doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2018.02.023

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

张建平[1]，张凌翔[2]，张　宁[2]，徐　文[3]
（1. 南京地铁运营有限责任公司，南京 210012；2. 东南大学智能运输系统研究中心轨道交通研究所，南京 210096；3. 北京城建设计发展集团股份有限公司，北京 100037）

摘　要：建立合理的城市轨道交通安全风险评价指标体系，不仅能有效反应当前的运营安全水平，也可以为运营安全管理的发展提供引导作用。阐述城市轨道交通风险评价的构建目标和原则；从人员、设备设施、环境、管理 4 个方面对影响城市轨道交通安全风险的因素进行分析，基于车站、线路和线网 3 个层次的需求，建立多层次城市轨道交通安全评价指标体系，并对风险评价指标的选取及计算进行分析。

关键词：城市轨道交通；运营风险评价；指标体系；目标导向
中图分类号：F530.7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2018)02-0135-06

Goal-oriented Safety Risk Evaluation System of Multi-level Urban Rail Transit Operation

ZHANG Jianping[1], ZHANG Lingxiang[2], ZHANG Ning[2], XU Wen[3]
(1. Nanjing Metro Operation Co., Ltd., Nanjing 210012; 2. ITS Rail Transit Research Institute of Southeast University, Nanjing 210096; 3. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037)

Abstract: Establishing a reasonable urban rail-transit safety risk assessment system can not only reflect the current operational safety level effectively but also provide guidance for developing operational safety management. First, the construction objectives and principles of the evaluation system are elaborated; second, the factors that affect the urban rail-transit safety risk from the four aspects of personnel, equipment, environment, and management are analyzed; third, based on the demand of the three levels of station, line, and network, a multi-level urban rail-transit safety evaluation index system is established, and the selection and calculation of risk evaluation indices are analyzed.

Keywords: urban rail transit; operational risk assessment; index system; goal orientation

近年来，随着社会和经济的快速发展，城市交通拥挤状况日趋严重，建立以轨道交通为骨干的综合交通体系，对缓解城市交通压力起到重要作用。城市轨道交通进入网络化运营后，线网拓扑结构更为复杂，不同站点、不同线路之间相互影响，局部问题对整个运营网络的波及效应和联动性更加突出[1]。然而城市轨道交通本身客流密度大，如果发生事故，封闭的运行环境导致救援难度增大，极易造成严重后果，对所在地区产生负面影响。因此，对城市轨道交通运营风险评价进行研究显得尤为必要。

有关城市轨道交通风险评价的研究已形成一些成果：刘书浩等[2]通过介绍英国城市轨道交通运营安全评价制度建设、机构设置及执行情况等，分析安全评价工作先进经验，结合国内实际情况提出相关政策建议；王忠文等[3]结合城市轨道交通领域安全评价的

收稿日期：2017-04-11　修回日期：2017-05-02
第一作者：张建平，男，本科，总经理，教授级高级工程师，从事城市轨道交通运营管理，zhang_jp@njmetro.com.cn
基金项目：交通运输部建设科技项目（2015318J33080）；江苏省重点研发计划（社会发展）项目（BE2016740）；南京地铁运营有限责任公司专项项目（8550140226）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

模式，提出现有的评价都是阶段性“一次性”的评价活动，忽略了过程伴随的重要性；燕飞等[4]根据国外的安全评价标准和国内的实际情况，提出基于危险源分析的安全评价方法以及城市轨道交通项目安全生命周期中的安全评价要点。但是现有研究成果尚未建立完善的城市轨道交通运营风险评价指标体系，评价内容较为分散，服务对象也不明确，评价结果比较片面，难以落地形成实质性的效果。鉴于此，本文结合城市轨道交通安全管理工作现状，从风险评价的目标着手，探讨如何为不同管理层次建立风险评价指标体系，进而为城市轨道交通风险评价提供新的思路和方法。

