

城市轨道交通危险因素分析与评价¹

王卓

北京交通大学交通运输学院, 北京(100044)

E-mail: zhuow168@126.com

摘要: 针对城市轨道交通影响安全因素众多的特点, 本文从人—机—环—管理四方面出发, 分析了城市轨道交通在建设及运营过程中存在的各种危险因素, 并用层次分析法对各种危险因素进行了权重计算, 得出了各种危险因素的排序。针对排序结果提出合理的预防和控制对策, 从而为改善城市轨道交通安全状况, 减少事故发生提供科学依据。

关键词: 城市轨道交通; 危险因素; 安全评价; 层次分析法(AHP)

1. 引言

随着城市轨道交通的大规模发展, 轨道交通的运营管理难度和复杂度大大增加, 随之带来的安全问题也逐渐增多。目前我国城市轨道交通建设处于起步阶段, 工程质量、人员意识、设备技术、整体环境和管理等方面都存在一些薄弱环节和安全隐患, 因此给运营安全造成了很大的威胁。虽然轨道交通系统是一个独立的、封闭的系统, 比其它的公共交通工具相对安全, 但由于轨道交通运量大, 设施设备的科技含量较高, 一旦发生事故就会造成比较严重的后果。为了防止轨道交通事故的发生, 改善运营的安全状况, 降低事故损失, 本文针对城市轨道交通在建设、运营中存在的危险因素进行分析, 并评价其危险程度, 及时对危险程度高的影响因素采取相应的防范措施, 规避建设、运营过程中存在的潜在风险, 确保城市轨道交通建设与运营的安全。

2. 城市轨道交通危险因素分析

城市轨道交通系统是一个复杂动态系统, 从其建设、施工到正式运营的各个环节中都存在在诸多的危险因素。本文在综合分析城市轨道交通系统所出现的各种事故的基础上, 从设备因素、人员因素、外界环境因素、管理因素等方面进行分析[1], 找出主要的危险因素作为影响城市轨道交通安全的一级评价指标, 通过评价各指标的重要性从而为保证城市轨道交通的安全运营提供依据。

2.1 设备危险因素

城市轨道交通系统中的设备危险因素除主体设备车辆外, 工务系统、供电系统、通信系统、环控通风系统及其他辅助设备等在运行过程中都存在一定的风险[3]。车辆在运营过程中可能存在的危险因素有: 列车失控、列车脱轨、列车相撞以及车内各种设施故障等; 其他危险因素还包括通信/信号设备故障, 电气火灾和触电, 通风系统故障, 排水系统不完善以及辅助设施设计缺陷等。

2.2 人员危险因素

城市轨道交通系统中的人员危险因素主要包括乘客和工作人员两大部分: ① 乘客因素: 主要表现在乘客不遵守乘车守则, 携带危险品上车; 人为故意破坏或偷盗设施设备; 在发生突发事件时应急技能低、不能自救、不能在工作人员指引下有序疏散。② 工作人员因素:

¹本课题受到北京交通大学校科技基金项目(2007XM024)资助。

施工人员携带易燃易爆危险品引起爆炸、火灾等事故；工作环境恶劣，如内燃机排出废气和烟雾、施工机械噪声、振动过大，造成作业人员不适感；工作人员操作不当，在紧急状况下不能作出正确反应而引发的事故[2]。

2.3 外界环境危险因素

城市轨道交通安全的外界环境危险因素包括社会环境因素和自然环境因素两个方面。在自然环境因素中，水灾、台风和地震等自然灾害是运营过程中可能遭遇的危险因素；各类不良地质条件，复杂地貌条件等在轨道交通建设期间可能造成塌方、异常涌水和有害气体堆积。社会环境因素主要是指一些针对轨道交通系统的破坏行为、恐怖袭击以及社会性自杀事件，这些因素对城市轨道交通安全有着直接和间接的威胁和影响。

2.4 管理危险因素

管理危险因素主要包括缺少规范、完备的安全管理组织和规章制度；安全管理责任制不明确；管理人员滥用职权存在违法违规行为；发生突发事件时缺少相关应急预案体系[5]。

3. 层次分析法

层次分析法（Analytic Hierarchy Process，简称 AHP）是美国运筹学家 T. L. Saaty 教授于 70 年代初期提出的一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法，特别适用于那些难于完全定量分析的问题。运用层次分析法建模，大体上可按下面三个步骤：

