

文章编号: 1003-1421(2026)08-0030-10

引用格式: 李馨悦, 徐永能. 基于改进投影寻踪的城市轨道交通基础设施韧性评估研究[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(8): 30-39.

LI Xinyue, XU Yongneng. Research on Resilience Assessment of Urban Rail Transit Infrastructure Based on Improved Projection Pursuit[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(8): 30-39.

基于改进投影寻踪的城市轨道交通基础设施 韧性评估研究

李馨悦, 徐永能

(南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 对典型交通基础设施进行韧性分析与评估, 是识别重要设施节点、提高应对突发事件能力的基础。为了解决城市轨道交通基础设施运营时间长、设备老化加快、安全隐患较多等问题, 从基础设施的结构特点、故障模式出发, 建立故障树模型分析设施失效机理及概率, 识别关键故障模式。从抵抗能力、恢复能力、适应能力3个方面分析韧性影响因素, 以此为依据构建韧性评估指标体系, 并利用改进粒子群优化的投影寻踪评价算法, 评估典型城市轨道交通基础设施的韧性等级, 并根据最佳投影方向判断脆弱指标。以南京地铁2号线为例进行验证, 结果表明, 40%的车站韧性水平较高, 韧性等级达到Ⅳ级, 45%的车站韧性水平中等, 其余15%的车站韧性水平较低, 针对脆弱指标所提出维护策略能够为城市轨道交通基础设施的韧性提升提供有效参考。

关键词: 城市轨道交通; 基础设施; 韧性评估; 投影寻踪模型; 粒子群优化算法

中图分类号: U279.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251114003

Research on Resilience Assessment of Urban Rail Transit Infrastructure Based on Improved Projection Pursuit

LI Xinyue, XU Yongneng

(School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: Conducting resilience analysis and assessment of typical transportation infrastructure is the foundation for identifying critical facility nodes and enhancing the ability to respond to emergencies. To solve the problems of long operating time, accelerated equipment aging, and numerous safety hazards in urban rail transit infrastructure, starting from the structural characteristics and failure modes of the infrastructure, a fault tree model was established to analyze the failure mechanisms and probabilities of the facilities and identify the critical failure modes. The influencing factors of resilience were analyzed from three aspects: resistance, recovery, and adaptability, and based on this, a resilience assessment indicator system was constructed. The resilience levels of typical urban rail transit infrastructure were assessed using a projection pursuit evaluation algorithm based on improved particle swarm optimization, and vulnerable indicators were determined based on the optimal projection direction. Nanjing Metro Line 2 was taken as an example for verification. The results show that 40% of the stations have a high resilience level, reaching Grade IV; 45% of the

收稿日期: 2025-11-14 修订日期: 2026-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52072214); 国家重点研发计划项目(2021YFE0194600)

stations have a moderate resilience level; the remaining 15% of the stations have a low resilience level. The maintenance strategies proposed for the vulnerable indicators can provide an effective reference for improving the resilience of urban rail transit infrastructure.

Keywords: Urban Rail Transit; Infrastructure; Resilience Assessment; Projection Pursuit Model; Particle Swarm Optimization Algorithm

0 引言

随着城市化进程加快,城市轨道交通(以下简称“城轨”)已成为缓解拥堵、保障出行的重要方式。极端天气、蓄意破坏、客流高密度及设施老化等因素影响城轨安全稳定运行,并加重运维成本^[1-2]。因此,开展城轨基础设施韧性分析与评估,识别关键影响因素、判定韧性等级并提出提升策略,对增强系统抗风险能力和保障安全运营具有重要意义。

现有研究主要聚焦于城轨基础设施的韧性分析和恢复策略研究等方面^[3-4],如Xu等^[5]采用了一种两阶段方法,第1阶段重点对故障发生前的网络拓扑结构进行强化处理,第2阶段则着重优化故障发生后的应急恢复流程,仿真结果表明,该方法能够有效识别出网络中的脆弱节点。Hou等^[6]提出了地震脆弱性模型,计算车站、隧道、桥梁等基础设施的破坏概率,基于地震后城轨网络运行数据的动态变化特征分析了结构的可靠程度。类似地,闫绪嫻等^[7]提出了一种基于贝叶斯网络的地铁水灾风险评估方法,从预防阶段、应急响应阶段和灾后重建阶段3个层面,给出地铁防洪减灾的具体措施建议。为了提高风险评估的准确性,Liu等^[8]提出了一种基于量子粒子群优化改进的投影寻踪模型,对影响车站恢复能力的多个指标数据进行处理,实例研究结果表明,该方法能够有效筛选出关键指标以及每个车站的韧性水平。

现有研究多聚焦交通网络韧性评估与恢复策略,对城轨关键基础设施结构特性和故障模式刻画不足,且较少揭示内部故障、运营管理与外部扰动的耦合关系,评价过程仍依赖经验判断。为此,基于故障树分析法(FTA)分析城轨基础设施韧性影响因素,构建评估指标体系,并采用基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)的投影寻踪(Projection Pursuit, PP)方法评价典型城轨基础设施韧性水平,提出提升建议。

1 问题描述

1.1 城轨基础设施韧性特点

城轨基础设施韧性是指在面对自然灾害、事故、恐怖袭击等突发事件时,系统能够承受冲击、适应变化并迅速恢复的能力。城轨基础设施韧性曲线如图1所示,展现了系统受到扰动后的变化过程,新形成的状态可能与原状态不同^[9]。