1 运营安全风险评价指标体系构建

1.1 构建目标及原则

城市轨道交通运营安全风险评价指标体系的构建应同时具备评价目标和引导目标。从评价目标来看，评价指标体系应能从多方面反映运营安全水平，在此基础上可以对城市轨道交通运营安全问题的症结所在及严重程度进行分析，进而提出切实有效的治理方案；从引导目标来看，评价指标体系应对运营安全管理起到导向作用，帮助城市轨道交通安全管理部门建立安全系统工程的概念，提出解决运营安全问题的总体思路[5]，引导城市轨道交通安全管理从“事后型”、“被动式”的管理模式向“事前预防”、“主动式”的管理模式转变。

城市轨道交通运营安全风险评价指标体系是由若干个单项评价指标组成的整体，该体系的建立应遵循系统性、层次性、定性与定量相结合、稳定性与动态性相结合、可操作性等基本原则，进而能够全面反映影响城市轨道交通运营风险的各种因素。

1.2 构建基本流程

安全风险评价指标体系的优劣直接影响评价结果的准确性、科学性及其实际应用的效果，评价指标必须能够准确把握影响城市轨道交通的风险因素点，需要在基于目标、遵循原则的前提下对其进行梳理、分解、提炼、综合，最后还要进行必要的修订和完善[6]。安全风险评价指标体系设计流程如图 1 所示。

2 运营风险影响因素分析

结合对城市轨道交通历史事故故障的分析及对实际运营状况的调研，得出城市轨道交通运营安全态势变化是由人员、设备设施、环境、管理 4 类因素及其相互之间的作用、影响所造成的[7]，其中前 3 类因素是直接致因，而管理因素则是间接致因，如图 2 所示。