3.1 建立递阶层次结构模型

递阶层次结构模型分三层：1.目标层：只有一个元素，一般是分析问题的预定目标或理想结果；2.准则层：包含了为实现目标所涉及的中间环节，可以由若干个层次组成，包括所需考虑的准则、子准则；3.措施层：包含了为实现目标可供选择的各种措施、决策方案等。每一层次中各元素所支配的元素一般不要超过 9 个，元素过多会给两两比较判断带来困难。

3.2 构造判断矩阵

层次结构反映了因素之间的关系，但准则层中的各准则在目标衡量中所占的比重并不一定相同，而且难以量化，为此 Saaty 等建议引用数字 1~9 及其倒数作为标度[4]。

3.3 层次单/总排序及一致性检验

求权值的方法主要有求和法、最小平方权法、特征值法（特征向量法）、幂法（特征根法）、均方根法等，需要注意的是，在层次排序中，要对判断矩阵进行一致性检验，只有通过检验，才能说明判断矩阵在逻辑上是合理的，才能继续对结果进行分析。

4. 基于AHP的危险因素分析评价

4.1 递阶层次结构的建立

根据对城市轨道交通危险因素的分析，将分析出的危险因素作为 AHP 的模型元素，建立递阶层次结构如表 1 所示。

表1 城市轨道交通危险因素分析递阶层次模型

目标层 U	指标层 B	指标层 C
城市轨道交通危险因素分析	B1 设备危险因素	C1 车辆系统故障
		C2 通信系统故障
		C3 电气系统故障
		C4 通风系统故障
		C5 排水系统故障
		C6 其他辅助设施缺陷
	B2 人员危险因素	C7 乘客因素
		C8 工作人员因素
	B3 外界环境危险因素	C9 自然灾害
		C10 社会性危险事件
	B4 管理危险因素	C11 安全管理组织缺陷
		C12 安全责任制不明确
		C13 安全法规不完善
		C14 应急预案体系缺陷

4.2 构造判断矩阵

采用指标重要程度1~9及其倒数的标度方法，制定出各层指标两两之间比较的表格，通过资料分析、实际调查或者专家评分，权衡各指标两两之间的相对重要程度，构造判断矩阵。本文根据对城市轨道交通危险因素进行分析比较，通过资料[5~8]分析和专家经验分别构造以下判断矩阵如表2~6所示。

表2 U-B矩阵

U	B1	B2	B3	B4
B1	1	3	4	4
B2	1/3	1	2	1/2
B3	1/4	1/2	1	1/2
B4	1/4	2	2	1

表3 B1-C矩阵

B1	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	3	2	4	7	5
C2	1/3	1	1/2	2	4	3
C3	1/2	2	1	3	5	3
C4	1/4	1/2	1/3	1	2	1
C5	1/7	1/4	1/5	1/2	1	1/2
C6	1/5	1/3	1/3	1	2	1

表4 B2-C矩阵

B2	C7	C8
C7	1	2
C8	1/2	1

表5 B3-C矩阵

B3	C9	C10
C9	1	1/3
C10	3	1

表6 B4-C矩阵

B4	C11	C12	C13	C14
C11	1	2	1	1/2
C12	1/2	1	2	1/3
C13	1	1	1	1/2
C14	2	3	2	1

4.3一致性检验及指标排序

本文中采用均方根法计算U-B矩阵指标权重值并进行一致性检验，具体计算步骤：

(1) 计算判断矩阵每一行元素的乘积

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad i=1, 2, \dots, 3 \quad (1)$$

式中， M_i 为表3中第*i*行元素的乘积； a_{ij} 为表@中对应元素。 $M_1=48$ ， $M_2=0.3333$ ， $M_3=0.0625$ ， $M_4=1$ 。

(2) 计算 M_i 的n次方根

$$\bar{\omega}_i = \sqrt[n]{M_i}$$

式中 $\bar{\omega}_i$ 为各行元素乘积 M_i 的n次方根， $\bar{\omega}_1=2.6321$ ， $\bar{\omega}_2=0.7598$ ， $\bar{\omega}_3=0.5$ ， $\bar{\omega}_4=1$ 。

