评价中的应用模型,并以中国铁路某局集团有限公司管辖范围内的道口为背景,得出道口安全所处的“态势”,验证了该模型的适用性,探讨出定量判断道口安全评价体系的又一方法。

关键词:铁路道口;多元联系数;集对;安全评价

中图分类号:U213.8

文献标志码:A

铁路道口是铁路轨道与公路或人行道路的相交处所,根据行车密度和安全风险度的不同,通常设置为有人看守道口和无人看守道口两种。然而铁路道口事故始终无法杜绝,成为铁路运营安全的重大危险源之一。尤其是近年来现代交通的快速发展,铁路及公路网络密度不断加大,公路与铁路不可避免的存在许多平面交叉,进一步增加了铁路道口的数量。另外火车和汽车运行速度的提高,也提升了道口事故的发生率;因此铁路道口安全成为影响铁路运营安全管理的一大难题。据中国铁路志统计:1980年至2015年共发生铁路道口事故55 865起,平均每年约为1 596起,给人民的生命财产和安全造成重大损失。

减少道口事故数量,“平改立”无疑是最有效的方法,但基于多种原因,短时间内实现全国范围内的铁路道口“平改立”是不现实的。如何对道口安全进行定量的评价,找到引发道口事故的薄弱环节,从而进行有效的管理是目前重要的研究课题,对此很多学者进行了大量的研究。张麟^[1]针对铁路道口事故建立了故障树模型,明确了影响铁路道口安全的主要因素。石红国等^[2]构建了铁路平交道口碰撞概率模型,为评估铁路平交道口的安全水平提供了定量依据。郑伟^[3]采用随机Petri网对公路使用者适当不适当的行为、道口列车交通的动态行为、道口系统控制功能及三者之间的相关性进行了全面完整的建模,该模型客观地反映了道口事故率和事故原因之间的联系。Larue G S等^[4]研究了在新型智能交通系统下,对驾驶员穿越铁路平交道口的行为进行了仿真模拟,发现驾驶员无法对列车的行进速度和距离做出正确的判断,造成铁路道口事故。由于引发铁路道口事故发生的因素众多且具有不确定性,笔者引入多元联系数集对分析原理,建立相关应用模型,将系统因素的确定性和不确定性看做一个整体进行分析。

1 多元联系数集对分析法

集对分析由赵克勤于20世纪80年代提出,该不确定性理论对包含随机性、模糊性等事件的评价提供了定量的依据,其本质在于将不确定性与确定性处理为一个确定与不确定系。联系数、集对与集对势是进行多元联系数集对分析的3个核心概念,是进行综合分析系统因素确定性和不确定性的基础。其中,联系数是

收稿日期:2019-03-04

作者简介:李明华(1963—),男,教授,研究方向为施工技术与管理。

描述研究对象确定性与不确定性关系的一种结构函数,其多元联系数基本形式为

$$\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + \dots + c_j \quad (1)$$

集对是指两个集合关系的对子,根据集合间关系的不同,集对的特性可分为同一度(a)、差异度(b)、对立度(c), μ 为集合的联系度。其公式表示为

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N} + \frac{P}{N} = a + bi + cj \quad (2)$$

式中: N 为对该问题组成的集对(H)展开分析后,得到的 N 个特性。其中在 N 个特性中,具有相同的特性记为 S ;具有相反的特性记为 P ;其余既不同一,又不对立的特性为 F ; i 为差异标记符号,取值区间为 $[-1, 1]$; j 为对立标记符号,取值为 -1 。根据归一化条件, a, b, c 应满足 $a + b + c = 1$ 。

由于不同的因素对事件本身的影响程度不同,致使各因素的权重也不相同,加入权重情况后,联系数公式为

$$\mu = \sum_{k=1}^S \omega_k + \sum_{k=S+1}^{S+F} \omega_k i + \sum_{k=S+F+1}^N \omega_{kj} \quad (3)$$

式中: ω_k 为特征权重,满足归一化条件 $\sum_{k=1}^S \omega_k = 1$

集对势反映了两个集合的同一度、差异度、对立度联系程度,能够反映集对在一定条件下的发展趋势,其表达式为

$$SHI(H) = \frac{a}{c} \quad (4)$$

当 $a > c$,即 $SHI(H) > 1$ 时,为同势;当 $a = c$,即 $SHI(H) = 1$ 时,为均势;当 $a < c$,即 $SHI(H) < 1$ 时,为反势。根据各态势的程度不同也可划分为4级,如表1所示。