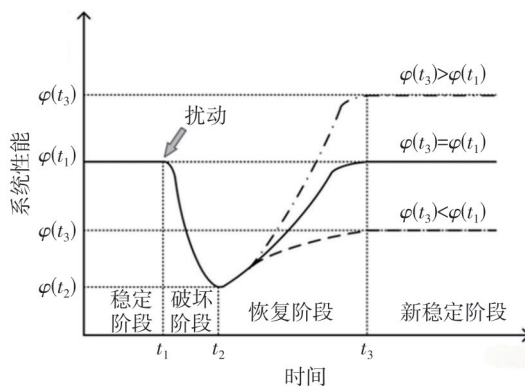


图1 城轨基础设施韧性曲线

Fig.1 Resilience curve of urban rail transit infrastructure

1.2 城轨基础设施故障分析

故障树分析法是从系统角度出发,采取逻辑推理方式,从表象到本质、由上至下按树形结构逐级追溯并得到逻辑图,进而得到导致故障发生的所有可能原因及其发生概率^[10]。故障树分析方法主要涉及两方面的内容:首先是定性研究,通过逻辑运算找出能够引起顶事件出现的最小割集;其次是定量计算,利用基础事件的故障率评估顶事件发生的可能性。在进行此类分析时通常假定以下前提条件^[11]:①各事件具有独立性;②事件状态仅存在正常与失效2种情况;③事件间的逻辑关联通过布尔门电路来表征。

以“城轨基础设施失效”为顶事件,结合失效机理和常见故障模式,采用逻辑与门和或门构建城轨基础设施故障树模型如图2所示。城轨基础设施故障树事件编号及含义如表1所示。

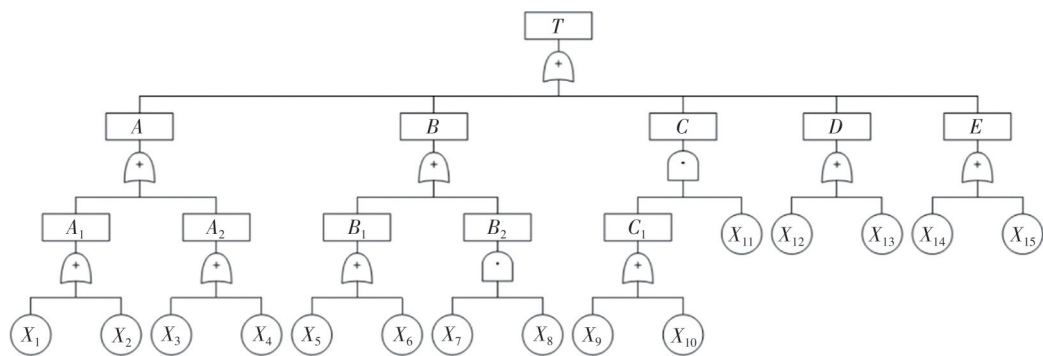


图2 城轨基础设施故障树模型

Fig.2 Fault tree model of urban rail transit infrastructure

表1 城轨基础设施故障树事件编号及含义

Tab.1 Event numbers and meanings of fault tree of urban rail transit infrastructure

编号	含义	编号	含义
T	城轨基础设施失效	X ₃	地基不稳
A	轨道结构问题	X ₄	地下水位变化
B	电力系统故障	X ₅	外部电网故障
C	信号系统故障	X ₆	内部线路故障
D	车辆系统故障	X ₇	设备老化
E	环境与人为因素	X ₈	设备过载/过热
A ₁	轨道断裂	X ₉	通信线路故障
A ₂	轨道沉降	X ₁₀	信号设备故障
B ₁	供电中断	X ₁₁	信号显示错误
B ₂	电力设备损坏	X ₁₂	车辆自身故障
C ₁	信号传输中断	X ₁₃	碰撞事故
X ₁	材料老化或疲劳	X ₁₄	自然灾害
X ₂	超负荷运行	X ₁₅	军事打击

经过上述分析，得到该故障树的最小割集为： $\{X_1\}$, $\{X_2\}$, $\{X_3\}$, $\{X_4\}$, $\{X_5\}$, $\{X_6\}$, $\{X_7, X_8\}$, $\{X_9, X_{11}\}$, $\{X_{10}, X_{11}\}$, $\{X_{12}\}$, $\{X_{13}\}$, $\{X_{14}\}$, $\{X_{15}\}$ ，故该故障树的结构函数如下所示。

$$T = \bigcup_{j=1}^k Q_j = \bigcup_{j=1}^k \bigcap_{i \in \Omega_j} X_i \quad (1)$$

式中： Q_j 为最小割集； $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为输入事件。

相同时间下 15 个底事件的相对发生概率分别为：1.46%，1.17%，0.15%，0.73%，0.88%，0.44%，3.80%，2.34%，11.09%，18.25%，15.33%，42.48%，1.02%，0.58%，0.29%。由于最小割集为独立事件，可进一步求出顶事件概率为 48.53%。顶事件概率如下所示。

$$P(T) = P(Q_1 + Q_2 + \dots + Q_k) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - P(Q_k)] \quad (2)$$

