

基于突变理论的城市轨道交通运营线路安全评价研究

谭海燕 张 旭

大连交通大学交通运输工程学院 辽宁 大连 116028

摘 要: 为对城市轨道交通各运营线路安全评估, 提出基于突变理论的评价方法研究城市轨道交通线路的运营安全情况。以近十年北京、上海市城市轨道交通运营安全事故案例为依托, 整理发生安全事故的风险要素, 建立安全评价体系。运用突变理论的评价方法对城市轨道交通运营线路进行定性和定量分析, 结合分值变换法对传统的突变理论方法进行改进。最后将突变理论评价结果与模糊综合评价结果进行对比, 验证了突变理论在评价城市轨道交通运营线路的有效性, 为北京、上海市城市轨道交通线路的运营安全提供强有力的支撑。

关键词: 城市轨道交通; 运营线路; 耦合值; 安全; 突变理论

Safety Evaluation of urban rail transit operating lines based on catastrophe theory

Haiyan Tan Xu Zhang

School of Traffic and Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China

Abstract: In order to evaluate the safety of urban rail transit lines, an evaluation method based on the mutation theory was proposed to study the operational safety of urban rail transit lines. Based on the safety accident cases of urban rail transit operation in Beijing and Shanghai in recent ten years, the risk factors of safety accidents are sorted out and a safety evaluation system is established. The evaluation method of catastrophe theory is used to make qualitative and quantitative analysis of urban rail transit operating lines, and the traditional catastrophe theory method is improved by combining with the score transformation method. Finally, the evaluation results of the catastrophe theory were compared with the results of fuzzy comprehensive evaluation, which verified the effectiveness of the catastrophe theory in the evaluation of urban rail transit operating lines, and provided strong support for the operation safety of urban rail transit lines in Beijing and Shanghai.

Keywords: Urban rail transit; Operating lines; Coupling value; Safety; Theory of sudden change

引言

据统计, 北京和上海市在我国城市轨道交通全年客流量中排名稳居我国前列。市民的市内出行以城市轨道交通方式为主, 使得城市轨道交通在运营过程中存在的安全问题逐渐显现, 一旦发生运营安全事故, 不仅对人们的出行和安全方面带来较大影响, 还会给社会带来经济损失。因此, 分析城市轨道交通运营事故的风险要素, 对运营安全的评价研究显得尤为重要。

国外一些发达国家的城轨发展较早, 其运营体系与管理系统都较完善, 通常结合自身实际运营情况建立安全评价指标体系, 进行分析^[1], 如运用德尔菲法与层次分析法^[2], 布局城市交通运营线路, 构建城市交通绩效的评价指标体系, 并以广州市为例, 验证该理论在城市交通线路方面的适用性。Azadeh 等^[3]对铁路运营系统提出了综合分析方法, 该方法利用计算机仿真技术对运营系统进行建模验证, 由 AHP 方法确定定性标准的权重, 再用 DEA 方法求解多目标找出主要风险要素。而国内学者运用基于结构方程法^[4]、模糊解释结构模型^[5]及案例统计-层次分析法^[6]等方法建立地铁运营安全评价指

标体系并进行分析。

综上所述, 每种评价方法适用范围不同, 层次分析法在评价城市轨道交通方面是适用的, 但主观方面的影响使安全评价的结果不具有代表性。而突变理论这种评价方法, 避免了风险要素权重的确定, 综合考虑了多个风险要素对安全状态的影响, 使评价结果更客观准确。目前, 突变理论已应用在海上运输关键点、高速公路运输和水上交通安全状态评价等方面; 在运用突变理论时, 要保证数据的客观与真实性, 但在实际中, 每条高速公路、地铁线路或是运输航线等发生安全事故的数据没有一个完整的平台将其统计, 缺少实际数据支撑, 使得此类研究较少。

鉴于此, 为提高我国城市轨道交通的安全水平, 完整统计城市轨道交通运营事故案例, 运用突变理论的评价方法, 对城市轨道交通运营线路进行安全评价, 掌握城市轨道交通线路的安全程度和发生安全事故的主要影响因素, 为北京、上海市的地铁运营安全提供了预防措施。

一、突变理论评价法

1 突变理论的基本原理

突变理论发生的本质是系统因各种因素的影响从一种稳定状态跃迁到另一种稳定状态^[7]。其主要步骤为:

