

基于FTA-改进层次分析评价法的有轨电车道路 交叉口运营风险分析

李胜男¹, 闫海峰², 吴鹏飞¹, 王静潇¹, 滕俊哲¹

(1.西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850032; 2.西南交通大学交通运输与物流学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为有效预防和减少城市有轨电车道路交叉口运营事故的发生, 以34起经典城市有轨电车安全事故数据为数据集, 对有轨电车在道路交叉口运营风险因素进行相关分析。利用历史事故数据分析将运营风险因素分为人员、设备、环境和管理这4类, 并构建城市有轨电车运营风险评价指标体系。为了使研究结论具有统一性与可靠性, 减少主观因素影响, 结合事故树结构重要度与传统层次分析法的优点, 提出事故树(FTA)-改进层次分析评价法对各风险因素进行分析。在采用此方法针对有轨电车运营风险因素的分析中, 将风险因素对顶上事件的影响程度进行量化, 同时优化工作人员对引发有轨电车安全事故风险因素的刻板印象, 精准提高其运营的安全性, 并根据研究结果提出相关建议。

关键词: 城市有轨电车; 道路交叉口; 事故树; 改进层次分析评价法

中图分类号: U412.35

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)04-0242-06

0 引言

2017年, 党的十九大报告中指出要“推进绿色发展”; 2019年, 在中共中央国务院印发的《交通强国建设纲要》中提出“到2035年, 基本建成交通强国”。为践行国家政策, 截至2021年底, 我国境内已有50个城市开通运营城市轨道交通, 运营线路总里程达到9 206.8 km^[1]。城市有轨电车以运营方式灵活、造价低、投资少、工期短而广受关注^[2]。尽管其运量只能达到地铁的1/3, 但对于一些中等城市而言, 已经完全可以满足其主要交通需求, 同时又能避免交通资源浪费。随着技术的逐渐完善, 有轨电车正在成为主要的城市公共交通工具。

有轨电车的逐渐普及带来了一定的交通便利, 随之也带来了一些潜在风险。有轨电车的运营路径为开放式轨行区, 与机动车、非机动车、行人等共享路权, 安全管理的难度远高于具有独立封闭空间的其他城市轨道交通, 且一旦发生交通事故即后果严重、损失巨大。众多专家学者对此进行了大量研究: 何利英^[3]将国内有轨电车安全事故划分为公共安全事件、交通事件、运营事件、自然灾害事件4类; 韩

旭^[4]通过搜集和分析交通数据, 探讨了有轨电车运营的安全隐患, 并提出了提升安全性的措施; 明瑞利^[5]从技术、人和管理3个方面探讨影响有轨电车安全性的重要因素; 迟胜超^[6]针对交叉口、轨行区和司机驾驶等安全关键点提出了相应的控制办法。

经分析相关文献发现, 目前针对有轨电车道路交叉口运营风险分析大致有2种类型, 一是从引起有轨电车事故的风险性质方面来分析造成事故的原因, 具有较强的主观性; 二是根据具体事故特征进行研究。但2种类型单独研究的结论单一, 且较为刻板。故本研究从风险性质入手, 将有轨电车运营风险因素分为人员、设备、环境和管理4类, 再依据具体安全事故的特征来构建城市有轨电车运营风险评价指标体系, 运用事故树(FTA)-改进层次分析评价法对城市有轨电车道路交叉口各运营风险因素进行量化分析与评价, 从而为提升其安全性提出更准确的建议。

1 城市有轨电车运营风险因素

(1) 开放式轨行区。路权形式直接影响城市有轨电车与其他交通参与者接触的概率, 是交通事故产生的主要影响因素。国外有研究显示^[7], 城市有轨电车专用路权下事故发生概率仅为混行路权下的1/3。目前, 我国运营的城市有轨电车多数设于路面, 并采用开放式车道运营, 由此导致在开放式轨行区有轨电车

