

基于 fsQCA(模糊集定性比较分析)的城市轨道交通运营安全风险研究*

李颖薇 冯套柱

(西安科技大学管理学院, 710054, 西安//第一作者, 硕士研究生)

摘要 目的: 为有效预防人为、设备、管理及环境因素引发的城市轨道交通运营事故, 需分析城市轨道交通运营安全风险, 以提升管理水平。方法: 选取 2003—2021 年 30 起国内外城市轨道交通运营典型事故案例, 运用模糊集定性比较分析法, 探究城市轨道交通运营事故的致因路径及核心条件。对分析得到的 6 种条件组态进行归纳, 总结了安全意识淡薄型、车辆系统故障型、监督管理匮乏型和外部环境恶劣型 4 种事故类型。结果及结论: 员工行为等 6 个前因变量均不是事故发生的必要条件。事故的核心条件分别为员工不安全行为、车辆系统故障、安全管理不到位和外部环境不良。若要预防安全意识淡薄型事故的发生, 就需要加强员工安全意识和提升职业技能; 针对车辆系统故障型事故, 可对车辆进行定期检修、建立维修数据库; 对于监督管理匮乏型事故, 建立健全安全运营管理体系、严格落实安全监督检查制度具有重要作用; 若要阻断外部环境恶劣型事故, 就要完善应急处置预案, 全面提升城市轨道交通的应急处置能力。

关键词 城市轨道交通; 运营安全管理; 模糊集定性比较分析

中图分类号 F530.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.034

Study on Urban Rail Transit Operational Safety Risks Based on fsQCA

LI Yingwei, FENG Taozhu

Abstract Objective: To effectively prevent URT (urban rail transit) operation accidents caused by human, equipment, management and environmental factors, it is necessary to analyze URT operational safety risks and improve management levels. Method: Selecting 30 typical URT operation accident cases in China and abroad from 2003 to 2021, the fsQCA (fuzzy set qualitative comparative analysis) method is employed to explore the causal pathways and core conditions of URT operation accidents. Based on six types of configuration conditions obtained from analysis, weak safety awareness, ve-

hicle system failures, inadequate supervision and management, and adverse external environment four types of accident scenarios are summarized. Result & Conclusion: None of the six antecedent variables, including employee behavior, are necessary conditions to cause accidents. The core conditions of accidents are identified as unsafe employee behaviors, vehicle system failures, inadequate safety management, and adverse external environment. To prevent accidents related to weak safety awareness, it is necessary to strengthen employee safety awareness and enhance professional skills. For accidents related to vehicle system failures, it is recommended to carry out regular maintenance and establish vehicle maintenance database. Addressing accidents caused by inadequate supervision and management system, it is crucial to build well-formed safety operation-management system and strictly implement safety supervision and inspection mechanisms. To block accidents caused by adverse external environment, it is important to improve emergency response plans and enhance the emergency response capabilities of URT comprehensively.

Key words urban rail transit; operation safety management; fuzzy set qualitative comparative analysis

Author's address College of Management, Xi'an University of Science and Technology, 710054, Xi'an, China

2021 年我国城市轨道交通(以下简称“城轨”)运营共发生 1 540 次 5 min 及以上延误事件、6 777 次列车退出正线故障, 并有大量的财产损失事故, 以及个别导致人员伤亡的事故^[1]。可见, 城轨运营安全风险的研究十分重要。目前国内外此类研究主要集中在风险评价方法及指标体系构建之上。文献[2-5]等研究大多未能系统整合多元影响因素, 进而分析事故发生的原因和风险。

fsQCA(模糊集定性比较分析)方法能够从整体上探寻多重并发因果致因导致的复杂社会问题发

* 国家自然科学基金青年项目(72104200); 陕西省交通运输厅科研项目(19-05R, 20-07R)