- (1) 建立评价指标体系。
- (2) 处理指标数据。

(3) 归一化处理。

(4) 重复以上步骤, 计算各系统的总突变值。

2 常用的突变理论模型

根据控制变量数目的不同, 分为以下几种不同的突变类型以及归一化公式, 如表 1 所示:

表 1 突变模型及归一化公式

突变模型	势函数	控制变量数目	归一化公式
折叠突变	$f(x) = x^3 + ux$	1	$x_{a1} = \sqrt{a_1}$
尖点突变	$f(x) = x^4 + ux^2 + vx$	2	$x_{a1} = \sqrt{a_1}$ $x_{a2} = \sqrt[3]{a_2}$
燕尾突变	$f(x) = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx$	3	$x_{a1} = \sqrt{a_1}$ $x_{a2} = \sqrt[3]{a_2}$ $x_{a3} = \sqrt[4]{a_3}$
蝴蝶突变	$f(x) = x^6 + tx^4 + ux^3 + vx^2 + wx$	4	$x_{a1} = \sqrt{a_1}$ $x_{a2} = \sqrt[3]{a_2}$ $x_{a3} = \sqrt[4]{a_3}$ $x_{a4} = \sqrt[5]{a_4}$

3 突变评估指标的处理

由于底层指标的取值和单位不同, 需要对指标数据进行无量纲化处理。可分为两种:

①对于正向指标, 其标准化方程采用:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

②对于逆向指标, 其标准化方程采用:

$$x_{ij}^* = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

式 (1) (2) 中: x_{ij}^* 表示数据进行无量纲化处理后的值; x_{ij} 表示第 i 条地铁线的第 j 个影响因素; $i = (1, 2, \dots, n)$ 表示地铁线路; $j = (1, 2, \dots, m)$ 表示影响因素; $\max(x_{ij})$ 和 $\min(x_{ij})$ 表示第 j 个影响因素的最大值和最小值。

4 突变理论的不足与改进方法

(1) 突变理论的不足

突变理论德不足体现在使用传统的突变评级法在使用归一化公式时, 因聚集性的特点, 使最终的综合评价价值都偏高, 综合评价间的差距较小, 很难直观清楚的判定评价对象。

(2) 突变理论的改进方法

采用突变级数法计算得到的值常有聚集性问题, 本文依据施玉群等^[8]对传统的突变级数法计算得出的综合值进行改进。将集中靠近 1 的常规突变评价价值调整到 0 到 1 的 10 个子区间, 更加直观的区别评价价值的等级与大小。

二、城市轨道交通运营事故及风险因素提取

1 数据来源

本文选取北京、上海两个重点城市作为研究对象, 基于历史事件法搜集北京、上海市 2011-2020 年的运营线路安全事故案例, 通过查阅文献^[9]、浏览网页信息以及搜索官方微博、官方公众号等途径, 共搜集到北京地铁事故 528 条、上海地铁事故 767 条。整理发现, 北京市地铁运营安全事故主要集中在北京地铁 1 号线、2 号线、5 号线、6 号线、10 号线和 13 号线; 上海市地铁运营安全事故主要集中在上海地铁 1 号线、2 号线、3 号线、8 号线、9 号线和 11 号线。因此, 本文研究以上 12 条城市轨道交通线路的运营安全情况。

2 运营线路风险因素的提取及分析

构建城市轨道交通运营评价指标体系时, 大部分学者从人、机、环、管四方面提取风险要素, 少部分学者加上监督方面的风险因素, 本文结合实际搜集的事故数据, 发现由于工作人员或机构管理不当而发生运营安全事故的比例极低, 所以本文构建的评价指标体系忽略了管理方面的因素, 构建以人员、物 (机器设备) 和环境为主的安全评价体系。具体风险因素可划分为:

(1) 人员因素: 乘客进入运营正线、乘客坠轨、

乘客其他安全事故、员工失误

(2)物因素: 线路设备、车门及屏蔽门、供电、信号、车辆、道岔、扶梯

(3)环境因素: 不良天气、异物入侵、大客流

三、北京、上海城市轨道交通运营安全评价

1 数据标准化处理

运用公式(2)对北京、上海市地铁线路事故进行无量纲化处理, 如表 2 所示。

2 构建运营安全评价指标体系

对风险因素进行归类后, 在运用突变模型对城市轨

道交通运营安全进行评价时, 首先建立符合突变模型结构的评价指标体系, 考虑每一层指标的重要性程度, 将重要性程度高的排在前面, 本文以 2011-2020 年实际搜集的运营事故数据为基础, 通过 SPSSPRO 软件中的熵值法^[10]计算指标权重, 根据权重结果进行排序, 比如人员因素下的指标权重: 乘客进入运营正线的权重>乘客坠轨的权重>乘客摔倒等的权重, 结合突变模型中控制变量个数构建城市轨道交通安全风险评价的突变模型, 如图 1 所示。

