

基于 MRO 状态的巴基斯坦 地铁橙线高架区间安全模糊决策研究

林 辉¹, 董继峰¹, 李 辰^{1,2}, 谭子东^{1,2}, 毛麒麟^{1,2}

(1. 北方国际合作股份有限公司, 北京 100040; 2. 地铁橙线运维联营体, 巴基斯坦 拉合尔 54792)

摘要:为对受地面沉降漏斗区威胁的巴基斯坦拉合尔地铁橙线高架区间 MRO(维护、维修、运行)状态进行监测,研究了基于 MRO 状态的地铁高架区间安全模糊决策问题。提出地铁高架区间 MRO 状态等级,地铁高架区间 MRO 威胁等级,形成基于 MRO 状态的地铁高架区间风险等级矩阵。构建地铁高架区间 MRO 威胁决策模型,对拉合尔地面沉降漏斗区地铁高架区间监测设备布设方案进行优选,运用系数伸缩变换法避免模糊决策失效的可能性。研究成果为地面沉降漏斗区地铁高架区间安全研究提供了参考。

关键词:地铁;高架区间;沉降漏斗区;性能;模糊决策

中图分类号: U441 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)01-0094-06

巴基斯坦拉合尔地铁橙线是巴基斯坦首条城市地铁,该项目全部采用中国地铁标准、技术和装备,并由北方国际合作股份有限公司领导的中巴两国公司组成的运维联营体负责运维。2020 年 10 月 25 日,拉合尔地铁橙线正式开通运营。由于橙线不得经过拉合尔市内 2 个大型地面沉降漏斗区,人工监测地铁线路效率低,因此运维联营体开展了橙线安全 MRO(维护、维修、运行)系列研究。

近年来,随着中国北斗卫星导航系统(BDS)建成并投入使用,卫星导航定位(GNSS)技术在各领域的研究迅速展开^[1-2],北斗产品、技术和服 务已在全球半数以上国家得到应用。在拉合尔地面沉降漏斗区内,橙线高架区间全线布设北斗监测设备的方案费用较高,巴方难以承受。研究团队以基于性能的抗震理念^[3-4]为基础,提出基于 MRO 状态的地铁高架区间安全模糊决策,实现巴方可接受的效率与费用最优解。

1 地铁高架区间 MRO 状态等级

在胡明亮^[5]地震易损性研究基础上,将地铁高架区间 MRO 状态等级划分为以下 5 级:

运行基本未受影响(s_1)——地铁高架区间运行安全性及行车舒适性未受影响,可保持常规监测(取 $i \leq 3$ mm);

运行受到轻微影响(s_2)——地铁高架区间运行安全性未受影响,但行车舒适性有所降低,可利用正常天窗时间维护(取 $3 \text{ mm} < i \leq 4 \text{ mm}$);

运行受到中等程度影响(s_3)——地铁高架区间运行安全性受到中等程度影响,宜减速行车以保证安全,宜申请增加天窗时间(减少运营时间)以进行维护(取 $4 \text{ mm} < i \leq 5 \text{ mm}$);

运行受到较严重影响(s_4)——地铁高架区间运行安全性受到较大影响,应低速行车以保证安全,宜申请非工作日中断运营以进行维修(取 $5 \text{ mm} < i \leq 6 \text{ mm}$);

运行受到重大影响(s_5)——地铁高架区间运行安全性受到重大影响,安全无法保证,应立即中断运营进行紧急维修(取 $i > 6 \text{ mm}$)。

收稿日期:2023-10-12 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230263

基金项目:交通运输部交通运输行业重点科技项目(2022-MS1-001)

作者简介:林辉(1981—),男,正高级工程师,研究方向为“一带一路”建设。E-mail:linh@norinco-intl.com

林辉,董继峰,李辰,等.基于 MRO 状态的巴基斯坦地铁橙线高架区间安全模糊决策研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(1):94-99.

