

文章编号: 2095-2163(2020)08-0113-06

中图分类号: U231.96

文献标志码: A

城市轨道交通线网应急预警分级模型

刘滋曼, 黄远春, 刘志钢, 庄异凡

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 针对城市轨道交通系统的运营特点,对轨道交通预警分级进行了研究。基于改进层次分析法与复杂网络,建立了城市轨道交通预警指标体系与线网预警分级模型。针对影响事故的因素,该预警指标体系由事故统计分析确立“人-机-环-管”四个方面危险源之间的归属关系,并由静态指标和动态指标综合确定权重;根据多目标线性加权函数计算线网综合预警值,确定阈值范围及预警级别,并通过色谱图呈现。通过对上海地铁节点重要度不同的车站发生既定规则大客流事件进行分析,验证了该预警模型的可行性和有效性。

关键词: 城市轨道交通; 应急预警; 线路网络; 层次分析法; 复杂网络

Emergency warning hierarchical model of urban rail transit network

LIU Ziman, HUANG Yuanchun, LIU Zhigang, ZHUANG Yifan

(Institute of Urban Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] In order to ensure the safe operation of urban rail transit, it is necessary to change the emergency management mode from post-emergency measures to hazard control and prevention. Based on the operation characteristics of urban rail transit system, this paper studies the early warning classification of urban rail transit, establishes the early warning index system of urban rail transit station and the early warning classification model of line network based on the improved analytic hierarchy process (AHP) and complex network. Aiming at the factors affecting the accident, the warning index system establishes the ownership relationship among the four hazard sources of man-machine-environment-management by accident statistical analysis, and the weight is determined by static index and dynamic index. Based on the multi-objective linear weighting function, the comprehensive warning value of line network is calculated, and the threshold range and warning level are determined. The feasibility and effectiveness of the warning model are verified by analyzing the large passenger flow events in the stations with different node importance in Shanghai metro.

[Key words] urban rail transit; emergency warning; line network; analytic hierarchy process; complex networks

0 引言

随着城市现代化进程的推进,为满足大众的出行需求,城市轨道交通作为发展过程中标准配置,其建设、运营、维护保障在全国各大城市如火如荼地进行。截止至2020年,轨道交通客流强度(客流量/运营里程)高达1.13万人次/公里左右,公众出行方式选择比例逐年攀升,安全的运营环境是消费群体对城市轨道交通认可的基本条件。因此,进行快速有效的预警分级是应急管理中的基础工作之一,对潜在的风险进行辨识和评估,尽早采取相应措施,从而有效控制、处置危险源,以达到防范化解安全风险、及时消除安全隐患、有效遏制安全事故的目的^[1]。

目前对危险源评估的方法主要有定性、半定量、定量以及模型评估四种。文献[2]通过调查规范、事故案例统计等方式,运用解释结构模型对施工过程中工人健康影响因素进行梳理划分并建立模型。

使因素之间的相互关系及结构层次更加清晰明确,但是未进行定量分析;文献[3]构建了车站和线路两层运营安全评价体系,采用增益型加权综合法对指标进行赋值计算,对应安全等级将评价结果形式化。但是没有对指标的特殊阈值进行设置,具体的数据指标在最终结果中未给出;文献[4]中,采用基于模糊贝叶斯网络,有效定量评估了基本事件的相对概率,有效地改善了事故树结构重要度排序分析法,提高了评估的可靠度。模型评估在加入作业因素的场景后,可以克服定量估计过程中可能出现的风险聚集难度增大情况,发现未知的脆弱点和灰色关联事件中存在的安全隐患^[5]。因此,本文基于改进层次分析法与复杂网络,建立了城市轨道交通线网应急预警分级模型,以解决前人主观成分偏高等难题。

1 应急预警分级判定思路

城市轨道交通应急预警分级模型,结合国内外

基金项目: 国家自然科学基金(71701124);城市轨道交通突发事件下大客流疏运监控预警技术和装备研发(2017YFC0804903)。

作者简介: 刘滋曼(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向:交通运输规划与管理、交通运输安全。