图 1 城市轨道交通安全风险评价的突变模型

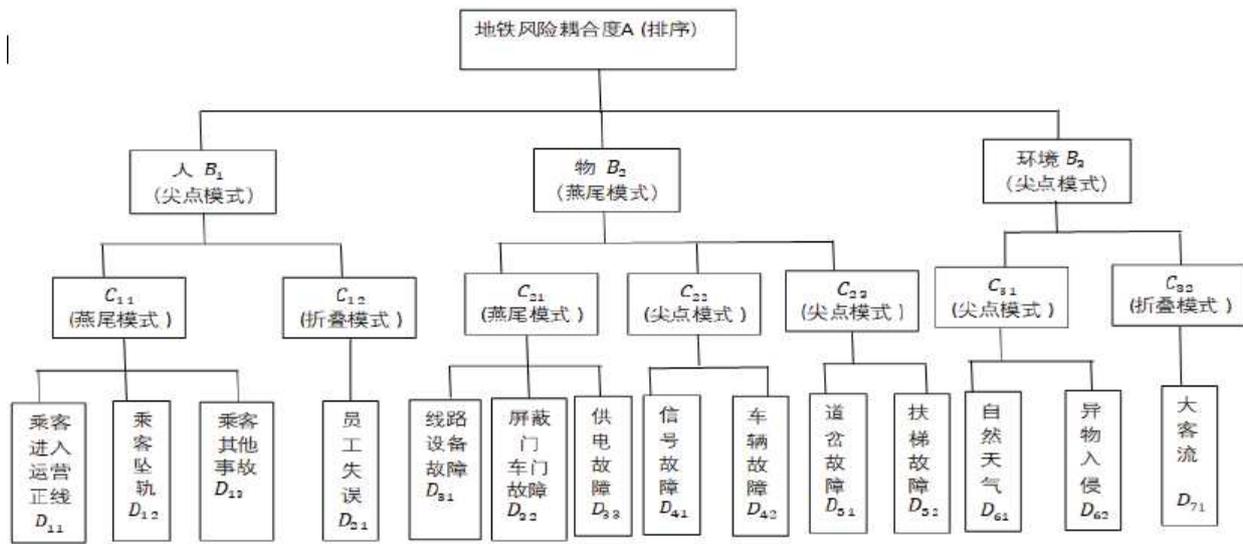


表 2 北京、上海市城市轨道交通线路无量纲值

	乘客坠轨	乘客进入运营正线	乘客其他事故	员工失误	车辆故障	供电故障	设备故障	扶梯故障	屏蔽门、车门故障	道岔故障	信号故障	自然天气	外部影响	大客流
北京 1 号线	0.3043	0.2609	0.8696	0.6522	0.956	0.826	0.8261	0.867	0.8261	0.8261	0	1	1	1
北京 2 号线	0.1538	0.1538	0.8462	1	0.769	0.846	0.6923	1	0.9231	0.9231	0	1	1	1
北京 5 号线	0.9815	1	0.9444	0.9815	0.907	1	0.8704	1	0.7407	0.9815	0	1	0.9815	1
北京 6 号线	1	1	1	1	0	0.75	0.6667	0.916	0.4167	0.75	0.1667	0.833	0.833	1
北京 10 号线	0.9688	1	0.9375	0.9688	0.7188	0.9375	0.7813	0.9062	0.5938	0.9375	0	0.937	0.9688	0.968
北京 13 号线	0.8462	0.3846	1	1	0.615	1	0.7692	1	1	0.9231	0	0.846	0.8462	1
上海 1 号线	0.9412	0.9118	1	1		0.706		0.5	1	0.4118	1	0.4709	1	0.9412
上海 2 号线	0.9744	0.6154	0.8974	1		0.820		0.8462	1	0.359	1	0.28205	0.974	0.9488
上海 3 号线	0.96	0.76	1	1		0.88		0.36	0.96	0.16	1	0	0.88	0.68
上海 8 号线	1	0.9545	0.9545	1		0.909		0.5909	1	0.5909	0.9545	0.7273	1	1
上海 9 号线	0.9677	0.9677	0.9677	1		0.903		0.8065	1	0.5806	1	0.6774	0.967	0.9355
上海 11 号线	0.9722	1	1	1		0.972		0.9167	1	0.6667	1	0.6389	0.972	1