其中, i 为相邻桥墩工后不均匀沉降控制值^[6]。

2 地铁高架区间 MRO 威胁等级

2.1 地铁高架区间 MRO 威胁因素

为科学地评判地铁高架区间 MRO 威胁,选取结构形式、沉降区域、直(曲)线和主跨跨度等作为地铁高架区间 MRO 威胁影响因素。通过影响因素归类,建立地铁高架区间 MRO 威胁决策模型,如图 1 所示。

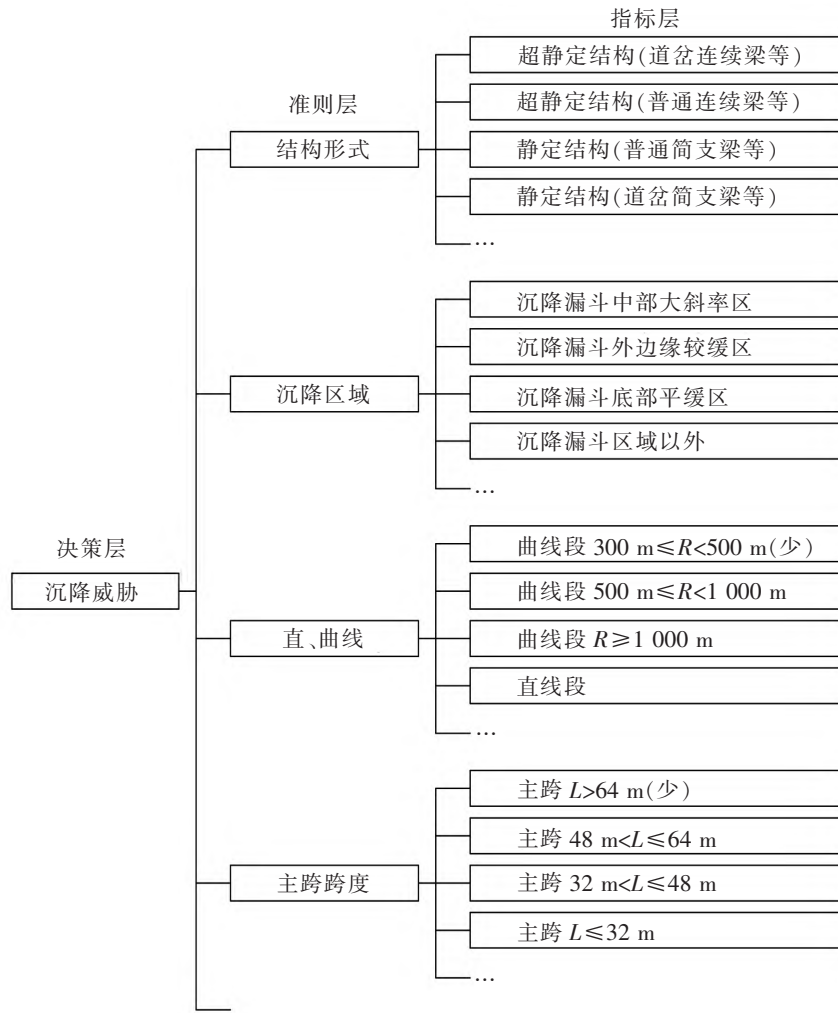


图 1 地铁高架区间 MRO 威胁决策模型

与地铁高架区间 MRO 威胁对应的评价因素集为

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\} \quad (1)$$

$$U_1 = \{u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1n}\} \quad (2)$$

$$U_2 = \{u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2n}\} \quad (3)$$

⋮

$$U_m = \{u_{m1}, u_{m2}, \dots, u_{mn}\} \quad (4)$$

2.2 地铁高架区间 MRO 威胁评价

以宁晓晴等^[7]、程绍革等^[8]抗震系统工程应用及地铁高架区间运行安全可能受到中等程度影响的概率,将地铁高架区间 MRO 威胁评价划分为 5 个等级:频繁受到威胁水准(p_1);可能受到威胁水准(p_2);偶尔受到威胁水准(p_3);很少受到威胁水准(p_4)和极少受到威胁水准(p_5),即

$$p = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\} \quad (5)$$

2.3 地铁高架区间 MRO 威胁权重

定义 A 为地铁高架区间 MRO 威胁权重向量,构建相应的分配矩阵。采用 Delphi 法,由归一化原则 $\sum_{i=1}^m A_i = 1$, 结构形式占 25%, 沉降区域占 45%, 直(曲)线占 10%, 主跨跨度占 20%(仅考虑图 1 中所列因素)。