收稿日期: 2023-05-18

作者简介: 李胜男(1996—), 女, 硕士生。

通讯作者: 闫海峰(1974—), 男, 博士, 副教授, 从事运输组织优化研究工作。

与社会机动车辆、非机动车辆和行人路权冲突,随之会产生诸如行人无安全意识穿越轨行区、机动车与非机动车随意占用轨行区、抢行等一系列安全风险问题。

(2)道路交叉口。据文献[3]研究,城市有轨电车交通事故有高达 59%的比率发生在道路交叉口,主要原因是社会车辆违章、行人闯红灯等。道路交叉口是各路段车流汇集、行人聚集的地方,城市有轨电车站体庞大、启动速度小,所需信号清空时间远大于其他车辆。当有轨电车未完全通过交叉口,而信号灯就发生了变换时,若社会车辆抢行,会导致有轨电车紧急制动,使车内乘客由于惯性而摔伤(若制动不及时,将会导致重大经济损失和伤亡事件)。可见,有轨电车在道路交叉口的安全管理控制与普通公共交通截然不同,不可将两者混为一谈^[8-9],应对有轨电车在道路交叉口的运营风险开展进一步研究。

2 城市有轨电车运营风险指标与评价

2.1 风险评价指标体系

根据网络搜集的 34 起城市有轨电车道路交叉口安全事故数据,参照相关文献^[10],可将事故风险因素划分成人员因素、设备因素、环境因素、管理因素 4 类。基于安全事故数据,使用事故树(FTA)对城市有轨电车事故原因进行逻辑分析,找寻出 4 类主因素下的基本事件,再按其性质找寻出共同点,将其划分成 9 类子因素。4 类主因素分别是人员因素(包括工作人员、驾驶人员和行人 3 类子因素);设备因素(包括交通安全设施、车辆基础设备 2 类子因素);环境因素(包括交通环境、自然环境 2 类子因素);管理因素(包括安全管理制度、组织协调能力 2 类子因素)。以 4 类主因素作为二级指标、9 类子因素作为三级指标,所构建的城市有轨电车运营风险评价指标体系如图 1 所示。

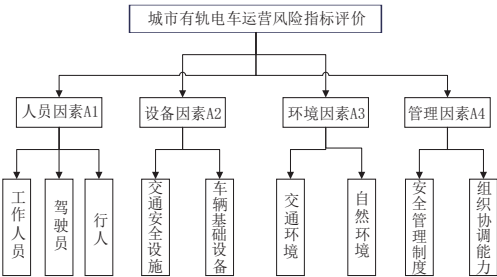


图 1 城市有轨电车运营风险评价指标体系

2.2 FTA-改进层次分析评价法

FTA 是一种从结构到原因,找出导致事故发生的因果关系,并按其逻辑关系进行图解的分析方法。

FTA 清晰地展示事故发生的因果逻辑关系,可利用其分析事故致因,求解各基本事件的结构重要度,并以此进行评价分析后给出相关建议,从而起到提前预防事故的作用^[11-12]。

FTA-改进层次分析评价法是在传统层次分析法的基础上,基于历史事故数据,利用 FTA 找出风险因子、构建事故树,并计算结构重要度。根据风险因子的结构重要度构造判断矩阵,求得各基本事件的权重 W' ;同时通过专家判断打分所构造的判断矩阵求得另一个权重 W'' ,然后将 W' 和 W'' 相结合,从而构成最终的权重 W 。这有利于减少主观因素的影响,提高研究结果的准确性^[13]。FTA-改进层次分析评价法技术路线见图 2。

