

·应急管理·

全自动运行地铁突发事件应急响应能力评价指标体系研究



□张敏¹ 韩阳² 马运康² 高士杰³ 徐道亮³

[1. 天津大学 天津 300072; 2. 天津市地下铁道集团有限公司 天津 300051; 3. 天津市市政工程设计研究院 天津 300392]

[摘要] 【目的/意义】全自动运行系统是地铁最高自动化等级,地铁应急响应系统建设与机制完善是城市轨道交通运营的重要环节,通过构建应急响应能力评价指标体系,旨在提升全自动运行地铁突发事件的应急响应能力,提高地铁运营安全。【设计/方法】在梳理地铁应急管理相关文献的基础上,结合地铁全自动运行特点和一系列轨道交通国家规范,剖析应急响应管理的影响因素,构建出全自动运行地铁突发事件应急响应能力评价指标体系,包含3个一级指标、11个二级指标和54个三级指标。之后,利用层次分析法,确定了各级指标的权重,并以天津地铁6号线二期为例进行了实例分析。【结论/发现】依据权重结果,分析了指标体系中重要的一级、二级和三级指标,进而提出提升全自动运行地铁突发事件响应能力的策略建议,最后对天津地铁6号线二期应急响应能力进行了评价。

[关键词] 地铁; 应急响应; 全自动运行系统; 层次分析法

[中图分类号] D631.5

[文献标识码] A

[DOI] 10.14071/j.1008-8105(2022)-3011

Emergency Response Capability Evaluation Index System of Fully Automatic Operation Metro

ZHANG Min¹ HAN Yang² MA Yun-kang² GAO Shi-jie³ XU Dao-liang³

(1. Tianjin University Tianjin 300072 China; 2. Tianjin Metro Group Co., Ltd. Tianjin 300051 China; 3. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Tianjin 300392 China)

Abstract [Purpose/Significance] The fully automatic operation system is the highest automation level of metro. The construction and mechanism improvement of the metro emergency response system are important part of urban rail transit operation. By constructing an evaluation index system, this study aims to improve the emergency response capability of the fully automatic operation metro and the safety of metro operation. [Design/Methodology] Based on the previous literature on metro emergency management, combining the characteristics of fully automatic operation metro and the relevant national norms of rail transit, the influencing factors of emergency management are analyzed. Then the evaluation index system of emergency response capability of fully automated operation metro is constructed with 3 primary indicators, 11 secondary indicators and 54 tertiary indicators. Analytic Hierarchy Process (AHP) method is used to obtain the weight of each indicator. The emergency response evaluation of Tianjin metro line 6 phase II is illustrated as an example.

[收稿日期] 2022-03-17

[基金项目] 天津市交通运输科技发展项目计划(2021-13); 天津市科技计划项目(17YFZCSF01210)。

[作者简介] 张敏(1979-)女,博士,天津大学管理与经济学院教授、博士生导师;韩阳(1987-)男,博士,天津市地下铁道集团有限公司高级工程师;马运康(1971-)男,天津市地下铁道集团有限公司总经理;高士杰(1971-)男,天津市市政工程设计研究院副总工程师,正高级工程师;徐道亮(1990-)男,天津市市政工程设计研究院总工程师。

[Conclusions/Findings] Based on the weighting results, this paper identifies the important primary, secondary and tertiary indicators in the index system. The strategic suggestions are proposed to strengthen the emergency response ability of fully automatic operation metro. Finally, the emergency response capability of Tianjin metro line 6 phase II is evaluated.

Key words metro; emergency response; fully automatic operation system; analytic hierarchy process

引言

推动城市轨道交通信息化和智能化发展, 加快提升智慧交通建设是我国实现交通强国战略的重要突破口。《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》强调了城市轨道交通在实现交通强国战略中的重要性, 并明确了城市轨道交通的智能化发展方向。城市轨道交通全自动运行系统是基于现代计算机、通信、控制和系统集成等技术实现城市轨道交通运行全过程自动化的新一代城市轨道交通系统, 是城市轨道交通运行的最高自动化等级, 成为当前轨道交通自动化领域的研究热点之一^[1-2]。地铁作为城市轨道交通的重要分支, 已经成为居民出行的重要交通方式。近年来, 国内地铁全自动运行线路取得了明显进展, 截至2021年底, 国内已有北京燕房线等27条全自动运行轨道交通线路投入运营, 另外24条全自动线路在建。

由于地铁具有网络结构复杂、客流密度高、空间封闭等特点, 一旦发生地震、公共卫生、火灾、恐怖袭击等重大突发事件, 在指挥、控制疏散等方面存在诸多困难, 往往会造成严重的人员伤亡和财产损失^[3]。比如, 2021年7月20日, 郑州市突降特大暴雨, 造成地铁5号线区间积水, 事故导致500余名乘客被困, 12名乘客经抢救无效不幸罹难。上述重大突发事件暴露出地铁应急机制存在一定的缺陷, 如应急规章制度与预案不完善、信息沟通不畅通、危机意识欠缺、安全装置不足以及人员失职等。全自动运行地铁虽然通过高度自动化、高度集成、深度互联以及充分的冗余配置提高整个系统的可用性和可靠性, 但是当发生故障时仍旧需要站台人员的援助。从应急响应的角度来讲, 它不只是传统意义上信号设备的升级扩充, 而是人机功能的重新分配。在突发事件发生后, 地铁运营人员应能够及时介入并参与应急管理。因而, 地铁应急响应系统建设与机制完善是轨道交通运营的重要环节, 如何构建全自动运行地铁突发事件的应急响应指标体系, 进而评价其应急响应能力成为亟待解决的重要问题。