地铁高架区间 MRO 威胁中结构形式、沉降区域、直(曲)线和主跨跨度的权重向量为 $A = (0.25, 0.45, 0.10, 0.20)$ 。

结构形式中超静定结构(道岔连续梁等)、超静定结构(普通连续梁等)、静定结构(普通简支梁等)和静定结构(道岔简支梁等)的权重向量为 $A_1 = (0.40, 0.25, 0.15, 0.20)$ 。

同理,沉降区域、直(曲)线和主跨跨度等子因素在地铁高架区间 MRO 威胁决策中的权重向量分别为 $A_2 = (0.45, 0.20, 0.25, 0.10)$ 、 $A_3 = (0.30, 0.35, 0.20, 0.15)$ 、 $A_4 = (0.25, 0.15, 0.20, 0.40)$ 。

2.4 地铁高架区间 MRO 威胁决策

在 ZIEMBA^[9] 模糊多目标决策研究基础上,采用模糊决策方法,定义模糊处理系统传输函数为决策矩阵 R ,系统输入为决策权重 A ,系统输出为决策结果 B ,则地铁高架区间 MRO 威胁决策公式为

$$B = A \circ R \quad (6)$$

若在 B 中至少出现 2 个相等的最大分量,即

$$\max_{j=1}^n b_j = b_f = b_g \quad (f \neq g) \quad (7)$$

模糊决策会失效。

模糊决策失效后,若 $\max_{j=1}^m a_i = a_k$, $\max_{j=1}^n r_{kj} = r_{kf}$, 并设 r_{kj} 中次大元素为 r_{kg} , 且

$$r_{kj} \leq r_{kg} < a_k \leq r_{kf} \quad (j \neq f, g) \quad (8)$$

$$\max_{j=1}^n b_j = b_f = a_k > b_j \quad (j \neq f) \quad (9)$$

经系数伸缩变换,模糊决策恢复有效。

因为,对于任意的 i, j 都有

$$a_i \wedge r_{ij} \leq a_i \leq a_k \quad (10)$$

所以

$$b_j = \bigvee_{i=1}^m (a_i \wedge r_{ij}) \leq a_k \quad (11)$$

当 $j = f$ 时,如 $i = k$,由条件 $a_k \leq r_{kf}$,得 $a_k \wedge r_{kf} = a_k$,如 $i \neq k$,则 $a_i \wedge r_{if} \leq a_i < a_k$,所以

$$b_f = \bigvee_{i=1}^m (a_i \wedge r_{if}) = (a_k \wedge r_{kf}) \bigvee_{\substack{i=1 \\ (i \neq k)}}^m (a_i \wedge r_{if}) = a_k \bigvee_{\substack{i=1 \\ (i \neq k)}}^m (a_i \wedge r_{if}) = a_k \quad (12)$$

当 $j \neq f$ 时,如 $i = k$,则 $a_k \wedge r_{kj} \leq r_{kj} \leq r_{kg} < a_k$,如 $i \neq k$,则 $a_i \wedge r_{if} \leq a_i < a_k$,所以

$$b_j = \bigvee_{i=1}^m (a_i \wedge r_{ij}) = (a_k \wedge r_{kj}) \bigvee_{\substack{i=1 \\ (i \neq k)}}^m (a_i \wedge r_{ij}) < a_k \quad (13)$$

由式(13)可得

$$b_j < b_f \quad (j \neq f) \quad (14)$$

故

$$\max_{j=1}^n b_j = b_f = a_k > b_j \quad (j \neq f) \quad (15)$$

所以,经系数伸缩变换,模糊决策恢复有效。

3 地铁高架区间 MRO 监测设备布设方案

3.1 地铁高架区间 MRO 风险等级

在潘晨等^[10]工程风险评价研究基础上,根据地铁高架区间 MRO 状态等级和地铁高架区间 MRO 威胁水准,将地铁高架区间 MRO 风险等级划分为以下 5 级:很高(r_1)——地铁全寿命周期内,高架区间安

全风险很高,高架区间应采取最全面北斗监测设备布设方案;中高(r_2)——地铁全寿命周期内,高架区间安全风险中偏高,宜采取比基本北斗监测设备布设方案适当增加北斗监测设备;中等(r_3)——地铁全寿命周期内,高架区间安全风险中等,宜采取基本北斗监测设备布设方案;中低(r_4)——地铁全寿命周期内,高架区间安全风险中偏低,可采取比基本北斗监测设备布设方案适当减少北斗监测设备;极低(r_5)——地铁全寿命周期内,地铁高架区间安全风险极低,可不采取北斗监测设备布设方案。