3 结果计算及对比分析

根据表 2 的无量纲值, 结合图 1 的安全指标体系和表 1 中突变模型及归一化公式。每层根据相应的归一化公式进行递归运算, 考虑“互补与非互补原则”, 得出

安全评价。以北京地铁 1 号线 D 层指标人员影响因素为例进行运算。

D_{11} 、 D_{12} 和 D_{13} 构成燕尾突变, 则有:

$$D_{11_1} = D_{11}^{\frac{1}{2}} = 0.260870^{\frac{1}{2}} = 0.5108$$

$$D_{11_2} = D_{12}^{\frac{1}{3}} = 0.304384^{\frac{1}{3}} = 0.6727$$

$$D_{11_3} = D_{13}^{\frac{1}{4}} = 0.869565^{\frac{1}{4}} = 0.9657$$

D_{21} 构成折叠突变, 则有:

$$D_{22_1} = D_{21}^{\frac{1}{2}} = 0.869565^{\frac{1}{2}} = 0.9325$$

根据 D 层的无量纲值逐层向上递归计算得出北京地铁 1 号线的评价值, 同理, 可求得剩余线路的安全评价值。经计算, 北京、上海市 12 条城市轨道交通线路评价值大多集中在 0.97-0.99 之间, 安全等级都为 10 级, 不能很好的分辨线路的“优”与“劣”, 因此, 根据本文 1.4 中的方法计算底层控制变量为 {0, 0.1, 0.2, , 1} 的综合突变评价值 r_i , 将 r_i 作为改进的安全等级刻度。运用分值得方法对集中在 0.97-0.99 之间的 12 条线路的安全评价值进行改进, 分析城市轨道交通线路的安全等级水平, 将改进前后的结果进行对比, 如图 2 所示。

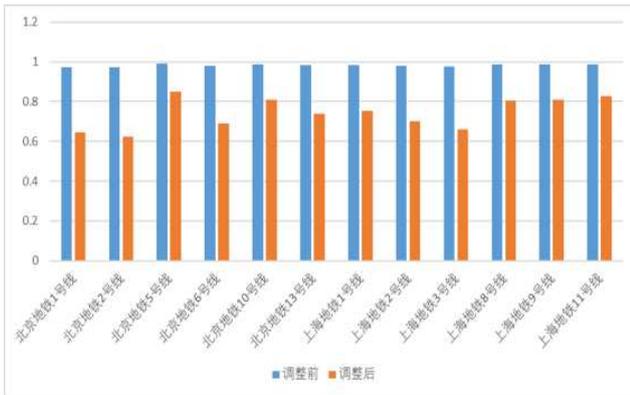


图 2 北京、上海市运营线路安全评价值调整前后对比

可知, 未经改进的评价值大多隶属于 [0.9719, 0.9901] 区间, 评价值过高且过于集中, 难以直观地区分各条线路安全程度, 而改进后的评价值大多集中在 [0.6225, 0.8486] 之间, 使评价值分布更加直观清晰, 有较高的分辨率水平, 能真实地反映出北京上海市 12 条线路的安全程度状态。改进后的评价结果中, 北京地铁 5 号线的的安全程度最高, 北京地铁 2 号线的的安全程度最低, 与改进前的评价结果一致。

在安全等级方面, 改进前的 12 条线路都位于一个相同的安全等级, 改进后 12 条线路位于三个不同的安全等级; 其中, 北京地铁 1 号线、2 号线、6 号线和上海地铁 3 号线处于第 7 安全等级中, 北京地铁 13 号线、上海地铁 1 号线、2 号线处于第 8 安全等级, 北京地铁 5 号线、10 号线、上海地铁 8 号线、9 号线处于第 9 安全等级中。

4 改进的突变评价法与模糊综合评价法对比分析

为验证突变理论在城市轨道交通运营方面的有效性和合理性, 引入模糊综合评价法, 根据实际搜集的数据, 并结合专家打分, 建立判断矩阵, 获得评价指标的相对重要度。以北京地铁 1 号线为例, 经咨询专家得出各因素比较结果如表 3 所示。