(3) 对 $\bar{\omega}_i$ 进行归一化

$$\omega_i = \bar{\omega}_i / \sum_{j=1}^n \bar{\omega}_j \quad (2)$$

式中， ω_i 为指标层元素B1、B2、B3、B4的层次单排序权重； $\sum_{j=1}^n \bar{\omega}_j$ 为各行元素乘积n次方根累加和。由式(2)得： $\omega_1=0.5381$ ， $\omega_2=0.1553$ ， $\omega_3=0.1022$ ， $\omega_4=0.2044$ 。

(4) 计算判断矩阵的最大特征根

$$\lambda_{\max} = \sum (A \omega) / n \omega_i \quad (3)$$

式中， λ_{\max} 为最大特征根； A 为原始矩阵； ω 为指标层元素B1、B2、B3、B4标准化的权重向量。

$$A \omega = \begin{vmatrix} 1 & 3 & 4 & 4 \\ 1/3 & 1 & 2 & 1/2 \\ 1/4 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/4 & 2 & 2 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0.5381 \\ 0.1553 \\ 0.1022 \\ 0.2044 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2.2304 \\ 0.6413 \\ 0.4166 \\ 0.8539 \end{vmatrix}$$

代入式(3)，得：

$$\lambda_{\max} = 1/4(2.2304/0.5381 + 0.6413/0.1553 + 0.4166/0.1022 + 0.8539/0.2044) = 4.1320$$

(5) 进行一致性检验

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad CR = CI / RI \quad (4)$$

式中， CI 为一致性检验指标； CR 为随机一致性比率指标； RI 为平均随机一致性指标； n 为判断矩阵的阶数。随机一致性指数 RI 取值表[4]如表 7 所示。

表7 随机一致性指数RI取值表

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

根据平均随机一致性指标 RI 可得，当 $n = 4$ 时， $RI = 0.90$ 。计算得出 $CI = 0.044$ ， $CR = 0.049 < 0.1$ ，因此可以接受，即认为该判断矩阵较理想。由此，可得指标层元素B1、B2、B3、B4层次单排序如表8所示：

表8 U-B层次单排序

U	B1	B2	B3	B4	ω_i	$A \omega$
B1	1	3	4	4	0.5381	2.2304
B2	1/3	1	2	1/2	0.1553	0.6413
B3	1/4	1/2	1	1/2	0.1022	0.4166
B4	1/4	2	2	1	0.2044	0.8539
$\lambda_{\max} = 4.1320$, $CI = 0.044$, $CR = 0.049 < 0.1$, 满足一致性						

按照以上步骤，计算指标层C元素单排序。总排序是指每一个判断矩阵各因素针对目标层(最上层)的相对权重。这一权重的计算采用从上而下的方法，逐层合成。最后通过对排序结果的分析，得出最后的排序和决策方案。层次总排序如表9所示。

表9 层次总排序

指标层	B1	B2	B3	B4	CR<0.1	总排序	权重序列
	0.5381	0.1553	0.1022	0.2044			

C1	0.3927		0.2113	1
C2	0.1611		0.0867	5
C3	0.2411		0.1297	2
C4	0.0845	0.013	0.0455	9
C5	0.0445		0.0239	14
C6	0.0761		0.0409	10
C7	0.6667	0.000	0.1035	3
C8	0.3333		0.0518	7
C9	0.2797		0.0286	13
C10	0.6267	0.074	0.0640	6
C11	0.2304		0.0471	8
C12	0.1472		0.0301	12
C13	0.1937	0.013	0.0396	11
C14	0.4287		0.0876	4