基于 MRO 状态的地铁高架区间风险等级矩阵,见表 1。

表 1 基于 MRO 状态的地铁高架区间风险等级矩阵

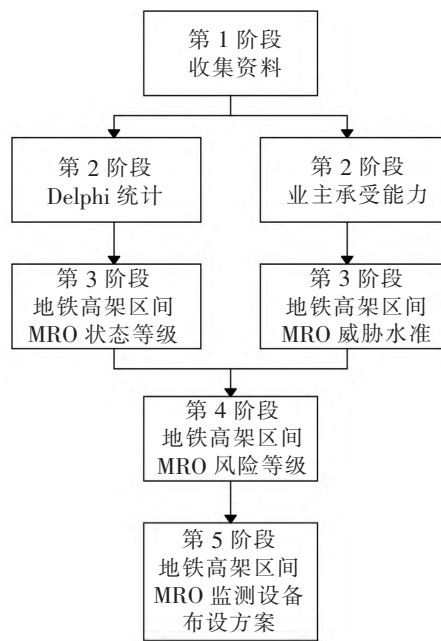
安全等级	威胁水准				
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
s_1	r_3	r_4	r_4	r_5	r_5
s_2	r_2	r_3	r_4	r_4	r_5
s_3	r_2	r_2	r_3	r_4	r_4
s_4	r_1	r_2	r_2	r_3	r_4
s_5	r_1	r_1	r_2	r_2	r_3

3.2 地铁高架区间 MRO 监测设备布设方案

在 3.1 节得到地铁高架区间 MRO 威胁水准 p_i^* ($i=1, 2, \dots, 5$)后,根据业主选择能够承受的地铁高架区间 MRO 状态等级 s_i^* ($i=1, 2, \dots, 5$),查表 1,可得地铁高架区间 MRO 风险等级 r_i^* ($i=1, 2, \dots, 5$)。再根据地铁高架区间 MRO 风险等级 r_i^* ($i=1, 2, \dots, 5$),采取相应的地铁高架区间 MRO 监测设备布设方案。

地铁高架区间监测设备布设方案优选流程,如图 2 所示。

图 2 地铁高架区间监测设备布设方案优选流程



4 实例

巴基斯坦拉合尔地铁橙线正线长 25.58 km,其中高架区间长 23.80 km,高架区间占比 93.0%,InSAR(干涉雷达)地面沉降漏斗区监测图如图 3 所示。

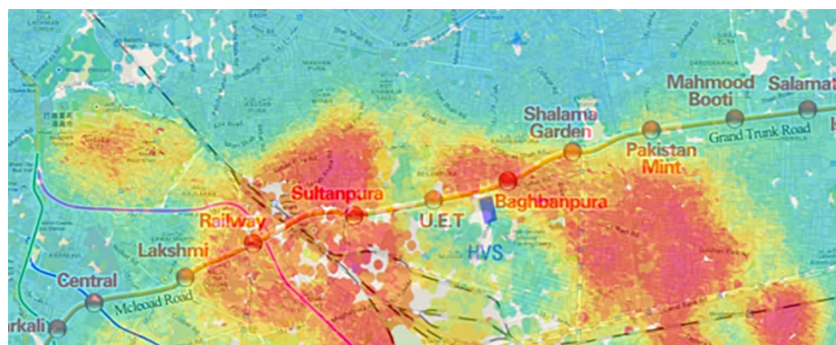


图 3 InSAR(干涉雷达)地面沉降漏斗区监测图

巴基斯坦旁遮普省公共交通局(PMA)选择能够承受的地铁高架区间 MRO 状态等级为 s_3 。根据地铁高架区间 MRO 威胁评价,通过 Delphi 法量化每个单因素。对超静定结构(道岔连续梁等)可能引起的 MRO 威胁, p_1 占 8%、 p_2 占 14%、 p_3 占 25%、 p_4 占 48%、 p_5 占 5%,即 $u_{11} \rightarrow (0.08, 0.14, 0.25, 0.48, 0.05)$ 。同理, $u_{12} \rightarrow (0.03, 0.20, 0.40, 0.33, 0.04)$, $u_{13} \rightarrow (0.11, 0.23, 0.29, 0.32, 0.05)$, $u_{14} \rightarrow (0.08, 0.19, 0.36, 0.30, 0.07)$ 。