通讯作者: 黄远春 Email: copy008@163.com

收稿日期: 2020-03-24

学者对安全风险管理的相關研究,分析了城市轨道交通的运营特性以及运营事故统计数据,确定预警事件的主要影响因素,分析影响因素的层次关系和递阶关系,完成目标层、准则层、指标层的合理划分。

考虑到影响因素在城市轨道交通线网的重要程度,由静态风险评估和动态演化分析进行综合评估,对安全指标赋予不同权重系数,对LEC法中的事故发生可能性、危险源暴露的频繁程度、发生事故的结果等指标加以改进。采用层次分析法和复杂网络的相关理论,对评估线路网络进行安全评估,计算线网综合预警值,结合可拓区间创建网络安全指标等级差的标度区间映射表,进行ALERP原则上的划分。通过色谱图进行分数上的实时呈现,从而对影响因素量化分析,有针对性地制定预防措施,保障风险管理工作的有力实施。

2 应急预警分级指标体系建立

城市轨道交通运营的目标主要是满足大众出行需求、提高公众出行质量,保障系统安全运行。因此,研究指标体系模型与实际运营状况的耦合关系,从而达到应急预警的目的。

2.1 构建车站预警指标体系

任何应急事件的发生都会对交通系统产生一定的影响,在进行城市轨道交通应急预警量化判定时,需要结合事故案例库中的事故数据以及运营安全评价标准等手段,得出事故发生的因素和不同因素所属层次^[6]。针对线网层级的大系统来看,通过因子分析法分解协调,将运作过程分解成多个层次,每个层次由多个元素组成以达到诸多因素有条理、层次鲜明^[7]。

在此,建立评判因素集合 A ,按某个属性 c ,划分为 m 个指标(子集),使其满足:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m A_i = A, \\ A_i \cap A_j = \phi (i \neq j). \end{cases} \quad (1)$$

子集 T_i 属准则层,同样依据公式(1)进行指标层 A_i 在属性 c_1 前提下的梳理,并以此类推,使其划分为:

$$A_i | c_1 = \{A_{11}, A_{12}, A_{13} \cdots A_{1n}\}. \quad (2)$$

2.2 确定车站各指标权重

子集指标对总集合的相对影响程度有一定的差异,这也是定量评价相比较于定性评价的优势所在^[8]。通过确定隶属度函数——二元对比排序法,构造新的判断矩阵。即通过对多个指标之间的两两对比来确定某种特征下的相对顺序,由此来决定这

些因素对该特征的隶属函数的大体分布。在城市轨道交通线网中,即通过事故相对发生频率,结合静态指标、动态指标综合评价得出。

(1)收集原始评价数据,得到判断矩阵。对于评判因素集合 A 、子集 A_i 、次子集 A_{ij} 分别对应层次分析法中目标层、准则层、指标层。以一个集合中的子集 A_i 为例,说明二元对比排序过程。对某子集层次划分后,指标 $A_{11}, A_{12}, A_{13} \cdots A_{1n}$ 分布于邻接矩阵 $A_{j \times j}$ 中,横列与竖列元素进行两两比较,选择相对发生频率较高事件处赋值“1”,并参照国内外以往发生的事故汇总以及上海地铁运营标准,对可能造成的事故需采取的应急响应1-5等级,得出预测组成数对 (x, b_{ij}) ,数对赋值规则满足:

$$X = \begin{cases} (1, b_{ij}) \text{ 相对容易发生, 预警等级为 } b_{ij}; \\ (0, b_{ij}) \text{ 相对较少发生, 预警等级为 } b_{ij}. \end{cases} \quad (3)$$

利用两两对比形成判断矩阵 M 时,为了防止矩阵中的 a_{ij} 与实际比值出现偏差,故需要进行一致性检验。由于本文中赋值仅两个数值,故 R, I 均取值为0,无需进行一致性检验。