表1 集对势等级划分
Tab.1 Set of potential level

态势	等级划分	判别条件
同势	准同势	$a > 0, b = 0$
	强同势	$a > c, c > b$
	弱同势	$a > c, a > c > b$
	微同势	$a > c, b > a$
均势	准均势	$a = c, b = 0$
	强均势	$a = c, a > b > 0$
	弱均势	$a = c, b = a$
	微均势	$a = c, b > a$
反势	准反势	$a < c, b = 0$
	强反势	$a < c, 0 < b < a$
	弱反势	$a < c, b > a, b < c$
	微反势	$a < c, b > c$

2 基于多元联系数集对分析道口安全评价模型的建立

2.1 确定道口安全评价指标体系

铁路道口的安全涉及铁路、公路、地方等多个部门,且每个道口的情况也有所差别,致使影响道口安全的因素众多;因此建立道口安全评价指标体系是一个错综复杂的问题,怎样科学合理的选取评价指标就显

得意义重大。为使道口安全评价指标体系更具合理性,主要采取以下方式选取关于道口安全的评价指标:

1) 研读大量有关道口安全的文献,分析产生道口事故的原因,统计不同原因发生的频度,从中找出相关规律^[5-6],进而确定引发道口事故的主要因素;

2) 统计近年来发生的道口事故案例,在阅读有关部门针对道口事故深度分析报告的基础上,分析事故发生的深层次原因,进一步完善道口安全评价体系;

3) 通过“交叉影响法”“数据分析”等多种方法筛选出影响道口安全的评价指标,减少数据的冗余度,以保证各评价指标的独立性。

通过上述步骤的整理,将影响铁路道口安全的主要因素分为人的因素、车辆因素、道口特性因素、安全防护装置因素、环境因素5个方面,得到道口安全评价指标体系,详见表2。

表2 道口安全评价指标体系
Tab.2 Crossing safety evaluation index system

目标层	因素层	指标层	指标数据提取方式
道口作业 安全评价 指标体系	人的因素	R ₁ : 火车驾驶员的驾驶技术	考核
		R ₂ : 道口管理员的认真程度	调查
		R ₃ : 道口管理员的心理状态	测试
		R ₄ : 火车驾驶员和道口管理员的身体素质	测试
		R ₅ : 火车驾驶员和道口管理员的疲劳程度	测试
		R ₆ : 道口管理部门的管理水平	测评
	车辆因素	R ₇ : 车辆性能	测试
		R ₈ : 机车车速与超载	检查
		R ₉ : 发动机熄火、制动失效等机械故障	检测
	道口特性因素	R ₁₀ : 道口的角度、坡度、有效宽度的合理性	测量
		R ₁₁ : 道路类型及等级	调查
		R ₁₂ : 铺面、股道数、钢轨及护轨	检查
		R ₁₃ : 道口减速带、排水措施	检查
		R ₁₄ : 道口房、两侧平台位置	测量
	安全防护 装置因素	R ₁₅ : 防护装置、警示灯、警铃完好情况	检查
		R ₁₆ : 道口标志、信号机完好情况	检查
		R ₁₇ : 车辆监控系统	检查
		R ₁₈ : 安全装置的位置	测量
	环境因素	R ₁₉ : 道口周围树木、建筑物过高、过密	统计
		R ₂₀ : 道口行车密度及秩序	调查
		R ₂₁ : 安全宣传教育力度及质量	考查
		R ₂₂ : 暴风雨、雪等恶劣天气	统计
		R ₂₃ : 道口安全制度完善情况	考查
		R ₂₄ : 工作空间(室内人均作业面积)	调查

2.2 道口评价等级划分及权重的确定

心理学家米勒通过大量的试验证明,对于属性级别的划分,普通人能正确区分的属性级别一般在5~9级^[7]。结合实际情况,将系统的安全等级划分为5级:优(5分)、良(4分)、合格(3分)、差(2分)与较差(1分)。