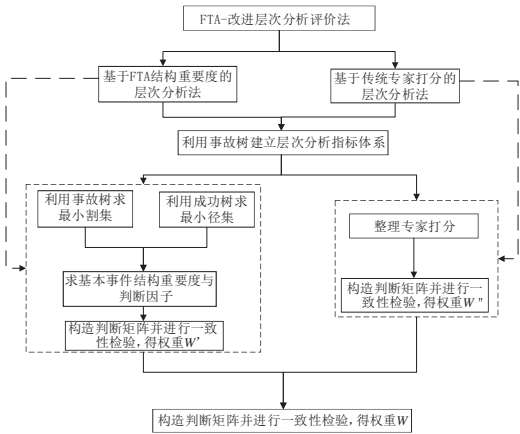


图 2 FTA-改进层次分析评价法技术路线

3 风险评价模型构建

3.1 层次分析模型构建

3.1.1 建立事故树

通过 34 起有轨电车道路交叉口事故数据,以有轨电车在道路交叉口的风险事故为顶上事件构造事故树,依据引起事故的主要责任进行划分。事故树从社会车辆责任、有轨电车责任、行人责任 3 个基本事件逐步展开,寻找造成交通事故的根本原因,从中归结出 22 个基本事件。根据 22 个基本事件构建出的事故树结构见图 3,事故树中基本事件各个符号所代表的含义见表 1。

3.1.2 构造层次分析指标体系

根据城市轨道交通道路交叉口事故的事故树建立层次分析指标体系,以有轨电车道路交叉口的运营安全为目标层,人员因素、设备因素、环境因素、管理因素为准则层,基本事件作为指标层^[14],构造有轨电车道路交叉口风险评价层次分析指标体系。

风险评价层次分析指标体系结构见表 2。

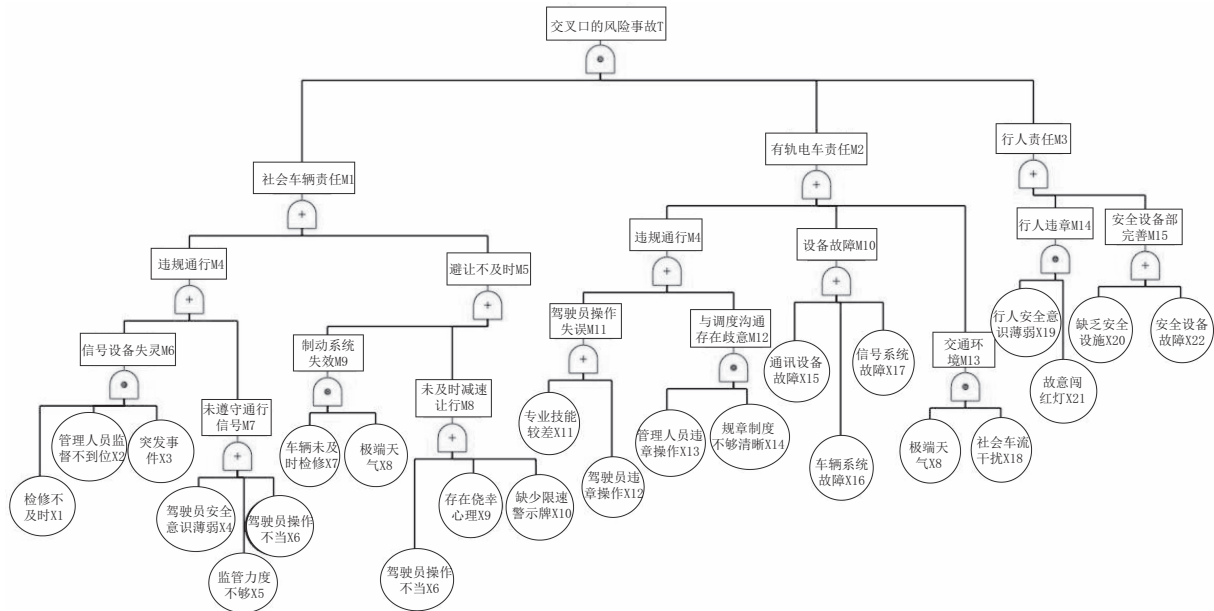


图3 城市有轨电车道路交叉口事故树

表1 城市有轨电车道路交叉口事故树中基本事件符号及含义

符号	含义	符号	含义
X1	检修不及时	X12	驾驶员违章操作
X2	管理人员监察不到位	X13	管理人员违章操作
X3	突发事件	X14	规章制度不够清晰
X4	驾驶员安全意识薄弱	X15	通讯设备故障
X5	监督力度不够	X16	车辆系统故障
X6	驾驶员操作不当	X17	信号系统故障
X7	车辆未及时检修	X18	社会车流干扰
X8	极端天气	X19	行人安全意识薄弱
X9	存在侥幸心理	X20	缺乏安全设施
X10	缺少限速警示牌	X21	故意闯红灯
X11	专业技能较差	X22	安全设备故障