(2)确定事故级别。利用模糊数学中,通过建立由次子集指向子集的模糊映射^[9],根据上述得到的判断关系矩阵所确定,依据层次分析法进行多级模糊评判^[10],确定各层级权重。

借鉴事故发生引起的故障模式与影响分析理论,以一定时期内指标是否发生变动为标准,进行动态指标和静态指标的划分,结果如图1所示。在判断事故级别的过程中,通过专家知识库对事故案例聚类分析得出静态评价的同时,还需要对实际情况的事故动态分析进行评价。达到对体系静态指标和动态指标相结合,在满足一致性的情况下进行后续相应级别的计算。否则需要进行新一轮的迭代,直至可靠性达到规定阈值,从而得出事故等级判断矩阵 B 。

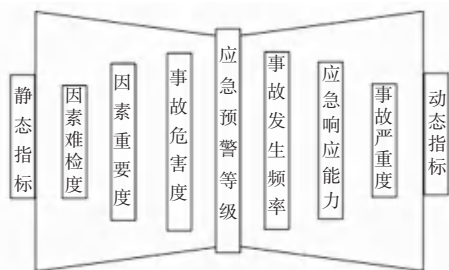


图1 b_{ij} 数值的影响因素

Fig. 1 Influencing factors of b_{ij} value

(3) 数据处理

①对初始判断矩阵 A 中的各行元素进行累加并归一化。

$$M_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

$$M'_i = M_i / \sum_{j=1}^n M_j, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

②计算车站级各因素权重。

$$W = M' * B. \quad (6)$$

③得出次子集的 n 个因素相对于子集 A_i 层的层次排序权重向量。

$$w_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ij})^T, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

④得出子集层的 m 个元素相对于评判因素集合 A 的权值向量。

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_i)^T, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

2.3 线网层级应急预警影响

城市轨道交通的网络连接性,保证了系统运行的连续性。节点的物理结构形态保证了网络的服务区域范围,同时也关系到发生事故的影响范围。车站层级的“人-机-环-管”任何一个部位出现故障都会产生一定的影响,波及部分区域乃至整个线网。因此,整体性线网的研究则尤为重要。

通常情况下,当轨道交通在城市中发展到成熟线网状态时,城市轨道交通网络在线路的衔接、交汇下形成放射状、网格状。在此结构上若加入环线,形成多种的运行线路,“环线+放射型”、“环线+网格型”等^[11],复杂网络的小世界特性和无标度特性就会相应的形成。

为了更好的研究城市轨道交通线网特性,需要对地铁网络中的所有车站节点集进行拓扑结构的构建。如图 2 所示,假设线路中的所有网络构成集合 $G = [S, E]$; S 表示地铁网络中的车站节点,记为 $S = [S_1, S_2, \dots, S_i, S_j], i, j$ 为节点编号; E 表示线路数量及长度^[12],记为 $E = [E_{12}, E_{24}, \dots, E_{ij}], i, j$ 为线路起点及终点节点,其对路网形态复杂程度影响较大;节点度 k 为站点的连接条数,节点度越大则代表枢纽作用能力越大;两个节点之间的连接状态可以用相关矩阵表示为 $[c_{ij}]_{n \times n}, c_{ij}$ 的取值依据是否车站之间有直接连接,分别取值 $\forall, 1, 0$ ^[13];平均路径长度 L 表示网络中两个任意节点之间最短距离 d 的平均值如公式(9)所示,根据 Floyd 算法得出;聚类系数 C_i 表示为节点之间存在的边数与总的可能存在边数最大值的比值,如公式(10)所示;连接效率为聚类系数的倒数,根据连接系数可得出节点之间的相互影响

关系^[14]。在此基础上,若同时满足公式(11)、公式(12),即可认为符合复杂网络中的小世界网络特性,继而根据是否符合幂律分布完成无标度特性的检验,对复杂网络的研究即可展开。