4.4 评价结果及分析

根据表9所得出的层次总排序的权值，对城市轨道交通危险因素进行权重排序，权值如图1和图2所示：

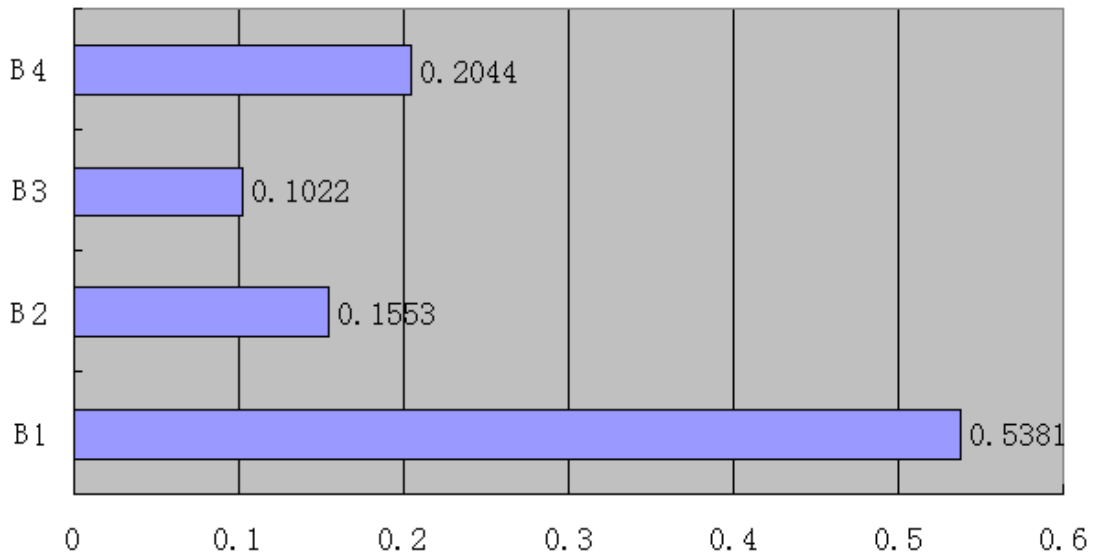


图1 二级指标权值

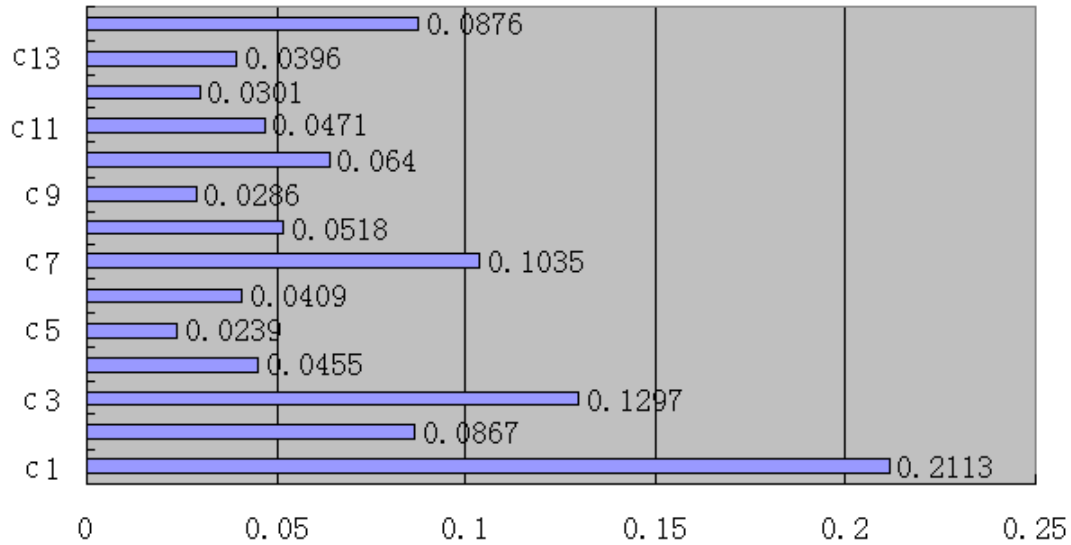


图2 三级指标权值

(1) 在城市轨道交通系统(U)中设备危险因素(B1)对城市轨道交通安全影响最大,其权重为0.5381;而在下一层次中,车辆系统故障(C1)的危险性最大,其权值为0.2113,远高于同一层次的其他各种元素,而电气系统故障(C3)、通信设备故障(C2)的危险性也很大,其权值分别为0.1297和0.0867,分列2、5位,说明硬件设施的质量和安全性对于城市轨道交通的安全具有非常重要的影响,应该加强和提高设施设备的质量水平,特别需要重视车辆系统相关设备的安全监控;其他辅助设施(C6)和通风系统(C4)的重要度相似,分别居于9、10位,同样不容忽视;排水系统(C6)权值为0.0239,危险性较低,位居最后,说明相对比较安全。