表2 风险评价层次分析指标体系结构

目标层	准则层	指标层
有轨电车交叉口的运营安全	人员因素 A1	驾驶员安全意识薄弱 (X4)、驾驶员操作不当 (X6)、存在侥幸心理 (X9)、专业技能较差 (X11)、驾驶员违章操作 (X12)、行人安全意识薄弱 (X19)
	设备因素 A2	车辆未及时检修 (X7)、车辆系统故障 (X16)、通讯设备故障 (X15)、信号系统故障 (X17)、安全设备故障 (X22)
	环境因素 A3	突发事件 (X3)、极端天气 (X8)、社会车流干扰 (X18)、缺少限速警示牌 (X10)、缺乏安全设施 (X20)
	管理因素 A4	检修不及时 (X1)、管理人员监察不到位 (X2)、监督力度不够 (X5)、管理人员违章操作 (X13)、规章制度不够清晰 (X14)、故意闯红灯 (X21)

3.2 构造判断矩阵

(1)根据图3事故树结构,运用布尔代数化简法求得最小割集 T ,然后根据最小径集与最小割集的对偶性,画出事故树的对偶树,即成功树,再通过成功树求得最小割集,即为事故树的最小径集 T' 。

(2)运用式(1),计算各基本事件的结构重要度。

(3)对各基本事件的结构重要度分母计算其最小公倍数 LCM。

(4)通过式(2),计算各基本事件的判断因子 $\chi_{(i)}$ 。

$$I_{\phi(i)} = \sum_{X_j \in K_j} \frac{1}{2^{n_j-1}} \tag{1}$$

$$\chi_{(i)} = I_{\phi(i)} \cdot \text{LCM} \tag{2}$$

式中: $I_{\phi(i)}$ 为第 i 个基本事件的结构重要度系数; K_j 为有 j 个最小割集; n_j 为第 i 个基本事件所在的第 K_j 最小割集中的基本事件总数。

(5)对同一层次中各因素之间判断因子 $\chi_{(i)}$ 进行两两比较,得出各个准则对应指标的判断矩阵,并记 $A_k = \{a_{ij}^k\}$ 为准则 k 所对应各指标的判断矩阵。

(6)用各个准则所对应指标的判断因子之和来表示其相对重要度(标度),并依此构建准则层的判断矩阵。因此,各准则层因素判断因子为:

$$\chi_{(A_k)} = \sum_{i=1}^n \chi_{(i)} \tag{3}$$

式中: $\chi_{(A_k)}$ 为准则层第 k 个因素的判断因子(标度); n 为准则层下指标层因素的数目。

(7)另外,依靠专家判断的方式来反映各指标相对重要度,并以此构建各准则所对应指标的判断矩阵。首先,统计整理专家打分表,确定准则与指标各

层因素之间比较的标度值后,再分别建立准则层与指标层的判断矩阵^[15-17],并记 $B_k=\{a_{ij}^k\}$ 为准则 k 所对应各指标的判断矩阵。

3.3 确定权重

FTA-改进层次分析评价法的权重 W 由两部分构成,第一部分是通过对事故树结构重要度计算判断因子建立的判断矩阵,进行一致性检验后得到各个基本因素的权重 W' ;第二部分是传统的层次分析法,即依靠主观打分构成判断矩阵后进行一致性检验^[18],得到各个基本因素的权重 W'' 。因为事故树的结构重要度与传统层次分析法的指标层因素都可以反映基本事件对顶上事件的影响程度,所以通过式(4)的计算,即可得到FTA-改进层次分析评价法的权重 W 。最后利用式(5)~式(7)进行一致性检验。

$$W = \frac{\alpha W' + \beta W''}{\alpha + \beta} \tag{4}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{CR - CR_{\min}}{CR_{\max} - CR_{\min}} = 1 - 10CR \tag{5}$$

$$CR = \frac{\sum_{k=1}^4 a_k CI_k}{\sum_{k=1}^4 a_k RI_k} \tag{6}$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \tag{7}$$