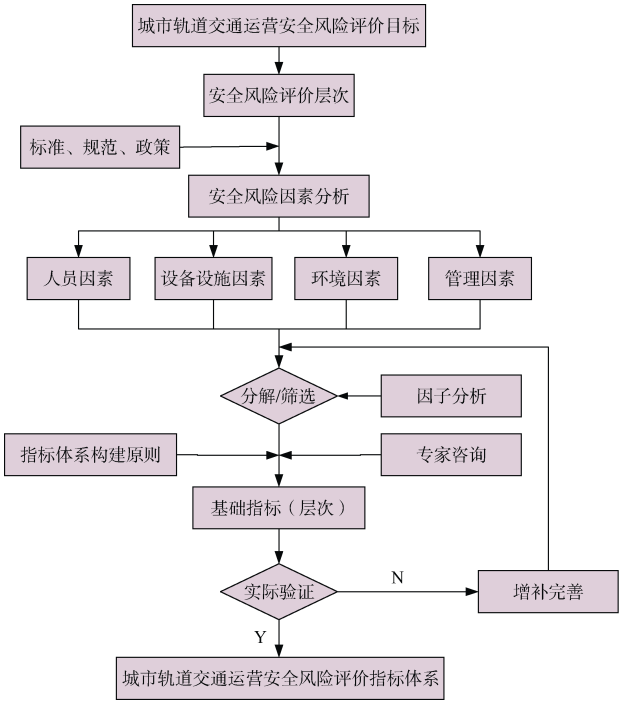

图 1 安全风险评价指标体系设计流程

Fig. 1 Safety risk evaluation index system design flow

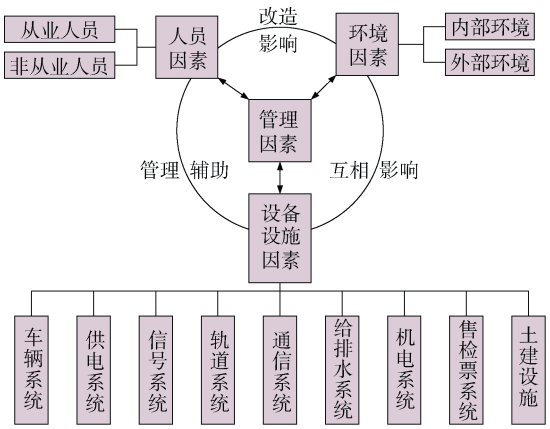

图 2 4 类影响因素的关系

Fig. 2 The relationship among the four influencing factors

人员因素在城市轨道交通运营中主要体现在人的不安全行为上，人员由从业人员和非从业人员组成，其中非从业人员主要是指乘客。从业人员的不安全行为主要受生理、心理和技术 3 类因素的影响，生理因素包括身体存在缺陷、工作负荷过高等，心理因素包括安全意识淡薄、责任心不强、注意力不集中等，技术因素包括专业知识基础差、操作技能不熟练、违规操作等。而非从业人员的不安全行为则包括乘客拥挤、

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

跳下站台、强扒车门、误入区间隧道以及疾病突发等。

设备设施作为影响城市轨道交通运营的重要因素，主要包括车辆系统、通信系统、信号系统、供电系统、机电系统、轨道系统、环境与设备监控系统、自动售检票系统、土建等设备设施[8]，其良好的质量和稳定的运转状况是城市轨道交通安全运营的重要保障。

环境因素主要分为内部环境因素和外部环境因素。内部环境由员工的作业环境和城轨系统内部的社会环境组成，员工的作业环境包括其工作的站台、站厅、隧道等区域，区域内的照明、噪声、湿度、温度等因素对工作人员及乘客的心理变化、疲劳强度和情绪等都有直接影响；而城轨系统内部的社会环境影响指地铁企业员工的职业道德、责任心、安全意识等。外部环境包括雨雪极端天气、地震、水灾等自然环境和涉及极端恐怖组织等的社会环境。环境对安全的影响可能是正面的，也可能是负面的，故需要优化可控的内部环境，适应不可控的外部大环境，降低运营安全风险。

管理因素贯穿于“人-机-环-管”系统里的各个环节，综合作用于人员、设施设备和环境之中，主要体现在管理者按照安全运营的客观规律，对运营系统的人、财、物、信息等资源进行计划、组织、协调和控制。规章制度不健全、管理决策失误、安全管理不到位、安全保障不足等都是城市轨道交通安全管理风险因素。

3 目标导向的多层次评价指标体系

在城市轨道交通评价的具体实施过程中，不同城市轨道交通的地理位置、社会状况、运营规模、管理理念都存在着巨大差异，这种差异决定了各个城市在运营安全方面的工作各具特色。而在各个城市中，不同线路、车站也由于各种因素的影响，安全风险情况也不尽相同。传统的原则导向风险评价相对简单，更多依赖职业经验，重形式而轻实质，而目标导向的风险评价在重申原则导向的同时，更为具体且更具可操作性。基于构建目标，考虑不同管理层次的需求，根据轨道交通自身的结构特点，从车站、线路、线网 3 个层面出发构建运营安全风险评价指标体系。

3.1 车站层级风险评价指标体系

车站是城市轨道交通系统中重要的基础设施，不同车站的客流量、设备设施状况、站务人员安排情况等都不尽相同，随时影响车站“动态”安全风险的变化。车站层级的评价是最底层的评价，属于微观层面，主要面向城市轨道交通公司内部各职能部门，需要其掌握每个车站的风险大小，找出每个车站的薄弱环节，并为车站安全管理提供依据，对安全风险水平起监测和安全预警作用。由于风险评价的基础是风险辨识与评估，其通过严格遵循国标、行标、地标和企业规范对城市轨道交通的风险项进行全面梳理，就各个风险项的发生概率、损失程度，并结合其他因素进行综合考虑，并与公认的安全指标相比较以衡量每项风险的严重程度[9]，故考虑用风险辨识与评估的结果为该层级评价作支撑。基于此，车站级风险评价指标体系具体设计如图 3 所示。