在地铁应急能力评价研究领域, 国内外学者已经展开了相关研究。在研究方法选择上, 层次分析法(AHP)^[4-5]和模糊综合评价法^[6-9]是较为广泛采

用的研究方法。在指标体系研究方面, 学者们构建了包含多个一级指标、二级指标和三级指标的地铁应急能力评价指标体系。比如: 以广州地铁为例, 袁孝伟从人、物、环境和管理四个方面, 深入分析了地铁运营的风险影响因素和应急能力的内涵, 构建了包括预警能力、应急准备能力、应急响应能力和善后恢复能力四个一级指标的地铁应急能力评价指标体系, 并运用AHP法和模糊综合评价法进行应急能力评价^[10]。刘继龙从人员、设备、管理、环境四个方面分析了城市轨道交通应急管理的相关影响因素, 建立了城市轨道交通应急救援能力综合评价指标体系, 基于AHP和模糊数学提出了城市轨道交通应急救援能力的综合评价模型, 进而构建了城市轨道交通应急管理的信息系统框架^[11]。聚焦于乘客地铁站内乘车过程, 和子葳深入分析了地铁设备通行能力、站台承载能力和列车转移能力的影响因素, 构建了地铁站应急反应能力的评价指标体系, 基于AHP-熵权法确定指标权重, 采用模糊综合评价法对地铁站的应急反应能力进行了综合评价^[12]。李一曼以北京地铁车站的高峰期大客流为研究对象, 提取出影响车站疏散能力的三个重要因素, 即客流组织、设备设施布局和列车运行计划, 建立了地铁车站疏散能力评价指标体系, 并运用基于三角模糊数的AHP方法确定各级评价指标的权重, 基于灰色关联分析法提出了地铁车站大客流疏散能力评价模型^[13]。刘帆基于“阶段—部门—决策”应急决策体系和案例推理的智能系统, 针对地铁突发事件进展的不同阶段提出相应的不同决策系统, 包括事前预警决策系统、事中应急决策系统和事后善后决策系统, 便于不同部门之间的快速决策和任务下达, 从而为地铁突发事件的快速响应提供支持^[14]。高宇航在对地铁站员工进行访谈和相关文献标准分析的基础上, 利用扎根理论构建了地铁站突发事件应急疏散能力评价指标体系, 包括管理因素、应急响应、建筑因素和人员因素4个一级指标、12个二级指标和31个三级指标, 结合灰色关联分析建立了地铁站应急疏散能力评价模型, 并以西安某地铁站为例进行了应用分析^[15]。

也有学者依据“危机管理的4R理论(Reduction,

Readiness, Response, Recovery) ”^[16], 基于危机管理的缩减力、预备力、反应力和恢复力四个阶段, 构建了地铁应急能力评价指标体系。比如, 卢文刚和黄小珍聚焦于城市地铁踩踏事件, 构建了包含事前防范能力、事中处置能力和事后恢复能力3个一级指标、9个二级指标和31个三级指标的地铁应急能力评价体系, 运用AHP和模糊综合评价法提出了地铁踩踏事件的应急能力评价模型^[7]。卢文刚和叶丽娅针对城市地铁暴恐事件, 深入分析了城市地铁暴恐风险因素, 开发了包含暴恐防范能力、暴恐处置能力和暴恐恢复能力3个一级指标的“1-3-10-35”比例层次的四级地铁暴恐事件应急能力评价指标体系, 基于改进AHP法确定各级指标的权重^[17]。林立等以可拓学为基础, 构建了包含4个一级指标(事前监控预备能力、事中应对能力、事后恢复能力、政府部门应急支持能力)和19个二级指标的地铁突发事件应急能力评价模型, 基于AHP法确定指标权重, 并对济南市地铁某线路的应急能力水平进行了评价^[18]。杨苏和孙太保构建了多层次地铁应急能力评价指标体系, 包含突发事件事前监测预警能力、突发事件事发时反应能力、突发事件政府反应能力和突发事件善后处理能力4个二级指标以及17个三级指标, 利用AHP法确定所有指标的权重, 并运用模糊综合评价法对南京市地铁应急管理能力进行了评价^[8]。

综上所述, 针对传统地铁突发事件的应急管理已经有了较完善的研究成果, 但对全自动运行地铁背景下如何进行应急管理的关注有限, 还缺乏系统的研究。因此, 通过研究全自动运行地铁的应急管理影响因素, 本文将运用AHP法构建适用于全自动运行地铁的应急响应能力评价指标体系, 并以天津地铁6号线二期(绿水道站至咸水沽西站段)为例, 对其应急响应能力进行评价, 以提升全自动运行地铁的应急管理水平。