式中: α 为权重 W' 在 W 中的比重, $\alpha=\varphi_1+\varepsilon_1$; β 为权重 W'' 在 W 中的比重, $\beta=\varphi_2+\varepsilon_2$; ε 为CR因子,反映判断矩阵的可信度; ϕ 为标度因子(根据准则层最大标度,查表3得到),反映的是选用不同标度时的误差;CR为准则层各因素的一致性比率($CR<0.1$); $CR_{\max}$ 、 $CR_{\min}$ 为一致性比率的最大值与最小值,分别为0.1和0; a_k 为准则层各因素的权重; CI_k 为准则层各因素下指标层判断矩阵的一致性指标; RI_k 为准则层各因素下指标层判断矩阵的随机一致性,用于衡量CI值的大小,RI值可查表4得到; $\lambda_{\max}$ 为准则层各因素下指标层判断矩阵入判断矩阵的最大特征根; m 为判断矩阵的阶数。

表3 不同标度下的标度因子^[10]

标度	φ	标度	φ
9	1.000	34	0.318 2
11	0.850 6	36	0.292 2
13	0.746 8	44	0.207 8
15	0.694 8	52	0.168 8

表4 RI值^[10]

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI值	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

4 应用分析

虽然城市有轨电车具有运营可靠、舒适、节能、环保等特点,但是它的运营在带来交通便利的同时,也带来了潜藏的安全风险。通过网络搜集34起城市有轨电车道路交叉口运营安全事故数据(未考虑耦合作用,见表5),对城市有轨电车在道路交叉口运营风险因素进行分析与研究。

表5 有轨电车道路交叉口运营安全事故数据统计

准则层	起数	占比/%	风险因素	指标	起数
人员因素 A1	11	32.35	驾驶员安全意识薄弱	X4	2
			驾驶员操作不当	X6	2
			存在侥幸心理	X9	1
			专业技能较差	X11	1
			驾驶员违章操作	X12	2
设备因素 A2	6	17.65	行人安全意识薄弱	X19	3
			车辆未及时检修	X7	2
			通讯设备故障	X15	1
			车辆系统故障	X16	1
			信号系统故障	X17	1
环境因素 A3	7	20.59	安全设备故障	X22	1
			突发事件	X3	1
			极端天气	X8	1
			社会车流干扰	X18	3
			缺少限速警示牌	X10	1
管理因素 A4	10	29.41	缺乏安全设施	X20	1
			检修不及时	X1	1
			管理人员监察不到位	X2	1
			监督力度不够	X5	2
			管理人员违章操作	X13	2
			规章制度不够清晰	X14	1
			故意闯红灯	X21	3

4.1 构造判断矩阵

4.1.1 依据事故树构造判断矩阵

由图3,运用布尔代数化简法求得最小割集 T 为49个,数量较多,用来求解基本事件结构重要度相对复杂。故本研究采取通过成功树来求解事故树的最小径集,得到 $T=12$ 。根据最小径集并用式(1)计算基本事件的结构重要度,再用式(2)将各基本事件(指标)的结构重要度转换为判断因子(见表6);然后由式(3)计算得到准则层各指标的判断因子(见表7)。

表6 基本事件的结构重要度以及判断因子

基本事件	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
结构重要度	1/32	1/32	1/32	3/32	3/32	3/32	3/64	5/64	3/32	3/32	1/16
判断因子 $\chi_{(i)}$	2	2	2	6	6	6	3	5	6	6	4
基本事件	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22
结构重要度	1/16	1/32	1/32	1/16	1/16	1/16	1/32	1/4	1/2	1/4	1/2
判断因子 $\chi_{(i)}$	4	2	2	4	4	4	2	16	32	16	32