于是,地铁高架区间 MRO 威胁评价中结构形式、沉降区域、直(曲)线和主跨跨度的决策矩阵分别为

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \begin{bmatrix} 0.08 & 0.14 & 0.25 & 0.48 & 0.05 \\ 0.03 & 0.20 & 0.40 & 0.33 & 0.04 \\ 0.11 & 0.23 & 0.29 & 0.32 & 0.05 \\ 0.08 & 0.19 & 0.36 & 0.30 & 0.07 \end{bmatrix}; R_2 = \begin{bmatrix} 0.12 & 0.22 & 0.23 & 0.25 & 0.18 \\ 0.10 & 0.17 & 0.32 & 0.28 & 0.13 \\ 0.09 & 0.18 & 0.24 & 0.35 & 0.14 \\ 0.04 & 0.14 & 0.21 & 0.48 & 0.13 \end{bmatrix}; \\
 R_3 &= \begin{bmatrix} 0.22 & 0.25 & 0.33 & 0.11 & 0.09 \\ 0.13 & 0.18 & 0.23 & 0.30 & 0.16 \\ 0.08 & 0.18 & 0.34 & 0.27 & 0.13 \\ 0.04 & 0.10 & 0.16 & 0.42 & 0.18 \end{bmatrix}; R_4 = \begin{bmatrix} 0.18 & 0.22 & 0.30 & 0.18 & 0.12 \\ 0.03 & 0.06 & 0.15 & 0.31 & 0.45 \\ 0.21 & 0.25 & 0.29 & 0.22 & 0.03 \\ 0.26 & 0.27 & 0.20 & 0.23 & 0.04 \end{bmatrix}。
 \end{aligned}$$

根据模糊决策原理,一级决策向量为

$$B_1 = A_1 \circ R_1 \quad (16)$$

$$B_2 = A_2 \circ R_2 \quad (17)$$

$$B_3 = A_3 \circ R_3 \quad (18)$$

$$B_4 = A_4 \circ R_4 \quad (19)$$

得 $B_1 = (0.11, 0.20, 0.25, 0.40, 0.07)$, $B_2 = (0.12, 0.22, 0.24, 0.25, 0.18)$, $B_3 = (0.22, 0.25, 0.30, 0.30, 0.16)$, $B_4 = (0.26, 0.27, 0.25, 0.23, 0.15)$ 。

再根据最大隶属原则,地铁高架区间结构形式威胁水准为 p_1 , 沉降区域威胁水准为 p_4 , 直(曲)线威胁水准为 p_3 (或 p_4), 主跨跨度威胁水准为 p_2 。

$$\text{令 } R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.11 & 0.20 & 0.25 & 0.40 & 0.07 \\ 0.12 & 0.22 & 0.24 & 0.25 & 0.18 \\ 0.22 & 0.25 & 0.30 & 0.30 & 0.16 \\ 0.26 & 0.27 & 0.25 & 0.23 & 0.15 \end{bmatrix}。 \text{ 于是有 } B = A \circ R = (0.20, 0.22, 0.25, 0.25, 0.18)。$$

B 中有 2 个相同的最大分量,无法确定地铁高架区间 MRO 威胁水准。因此,需进一步用系数伸缩变换法修正分量 A 。

因为 $\sum_{i=1}^4 a_i = a_2 = 0.45$, $\sum_{j=1}^5 r_{2j} = r_{24} = 0.25$, 又 r_{2j} 中第 2 大元素为 $r_{23} = 0.24$, 因此,选取 a 为修正系数,使

$$a'_i = a \cdot a_i \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (20)$$

且满足条件

$$r_{23} < a'_4 \leq r_{24} \quad (21)$$

即 $0.24 < 0.45a \leq 0.25$, 得 $0.533 < a \leq 0.556$, 取 $a = 0.55$, 则 $A' = (0.14, 0.25, 0.05, 0.11)$, 于是 $B' = A' \circ R = (0.12, 0.22, 0.24, 0.25, 0.18)$ 。