生理理,其以隶属程度作为评估条件,适用于条件变量和结果变量为隶属程度的分析,能解决变量之间相互影响的问题。为此,本文将组态视角引至城轨运营事故分析当中,以典型城轨运营事故为案例进行小样本分析,运用 fsQCA 方法,探究多重不安全因素并行引发事故的原因,识别影响城轨运营事故的不同致因路径,以便切断其致因路径,有助于提高城轨运营的安全风险管理水平。

1 运用 fsQCA 方法识别致因路径

1.1 案例样本的筛选

本文以城轨运营事故及险兆事故为研究对象,数据来源于中华人民共和国应急管理部及中华人民共和国交通运输部及安全管理网等网站发布的

事故调查报告。

典型案例样本的筛选标准如下:①所选案例具有较大的社会影响力,得到媒体和社会的广泛关注;②所选案例在发生地域、时间跨度及邻避设施类型上均体现多元化特征;③案例支撑材料具有全面性,包含媒体报道及事故调查报告等。

1.2 变量的设定与赋值

fsQCA 方法需根据研究问题结合案例特征选择合适的条件变量与结果变量。

根据惯例,小样本规模研究(10~40 个案例)宜将条件变量限制在 7 个之内。本文结合选定的 30 个典型案例及参考相关文献,以事故致因模型为基础,从人为、设备、管理和环境 4 个因素出发,确定了 6 个条件变量。条件变量的设定及赋值见表 1。

表 1 条件变量的设定及赋值表
Tab.1 Setting and assignment of condition variables

变量分类	条件变量名称	变量说明	赋值条件	赋值
人为因素	S (员工行为)	员工的不安全行为包含误操作或违规操作等,任一行差为差错都可能导致事故的发生	员工有意识不安全行为 ^[6]	1.00
			员工无意识不安全行为	0.80
			员工无不安全行为	0
	P (乘客行为)	乘客的不安全行为包含人为阻挡、翻越站台门等。这些行为往往会导致列车运行异常、组织混乱、甚至是人员伤亡	乘客有意识不安全行为	1.00
			乘客无意识不安全行为	0.80
			乘客无不安全行为	0
设备因素	I (基础设施)	基础设施包含供电系统、信号及通信系统、机电系统、站台设备系统等。基础设施的老化、设计缺陷,以及维护保养不合理都会导致突发事件	基础设施 A 类故障 ^[7]	1.00
			基础设施 B 类故障	0.67
			基础设施 C 类故障	0.33
			基础设施无故障	0
	V (车辆系统)	包含制动系统及牵引系统等。车辆系统故障会引发列车脱轨、列车撞车等事故	车辆系统 A 类故障	1.00
管理因素	M (安全管理)	包含安全生产投入、安全教育培训、安全检查规程等	车辆系统 B 类故障	0.67
			车辆系统 C 类故障	0.33
			车辆系统无故障	0
			安全管理不到位	1.00
环境因素	E (外部环境)	外部环境包含暴雨、地震、公共卫生事件及极端事件等	安全管理到位	0
			外部环境不良	1.00
			外部环境良好	0

参照《国家城市轨道交通运营突发事件应急预案》,结合所收集的国内外地铁事故案例,将城市轨道交通运营事故按后果严重程度划分为 5 个等级,并将城轨运营事故等级作为结果变量。结果变量的设定及赋值见表 2。

在条件变量中,安全管理不是导致城轨运营事故发生的直接原因,但管理因素对于其他三类因素

有重要的调节作用。如果缺乏完善的应急预案、紧急医疗体系和健全的制度等,一旦发生事故,将会造成更多的经济损失及人员伤亡,甚至可能让事故重演。

此外,由于目前鲜有内部环境因素导致的城轨运营事故,故本文在分析时不考虑内部环境因素。而外部环境分为自然环境和社会环境:自然环境中,

表 2 结果变量的设定及赋值表

Tab.2 Setting and assignment of result variables		
结果变量名称	变量说明	赋值
特别重大运营事故	死亡 30 人以上或 100 人以上重伤,或直接经济损失 1 亿元以上	1.00
重大运营事故	死亡 10 ~ 30 人或 50 ~ 100 人重伤,或直接经济损失 5 000 万元以上 1 亿元以下,或连续中断行车 24 h 以上	0.80
较大运营事故	死亡 3 ~ 10 人或 10 ~ 50 人重伤,或直接经济损失 1 000 万元以上 5 000 万元以下,或连续中断行车 6 ~ 24 h	0.60
一般运营事故	死亡 3 人以下或 10 人以下重伤,或直接经济损失 50 万元以上 1 000 万元以下,或连续中断行车 2 ~ 6 h	0.40
险兆事故	无实质性影响	0