表7 准则层各指标的判断因子

准则层	人员因素 A1	设备因素 A2	环境因素 A3	管理因素 A4
判断因子 $\chi_{(A_k)}$	42	47	47	30

依据表7中准则层各指标的判断因子,构造出准则层判断矩阵(已通过一致性检验),如表8所示。同理,也可依据表6中的判断因子,构造出指标层各因素的判断矩阵。

表8 事故树结构重要度判断矩阵

准则层	A1	A2	A3	A4	权重
人员因素 A1	1	8/9	8/9	7/5	0.252 6
设备因素 A2	9/8	1	1	8/5	0.284 2
环境因素 A3	9/8	1	1	8/5	0.282 8
管理因素 A4	5/7	5/8	5/8	1	0.180 4

4.1.2 依据传统层次分析法构造判断矩阵

通过专家打分方式,对各准则层因素比较其相对于目标层某因素的重要程度,并按表3规定的标度进行量化,建立传统准则层判断矩阵,如表9所示。同理,按照此方法可以构造指标层各因素相对于准则层的判断矩阵,并进行一致性检验。

表9 传统层次分析判断矩阵

准则层	A1	A2	A3	A4	权重
人员因素 A1	1	2	3	2	0.416 8
设备因素 A2	1/2	1	2	2	0.269 5
环境因素 A3	1/3	1/2	1	1/2	0.120 9
管理因素 A4	1/2	1/2	2	1	0.192 8

4.2 确定权重

(1)参数 α 计算。依据表7,其最大标度为47,由表3可算出此标度下的标度因子 $\varphi_1=0.193\ 2$;根据式(6)算得 $CR_1=0.016\ 3$,再代入式(5)可得:

$\varepsilon_1 = 1-10CR_1 = 1-0.163 = 0.837$,故:

$\alpha = \varphi_2 + \varepsilon_2 = 1.03$ 。

(2)参数 β 计算。由表3可知,最大标度为9时的标度因子 $\varphi_2=1$;根据式(6)算得 $CR_2=0$,再代入式(5)可得:

$\varepsilon_2 = 1-10CR_2 = 1-0=1$,故:

$\beta = \varphi_2 + \varepsilon_2 = 2$ 。

(3)各指标综合权重计算。根据式(4),由 W' 和 W'' 计算得出各指标因素的综合权重 W 和重要度排序,计算结果见表10。

4.3 结果分析

由表10可见,与传统层次分析法的排名相比,安全设备故障(X22)、缺乏安全设施(X20)这2个风险因素在FTA-改进层次分析评价法中的排名有大幅度提高,其中设备因素下的安全设备故障(X22)的排名由第11位提高到了第3位。通过收集2010年至2016年560例国内外城市轨道交通运营事故分析报告可知,设备因素是造成城市轨道交通运营事故的主要原因,占比为78.7%^[19]。但在本研究的运营安全事故统计结果(见表5)中,34起事故中只有6起是由设备因素引发,安全设备故障(X22)在传统层次分析法中的排名也仅为第11位,若只由这两方面来评判事故的风险性,大概率会低估其危险程度。而FTA-改进层次分析评价法是将事故树的结构重要度与传统层次分析法相结合,可以有效降低由人的主观判断带来的误差,从而对风险因素进行客观的评价。

相比于传统层次分析法,在FTA-改进层次分析评价法中存在个别风险因素排名下降的现象,如信号系统故障(X17)、突发事件(X3)、管理人员监察不到位(X2)、管理人员违章操作(X13)。排名下降最显著的是突发事件(X3),它由第7名下降到了第13名。在文献[19]中,环境因素占比仅为1.6%,这也从一个侧面验证了FTA-改进层次分析评价法的客观性。