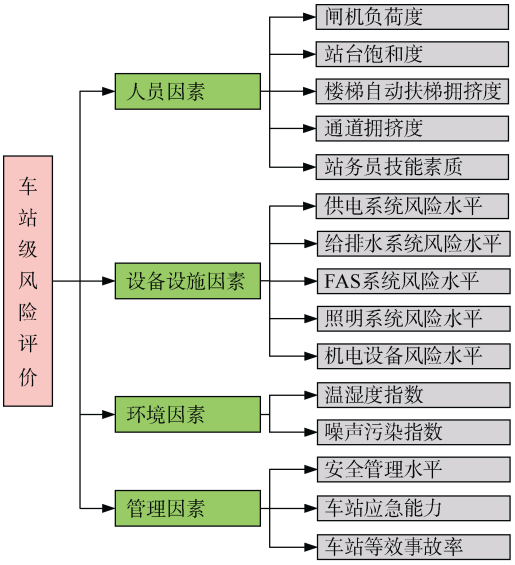

图 3 车站级风险评价指标体系

Fig. 3 Risk evaluation index system at the station level

在人员因素方面，选取指标主要考察在车站客流最大的时间段内，站内各重要地点客流的密集程度[10]，该类指标可通过采集 AFC 系统客票数据、人工计数、视频采集等方式得到，用于反映车站内不同位置的大客流风险水平。而站务员作为车站的管理者，其技能素质水平越高，车站的秩序性越好，车站风险越低，可通过站务员年龄、工龄、职称等级和文化程度来衡量。

从设备设施因素角度，主要考察车站内机电设备（包括自动电扶梯、站台门等）、供电系统、给排水系统、照明系统、FAS 系统等设施稳定性，各类设备设施发生故障，即使不直接造成事故发生，客观上也增大了车站的风险。该类指标可通过车站记录的各设备

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

设施的日常负荷强度、检测合格率和故障发生频率、严重度、修复时间等定量加权计算得出。对于在评价结果中，故障后果严重的、发生频率高的设施设备应及时进行修复，并加强监测和控制。

车站环境因素不但影响乘客和工作人员的舒适度，同时也影响设备设施的运行状态和工作寿命。考虑到实际操作中指标获取的难易程度，主要选取站内温湿度和噪声污染两个指标，通过计算温湿度、噪声值的实际测量值与标准值的差值来衡量。对于受环境因素影响较大的车站，应针对性地做好改善工作。

管理因素主要通过车站管理、应急能力、事故水平 3 个方面来体现，反映管理的指标很难通过定量进行评价，通常采用半定量的方法加以衡量。安全管理水平可以在定性评价的基础上，通过专家打分法对安全管理制度的完善程度和落实程度进行评价。车站应急能力指数用来反映车站在应对突发事件时的水平，可通过应急预案的完备性、应急资源的齐全性、应急演练频率及效果等相关因素来体现。而车站等效事故率从事故角度综合反映车站的风险水平，通过对车站事故发生的次数、伤亡人数、经济损失统计等加权计算得出。

3.2 线路层级风险评价指标体系

线路层级的评价是中观层面的评价，该层面的评价起到了承上启下的作用。对于已进入网络化运营的大城市，该层面的评价可用于网络中各线路间的评价比较，有助于城市轨道交通内部各线路之间取长补短，降低风险水平。而对于一些中小城市或刚开通轨道交通还未发展成网的城市，也可用于政府职能部门和城市轨道交通公司内部对现有线路的总体评价。线路层面的评价着重针对单线行车过程，行车环境、车辆系统、轨道系统等因素在该层级起重要作用。基于此，线路级风险评价指标体系具体设计如图 4 所示。

线路由单个车站串联组成，车站层的评价应该对线路层的评价起支撑作用。线路车站风险矩阵由车站层级评价得到，水平轴代表各车站名，垂直轴代表各车站指标，矩阵内风险数值可以清晰反映线路中各车站风险对于车站所在线路风险的影响。

在人员因素方面，非从业人员因素主要由线路车辆满载率体现，当客流量超过该线路的最大运送能力时，车厢内乘客拥挤度高，运营风险增大，该指标通过统计高峰时段内线路中各区间满载率超过规定值的个数得到。而从业人员因素方面，驾驶员作为城市轨道交通车辆的驾驶者，其业务能力指数由驾驶经验、应对突发事件的能力和驾驶技能体现。调度员作为线路直接的安全管理者和指挥者，业务能力指数则通过应变能力、应急指挥能力和大局意识来衡量。对这些岗位的评价也可为以后招聘与培训相关技术人员提供依据。