一、全自动运行地铁突发事件的应急响应能力评价体系构建方法

危机管理4R理论将危机管理分为缩减(Reduction)、预备(Readiness)、响应(Response)、恢复(Recovery)四个阶段, 为全自动运行地铁的应急能力评价提供了一个较清晰的评价指标体系构建框架。在突发事件中, 地铁系统应急响应能力与应急管理方面的欠缺是导致事故未能在第一时间得

以控制的重要原因, 因此, 应急响应能力是整个全自动运行地铁应急管理的关键环节, 做好应急响应工作是减少事故造成的人员、财产损失的重要环节, 在舆情控制、风险评估、危机识别与警示等方面具有不可替代的效果, 关系到整个应急过程的成败, 这也是本文的核心研究内容。

全自动运行地铁实现了传统地铁以人为主要的操作到系统自动联动控制, 传统由人完成的工作, 特别是司机的职能, 由列车自动控制系统完成, 行车组织、列车控制和车辆监控等全部由控制中心调度员负责, 形成以系统和远程控制为主的行车组织管理方式。系统实时监控列车的车内外信息并上传给控制中心, 以供调度员决策, 替代原来需要司机执行的信息掌握、传达的功能。发生突发事件时, 控制中心可以及时通知地铁工作人员到现场进行应急处置, 实时调配人力和各类应急响应资源。因此, 与传统地铁突发事件应急响应相比, 全自动运行系统各系统间的关联性、统筹性、协调性更加突出。当发生突发事件后, 应根据全自动运行地铁故障场景和应急运营场景采取相应的措施, 地铁本部门以及其他部门(如卫生部门、消防部门、交通部门等)进行应急指挥和快速响应, 在第一时间做好乘客的疏散与医疗救助。

结合以往文献^[7,8,10,15-24], 地铁应急响应能力主要包括快速响应能力、紧急救援能力和减灾能力。另外, 全自动运行地铁运营场景区分了故障场景和应急运营场景, 因而在应急响应时应进行分级响应。根据《国家处置城市地铁事故灾难应急预案》《城市轨道交通技术规范》《城市轨道交通全自动运行系统技术规范》《地铁安全疏散规范》《城市轨道交通运营管理规定》《城市轨道交通运营突发事件应急演练管理办法》等规范文件要求, 通过与天津轨道集团建设和运营部门相关负责人和政府相关部门负责人的深度访谈, 总结了全自动运行地铁突发事件的特征和影响应急响应能力的主要影响因素。严格遵循科学性、重要性、层次性、独立性、可操作性与预见性原则, 本文将全自动运行地铁突发事件应急响应能力作为总指标(零级指标), 分级响应、应急指挥、安全防护和医疗救助作为一级指标, 再对3个一级指标进行详细分解, 提炼出11个二级指标和54个三级指标, 构建出全自动运行地铁突发事件应急响应能力指标体系。然后, 利用AHP法确定各级评价指标的权重, 为评价全自动运行地铁突发事件的应急响应能力提供依据。

二、全自动运行地铁突发事件应急响应能力评价指标选取及其体系结构

根据上述分析, 本文将全自动运行地铁突发事件应急响应能力评价指标体系按层次划分为目标层、1-3级指标层共4个层次, 对全自动运行地铁突发事件应急响应管理的相关环节进行层层分解, 目标层A代表全自动化运行地铁突发事件应急响应能力, 最终筛选提炼出3个一级指标: 分级响应、应急指挥、安全防护和医疗救助; 11个二级指标: 领导小组、障碍运营场景、应急运营场景、人员疏散、现场警戒、交通管制、事故区域监控、应急情况报告、医疗卫生救助、人员响应和安全防护; 以及54个三级指标。以上第一级和第二级指标体系结构如图1所示。

(一) 分级响应 B_1

分级响应机制是应急体系运行的基础, 也是应急救援活动能够快速、高效开展的基石^[16]。应急领导团队通过对于灾难事故现场的检测和测评, 了解事故成因、灾难类型、死伤程度等。进而决定应急响应的等级, 并根据不同等级采取相应的措施, 提高救援资源利用效率。因此, 地铁公司作为安全生产主体责任部门, 其他政府部门起监管指导和综合协调作用, 负责重大突发事件指挥的领导小组在整个应急管理体系中起领导作用。同时, 全自动运行地铁突发事件应急响应需要区分不同的障碍运营场景和应急运营场景。因此, 分级响应 (B_1) 这个一级指标下共3个二级指标, 即领导小组 (C_1)、障碍运营场景 (C_2)、应急运营场景 (C_3), 以及20个三级指标, 详情如图2所示。