此外，底事件概率重要度反映了各基本事件对

顶事件发生概率的影响程度，其表达式如下所示。

$$I_i = \frac{\partial(P_T)}{\partial(P_i)} \quad (3)$$

经计算得到底事件概率重要度如图 3 所示。

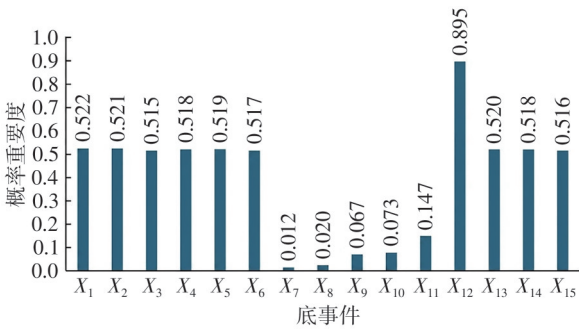


图3 底事件概率重要度

Fig.3 Probabilistic importance of bottom events

在底事件相互独立、故障率为静态常数的假设下， X_{12} (车辆自身故障)对顶事件的概率贡献最大，应作为关键风险源重点管控。需要指出的是， X_7 (设备老化)在概率重要度排序中相对靠后，并不意味着其在工程实践中不重要，因为其在故障树中以与门形式进入最小割集 $\{X_7, X_8\}$ ，单独发生不足以触发顶事件，从而在“直接概率贡献”指标下被低估。实际上，设备老化具有长期累积性与共因性，往往会提高过载/过热、线路故障、信号设备故障等多类失效的发生概率，并可能引发级联扩散，导致更大范围的功能退化。因此，工程上仍应将设备老化视为关键的慢变量风险源，通过状态监测、预防性维护与更新改造等措施进行优先治理。

1.3 韧性评估指标体系

车站作为城轨典型基础设施，是连接不同线路的节点，是实现乘客换乘的关键场所，同时也是城

市中人流量高度集中的地方。作为交通网络规划与运营的重要组成部分，地铁站的建设及运营管理至关重要。基于此，以地铁站为核心分析对象，从韧性特性的3个层面，即抗干扰能力、快速恢复能力和动态适应能力出发，分析影响韧性的关键因素，进而构建韧性评价体系。

结合生态学和灾害理论中的定义，车站的抵抗能力表示其在受到外部事件冲击时，能够保障车站结构安全 and 功能持续性的能力^[12]；恢复能力表示其在受到外界破坏后，能够快速回到原来的运营状态的性能表现^[13]；适应能力表示其在面对外界冲击和内部变化时，能够通过自我修复和组织来调整自身结构及运营策略，以持续提供安全、可靠服务的能力^[14]。车站韧性影响因素分析如表2所示。

基于表2中对车站韧性影响因素的分析，构建三级韧性评估指标体系，共13个指标，用 H_1 — H_{13}

表示。城轨车站韧性评估指标体系如图4所示。其中，站点附近卫生人员数的统计单位为“千人”；所在区域公共预算的统计单位为“亿元”；所在区域平均生产总值的统计单位为“百亿元”。

2 模型建立

投影寻踪技术是一种处理多维数据的非参数统计手段，其核心思想是将高维信息映射到低维子空间，依靠最优投影向量来揭示数据特性，特别适用于非正态分布的高维数据集。该方法不仅能有效提取数据特征，还能依据分类标准对研究对象进行等级划分^[15]。在优化过程中，运用改进PSO算法搜索投影向量，以提高模型的实用性能。所建立的基于改进PSO算法的投影寻踪等级评价模型如图5所示。

步骤1：将城轨车站韧性水平划分为由低到高5个等级，分别用I—V表示，并确定各韧性评估指

表2 车站韧性影响因素分析
Tab.2 Analysis of influencing factors of station resilience

维度	韧性影响因素	含义
抵抗能力	结构安全因素	车站结构的抗震、耐火等性能是否达到标准
	设施设备可靠性	如设备故障率、保养状况，是否有备品备件
	防灾减灾能力	防洪、防火、防震等措施及管理制度是否完善
恢复能力	外部协作因素	与消防、医疗、公安等部门的联动协调能力
	社会经济因素	政府对车站韧性的资金投入是否充足
	环境人为因素	车站所处的地理环境、极端天气、军事战争等影响
适应能力	应急疏散能力	疏散通道的设置、紧急出口的分布是否合理
	客流组织能力	如高峰期客流疏散、应急事件下的客流控制能力
	运营管理因素	应急预案的制定，以及员工的实际操作能力

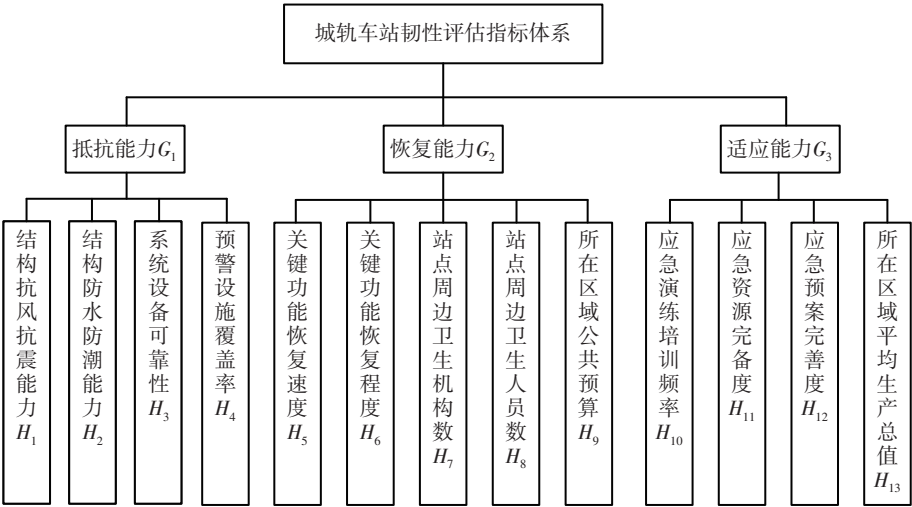


图4 城轨车站韧性评估指标体系
Fig.4 Resilience assessment indicator system for urban rail transit stations