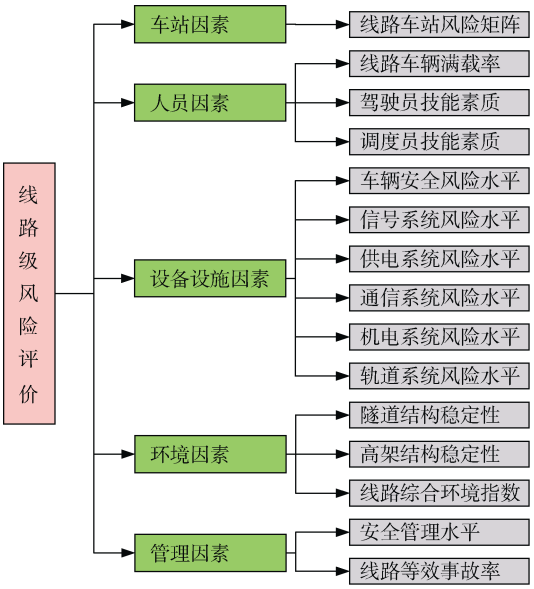

图 4 线路级风险评价指标体系

Fig. 4 Risk evaluation index system at the line level

设备设施因素方面主要考察车辆、信号、供电、通信、机电等系统设备设施的风险水平。与车站层不同，该层面主要考虑行车设备的设计缺陷、维护不当等问题，可由各设备设施的日常负荷强度、检测合格率和故障发生频率、严重程度、修复时间等定量加权计算得出。轨道系统风险指数根据轨检车对轨道的相应指标进行检查反馈，同时考虑伤损钢轨的分布情况来反映钢轨的安全状况，对轨道状况较差路段及时进行补救，最大限度保障行车安全。

环境因素在该层面主要指对轨行区的环境评价。大部分的城市轨道交通都是地下线或高架线，故隧道和高架稳定性对线路的运营安全影响重大，该指数是通过监控隧道及软土地基的变形值统计计算而得。而线路综合环境指数是对该线路各车站与区间环境状况的总体反映，可通过对线路内区间温湿度、噪声等环境指标进行统计计算，并与上一层级对车站的评价结合起来考虑。

在管理因素方面，线路的安全管理水平是反映该线路安全管理组织的工作状态，主要采用半定量的方

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

法对该线路的专业安全管理人员占有率和安全管理组织协调性进行衡量。线路等效事故率从事故角度综合反映线路的风险水平，通过线路在特定时间内事故发生的次数、伤亡人数、经济损失等计算得出。

3.3 线网层级风险评价指标体系

线网层级的风险评价属于最高层级，面向政府职能部门和轨道交通公司领导决策层，在宏观层面对城市轨道交通运营进行评价。对于城市轨道交通的管理者，通过该层级评价可以准确地了解线网内存在风险的地点及风险程度，确定关键因素，有助于其提出相应的安全对策，也有助于意外事件发生后，应急资源的调配及应急工作的开展。同时，在规划、建设新线过程中进行有目的性的改善，对提高新线安全水平起指引作用。该层级主要从线网拓扑结构、运输能力、客流量、事故率等几个角度对网络化运营进行评价，而对设备系统故障等细节的评价相对较少。基于此，线网级风险评价指标体系具体设计如图 5 所示。