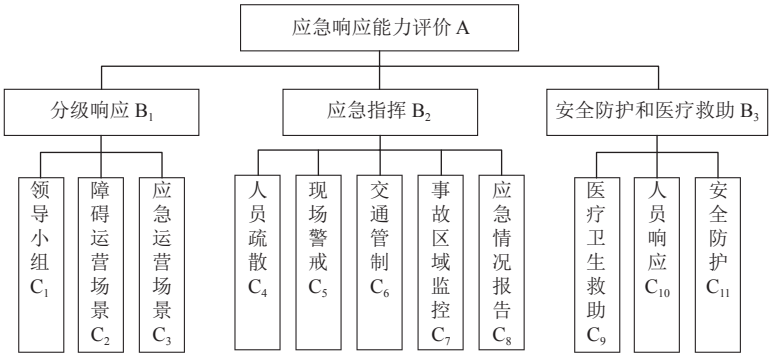


图 1 应急响应能力评价指标体系结构：第一级和第二级



图 2 一级指标“分级响应”的指标体系结构

(二) 应急指挥 B_2

应急指挥分场内指挥和场外指挥, 包括人员疏散、现场警戒、交通管制、应急情况报告等, 以权

责配置为核心。应急指挥团队根据现场检测的具体情况, 综合规章制度和应急预案, 对有限的医疗、人力等资源进行有效分配, 主要包括人员疏散 (C_4 ,

场内指挥人员引导乘客安全、有序撤离事故现场)、现场警戒(C_5 , 维持现场秩序, 为应急救援活动提供稳定实施环境)、交通管制(C_6 , 为了避免事故区域交通拥堵, 影响应急救援进度, 场外采取的管制措施)、事故区域监控(C_7 , 为保证应急救援的有效推进, 监控事故发生区域)、应急情况报告(C_8 , 将现场情况向上级汇报)。因此, 应急指挥 B_2 这个一级指标下共5个二级指标, 21个三级指标, 如图3所示。

(三) 安全防护和医疗救助 B_3

安全防护与医疗救助以各级卫生部门为主, 民间力量与社会组织也参与其中。卫生部门要根据国

务院颁布的应急预案和相关法律法规组织医护人员, 整合医疗资源, 配合其他救援部门做好应急准备工作, 并定期对参与事故灾难救援的医护人员进行培训和考核, 提高救援人员的职业素养和专业知识。进行安全防护和医疗救助时, 主要包括医疗卫生救助(C_9 , 派遣救护车、医护人员等前往现场进行救助)、人员响应(C_{10} , 地铁值守人员、调度员等相关人员的应急响应)、安全防护(C_{11} , 乘客的自我保护意识和应急人员的应急防护知识等)。因此, 安全防护与医疗救助 B_3 这个一级指标下共3个二级指标, 13个三级指标, 如图4所示。

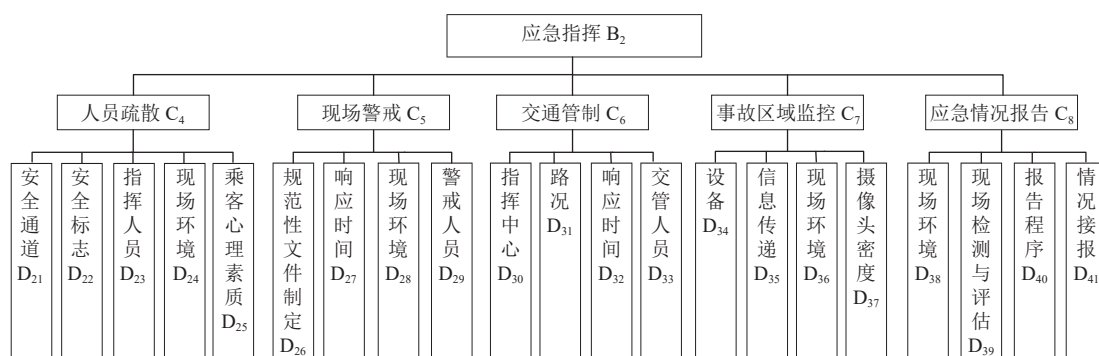


图3 一级指标“应急指挥”的指标体系结构

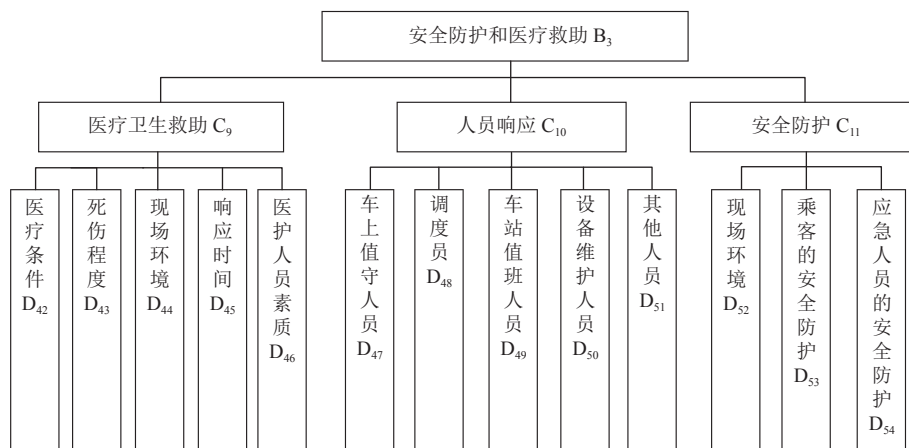


图4 一级指标“安全防护和医疗救助”的指标体系结构

三、全自动运行地铁突发事件应急响应能力评价指标体系的权重确定

本文所涉及的指标体系包含4个层级和54个三级指标, AHP法适用于具有复杂层次结构的多目标决策问题, 符合本文指标体系构建的需要。因此, 本文将采用AHP法确定全自动运行地铁突发事件应急响应能力各级评价指标的权重。