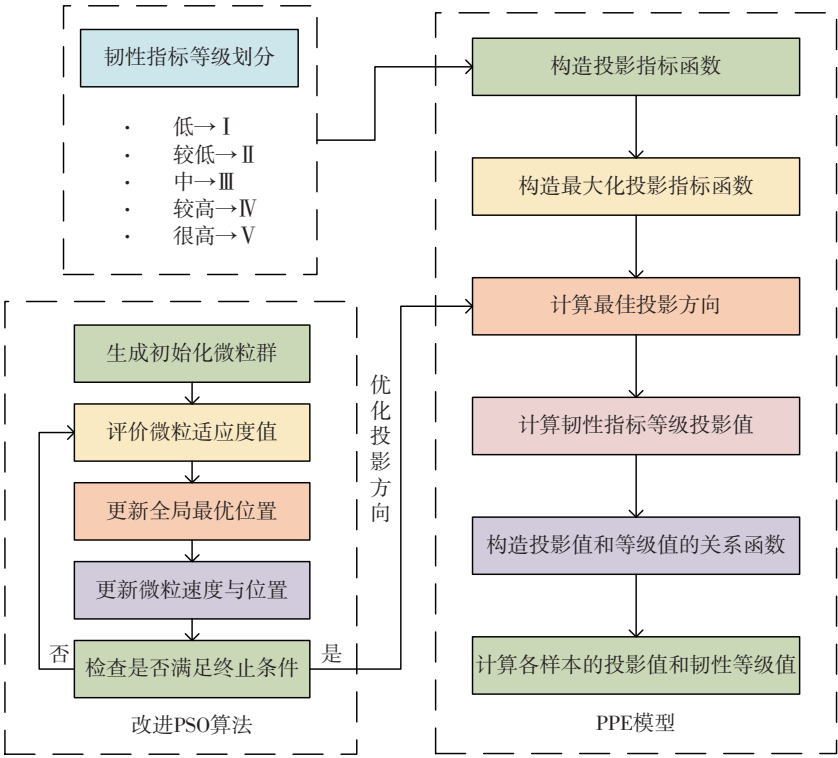


图5 基于改进 PSO 算法的投影寻踪等级评价模型
Fig.5 Projection pursuit grade evaluation model based on improved PSO algorithm

标对应不同等级的取值范围。

步骤2：分别建立韧性评估指标与车站样本的投影指标函数，再得到最大化的投影目标函数。

步骤3：采用改进 PSO 算法逐步搜索出最佳投影方向，可得到韧性评价指标的分级投影值，利用曲线拟合技术建立分级投影值与实际值之间的数学模型。

步骤4：将各站点的韧性投影值输入到模型中，即可得到不同站点的韧性等级评定结果。

3 模型算法设计

3.1 输入数据预处理

韧性指标等级划分标准如表 3 所示，采用统计

表 3 韧性指标等级划分标准
Tab.3 Classification standards of resilience indicator grades

维度	指标	韧性等级				
		I	II	III	IV	V
抵抗能力	H_1	弱	较弱	一般	强	较强
	H_2	弱	较弱	一般	强	较强
	H_3	低	较低	一般	高	较高
	H_4	[0, 20)	[20, 40)	[40, 50)	[50, 70)	[70, 80]
恢复能力	H_5	慢	较慢	一般	较快	很快
	H_6	低	较低	一般	较高	很高
	H_7	[0, 76)	[76, 153)	[153, 278)	[278, 652)	[652, 777]
	H_8	[0, 1.7)	[1.7, 3.4)	[3.4, 12.9)	[12.9, 22.4)	[22.4, 31.9]
	H_9	[0, 22.89)	[22.89, 45.78)	[45.78, 77.22)	[77.22, 171.52)	[171.52, 202.96]
适应能力	H_{10}	5年一次	4年一次	3年一次	2年一次	每年一次
	H_{11}	不完备	较不完备	一般	较完备	很完备
	H_{12}	不完善	较不完善	一般	较完善	很完善
	H_{13}	[0, 2.56)	[2.56, 5.12)	[5.12, 10.1)	[10.1, 25.03)	[25.03, 30]

年鉴数据对定量指标进行区间划分，并运用“强弱”“高低”等评判术语对不同韧性等级下的定性指标进行描述性评估。根据2024年南京统计年鉴，查找定量指标相关数据的最小值与最大值，在二者之间划分3个区间段分别对应韧性等级Ⅲ—Ⅴ的数值区间，将0到最小值之间的范围均分成2部分，分别作为韧性等级Ⅰ和Ⅱ的数值区间。