因此,为有效降低有轨电车在道路交叉口的安全风险,避免和减少安全事故发生,提升城市有轨电车道路交叉口的安全性,需要加强安全设备设施的检修与保养,针对设备风险因素制定完善的管理制度,不断提高城市有轨电车安全事故风险评价的客观性。

5 结 语

城市有轨电车轨行区一般都是处于半封闭状

表 10 各指标因素的综合权重及重要度排序

准则层	风险因素	指标	W'	排名	W''	排名	W	排名
人员因素 A1	驾驶员安全意识薄弱	X4	0.036 9	6	0.022 7	20	0.027 5	17
	驾驶员操作不当	X6	0.036 9	6	0.022 7	20	0.027 5	17
	存在侥幸心理	X9	0.036 9	6	0.045 5	12	0.042 5	9
	专业技能较差	X11	0.022 3	12	0.022 7	20	0.022 6	22
	驾驶员违章操作	X12	0.022 3	12	0.045 5	12	0.037 6	12
	行人安全意识薄弱	X19	0.094 8	4	0.090 9	1	0.092 2	1
设备因素 A2	车辆未及时检修	X7	0.016 0	17	0.039 7	15	0.031 6	16
	通讯设备故障	X15	0.021 3	14	0.049 6	10	0.040 0	11
	车辆系统故障	X16	0.021 3	14	0.055 6	6	0.043 9	8
	信号系统故障	X17	0.021 3	14	0.059 5	3	0.046 5	7
	安全设备故障	X22	0.170 2	1	0.045 6	11	0.088 0	3
环境因素 A3	突发事件	X3	0.010 6	21	0.050 0	7	0.036 6	13
	极端天气	X8	0.026 6	11	0.050 0	7	0.042 0	10
	社会车流干扰	X18	0.010 6	21	0.075 0	2	0.053 1	5
	缺少限速警示牌	X10	0.031 9	9	0.025 0	19	0.027 4	19
	缺乏安全设施	X20	0.170 2	2	0.050 0	7	0.090 9	2
管理因素 A4	检修不及时	X1	0.015 6	18	0.044 1	14	0.034 4	15
	管理人员监察不到位	X2	0.015 6	18	0.029 4	16	0.024 7	20
	监督力度不够	X5	0.046 9	5	0.029 4	16	0.035 3	14
	管理人员违章操作	X13	0.015 6	18	0.029 4	16	0.024 7	20
	规章制度不够清晰	X14	0.031 3	10	0.058 8	4	0.049 5	6
	故意闯红灯	X21	0.125 0	3	0.058 8	4	0.081 3	4

态,大大增加了运营安全事故发生的概率,预防运营安全事故的发生是保障有轨电车系统安全运行的有效途径。基于 FTA 结构重要度的层次分析法与基于专家打分的传统层次分析法在风险评价中被广泛应用,是研究事故起因简便高效的方法。本研究通过 FTA-改进层次分析评价法的分析结果,建立了城市有轨电车运营风险评价体系。该体系基于事故树的结构重要度的分析结果,代入到传统层次分析法的权重计算中,将两种方法的评价结果综合起来,量化地分析各个因素对有轨电车道路交叉口运营安全的影响大小,在一定程度上可以减少主观因素的影响,准确掌握城市有轨电车道路交叉口运营的风险因素对顶上事件的影响程度,达到从根源上减少城市有轨电车道路交叉口运营事故的发生。

由于事故数据集有限,本文研究数据不够丰富和全面,今后需进一步收集事故案例样本,使研究结论更具科学性。

参考文献:

[1] 中国城市轨道交通协会.2021 年中国内地城轨交通线路概况 [R].北京:中国城市轨道交通协会,2022.

[2] 赵鹏林.现代有轨电车在城市应用中的问题 and 对策[J].城市轨道交通,2014(4):20-23.

[3] 何利英.城市有轨电车安全综合技术研究[J].城市轨道交通,2021 (6):36-39.

[4] 韩旭.沈阳现代有轨电车运营安全性提升探讨[J].黑龙江交通科技, 2017,40(10):161-163,165.