(一) 构造两两比较的判断矩阵

在构造判断矩阵时, 邀请10位天津地铁6号线的专家对全自动运行地铁突发事件应急响应能力评价指标的重要程度进行评价打分, 即对指标体系中同层次的各个指标两两比较得到的相关程度值, 从而做出相对重要性判断。其中比较权重依据“判断矩阵比较标度”确定, 如表1所示。

表 1 判断矩阵比较标度

相对重要程度 (a_{ij})	定义
1	表示两个指标比较, 两者同等重要
3	表示两个指标比较, 前者比后者稍微重要
5	表示两个指标比较, 前者比后者明显重要
7	表示两个指标比较, 前者比后者强烈重要
9	表示两个指标比较, 前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻等级的中间值
取倒数	比较判断计算得出 $a_{ji}, a_{ji} = 1/a_{ij}$

(二) 指标权重的计算与一致性检验的判断

1. 一级指标权重和一致性检验

基于10份回收的专家判断矩阵, 进行几何平均处理, 对数据进行处理和分析。地铁突发事件应急响应能力评价体系包括分级响应、应急指挥、安全防护和医疗救助3个一级指标。根据专家对各因素指标权重打分情况的比较, 按照AHP法构造评价指标重要性判断矩阵得出的权重, 如表2所示。

表 2 一级指标专家赋值表及权重

应急响应能力	分级响应	应急指挥	安全防护和医疗救助	权重
分级响应	1	0.356	1.300	0.224
应急指挥	2.807	1	3.081	0.594
安全防护和医疗救助	0.769	0.325	1	0.182

为了确保上述结果的可靠性, 按照AHP法要求, 进行了一致性检验。表2中判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 为3.003, 计算判断矩阵的一致性指标(CI)为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.003 - 3}{3 - 1} = 0.0015$$

由于维数 $n=3$,则平均随机一致性指标(RI)为0.52, 所以一致性比例(CR)为:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0015}{0.52} = 0.003$$

由于 $0.003<0.1$, 说明判断矩阵具有较好的一致性, 通过了一致性检验。

2. 二级指标权重和一致性检验

一级指标分级响应(B_1)包括3个二级指标: 领导小组(C_1)、障碍运营场景(C_2)、应急运营场景(C_3), 通过两两判断矩阵, 权重计算结果如表3。

表 3 二级指标分级响应(B_1)专家赋值表及权重

分级响应	领导小组	障碍运营场景	应急运营场景	权重
领导小组	1	0.301	0.194	0.099
障碍运营场景	3.323	1	0.353	0.272
应急运营场景	5.165	2.829	1	0.629

依据一致性检验步骤, 计算可得表2的判断矩阵对应的一致性比例(CR)为 $0.039<0.1$, 表明判

断矩阵通过了一致性检验。

由于其他二级指标和三级指标的权重和一致性检验步骤类似, 因此, 本文只给出分级响应(B_1)的二级指标权重和一致性检验计算结果, 其他二级指标和三级指标的计算过程在此不再赘述, 具体权重结果详如表4的前7列, 对应的一致性检验结果详见表5, 由于所有的CR值都小于0.1, 结果表明, 所有判断矩阵均通过了一致性检验, 具有较好的一致性。

3. 各层级指标的综合权重

本文构建的全自动运行地铁应急响应能力评价指标体系包含四个层级, 各层次指标相对于目标层的综合权重, 需要从上到下逐层进行, 对于第一级指标, 其综合权重即为上一节中的层次单排序^[25]。下面以第二级为例给出指标综合权重的计算说明。

第一级每个指标 $B_i(i=1, 2, 3)$ 相较于目标层A的权重为 b_1, b_2 和 b_3 , 第二级指标 C_j 相较于第一级指标 B_i 的权重为 $c_1, c_2, \dots, c_{11}(j=1, 2, 3, \dots, 11)$ 。则与 B_1 对应的3个三级指标 C_1, C_2 和 C_3 的综合权重分别为 $b_1c_j(j=1, 2, 3)$, 与 B_2 对应的5个三级指标 $C_4\sim C_8$ 的综合权重分别为 $b_2c_j(j=4, 5, 6, 7, 8)$, 与 B_3 对应的3个三级指标 C_9, C_{10} 和 C_{11} 的综合权重分别为 $b_3c_j(j=9, 10, 11)$, 其中所有二级指标 $C_j(j=1, 2, 3, \dots, 11)$ 的综合权重和为1。