针对其余定性指标，采用专家评分法，获取站点层评价价值。邀请专家共20名，均具备城轨规划、车站土建与机电运维、应急管理等相关从业或研究经历，其中运营管理类、设备运维类、土建结构类、应急管理类各5人。以南京地铁2号线为例，评分对象为该线路上的20个站点及对应定性指标条目。采用1~5分李克特量表，分别对应“Ⅰ—Ⅴ级”韧性标准中的描述性术语进行量化映射。评分时向专家提供统一的指标释义、站点基础信息与打分示例，确保评分口径一致。

采用Delphi两轮咨询：第一轮独立评分并收集意见；第二轮向专家反馈各指标的群体统计量(如均值、标准差)及分歧项提示，专家可在知悉群体

意见后对分歧较大的条目进行复评。若第二轮仍存在明显分歧，则对该条目组织补充讨论或引入第三轮复评，直至分歧收敛。

为保证定性指标的可信度，对专家评分结果进行一致性检验：Kendall协同系数W检验用于评价专家排序一致性，若显著性检验 $p<0.05$ 且W达到可接受水平，认为专家意见具有较好一致性；同时计算组内相关系数(ICC)衡量评分可靠性，ICC值达到中高水平则认为量表内部一致性良好。对通过一致性检验的评分结果，按站点—指标维度计算均值作为最终得分；为降低个别极端值影响，将去掉最高分与最低分后的均值作为稳健估计。

最终得到南京地铁2号线车站韧性指标评估数据如表4所示。

3.2 投影寻踪等级评价法

设评价样本指标集为： $\{x^*(i, j)|i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$ ，其中*i*表示样本，*j*表示指标， $x^*(i, j)$ 为评价值。所选取的指标均为正向指标，采取极值归一化处理，如下所示，以消除指标量纲。

表4 南京地铁2号线车站韧性指标评估数据
Tab.4 Assessment data of resilience indicators for stations on Nanjing Metro Line 2

序号	韧性评估指标												
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9	H_{10}	H_{11}	H_{12}	H_{13}
1	4	4	4	59.2	4	4	209	3.41	81.61	5	5	5	10.40
2	5	4	4	56.8	4	4	209	3.41	81.61	4	4	4	10.40
3	5	4	4	58.7	3	4	209	3.41	81.61	5	5	5	10.40
4	5	4	4	57.8	4	4	259	6.72	159.70	4	4	4	12.50
5	5	4	4	56.2	4	4	259	6.72	159.70	4	4	4	12.50
6	5	4	4	58.6	4	4	259	6.72	159.70	4	4	4	12.50
7	5	4	4	57.0	4	4	259	6.72	159.70	4	4	4	12.50
8	5	4	4	56.5	4	4	259	6.72	159.70	4	4	4	12.50
9	5	4	4	57.1	3	4	444	31.66	174.18	4	4	4	19.54
10	5	4	4	56.8	4	4	444	31.66	174.18	4	4	4	19.54
11	5	4	4	65.9	5	4	467	18.68	109.13	5	4	5	14.01
12	5	4	4	64.3	5	4	467	18.68	109.13	5	4	5	14.01
13	5	4	4	57.1	3	4	467	18.68	109.13	4	4	4	14.01
14	5	4	4	56.8	4	4	467	18.68	109.13	4	4	4	14.01
15	5	4	4	53.9	4	4	467	18.68	109.13	4	4	4	14.01
16	5	4	4	58.7	4	4	230	7.91	85.10	4	4	4	12.31
17	5	4	4	57.2	4	4	230	7.91	85.10	4	4	4	12.31
18	5	4	4	56.1	4	4	230	7.91	85.10	4	4	4	12.31
19	3	5	4	66.3	5	4	230	7.91	85.10	5	5	5	12.31
20	4	4	4	60.0	4	4	230	7.91	85.10	5	5	5	12.31

$$x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(i, j)}{x_{\max}(i, j) - x_{\min}(i, j)} \quad (4)$$

将 n 维数据 $\{x(i, j) | j = 1, 2, \dots, n\}$ 转换成以 $\mathbf{a} = \{a(1), a(2), \dots, a(n)\}$ 为投影方向的一维投影值 $Z(i)$, 其公式如下所示。

$$Z(i) = \sum_{j=1}^n \mathbf{a}(j)x(i, j) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中: $\mathbf{a}$ 为投影方向的单位长度向量。

然后根据 $\{Z(i) | i = 1, 2, \dots, m\}$ 的一维散布点图进行分类。投影指标函数如下所示。

$$Q(\mathbf{a}) = S_Z D_Z \quad (6)$$

式中: S_Z 为标准差; D_Z 为局部密度。

S_Z 和 D_Z 计算公式如下所示。

$$S_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [Z(i) - E(Z)]^2}{m - 1}} \quad (7)$$

$$D_Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [R - r(i, j)] \cdot U[R - r(i, j)] \quad (8)$$

式中: $E(Z)$ 为序列 $\{Z(i) | i = 1, 2, \dots, m\}$ 的期望值; $r(i, j)$ 表示样本之间的距离, 且 $r(i, j) = |Z(i) - Z(j)|$; $U(t)$ 为一单位阶越函数; R 为局部密度的窗口半径。

投影指标函数的最值问题转化为公式(9)–(10)

$$\max Q(\mathbf{a}) = S_Z \cdot D_Z \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^n \mathbf{a}(j)^2 = 1 \quad (10)$$