表 3 北京地铁 1 号线风险因素比较结果

A	B ₁	B ₂	B ₃
B ₁	1	3	1/7
B ₂	1/3	1	1/9
B ₃	7	9	1

经计算, 上述判断矩阵的特征值为 3.083, 特征向量为 (0.155、0.069、0.776), 并进行一致性检验, 一致性比率 $CR = CI / RI = 0.072 < 0.1$, 满足一致性要求, 可求出北京地铁 1 号线的的安全模糊评价值。同理, 其他线路模糊评价值与经过分值得方法调整后的风险评价值进行比较, 如表 4 所示。

表 4 改进的突变评价法与模糊评价法对比分析表

地铁线路	模糊评价值	排名	改进的评价值	安全等级	排名
北京 1 号线	0.7354	11	0.6449	7	11
北京 2 号线	0.7296	12	0.6225	7	12
北京 5 号线	0.8673	1	0.8486	9	1
北京 6 号线	0.7851	7	0.6899	7	9
北京 10 号线	0.8154	4	0.8087	9	4
北京 13 号线	0.7528	9	0.7380	8	8
上海 1 号线	0.8067	6	0.7519	8	6
上海 2 号线	0.7736	8	0.7203	8	7
上海 3 号线	0.7448	10	0.6618	7	10
上海 8 号线	0.8109	5	0.8057	9	5
上海 9 号线	0.8233	3	0.8094	9	3
上海 11 号线	0.8439	2	0.8257	9	2

从整体上看,两种评价方法得出的城市轨道交通安全水平排名除了北京地铁 6 号线、北京地铁 13 号线和上海地铁 2 号线之外,其他排名相同,与实际情况吻合,表明改进的突变评价法在城市轨道交通方面的合理性。模糊综合评价得出的结果整体偏大,主要集中在 0.72-0.86 之间,最值相差 0.1377;改进的突变评价法得出的结果主要集中在 0.62-0.84 之间,更为分散,最值相差 0.2261。改进的突变评价法弥补了模糊评价法的不足,避免了难以确定且主观性大的权重,使评价结果具有更高分辨水平,分布更为合理,证明该评价方法有很好的实用价值。

四、结语

对北京、上海市 12 条城市轨道交通线路的运营事故进行收集,并建立安全评价指标体系,运用突变理论对运营线路进行度量,采用分值变换法对结果进行调整优化,最后与模糊综合评价法进行对比,得出以下结论。

(1) 在 12 条地铁线路中,北京地铁 5 号线的评价值最高,表明该线路的地铁运营最为安全;上海地铁 11 号线次之;而北京地铁 2 号线的评价值最低,表明该线路的地铁运营最为危险。

(2) 通过分值变换法对初始综合值进行调整优化后,12 条轨道线路的安全评价排名与调整前基本相符,但安全等级发生了改变,更容易区分各条线路的运营安全情况。

(3) 与模糊综合评价法相比,改进的突变理论方法弥补了模糊评价法的不足,使评价结果分布更为合理,具有更高的分辨率水平,验证了该方法的合理性与实用性。

参考文献:

[1] 刘福泽,李娟,范博松等.城市轨道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(07):217-225.

[2] Teng Hongan. Analytical hierarchy process and fuzzy theory applied to urban rail transit operation opinion [J].IEEE Computer Society,2010:525-527.

[3] Arabi Azadeh, Ghaderi Sara Fakhari, Izadbakhsh Hassan. Integration of DEA and AHP with computer simulation for railway system improvement and optimization [J] Applied Mathematics and Computation,2008,195(2) : 775-785.

[4] 梁峰.基于结构方程的城市轨道交通运营安全评价研究[D].吉林大学,2020.

[5] 杨兴宇.基于模糊 ISM 模型和 FMICMAC 模型的地铁运营风险评估[D].西南交通大学,2019.

[6] 马彪.基于案例统计-层次分析法的地铁重大公共安全风险评估指标体系[J].城市轨道交通研究,2021,24(08):93-99.

[7] 李青峰.基于突变理论的边坡地震稳定性评价方法研究[D].西北农林科技大学,2019.

[8] 施玉群,刘亚莲,何金平.关于突变评价法几个问题的进一步研究[J].武汉大学学报(工学版),2003,36(4):132-136.

[9] 陈文.城市轨道交通运营安全风险管控研究[D].北京交通大学,2020.

[10] 高鹏,唐昭,杨坤洪,等.城市轨道交通运营设备安全风险评价[J].交通运输工程与信息学报,2020,18(1):91-98.

作者简介:谭海燕(1997-),女,硕士,工程师,研究方向:城市轨道交通安全