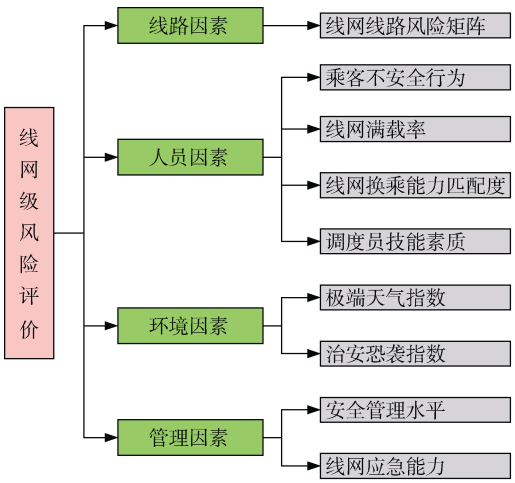

图 5　线网级评价指标体系

Fig. 5　Risk evaluation index system at the network level

线网可以看成多条线路组合而成，故线路层的评价应为线网层的评价起铺垫作用。线网线路风险矩阵由线路层级评价得到，水平轴代表各线路名，垂直轴代表各线路指标，矩阵内风险数值可以明确反映各线路风险对于线网风险的影响。

在人员因素方面，选取指标均为考察客流的组织情况服务。乘客的不安全行为主要涉及乘客违规吸烟、高空抛物至线路、人为盗窃等，虽然发生率不高但不容忽视。线网满载率用来反映高峰时段线网某个区间客流与运力的匹配情况，可通过统计得出。线网换乘能力匹配度则用于反映换乘站的换乘强度，可通过计算换乘客流量与车站最大换乘客流量的比值得到。通过满载率和换乘能力两个指标说明客流分布不均衡、运能运量矛盾、设计标准不适用、预测与发展不匹配等问题，给管理决策层指明改善方向。而调度员技能素质指数侧重于对整个线网的调度，与线路层级有所区别。

环境因素选取的指标反映整个线网一定时间内所有由于环境因素导致的突发事件产生的影响，包括极端天气和治安恐袭，用危害损失、影响范围和社会影响 3 类指标进行共同衡量。通过该层级的环境因素评价，可以找出易受外部环境影响的车站、区间，有针对性地做好预警工作，有助于在极端天气等恶劣条件下，减小部分脆弱区域对于整个线网行车的影响。

在管理因素方面，线网安全管理水平可用规章制度的完善程度、标准程度和落实程度来衡量。线网应急能力指数可反映线网安全管理组织状态，通过采用半定量的方法，对线网专业安全人员占有率、安全组织协调性以及应急物资的完备性进行衡量。该层级可从线网总体角度对线网的安全管理水平进行评判，对线网的规章缺陷、管理不到位、应急漏洞等问题进行针对性加强，有助于建立分层次、分专业的风险防控机制。

综上所述，从轨道交通的组成特点来看，由于车站串联得到线路，而线路组合形成线网，所以 3 个层级评价指标体系既相对独立，也相辅相成形成一个整体。各层级评价的侧重点不同，精确程度也不一样。使用时，应根据各评价的目标和各地铁实际情况综合使用三层评价指标体系，注意考虑同一层级指标之间的联系以及上下层级指标之间的关系。不仅要考虑人员、设施设备、环境三类直接风险致因，还要考虑管理因素，应将其与控制措施相结合。

4 结语

随着各大城市轨道交通网络化运营迅速推进，安全风险评价起促进城市轨道交通安全规划、设计、管理、维护形成闭环效应的纽带作用，对降低运营的风险性、保障运营安全意义重大。通过分析城市轨道交通运营安全影响因素，创造性地提出了基于目标导向的多层次运营安全风险评价指标体系，并针对不同的层次对象需求选取指标并进行分析。下一步将考虑以

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

实际工程项目案例为基础，将相关数学模型与评价指标体系相结合作为研究重点，从而提高安全风险评价的有效性和合理性，为未来城市轨道交通运营安全管理工作发挥导向作用。

参考文献

[1] 谭凯. 轨道交通网络化运营安全风险管控及影响因素分析[J]. 华东科技(学术版), 2014(6): 464.
TAN Kai. Analysis on safety risk control and influencing factors of rail transit network operation[J]. East China science & technology, 2014(6): 464.