道口指标权重的确定则采用专家打分法,按照信息熵原理进行处理。专家权重由专家的权威性、知识水平、专业技术经验等综合因素确定。

2.3 计算道口联系数

综合最终的打分评判结果、指标等级划分情况及指标权重,运用公式(3),确定出各个专家对道口安全评价结果的联系数,进而得到评价结果联系数矩阵 U 。

$$U = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1m} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{nm} \end{bmatrix}$$

假设专家权重为 $S_n = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_n]$,则系统联系数公式为

$$\mu = S_n \cdot U \cdot E = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_n] \cdot \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1m} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ i_1 \\ \vdots \\ i_{m-2} \\ j \end{bmatrix} = a + bi + cj \quad (5)$$

2.4 安全状态评价

通过评价对象(体系)的特征值,进行定量评判研究对象(体系)的安全水平,其计算公式为

$$\mu_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^m (a \cdot m + b_1 \cdot (m-1) + \cdots + b_{m-2} \cdot 2 + c \cdot 1) \quad (6)$$

由上述公式,可得到同一度 a 及对立度 c ,进而通过集对势值的大小,判断评价对象(体系)的安全发展态势。

3 实例验证

中国铁路某局集团有限公司自1986年以来,管内共发生道口交通事故7200多起,死伤人数达7700余人。特别是1993年以来,该集团公司道口事故的伤亡人数、客货车的脱轨辆数逐年增加,发生道口一般A类及以上事故达30余件。针对该集团严峻的道口安全形势,结合表格2中建立的道口作业安全评价指标体系,引入多元联系数集对分析法。邀请了该领域5名专家学者,采用打分法对评价指标进行打分,将评价等级划分为“优(5分)、良(4分)、合格(3分)、差(2分)与较差(1分)”5个等级。对各个参评专家的专业经验、知识水平、权威性等进行全方面的综合考量后,得到5位专家的权重 $S_5 = (0.25, 0.25, 0.2, 0.2, 0.1)$,打分情况详见表3。

运用信息熵原理对指标权重进行处理,该原理的特点为:“指标的熵值、离散程度及指标重要度成正比”,即熵值越大,离散程度越大,指标重要性越大。指标权重求解流程如下。

1) 若 μ_{ij} 表示专家 N_i 对评价指标 R_j 的打分结果。则指标的熵值为

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \mu_{ij} (\mu_{ij}) \ln \mu_{ij} \quad (7)$$

式中: $\mu_{ij} = \frac{\mu_{ij}}{\sum_{i=1}^n \mu_{ij}}$; n 为参与打分专家的人数。

表 3 道口安全评价指标体系打分表
Tab.3 Crossing safety evaluation index system score

指标	专家					指标	专家				
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅		N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅
R ₁	3	3	3	3	2	R ₁₃	3	2	3	3	2
R ₂	3	3	2	3	2	R ₁₄	4	5	5	5	5
R ₃	2	2	3	3	2	R ₁₅	4	5	3	2	4
R ₄	3	2	4	4	3	R ₁₆	2	3	2	3	2
R ₅	4	3	3	3	3	R ₁₇	3	3	2	3	3
R ₆	3	4	3	4	4	R ₁₈	2	2	2	3	2
R ₇	3	4	5	4	3	R ₁₉	2	3	1	1	2
R ₈	5	4	5	4	4	R ₂₀	3	2	4	3	3
R ₉	3	3	5	4	3	R ₂₁	4	4	4	5	3
R ₁₀	1	2	3	2	2	R ₂₂	3	4	3	4	4
R ₁₁	4	3	3	4	3	R ₂₃	4	3	3	3	1
R ₁₂	4	4	5	4	4	R ₂₄	4	4	5	5	4

2) 定义第 j 个指标权重

$$g_j = 1 - e_j \tag{8}$$

3) 计算第 j 个指标权重

$$\omega_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \tag{9}$$

由公式(7)(8)(9)及表 3 的原始数据,通过计算得到的指标权重为: $W=(0.020\ 3,0.035\ 5,0.038\ 3,0.053\ 8,0.014\ 0,0.017\ 5,0.036\ 2,0.011\ 3,0.044\ 6,0.097\ 5,0.019\ 4,0.008\ 3,0.034\ 5,0.006\ 7,0.079\ 6,0.037\ 5,0.020\ 3,0.028\ 7,0.162\ 5,0.042\ 4,0.023\ 5,0.017\ 6,0.136\ 4,0.011\ 5)$