自然灾害常常会引发次生灾害,从而造成更严重的后果;在社会环境中,近年来有些自杀者或极端主义者选择城轨站台作为制造极端事件的场所。

1.3 单因素的必要性分析

在进行组态分析之前通常先进行单因素必要性分析,计算一致性水平和覆盖度。若一致性水平大于 0.90,则该条件变量为必要条件。运行 fsQCA3.0 软件对 6 个条件变量进行单因素必要性分析,结果如表 3 所示。由表 3 可见,各条件变量作为前因变量的必要性指标均不超过 0.90,说明各条件变量不可单独成为城轨运营事故发生的必要条件。

1.4 条件组态分析

运用fsQCA方法进行条件组态分析可得到简

表 3 条件变量的单因素必要性分析结果

Tab.3 Single condition necessity analysis results of condition variables		
条件变量	一致性水平	覆盖度
S	0.42	0.68
\bar{S}	0.62	0.56
P	0.25	0.65
\bar{P}	0.78	0.57
I	0.33	0.57
\bar{I}	0.75	0.64
V	0.22	0.65
\bar{V}	0.78	0.55
M	0.57	0.62
\bar{M}	0.43	0.52
E	0.13	0.80
\bar{E}	0.87	0.55

约解、中间解和复杂解 3 种构型形式。其中合理有据、复杂度适中的中间解通常是 QCA(定性比较分析)研究中汇报和诠释的首选。因此,本文研究主要选取中间解,并以简约解进行辅助分析。

为了更好地对比不同组态的差异性,本文以核心条件为参照,归纳出 4 种事故类型:安全意识淡薄型、车辆系统故障型、监督管理匮乏型和外部环境恶劣型。经过条件组态分析,各类城轨事故的前因条件构型如表 4 所示。

表 4 各类城轨事故的前因条件构型

Tab.4 Antecedent condition configurations of various urban rail accidents										
事故类型	组态	条件变量						一致性水平	覆盖度	净覆盖度
		S	P	I	V	M	E			
安全意识淡薄型	A1	●	●	⊗	⊗	⊗	⊗	1.00	0.08	0.08
车辆系统故障型	A2	⊗	⊗	⊗	●	⊗	⊗	1.00	0.08	0.00
监督管理匮乏型	A3	●	⊗	⊗		●	⊗	0.84	0.23	0.23
	A4	⊗	⊗	●	⊗	●	⊗	0.84	0.12	0.12
外部环境恶劣型	A5	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	●	0.80	0.07	0.07
	A6	●	⊗	●	⊗	●	●	1.00	0.07	0.07

注:●—核心条件,且条件存在;●—边缘条件,且条件存在;⊗—核心条件,且条件不存在;⊗—边缘条件,且条件不存在;空白表示该变量出现与否不影响最终结果。

由表 4 可知,6 种条件组态的一致性水平均大于 0.80,说明所有的案例均满足一致性的要求,即 6 条组态都是导致轨道交通事故发生的充分条件。进一步计算可得,条件组态的总体一致性为 0.90,

总体覆盖度为 0.64,表明该结果能有效解释 64% 的城轨运营事故的案例。

各类城轨运营事故的核心条件及化简后致因路径为:

1) 安全意识淡薄型事故,为组态 A1(覆盖度为 0.08),其核心条件为员工不安全行为。化简后致因路径为:事故发生 = 员工不安全行为 \cup 乘客不安全行为 \cup 基础设施无故障 \cup 车辆系统无故障 \cup 安全管理到位 \cup 外部环境良好。