类似可以计算三级指标的综合权重, 结果如表4的最后一列“综合权重”所示。

4. 结果讨论

由表4的各级指标权重结果表明: 一级指标中“应急指挥”权重为0.594, 可见应急指挥在全自动化运行地铁面对重大突发事件中所处的重要地位。其次是“分级响应”和“安全防护和医疗救助”, 两者权重均小于“应急指挥”。

一级指标“应急指挥”中, 二级指标“人员疏散”权重最大为0.306, 其他二级指标按照重要性排序依次为“应急情况报告”“现场警戒”“事故区域监控”和“交通管制”。三级指标中, “人员疏散”下的三级指标中“安全标志”“安全通道”和“指挥人员”分居前三名且权重相差不大, 在地铁站的应急基础设施建设中这三项都应重视。“应急情况报告”下的三级指标“情况接报”权重最大, “现场警戒”下的三级指标“响应时间”权重最大, “事故区域监控”下的三级指标“信息传递”权重最大, “交通管制”下的三级指标“响应时间”和“指挥中心”位居前两名。从以上三级指标的权重计算结果可见: 全自动运行地铁在面对重

表 4 全自动运行地铁突发事件应急响应能力评价指标权重

目标层	一级指标		二级指标		三级指标		
	指标	权重	指标	权重	指标	权重	综合权重权重
全自动运行地铁突发事件应急响应能力A	分级响应B ₁	0.224	领导小组C ₁	0.099	各部门协调D ₁	0.232	0.005
			障碍运营场景C ₂	0.272	指挥团队 D ₂	0.231	0.005
					响应时间 D ₃	0.382	0.009
					信息发布 D ₄	0.155	0.003
					蠕动模式 D ₅	0.024	0.001
					车门、安全门、站台门状态丢失 D ₆	0.065	0.004
					车辆制动系统故障 D ₇	0.146	0.009
					车辆无限通道故障 D ₈	0.084	0.005
					接触网失电 D ₉	0.108	0.007
					区间积水 D ₁₀	0.052	0.003
					故障复位控制 D ₁₁	0.117	0.007
			运行中信号或车辆发生设备故障 D ₁₂	0.196	0.012		
			信号故障 D ₁₃	0.208	0.013		
			应急运营场景C ₃	0.629	车站突发客流 D ₁₄	0.025	0.004
			挤岔、脱轨、冲突事件 D ₁₅	0.122	0.017		
			火灾 D ₁₆	0.165	0.023		
			障碍物 D ₁₇	0.09	0.013		
			地震 D ₁₈	0.116	0.016		
			突发卫生事件 D ₁₉	0.146	0.021		
			恐怖袭击 D ₂₀	0.336	0.047		
			人员疏散C ₄	0.306	安全通道 D ₂₁	0.252	0.046
			安全标志 D ₂₂	0.268	0.049		
			指挥人员 D ₂₃	0.249	0.045		
			现场环境 D ₂₄	0.132	0.024		
			乘客心理素质 D ₂₅	0.099	0.018		
			现场警戒C ₅	0.171	规范性文件制定 D ₂₆	0.208	0.021
			响应时间 D ₂₇	0.449	0.046		
			现场环境 D ₂₈	0.171	0.017		
			警戒人员 D ₂₉	0.172	0.017		
			交通管制C ₆	0.153	指挥中心 D ₃₀	0.31	0.028
	路况 D ₃₁	0.207	0.019				
	响应时间 D ₃₂	0.354	0.032				
	交管人员 D ₃₃	0.129	0.012				
	事故区域监控C ₇	0.165	设备 D ₃₄	0.22	0.022		
	信息传递 D ₃₅	0.425	0.042				
	现场环境 D ₃₆	0.194	0.019				
	摄像头密度 D ₃₇	0.161	0.016				
	应急情况报告C ₈	0.205	现场环境 D ₃₈	0.128	0.016		
	现场检测与评估 D ₃₉	0.208	0.025				
	报告程序 D ₄₀	0.277	0.034				
	情况接报 D ₄₁	0.387	0.047				
	医疗卫生救助C ₉	0.256	医疗条件 D ₄₂	0.094	0.004		
	死伤程度 D ₄₃	0.438	0.02				
	现场环境 D ₄₄	0.076	0.003				
	响应时间 D ₄₅	0.199	0.009				
	医护人员素质 D ₄₆	0.193	0.009				
	人员响应C ₁₀	0.542	车上值守人员 D ₄₇	0.231	0.023		
	调度员 D ₄₈	0.313	0.031				
	车站值班人员 D ₄₉	0.243	0.024				
	设备维修员 D ₅₀	0.145	0.014				
	其他人员 D ₅₁	0.068	0.007				
	安全防护C ₁₁	0.202	现场环境 D ₅₂	0.127	0.005		
	乘客的安全防护 D ₅₃	0.483	0.018				
	应急人员的安全防护 D ₅₄	0.39	0.014				