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{ij} d_{ij}, \quad (9)$$

$$C_i = 2E_i / (k_i(k_i - 1)), \quad (10)$$

$$L > \frac{\ln N}{\ln k}, \quad (11)$$

$$C < \frac{k}{N}. \quad (12)$$

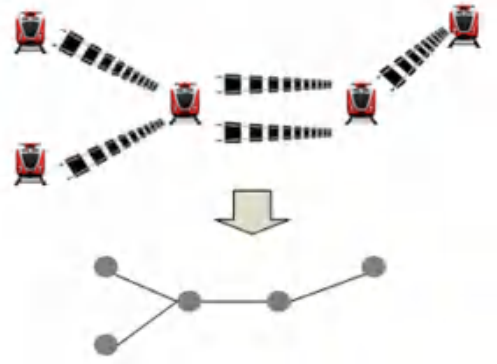


图 2 拓扑结构构建

Fig. 2 Topology construction

在图 2 中, $C = 0.4 < 1, L = 1.7 > 1$,故满足条件,上海地铁经验证符合特性。

若事故发生则车站的连通性在一定程度上受到损伤,整体的车站平均路径长度 L 发生改变^[15],聚集系数 C_i 和连接效率 $1/C_i$ 同样发生变化,车站应急预警的范围在线网层级也得到相应反馈^[16]。

将预警分级因素的等级划分为五级^[17-18],将数值 1-10 划分为对应因素的可拓区间,安全因素指标映射表,见表 1。

表 1 安全因素指标映射表

Tab. 1 Security factor indicator mapping table

级别	一	二	三	四	五
可拓区间	(1,3)	(3,4)	(4,6)	(6,8)	(8,10)
隶属度	无法控制区域	较危险区域 趋不可控	风险区域	可容忍区域	可控制相对安全区域

在现场作业中,通过指示灯颜色的变化,可以使线网安全信息同步传达到部门机关及基层,使应急响应更加及时,切实做到预防预警。在此,分别使用“红、橙、黄、绿、蓝”五种颜色对应应急预警级别,通过三原色的组合以蓝色(RGB 值中 B 为 255,其

余为 0) 至红色 (RGB 值中 R 为 255, 其余为 0) 这一区间的变化对应于线网安全得分, 更加直观、方便。

3 实例分析

上海地铁自 1993 年发展至今, 逐渐形成网络化格局, 人们的出行方式与轨道交通密不可分, 运营安全的保证更加重要。本文中应急预警因素集合从

“人-机-环-管”4 个传统安全管理层面出发, 加之对国内外轨道交通的事故共 979 起案例 (其中包括国内 895 起、国外 84 起) 汇总分析得出大致范围, 在集合内部对各指标进行评判, 在各类指标间形成由低层次向高层次的逻辑层次结构, 得到具体指标体系如图 3 所示。