通过建立最优投影向量与分级指标之间的映射关系, 对待测数据进行归一化处理后提取投影特征, 利用该映射关系计算出样本的分级数值, 进而实现等级划分。

3.3 改进 PSO 算法

为增强传统 PSO 算法在高维韧性评价问题中的全局搜索能力与稳定性^[16], 在惯性权重与学习因子等层面进行了如下改进。①动态惯性权重机制: 传统 PSO 采用固定权重, 易在早期陷入局部最优, 通过引入基于目标函数变化率的自适应更新策略, 使惯性权重随适应度值动态调整, 兼顾全局搜索与局部收敛能力。②变学习因子策略: 针对传统 PSO 后期粒子聚集问题, 采用随迭代次数衰减的学习因子, 使个体学习能力逐步增强, 从而提高搜索精度。③混合扰动更新机制: 在迭代过程中引入随机扰动项, 防止粒子陷入平衡态, 保证种群多样性。

改进后的惯性权重表达式如下所示。

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot (f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}} & f \leq f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max} & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ω 为惯性权重值; f 为粒子的目标函数值。

4 结果分析

4.1 车站韧性等级评估

以南京地铁 2 号线为研究对象, 选取油坊桥站至金马路站共 20 个站点进行定性与定量相结合的韧性分析与评估, 计算出各车站的韧性等级并判断关键站点, 给出韧性提升策略建议。

设置粒子群规模为 100, 惯性权重上限取 0.9, 下限取 0.6, 2 个学习因子均设置为 2, 最大进化 600 代, 独立实验次数定为 30 轮。实验数据显示, 在第 8 轮测试中获得了最优的投影目标函数值, 同时算法约在第 20 代时达到收敛状态, 适应度曲线趋于平稳, 这表明该算法具有良好的收敛特性和优化性能。特别地, 在第 8 次实验时, 各韧性评价指标对应的投影目标函数最优值达到 9.0817, 且最佳投影方向 $\mathbf{a}^* = (0.293 \ 0, 0.293 \ 0, 0.293 \ 0, 0.305 \ 1, 0.293 \ 0, 0.293 \ 0, 0.235 \ 1, 0.232 \ 0, 0.241 \ 1, 0.293 \ 0, 0.293 \ 0, 0.293 \ 0, 0.229 \ 5)$, 进而得到韧性等级的投影值 $Z(i)^* = (0, 0.774 \ 6, 1.584 \ 8, 2.584 \ 7, 3.587 \ 2)$ 。经曲线拟合, 得到韧性等级投影值与真实值的关系图如图 6 所示, 函数式如下所示。

$$Y^* = 0.012 \ 5(Z^*)^3 - 0.130 \ 6(Z^*)^2 + 1.423 \ 3(Z^*) + 0.993 \ 4 \quad R^2 = 0.999 \ 8 \quad (12)$$

同样地, 将车站韧性指标数据输入到模型中,

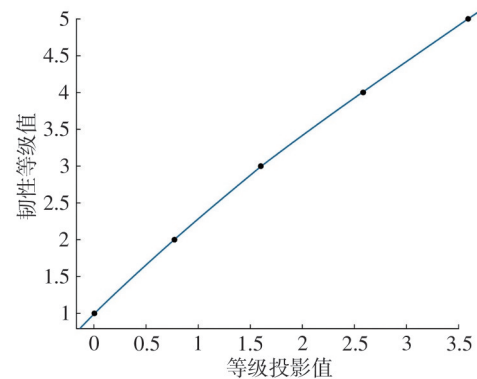


图6 韧性等级投影值与真实值的关系图

Fig.6 Relationship diagram between projected values and real values of resilience grades

设置和前面相同的参数并进行测算。结果显示，在第10次计算中，投影目标函数达到峰值，而适应度值则在第30代迭代后基本保持平稳，最佳投影方向 $\alpha'=(0.476\ 9, 0.036\ 1, 0.473\ 6, 0.120\ 1, 0.200\ 7, 0.472\ 5, 0.304\ 7, 0.222\ 3, 0.278\ 4, 0.016\ 9, 0.056\ 1, 0.016\ 9, 0.213\ 4)$ ，计算出各个车站的韧性投影数值 $Z(i)'$ ，并进一步确定了相应的韧性等级 $Y(i)'$ ，与既定的韧性评价标准进行对比，最终明确了各车站的具体韧性等级。南京地铁2号线车站韧性等级排序结果如表5所示。

表5 南京地铁2号线车站韧性等级排序结果
Tab.5 Ranking results of resilience grades for stations on Nanjing Metro Line 2