表 5 一致性检验计算结果

判断矩阵	$\lambda_{\max}$	n	CR	一致性检验结果
A	3.003	3	0.003	通过
B ₁	3.040	3	0.039	通过
B ₂	5.017	5	0.004	通过
B ₃	3.031	3	0.030	通过
C ₁	4.033	4	0.013	通过
C ₂	9.107	9	0.010	通过
C ₃	7.082	7	0.010	通过
C ₄	5.063	5	0.014	通过
C ₅	4.036	4	0.014	通过
C ₆	4.061	4	0.023	通过
C ₇	4.008	4	0.003	通过
C ₈	4.002	4	0.001	通过
C ₉	5.062	5	0.014	通过
C ₁₀	5.043	5	0.010	通过
C ₁₁	4.033	3	0.013	通过

大突发事件时响应迅速的必要性。

一级指标“分级响应”中，二级指标“应急运营场景”权重最大为0.629，其次是“障碍运营场景”和“领导小组”。“应急运营场景”下的三级指标中权重排名前三分别为“恐怖袭击”“火灾”和“突发卫生事件”，这也体现了当下全球正处于新冠疫情和复杂政治形势双重夹击的困境。“障碍运营场景”下的三级指标中权重排名前三分别为“运行中信号或车辆发生故障”“车辆制动系统故障”和“故障复位控制”，这也体现出加强障碍排查，升级车辆设备系统对于应对突发事件的重要作用。“领导小组”中权重最大的“响应时间”展现面对突发事件应急处理反应迅速的重要性。

一级指标“安全防护和医疗救助”中，二级指标中“人员响应”权重最大为0.542，之后是“医疗卫生救助”和“安全防护”。“人员响应”下的三级指标“调度员”权重最大，由于调度员负责突发事件过程中的各类资源整体协调和调度，因此加强调度员职业素养和技能的培训势在必行。“医疗卫生救助”和“安全防护”下的三级指标“死伤程度”和“乘客的安全防护”权重最大，彰显出突发事件发生后乘客生命安全的重要性。

从表4最后一列“综合权重”结果来看，在54个三级指标中，权重前10名的三级指标包括：一级指标“应急指挥”下的8个三级指标，分别为“安全标志”“情况接报”“安全通道”“响应时间”（“现场警戒”二级指标下）“指挥人员”“信息传递”“报告程序和响应时间”（“交通管制”二级指标下）；一级指标“分级响应”下的1个三级指标“恐怖袭击”；以及一级指标“安全防护和医疗救助”下的1个三级指标“调度员”。

因此，为了提升全自动运行地铁突发事件的应

急响应能力，应该加强全自动运行地铁应急基础设施建设，全面提升应急基础设施运维管理的效率与质量；提高全自动运行地铁应急信息系统的建设，完善信息采集、实时监测、信息传递和应急决策系统；加强全自动运行地铁调度中心的应急指挥能力，提高地铁调度中心与政府各部门的协同处置能力，完善智能应急处置方案，打造自动化运行地铁运维安全综合保障体系，以智能化手段组织指挥应急响应，实现突发事件下的大客流快速、安全疏散，从而以最大限度保障人民群众的生命安全。

四、实例研究

天津地铁6号线二期（渌水道站至咸水沽西站段）是天津市首条全自动运行地铁线路，该线路于2021年12月28日开通初期运营。基于本文所构建的评价体系，首先开发设计了《全自动运行地铁应急响应能力评价专家调查表》，邀请7位天津地铁集团相关专家和天津地铁6号线二期（渌水道站至咸水沽西站段）运营部门负责人，对54个三级指标进行打分，得分值按照百分制给出（参考范围参见表6）。根据表4的三级指标综合权重，利用简单加权平均方法可计算出天津地铁6号线二期（渌水道站至咸水沽西站段）应急响应能力评价总得分为86分，可见天津地铁6号线二期（渌水道站至咸水沽西站段）应急响应能力水平属于“良好”。整体而言，天津地铁6号线二期（渌水道站至咸水沽西站段）针对突发事件的应急响应能力较强，主要因为在建设阶段，已针对全自动运行地铁各种突发场景进行了深入研究，各核心设备系统具备基于确保行车安全为准则的自动处理功能，同时调度指挥中心制定了各类应急预案，从而确保在突发事件发生后，能够较好地保证应急信息传递、应急对策及时响应和应急行动的实施。

表 6 三级指标应急响应能力得分值参考范围

得分范围	[100, 90]	(90, 80]	(80, 70]	(70, 60]	<60
能力评价	优	良	中	一般	差

通过进一步分析，可知一级指标得分分别为：分级响应81分、应急指挥87分、安全防护和医疗救助88分。根据专家调查结果，可见“分级响应-应急运营场景-火灾/突发卫生事件/恐怖袭击”三个三级指标应急响应能力评价较低，说明天津地铁6号线二期（渌水道站至咸水沽西站段）对于重大突发事件的应急响应能力一般，因此，建议加强以上重