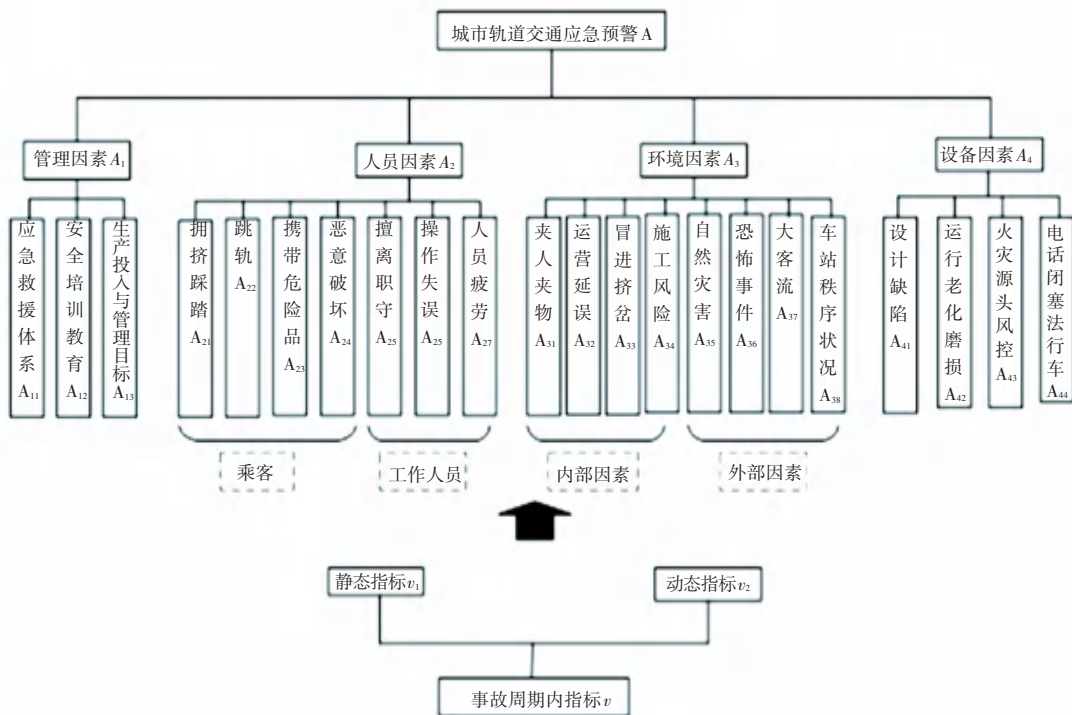


图 3 应急预警指标体系

Fig. 3 Emergency warning indicator system

针对上文构建的应急预警指标体系中的环境因素进行实例分析, 通过对环境因素中的 8 种子因素集进行二元对比排序法, 构造新的判断矩阵, 进行数

据处理。根据公式(1)-(8)可得 8 种影响因素的相对权重, 见表 2。人员因素、设备因素、管理因素的相对权重, 见表 3。

表 2 环境因素层级次子集相对权重

Tab. 2 Relative weights of hierarchical subsets of environmental factors

环境因素 W_3	综合等级	车站秩序状况 A_{38}	大客流 A_{37}	恐怖事件 A_{36}	自然灾害 A_{35}	施工风险 A_{34}	冒进挤岔 A_{33}	运营延误 A_{32}	夹人夹物 A_{31}
0.1553	4	0	0	1	0	1	1	0	夹人夹物 A_{31}
0.2718	2	1	1	1	1	1	1		运营延误 A_{32}
0.0777	4	0	0	1	0	0			冒进挤岔 A_{33}
0.0777	2	0	0	1	0				施工风险 A_{34}
0.1165	1	1	1	1					自然灾害 A_{35}
0.0291	3	0	0						恐怖事件 A_{36}
0.1166	1	1							大客流 A_{37}
0.1553	2								车站秩序状况 A_{38}

表 3 其余因素指标权重

Tab. 3 Index weights of other factors

因素类别	子集条目	所占比重
管理因素 W_1	应急救援体系 A_{11}	0.285 7
	安全培训教育 A_{12}	0.571 4
	生产投入与管理目标 A_{13}	0.142 9
人员因素 W_2	拥挤踩踏 A_{21}	0.200 0
	跳轨 A_{22}	0.033 3
	携带危险品 A_{23}	0.250 0
	恶意破坏 A_{24}	0.133 3
	擅离职守 A_{25}	0.050 0
	操作失误 A_{26}	0.200 0
	人员疲劳 A_{27}	0.133 3
设备因素 W_4	设计缺陷 A_{41}	0.117 6
	运行老化磨损 A_{42}	0.352 9
	火灾源头风控 A_{43}	0.176 5
	电话闭塞法行车 A_{44}	0.353 0