车站	投影值 $Z(i)'$	排序	等级计算值 $Y(i)'$	韧性等级
油坊桥站	0.990 3	19	2.287 0	Ⅱ
雨润大街站	1.701 4	16	3.098 5	Ⅲ
元通站	1.123 6	18	2.445 5	Ⅱ
奥体东站	2.080 1	8	3.501 4	Ⅳ
兴隆大街站	2.064 6	11	3.485 2	Ⅲ
集庆门大街站	2.087 8	7	3.509 5	Ⅳ
云锦路站	2.072 3	9	3.493 3	Ⅲ
莫愁湖站	2.067 5	10	3.488 3	Ⅲ
汉中门站	2.595 6	2	4.026 4	Ⅳ
上海路站	2.693 0	1	4.123 3	Ⅳ
新街口站	2.042 1	12	3.461 7	Ⅲ
大行宫站	2.500 1	3	3.930 8	Ⅳ
西安门站	2.195 9	6	3.621 4	Ⅳ
明故宫站	2.293 3	4	3.721 4	Ⅳ
苜蓿园站	2.265 3	5	3.692 7	Ⅳ
下马坊站	1.835 1	13	3.242 8	Ⅲ
孝陵卫站	1.820 6	14	3.227 2	Ⅲ
钟灵街站	1.809 9	15	3.215 8	Ⅲ
马群站	0.527 6	20	1.709 8	Ⅱ
金马路站	1.586 9	17	2.973 1	Ⅲ

由表5可知，奥体东站、集庆门大街站、汉中门站、上海路站、大行宫站、西安门站、明故宫站、苜蓿园站韧性等级为Ⅳ级；雨润大街站、兴隆大街站、云锦路站、莫愁湖站、新街口站、下马坊站、孝陵卫站、钟灵街站、金马路站韧性等级为Ⅲ级；油坊桥站、元通站、马群站韧性等级为Ⅱ级。

从韧性影响因素的计算结果及现场条件分析可知，马群站韧性水平最低，主要原因在于其所处区段地质条件复杂、周边地表水系及交通干扰较大，站点结构设计年代较早，设备系统相对老化，部分

关键子系统冗余度低，在极端工况下的抗扰动与恢复能力均偏弱。相比之下，上海路站韧性水平最高，主要得益于其位于市中心核心区段，结构抗震与防涝标准较高，建成时间较晚，采用了新型防灾设计与高标准材料；同时，其安全监测、应急联动和客流疏导系统完善，日常维护频率高、响应机制成熟，具备较强的抗冲击和快速恢复能力。这与实际运营表现基本一致。

综合来看，韧性等级排序能较好反映不同车站在结构抗扰、系统冗余、应急响应与环境适应等方面的综合差异，也验证了改进投影寻踪模型的合理性。

4.2 算法性能对比分析

为验证改进PSO算法在韧性等级评价中的有效性，将其与传统PSO算法、遗传算法(GA)、差分进化算法(DE)以及鲸鱼优化算法(WOA)进行了对比实验。各算法均在相同数据集、参数规模(种群数100、最大迭代600次)及评价函数条件下独立运行30次，比较其在收敛速度、最优适应度值与稳定性3方面的表现，不同优化算法的性能对比如表6所示。

表6 不同优化算法的性能对比
Tab.6 Performance comparison of different optimization algorithms

算法	收敛迭代次数	最优适应度值	稳定性方差
改进 PSO	30	9.08	0.05
传统 PSO	45	8.12	0.12
GA	60	7.95	0.15
DE	55	8.05	0.10
WOA	52	8.22	0.08

从表6可见，改进PSO算法在各项指标上均表现最佳，收敛速度较传统PSO提升约33%，明显减少了迭代次数；最优适应度值为9.08，表明模型在投影方向寻优上获得了更高质量的结果；稳定性方差最低，仅为0.05，说明算法在多次运行中结果波动最小，表现出良好的全局搜索能力与抗局部最优能力。与GA，DE，WOA等算法相比，改进PSO在收敛精度与稳定性上均占优，尤其在复杂投影目标函数优化中展现出更强的适应性。

4.3 韧性提升策略

韧性指标最佳投影方向的雷达图如图7所示。可以看出，各指标的投影权值存在显著差异且分布

不均。其中指标 H_1 , H_3 , H_6 对车站韧性水平的影响程度最大, 需要重点关注; 指标 H_2 , H_{10} , H_{12} 的影响相对较弱, 表明这些因素并非制约车站韧性提升的关键要素。

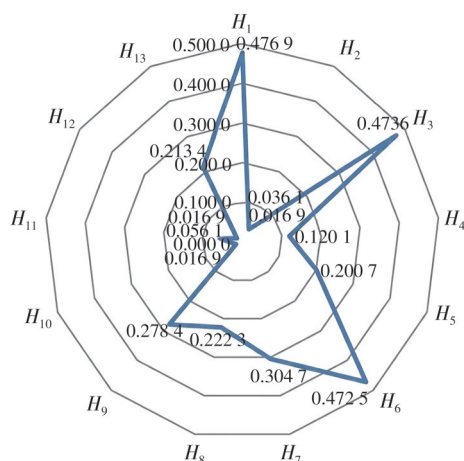


图7 韧性指标最佳投影方向的雷达图

Fig.7 Radar diagram of optimal projection direction of resilience indicators

对于指标 H_1 (结构抗风抗震能力), 在设计前加强地质勘察与评估, 根据地区特点优化设计规范, 可以采用前沿的防风抗震工艺与建材, 例如运用立体空间钢构与钢筋砼复合结构体系, 有效改进结构强度与抗震性能。此外, 要定期检查结构的损伤和性能退化情况, 制定合理的维护和加固计划, 减少故障的发生。

对于指标 H_3 (系统设备可靠性), 在设计时应考虑到设备的冗余性, 从设计、制造、维护、管理等多方面入手, 建议对备品备件实施系统化的库存管理制度, 并建立严格的质量监管机制。同时, 推行预防为主、预检结合的维护策略, 通过定期巡检掌握设备运行状况, 适时更新易损零部件, 保障设备持续稳定运行。