[5] 明瑞利.有轨电车系统安全性分析[J].城市交通,2016,14(4):59-63.

[6] 迟胜超.关于有轨电车运营车务安全管理的探讨[J].交通企业管理, 2015,30(3):38-41.

[7] FRIDULV Sagberg, INGER-ANNE F S. Traffic safety of tram transport [R].T&I Report 367,Oslo: Institute of Transport Economics, 1997.

[8] 杨泞晖.运营初期的现代有轨电车运营可靠性分析[D].南京:南京理工大学,2017.

[9] 王明文,王国良,张育宏.现代有轨电车与城市发展适应模式探讨 [J]. 城市交通,2007(6):70-72.

堆石混凝土试件单轴抗压试验进行细观模拟,对比了试验值和模拟值,并对模型的合理性进行验证,得出以下结论。

(1)建立由天然细骨料、老界面层、老砂浆层、新界面层和新砂浆层所构成的五相再生大骨料-自密实砂浆混凝土细观结构层次,并且在再生大骨料内部投放天然细骨料个数不止一个,为RLA-SCMRFC细观模型的建立确立了一个新的思路。

(2)通过对模拟出的应力应变曲线同实验测得数据进行对比,发现所选L7组轴心抗压强度的试验值19.03 MPa和模拟值19.95 MPa相差不大,在误差范围内,验证了本文所提出的细观模型的合理性,为文中研究不同因素对轴心抗强度影响做准备。

(3)以再生骨料粒径、再生骨料配制强度以及自密实砂浆配制强度为变量,研究上述三个因素对RLA-SCMRFC轴心抗压强度的影响。发现:RLA-

SCMRFC抗压强度随着再生骨料粒径的增大而增大,但是影响程度不是很显著;RLA-SCMRFC抗压强度随着再生骨料强度的增加而增加;RLA-SCMRFC抗压强度随着自密实砂浆强度的增加而增加,其中自密实砂浆强度对RLA-SCMRFC抗压强度的影响最为显著。模拟得出的影响规律同前期试验所得的规律完全吻合,这也使本文所提出的细观模型的合理性得到进一步验证。

参考文献:

- [1] 石建军,张志恒,金峰,等.自密实堆石混凝土力学性能的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007(7):3231-3236.
- [2] 张云国,李梦楠,薛向锋.自密实砂浆配合比设计及工作性能[J].大连交通大学学报,2015,36(3):60-64.
- [3] 肖建庄,李文贵,刘琼.模型再生混凝土单轴受压性能细观数值模拟[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(6):791-797.
- [4] 余燕妮,程勇.基于再生骨料的再生混凝土力学性能研究进展[J].江西建材,2020(8):10-11.

~~~~~  
(上接第247页)

- [10] 张凌翔.城市轨道交通运营风险分析与评价研究[D].南京:东南大学,2018.
- [11] 魏春荣,李艳霞,孙建华,等.事故树结构重要度的求解方法[J].黑龙江科技学院学报,2012,22(1):84-88,92.
- [12] 卜全民,王涌涛,汪德燿.事故树分析法的应用研究[J].西南石油大学学报,2007(4):141-144,200.
- [13] 吴殿廷,李东方.层次分析法的不足及其改进的途径[J].北京师范大学学报(自然科学版),2004(2):264-268.
- [14] 易灿南,胡鸿,廖可兵,等.FTA-AHP方法研究及应用[J].中国安全生产科学技术,2013,9(11):167-173.

- [15] 石龙,张瑞芳,谢启源,等.改进层次分析法在公共建筑火灾风险分析中的应用[J].科学通报,2009,54(3):329-336.
- [16] 许敏娟,许玉德.城市轨道交通风险评价的一种方法[J].中国科技信息,2005(21):73-74.
- [17] 朱建军.层次分析法的若干问题研究及应用[D].沈阳:东北大学,2005.
- [18] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
- [19] 刘骥鹏.城市轨道交通运营安全设备因素的风险评价研究[D].昆明:昆明理工大学,2017.