根据公式(3)及指标权重与专家权重,可算出 5 位专家的评价结果联系数,结果如下:

$$\mu_{\text{总}} = 0.056\ 7 + 0.19i_1 + 0.410\ 3i_2 + 0.235\ 8i_3 + 0.105\ 4j$$

因 $\max(a, b_1, b_2, b, c) = 0.414\ 3 < 0.5$, 不满足判断条件,需进一步计算级别特征值 μ_{sum} ,由公式(6)可得:

$$\mu_{\text{sum}} = 0.056\ 7 \times 5 + 0.19 \times 4 + 0.410\ 3 \times 3 + 0.235\ 8 \times 2 + 0.105\ 4 \times 1 = 2.851\ 4$$

由公式(4)可算出道口安全水平集对势 $SHI(H)$

$$SHI(H) = \frac{a}{c} = \frac{0.056\ 7}{0.105\ 4} = 0.538 < 1$$

因为 $\frac{a}{c} < 1$ 且 $a+b+c=1$,结合表格 1 及三者之间的关系可知在该评价系统状态下,该集团公司铁路道口安全状态处于“微反势”态势,且 b 项占比较大。即在影响铁路道口安全人的因素、车辆因素、道口特性因素、安全防护装置因素、环境因素 5 个方面构建的评价体系下,系统目前所处的安全状态存在多处薄弱的环节。因此该集团应着重从影响道口安全的薄弱环节,有针对性的提出防范措施,加强管理,减少道口事故的发生,使道口系统向良性方向发展。

4 结论

影响铁路道口安全的主要因素为人、车辆、道口特性、安全防护装置、环境5个方面,如果从这5个方面构建道口安全评价指标体系,则能较为全面、系统地辨识铁路道口存在的危险源,针对不同危险源指标权重值的大小初步判断出道口安全的优劣状况。由于各个因素均存在不确定性,因此引入多元联系数集对分析理论,建立相应的道口安全评价应用模型,为铁路道口安全目前所处的“态势”进行定量判断,有利于铁路运营单位针对不同道口的状况,采取更为有效的针对性的防患措施。

参考文献:

- [1] 张麒. 基于故障树的铁路平交道口事故分析[J]. 安全, 2006, 27(1): 14-16.
- [2] 石红国, 饶煜, 罗望, 等. 铁路专用线平交道口碰撞危险性分析[J]. 铁道运输与经济, 2018(4): 69-74.
- [3] 郑伟. 基于随机 Petri 网的平交道口建模及事故率分析[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(2): 27-32.
- [4] LARUE G S, KIM I, RAKOTONIRAINY A, et al. Driver's behavioural changes with new intelligent transport system interventions at railway level crossings—a driving simulator study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 81: 74-85.
- [5] 户佐安, 严余松, 张焱. 铁路平交道口交通安全管理研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(10): 96.
- [6] KOH P P, WONG Y D, CHANDRASEKAR P. Safety evaluation of pedestrian behaviour and violations at signalised pedestrian crossings[J]. Safety Science, 2014, 70: 143-152.
- [7] 刘祖德, 万福威. 多元联系数集对分析在安全绩效评价中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(5): 138-143.

Study on Crossing Safety Evaluation Based on Multivariate Connection Number Set Pair Analysis Method

Li Minghua, Chen Yanting, Zhou Xinli

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Railway crossing safety is an important link for ensuring the safety management of railway operation. However, there are many influencing factors and management difficulties, which make it difficult to prevent related accidents. Aiming at the frequent occurrence of railway crossing accidents, this paper analyzed these five main factors causing the crossing accident safety, such as people, vehicles, crossing characteristics, safety protection devices and environment. Then, it established the crossing safety evaluation index system, introduced the principle of multiple connection number set pair analysis, established the application model of multiple connection number set pair analysis method in crossing safety evaluation, and took China Railway X Bureau Group Co., Ltd., as an example. Based on the background of the railway crossing under the jurisdiction of this unit, the "situation" of crossing safety was probed into and the applicability of the model was verified, and a new method for quantitatively judging the crossing safety evaluation system was proposed.

Key words: crossing; multiple contact number; set pair; safety evaluation