(2) 人员危险因素(B2)危险性位列第三,仅比外界环境危险因素的危险性稍高,其权重为0.1553;人员危险因素只有乘客因素(C7)和工作人员因素(C8)两个子层次,其中乘客因素的权重位居第3,其权值为0.1035,其危险性也很高必须给予重视;而工作人员因素的权重位居第7位,也是比较重要的危险因素。人员因素(B2)层中的两个子层次的因素权值排序都比较靠前,表明城市轨道交通中工作人员的素质和乘客的素质低都有待提高,应该加强民众的安全思想教育及应对事故能力,提高工作人员的职业素质和应急能力。

(3) 外界环境危险因素(B3)在城市轨道交通系统中危险性最小,其权值为0.1022,但是在它的下一层次中,社会性危险事件(C10)的权值为0.0640,其危险性位居第6位,是造成城市轨道交通突发事件的重要危险因素,如近几年的恐怖袭击、社会性的自杀事件都把人员比较密集的城市轨道交通视为主要目标,这类危险事故也越发频繁,其发生率有继续增加的趋势,因此必须加强安全防范措施并给予足够重视。

(4) 管理危险因素(B4)危险因素仅次于设备因素,危险性位列第二,高于人员危险因素和外界环境危险因素,其权值为0.2044;它的下一层中的应急预案体系缺陷(C14)危险性位居第四,其权值为0.0876,另外安全管理组织的缺陷(C11)位居地8位,权值为0.0471。这表明当前城市轨道交通系统的管理组织系统还不够完善,并且缺乏针对事发后的应急预案体系,因此,必须重视事故应急预案的编制和研究,使得能够对突发的一些地铁事件立即采取预防措施避免造成人员的伤亡以及城市轨道交通系统损坏,甚至灾难性破坏。

5. 结论

本文对城市轨道交通的危险因素进行了分析,运用层次分析法建立了城市轨道交通危险因素递阶层次结构模型,并对其危险程度进行了评价与排序,及时对危险性高的影响因素采取相应的预防和控制措施,改善城市轨道交通安全状况,降低建设、运营过程中存在的风险,为城市轨道交通安全提供科学依据。

参考文献

1. 王山 姚晓晖 汪彤. 地铁安全评价研究, 华北科技学院学报, 2006年3月第3卷第1期: 46~49
2. 刘国彬. 城市轨道交通安全事故危害与防范, 世界科学, 2006.8
3. 何理 钟茂华 邓云峰. 城市轨道交通危险因素分析, 中国安全生产科学技术, 2005年6月第1卷第3期: 25~29
4. 王莲芬 许树柏. 层次分析法引论. 北京: 中国人民大学出版社. 1990
5. 王洪德 潘科 姜福东. 基于AHP的影响城市地铁运营安全的危害分析及预防对策, 大连交通大学, 铁道学报. 2007年4月第29卷第2期: 27~31
6. 宋维华 殷位洋. 浅谈层次分析法在预防地铁火灾事故中的运用. 现代城市轨道交通. 2007/1, 45~47
7. 齐福强 赵云胜 谢汉辉. 层次分析法在交通安全管理中的应用, 安全与环境工程. 2007.12第14卷第4期: 79~82
8. 许敏娟 许玉德. 城市轨道交通风险评价的一种方法, 中国科技信息. 2005年第21期: 73~74

Urban Rail Transportation Hazard Factors Analysis and Evaluation

Wang Zhuo

Beijing Jiaotong University, School of Traffic and Transportation, (100044)

Abstract

In the view of the characteristics of the urban rail transportation which has numerous influence safety factor, this article started from four aspects of the person- -machine—environment—management, analyzed each kind of hazard factor existed in the urban track transportation, and calculated the important weight of each hazard factor with AHP, finally obtained order of each kind of hazard factor. Aimed at the order result, the reasonable predication and control measure are proposed, therefore the science basis is provided for improving urban track transportation safety situation and lessening accident occurrence.

Keywords: Urban rail transportation;Hazard factor;Safety evaluation;Analytic hierarchy process(AHP)

作者简介: 王卓, 女, 1975 出生, 副教授, 主要研究方向是交通安全工程