B' 中最大分量只有 1 个,为有效决策。

根据最大隶属原则,地铁高架区间 MRO 威胁水准为 p_4 。再根据前述巴基斯坦旁遮普省公共交通局(PMA)选择并能够承受的地铁高架区间 MRO 状态等级为 s_3 , 查前表 1, 得到:巴基斯坦拉合尔地面沉降漏斗区内,地铁橙线高架区间 MRO 风险等级为 r_4 , 即地铁全寿命周期内,高架区间安全风险中偏低,可采取比基本北斗监测设备布设方案适当减少北斗监测设备。

5 结语

为保障巴基斯坦第一条地铁拉合尔地铁橙线运维安全,基于 MRO 状态的地铁高架区间安全模糊决策研究主要工作及结论:

(1) 定义基本未受影响、受到轻微影响、受到中等程度影响、受到较严重影响和受到重大影响描述地铁高架区间 MRO 的 5 个状态等级。以结构形式、沉降区域、直(曲)线和主跨跨度构建 MRO 威胁因素

集,将 MRO 威胁评价划分为频繁、可能、偶尔、很少和极少共 5 个水准。

(2)用系数伸缩变换法解决了模糊决策可能的失效问题。构建了基于 MRO 状态的地铁高架区间风险等级矩阵,将风险等级划分为很高、中高、中等、中低和极低共 5 个等级,并搭建了地铁高架区间监测设备布设方案优选流程。

(3)根据巴基斯坦旁遮普省公共交通局(PMA)选择的 MRO 状态目标,运用该方法解决了拉合尔地面沉降漏斗区地铁高架区间监测设备布设方案优选问题,为类似问题研究提供了有益参考。

参 考 文 献

- [1]YANG Yuanxi, LIU Li, LI Jinlong, et al. Featured services and performance of BDS-3[J]. Science Bulletin, 2021, 66: 2135-2143.
- [2]刘桂卫,王长进,李国和,等. 遥感技术在既有铁路地灾防治中应用方法研究[J]. 铁道工程学报, 2019(6): 23-27.
- [3]National Research Council. National earthquake resilience: research, implementation and outreach[R]. Washington DC: The National Academies Press, 2011.
- [4]DEZFULI F H, Li S, ALAME M S, et al. Effect of constitutive models on the seismic response of an SMA-LRB isolated highway bridge[J]. Engineering Structures, 2017, 148(5): 113-125.
- [5]胡明亮. 基于 KDE 的高烈度区典型简支梁桥地震易损性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 198-207.
- [6]国家铁路局. 铁路桥涵混凝土结构设计规范:TB 10092—2017[S]. 北京:中国铁道出版社有限公司, 2017.
- [7]宁晓晴,戴君武. 地震可恢复性与非结构系统性态抗震研究略述[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(3): 85-92.
- [8]程绍革,朱毅秀,杨欣,等. 既有框架性能化抗震鉴定方法研究及工程应用[J]. 工程力学, 2021, 38(8): 154-165.
- [9]ZIEMBA P. NEAT F-PROMETHEE-A new fuzzy multiple criteria decision making method based on the adjustment of mapping trapezoidal fuzzy numbers[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 110: 363-380.
- [10]潘晨,李全旺. 考虑主观风险态度的建筑结构地震风险决策[J]. 土木工程学报, 2018, 51(9): 121-128.

Fuzzy Decision Research on Safety of Elevated Sections of Pakistan Metro Orange Line Based on MRO Status

LIN Hui¹, DONG Jifeng¹, LI Chen^{1,2}, TAN Zidong^{1,2}, MAO Qiyuan^{1,2}

(1. NORINCO International Cooperation Ltd., Beijing 100040, China;
2. Metro Orange Line Operation and Maintenance Joint Venture, Lahore 54792, Pakistan)

Abstract: To monitor the MRO (maintenance, repair, operation) status of the Orange Line elevated section of the Lahore Metro in Pakistan, which is threatened by ground subsidence funnel zone, a fuzzy decision-making problem for the safety of the elevated section of the subway based on the MRO status was studied. The MRO status level and MRO threat level for subway elevated sections, and form a risk level matrix for subway elevated sections based on MRO status were proposed. A MRO threat decision-making model for the elevated section of the subway was constructed to chose the optimization of monitoring equipment layout in the Lahore ground settlement funnel area of the elevated section of the subway, and the coefficient expansion transformation method to avoid possible failure of fuzzy decision-making was used. The research results provide a reference for the safety research of subway elevated sections in the ground subsidence funnel area.

Key words: metro; elevated section; settlement funnel area; performance; fuzzy decision