2) 车辆系统故障型事故,为组态 A2(覆盖度为 0.08),其核心条件为车辆系统故障。化简后致因路径为:事故发生 = 车辆系统故障 \cup 员工无不安全行为 \cup 乘客无不安全行为 \cup 基础设施无故障 \cup 外部环境良好。

3) 监督管理匮乏型事故,包含组态 A3 和 A4(覆盖度为 0.35),其核心条件为安全管理不到位。化简后致因路径为:事故发生 = 安全管理不到位(员工不安全行为 \cup 乘客无不安全行为 \cup 基础设施无故障 \cup 外部环境良好 + 员工无不安全行为 \cup 乘客无不安全行为 \cup 基础设施故障 \cup 车辆系统无故障 \cup 外部环境良好)。

4) 外部环境恶劣型包含组态 A5 和 A6(覆盖度为 0.14),其核心条件为外部环境不良。化简后致因路径为:事故发生 = 外部环境不良(员工无不安全行为 \cup 乘客无不安全行为 \cup 基础设施无故障 \cup 车辆系统无故障 \cup 安全管理到位 + 员工不安全行为 \cup 乘客无不安全行为 \cup 基础设施故障 \cup 车辆系统无故障 \cup 安全管理不到位)。

2 安全风险分析及建议

针对城轨运营事故类型,本文结合其核心条件进一步分析并提出安全管理建议:

1) 安全意识淡薄型事故的核心条件为员工不安全行为。此类事故的发生往往是员工抱有侥幸心理或自身素质不高等导致的。例如,在 2020 年的济南地铁 1 号线列车挤岔事故中,司机在越过 S1104 信号机红灯及 P1106 道岔后,未认真确认 P1104 道岔开通方向就盲目进站,从而导致列车脱轨。阻断此类事故路径的关键是加强安全宣传教育和职业培训,提高员工自身安全意识和技能,对员工的行为进行考核管理。

2) 车辆系统故障型事故的核心条件为车辆系统故障。2012 年,广州地铁 8 号线列车因车顶受电弓发生故障,车厢被电击穿冒烟,造成乘客恐慌。为预防此类事故,应需对地铁车辆定期进行检修;对已发生的故障应按故障类型建立相应的维修数据库,为日后类似故障的处理提供参考。

3) 监督管理匮乏型事故的核心条件为安全管理不到位。2013 年,北京地铁 1 号线万寿路站的列车线缆烧断,造成 6 列地铁列车停运。经调查,安全检修未落实到位是加剧此次事故严重性的间接原因。要应对监督管理匮乏型事故,应该建立健全安全运营管理体系,严格落实安全监督检查制度,确保各项运营环节都有明确的制度规范,并严格执行。

4) 外部环境恶劣型事故的核心条件为外部环境不良。外部环境中的极端天气以及不良社会风气对于城轨运营的影响不容忽视。2021 年河南郑州地铁 5 号线的特大暴雨事故,因暴雨造成城市严重内涝,且郑州地铁集团应急处置不力、行车指挥调度失误,导致人员伤亡。为避免此类事故,管理单位应制定并完善应急预案,建立内部预警机制,全面提升应急处置能力。

3 结语

本文基于 fsQCA 方法,以员工行为、乘客行为、基础设施、车辆系统、安全管理及外部环境等 6 种条件因素,探究影响城轨运营事故的复杂因果机制,为深入探讨城轨运营事故的致因路径提供全新的视角。进行组态分析共得到 6 条导致事故发生的路径,将其归纳总结为安全意识淡薄型、车辆系统故障型、监督管理匮乏型和外部环境恶劣型 4 种类型的事故。

对于安全意识淡薄型事故,重点在于提升员工的安全意识和职业技能;预防车辆系统故障型事故,可采取定期检修、采用科学方法分析故障以及建立维修数据库等措施;建议通过建立健全安全运营管理体系、严格落实安全监督检查制度来应对监督管理匮乏型事故;外部环境恶劣型事故的阻断强调提升城轨的应急管理能力、全面提升应急处置能力。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2021 年度统计和分析报告[R]. 北京:中国城市轨道交通协会,2022.
China Association of Metros. 2021 annual statistics and analysis report of urban rail transit[R]. Beijing: China Association of Metros, 2022.
- [2] 许慧,岳靖川,杜茂康,等. 基于 N-K 模型的城市轨道交通运营风险耦合研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 105.