从线网层级来看,上海地铁线路分布复杂,如图 4 所示。在此复杂网络中,因上海地铁 3 号线和 4 号线沿线地铁站共用一条线路,故在线网连通性计算中只考虑一次共享的地铁站点和线路,其余线路均以线路图为准。

利用 Floyd 算法计算可得:平均节点度为 2.31,即每个站平均连接到 2.31 个站;特征路径长度为 14.87,即任意两个站之间最短路径平均经过 14.87 个站;聚类系数为 0.008 2,连接数为 121.95。



图 4 上海地铁运行线路图

Fig. 4 Shanghai metro line diagram

以上海地铁世纪大道、人民广场、东方体育中心、上海火车站(如图 4 所示)4 个大客流(分别对应的节点数为 8/6/5/4)出现频率较高站点为例,若四个站点发生大客流,其余因素均以正常方式运行,则此时环境因素的综合得分为 8.834,RGB 值为 R:64; G:140;B:115。根据表 1 隶属度划分可知,隶属于

五级预警,此时车站应该属于可控制安全范围,但是向可容忍区域变化的趋势偏高。所以在大客流车站通常会采取增加检售票能力、设立临时疏导、控制或关闭出入口来限制进站客流、利用广播做好客流疏导、安抚宣传工作等来进行控制,以防在其它叠加事故发生时,节点脆弱性增强,引发更为严重事故。

对路网层级来说,以上 4 个站在面临大客流采取限流措施时,聚类系数分别为 0.080 8、0.087 2、0.093 4、0.097 9,符合线网的聚合度规则,影响范围内的站点应急预警级别均处于可控范围。

4 结束语

在城市轨道交通运行过程中,事故带来的连锁反应难以想象,网络的结构化相比较于传统道路交通、海运交通等更加突出。构建完整的城市轨道交通系统安全体系,从而达到预防、保障、监控和应急救援的目的。在事故发生之前,对可能发生的故事进行应急预警,可以有效的利用救援资源、提高救援效率,遏止进一步扩大的趋势。本文提出的应急预警等级划分,使用色谱等精细化的分布形式来进行当前系统状态的描述,并利用层次分析法结合已发故事的动态因素和静态因素建立了评价指标模型,并从聚类系数和连接数得到对一定范围内事故的影响,以方便相邻车站采取应急措施,可为动态监测系统状态提供一定的基础。对不同车站的权重赋值可依据实际更改影响因素,但在评价过程中没有考虑事故发生对局域车站的影响因素差异性,对此有待进一步研究。

参考文献

- [1] 韩豫,成虎. 基于脆弱性的地铁运营安全事故致因分析[J]. 中国安全科学学报,2013,23(8):164-170.
- [2] 朱伟铸,朱建君,杨明宇,等. 基于 ISM 的土木工程施工工人健康影响因素研究[J]. 建设科技,2019(15):87-94.
- [3] 王艳辉,李曼,冯欢. 增益型加权综合法在城轨交通运营安全评价中的应用[J]. 铁道学报,2013,35(3):9-17.
- [4] 杨能普,杨月芳,冯伟. 基于模糊贝叶斯网络的铁路危险货物运输过程风险评估[J]. 铁道学报,2014,36(7):8-15.
- [5] 卢虹宇. 城市轨道交通运营安全评价方法研究[J]. 管理观察,2019(16):88-92.
- [6] 季学伟,翁文国,倪顺江,等. 突发公共事件预警分级模型[J]. 清华大学学报(自然科学版),2008(8):1252-1255.
- [7] 杨艳刚,简丽,关磊,等. 我国高速公路绿色服务区评价指标体系构建[J]. 交通运输研究,2019,5(5):88-93.
- [8] 邬春兰,宋雨欣,李晨. 高铁列车客运安全评价及风险管控[J]. 中国安全科学学报,2019,29(S1):150-157.
- [9] 张建平,张凌翔,张宇等. 目标导向的多层次城市轨道交通运营安全风险评价指标体系[J]. 都市快轨交通,2018,31(2):135-140.