大突发事件应急场景的预警预测,制定可视化应急预案,加大力度积极开展应急演练,指导重大突发事件的应急处置,提升全自动运行地铁调度中心应急指挥能力。

五、结论

本文围绕全自动运行地铁应对突发事件时的应急响应能力开展研究,通过深度访谈以及一系列国家规范和文件,构建了全自动运行地铁突发事件应急响应能力评价体系,该体系包含3个一级指标、11个二级指标和54个三级指标。利用AHP法确定了各级评价指标的权重,并以天津地铁6号线二期(绿水道站至咸水沽西站段)为例进行了应急响应能力评价,进而提出了相应的对策建议。本文为全自动运行地铁应急管理能力的提升提供了理论指导,为具体应急响应策略的制订提供了有力支撑。

应当指出,本文研究过程中存在一定的局限性。首先,本文仅依据天津地铁专家意见计算了各级指标权重,由于调查对象相对局限,对评价结果的准确性和普适性会产生一定的影响,因而后续各个城市全自动运行地铁线路在进行应急响应能力评价时,需要依据相关专家意见,对权重进行调整。其次,本文仅聚焦于应急能力评价中的应急响应能力,未考虑应急预警能力和事后评估能力等,因此,后续需要强化全自动运行地铁突发事件应急场景研究,完善应急预案和应急机制的建设。

参考文献

- [1] 郜春海,王伟,李凯,等.全自动无人驾驶系统发展趋势及建议[J].都市快轨交通,2018,31(1): 51-57.
- [2] 温朋哲,徐道亮,高士杰,等.城市轨道交通全自动运营场景及功能需求分析[J].机车电传动,2020(3): 132-136.
- [3] 刘爽,曹萍萍,蔡青青.基于案例决策理论的人群聚集区域公共安全应急方案选择方法[J].电子科技大学学报(社科版),2021,23(5): 60-67.
- [4] 闻千,李宗平.地铁应急指挥管理评价指标体系构建[J].现代城市轨道交通,2013(2): 77-80.
- [5] HU X, LI X, HUANG Y. Urban rail transit risk evaluation with incomplete information[J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 467-477.
- [6] KEPAPTSOGLU K, KARLAFTIS M G, GKOUNTIS J. A fuzzy AHP model for assessing the condition of metro stations[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(5): 1109-1116.
- [7] 卢文刚,黄小珍.基于FCE法的城市地铁踩踏事件应急能力评价研究——以广州地铁为例[J].中国行政管理,2018(3): 145-152.
- [8] 杨苏,孙太保.基于模糊综合评价法的地铁应急管理能力评价——以南京市地铁1号线为例[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2021,41(3): 195-200.
- [9] WANG G, LIU L, SHI P, et al. Flood risk assessment of metro system using improved trapezoidal fuzzy AHP: a case study of Guangzhou[J]. Remote Sensing, 2021, 13(24): 1-31.
- [10] 袁孝伟.城市地铁应急能力评价指标体系研究[D].西安:西安科技大学,2011.
- [11] 刘继龙.城市轨道交通应急管理信息系统研究[D].南京:南京理工大学,2011.
- [12] 和子蕙.北京地铁大客流应急反应能力评价[D].北京:北京交通大学,2017.
- [13] 李一曼.北京市地铁大客流疏散能力评价研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [14] 刘帆.地铁突发事件应急决策系统研究[J].情报探索,2016(8): 9-12.
- [15] 高宇航.地铁站突发事件应急疏散能力评价方法及应用[D].西安:西安科技大学,2019.
- [16] (美)罗伯特·希斯(Robert Heath).危机管理[M].北京:中信出版社,2000: 31-33.
- [17] 卢文刚,叶丽娅.基于风险分析的城市地铁暴恐事件应急能力评价研究[J].中国应急救援,2019(3): 22-28.
- [18] 林立,宋仲仲,汤霖.基于可拓学的地铁突发事件应急能力评价模型[J].现代城市轨道交通,2020(6): 89-94.
- [19] 曹萍萍,李铭洋.城市人群聚集区域公共安全应急管理的研究现状与展望[J].电子科技大学学报(社科版),2016,18(5): 6-11.
- [20] 王起全,李登尧,杨鑫刚.地铁事故应急疏散模拟及优化研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(11): 170-178.
- [21] 唐明伟,苏新宁,王昊.突发事件应急响应情报体系案例解析——以公共安全事件为例[J].情报科学,2019,37(1): 105-111.
- [22] KALLIANIOTIS A, PAPAKONSTANTINOU D, ARVELAKI V, et al. Evaluation of evacuation methods in underground metro stations[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 31(10): 526-534.
- [23] NIU K, FANG W N, SONG Q, et al. An evaluation method for emergency procedures in Automatic metro based on complexity[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(1): 370-383.
- [24] TRAVIS S. Accessibility of metro Vancouver fire-fighters following a damaging earthquake: a case study[J]. Journal of Business Continuity & Emergency Planning, 2019, 13(1): 52-66.
- [25] 吴育华,刘喜华,郭均鹏.经济管理中的数量方法[M].北京:经济科学出版社,2008: 41-57.