(下转第 191 页)

4) 前后洞错开开挖的工序,使得隧洞开挖过程中的变形呈现不同的特征。洞同时开挖时,隧洞拱顶处变形速率较小,单独开挖时隧洞拱顶处变形速率反而较大。

参考文献

- [1] 程小虎. 在既有建筑下修建浅埋暗挖岩石车站的关键技术[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(6): 99.
CHENG Xiaohu. Key technologies for the construction of shallow-buried rock metro stations under existing buildings[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(6): 99.
- [2] 王占生, 张顶立. 浅埋暗挖隧道近距下穿既有地铁的关键技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊2): 4208.
WANG Zhansheng, ZHANG Dingli. Key techniques on shallow embedded tunnel constructed beneath existing subway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4208.
- [3] 何知思, 杨新安. 浅埋黄土隧道下穿道路施工沉降及控制研究[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(2): 35.
HE Zhisi, YANG Xin'an. Research on settlement control of shal-

low buried loess tunnel underpass road[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(2): 35.

- [4] 李健, 谭忠盛, 喻渝, 等. 浅埋下穿高速公路黄土隧道管棚变形监测及受力机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 3002.
LI Jian, TAN Zhongsheng, YU Yu, et al. Analysis of deformation monitoring and mechanical behaviors of big pipe-roof for shallow-buried large-span tunnel to underpass highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3002.
- [5] 李永宽, 张顶立, 房倩, 等. 浅埋暗挖隧道下穿地表建筑物安全控制技术研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 266.
LI Yongkuan, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. Study on safety control technology of upper building crossed by shallow metro tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 266.
- [6] 唐黎明. 地铁盾构近距离下穿多座高铁桥梁影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(2): 45.
TANG Liming. Numerical analysis for the construction of metro shield tunnel under multiple high-speed railway bridges[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(2): 45.

(收稿日期: 2021-03-18)

(上接第 183 页)

- XU Hui, YUE Jingchuan, DU Maokang, et al. Analysis of urban rail transit coupling operation risks based on N-K model[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 105.
- [3] 刘懿文, 朱琳, 刘志钢, 等. 基于贝叶斯网络的城市轨道交通运营安全风险及防控研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 162.
LIU Yiwen, ZHU Lin, LIU Zhigang, et al. Risk analysis, prevention and control of urban rail transit operation system based on Bayesian network[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(2): 162.
- [4] 刘兵, 李晓璐, 张彭, 等. 基于熵权可拓物元模型的城市轨道交通线路运营风险评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 175.
LIU Bing, LI Xiaolu, ZHANG Peng, et al. Evaluation operational risk of urban rail transit line based on entropy weight extension matter-element model[J]. Journal of Safety Science and Technol-

gy, 2019, 15(12): 175.

- [5] 刘福泽, 李娟, 范博松, 等. 城市交通系统安全运营状态风险评估——以北京市轨道交通为例[J]. 管理评论, 2020, 32(7): 217.
LIU Fuze, LI Juan, FAN Bosong, et al. Risk analysis for urban transit — an empirical study on the Beijing rail transit system[J]. Management Review, 2020, 32(7): 217.
- [6] REASON J. Human error[M]. Cambridgeshire: Cambridge University Press, 1990.
- [7] 于丹丹, 徐永能, 李昊真. 地铁车辆设备 ABC 分类研究[J]. 城市公共交通, 2017(4): 31.
YU Dandan, XU Yongneng, LI Haozhen. Research on ABC classification of the metro vehicle equipment[J]. Urban Public Transport, 2017(4): 31.

(收稿日期: 2022-10-18)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt 1998.tongji.edu.cn