[2] 刘书浩，贾文峥，杨远舟，等. 英国城市轨道交通运营安全评估经验借鉴[J]. 交通标准化, 2014(17): 57-60.
LIU Shuhao, JIA Wenzheng, YANG Yuanzhou, et al. Experience reference of operation safety assessment of urban rail transit in UK[J]. Transportation standardization, 2014(17): 57-60.

[3] 王忠文，方鸣. 城市轨道交通安全评估现状综述[J]. 现代城市轨道交通, 2013(5): 1-5.
WANG Zhongwen, FANG Ming. Overview of urban rail transit safety assessment[J]. Modern urban transit, 2013(5): 1-5.

[4] 燕飞，唐涛，郜春海. 城市轨道交通安全评价体系研究[J]. 都市快轨交通, 2010, 23(3): 32-36.
YAN Fei, TANG Tao, GAO Chunhai. Research on safety assessment framework for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2010, 23(3): 32-36.

[5] 李铭辉. 我国地铁运营安全评价体系研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
LI Minghui. Study on subway operation safety assessment system of China[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.

[6] 徐田坤. 城市轨道交通网络化运营安全风险评估理论与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
XU Tiankun. Study on risk assessment theory and methods on urban rail transit network operation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

[7] 叶庆辉，李毅雄，陈波，等. 城市轨道交通运营系统风险分析方法探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 3(5): 92-95.
YE Qinghui, LI Yixiong, CHEN Bo, et al. Study on risk analysis method for urban rail transit operation system[J]. Journal of safety science and technology, 2007, 3(5): 92-95.

[8] 城市轨道交通运营安全评价标准: GB/T 50438-2007[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Standard for the operation safety assessment of existing metro: GB/T 50438-2007[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[9] 代宝乾，汪彤，秦跃平，等. 基于事故理论的城市轨道交通风险评价模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(10): 156-159.
DAI Baoqian, WANG Tong, QIN Yueping, et al. Study on risk sssessment model of urban rail transportation based on accident theories[J]. China safety science journal, 2007, 17(10): 156-159.

[10] 霍宇芒，宋守信，顾一波. 基于组合权重的地铁车站拥挤踩踏事故风险评价[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(5): 139-143.
HUO Yumang, SONG Shouxin, GU Yibo. Risk assessment of crowd crushing and trampling accidents in subway stations based on combined weights[J]. Safety and environment engineering, 2016, 23(5): 139-143.

（编辑：王艳菊）

中国中车获得伊朗地铁列车采购大单

中国中车南京浦镇车辆有限公司与伊朗工矿贸易部下属工业发展与革新组织日前在伊朗首都德黑兰签署价值 5 亿欧元的供应合同，中车将陆续向伊方提供 90 列地铁列车。

根据合同，中车南京浦镇车辆有限公司承担车辆设计、生产制造、试验、运输、调试、人员培训及备件和设备供应，并帮助伊方实现部分零部件国产化。列车设计时速为 80 km，未来将在伊朗阿瓦士、设拉子和大不理士 3 座城市的地铁线路上运营。

摘编自 http://www.camet.org.cn/2018-03-09

北京地铁全线将适用所有智能手机

3 月 26 日下午，从北京地铁官方票务平台如意行公司获悉，预计今年上半年北京地铁全线各站的所有闸机都将实现刷手机二维码乘车的功能。据了解，这种“刷码进站”的方式不要求手机具备 NFC 功能，只要是智能手机即可使用。

此外，使用该项服务还可享受到地铁累计优惠票价政策，每月累计乘车消费满 100 元，可享受 8 折优惠，满 150 元可享受 5 折优惠。

如意行公司相关负责人表示，二维码乘车业务开通分为两个阶段：第一个是从即将开始的全面公测，在此期间，乘客可申请参与，成为首批二维码乘车用户，并且拥有邀请权限，随后是第二个正式开通阶段，预计 2018 年上半年开通，届时，北京所有易通行注册用户都可通过扫描二维码的方式进出地铁站。

摘编自 http://www.chinametro.net/2018-03-28

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net