对于指标 H_6 (关键功能恢复程度), 制定韧性规划, 明确恢复优先级, 并建立优质的紧急修复队伍, 进行紧急修复技能培训。此外, 与政府、救援机构、供应商和社区建立协同机制, 确保在紧急情况下可以快速协调资源和支持, 并实施跨部门的信息共享和协调指挥。

5 结论

在深入剖析韧性理论基础上, 对城轨基础设施

的故障模式、失效规律展开分析, 以地铁车站作为典型案例, 评估韧性水平等级, 主要结论如下。

(1) 通过故障树模型求解最小割集, 计算出顶事件发生概率与底事件概率重要度, 识别了高风险设备及其关键故障模式, 其中“车辆自身故障”的概率重要度最高, 为0.895。

(2) 在统计的20个车站中, 40%的车站韧性等级为Ⅳ级, 基础故障不影响正常运营, 45%的车站韧性水平中等, 其余车站韧性等级为Ⅱ级, 一旦损毁对整个交通网络的影响较大。

(3) 在所有韧性指标中, 结构抗风抗震能力、系统设备可靠性以及关键功能恢复程度这3个韧性指标为车站韧性提升的关键因素, 后续需要重点关注。

参考文献:

- [1] 肖红, 刘书君, 王孝坤. 突发事件下地铁网络韧性评估及恢复策略研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(2): 161-171.
XIAO Hong, LIU Shujun, WANG Xiaokun. Resilience Assessment and Recovery Strategy of Metro Network under Emergencies[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(2): 161-171.
- [2] 赵有明, 张格明, 凌烈鹏, 等. 朔黄铁路基础设施智能运维系统研发与应用[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(11): 1-10.
ZHAO Youming, ZHANG Geming, LING Liepeng, et al. Development and Application of Infrastructure Intelligent Operation and Maintenance System for Shuohuang Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(11): 1-10.
- [3] 黄博亚, 龚华凤, 张潇丹, 等. 山地城市交通关键基础设施韧性风险评价体系研究[J]. 城市道桥与防洪, 2025(2): 11-16.
HUANG Boya, GONG Huafeng, ZHANG Xiaodan, et al. Study on Resilience Risk Assessment System of Critical Infrastructure for Transportation in Mountainous Cities[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2025(2): 11-16.
- [4] 吴鹏, 李得伟, 戴智丞. 基于时间最短路径的轨道交通网络冗余性关键站点识别方法[J]. 都市快轨交通, 2025, 38(2): 157-163.
WU Peng, LI Dewei, DAI Zhicheng. Identification of Critical Stations Based on Time Redundancy in Rail Transit Networks Using Shortest Path Analysis[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2025, 38(2): 157-163.
- [5] XU C, XU X. A Two-Stage Resilience Promotion Approach for Urban Rail Transit Networks Based on Topology

- Enhancement and Recovery Optimization[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2024, 635.
- [6] HOU B, YOU D, FAN S, et al. Seismic Resilience Evaluation of Urban Rail Transit Network Based on Network Efficiency[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 64(3): 509–519.
- [7] 闫绪娴, 王俊丽, 范 玲, 等. 韧性城市视角下地铁洪涝灾害风险分析: 基于Bow-Tie-贝叶斯网络模型[J]. *灾害学*, 2022, 37(2): 36–43.
- YAN Xuxian, WANG Junli, FAN Ling, et al. Research on Subway Flood Disaster from the Perspective of Resilient City-Based on Bow-Tie-Bayesian Network Model[J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(2): 36–43.
- [8] LIU L J, WU H, WANG J, et al. Research on the Evaluation of the Resilience of Subway Station Projects to Waterlogging Disasters Based on the Projection Pursuit Model[J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2020, 17(6): 7302–7331.
- [9] 刘婧蕾, 彭其渊, 陈锦渠. 基于贝叶斯网络的区域多制式轨道交通网络韧性评估[J]. *铁道运输与经济*, 2025, 47(3): 151–160.
- LIU Jinglei, PENG Qiyuan, CHEN Jinqu. Resilience Assessment of a Regional Multi-Modal Rail Transit Network Based on Bayesian Network[J]. *Railway Transport and Economy*, 2025, 47(3): 151–160.
- [10] 唐兆鑫, 朱昌锋, 安 醇, 等. 考虑韧性影响的地铁网络承载特性研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2025, 22(6): 2504–2517.
- TANG Zhaoxin, ZHU Changfeng, AN Chun, et al. A Study on the Load-Carrying Characteristics of Metro Networks Considering the Effects of Resilience[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2025, 22(6): 2504–2517.
- [11] 董云逸, 邢科家, 姚宇峰. 编组站综合自动化系统联调联试行车安全风险评价[J]. *铁道运输与经济*, 2019, 41(12): 82–89, 96.
- DONG Yunyi, XING Kejia, YAO Yufeng. The Evaluation on the Traffic Safety Risk of SAM Joint Commissioning and Testing[J]. *Railway Transport and Economy*, 2019, 41(12): 82–89, 96.
- [12] 徐玉萍, 侯明超. 地铁网络中断下韧性评估及修复策略[J]. *铁道运输与经济*, 2024, 46(6): 198–206, 214.
- XU Yuping, HOU Mingchao. Resilience Evaluation and Restoration Strategy for Interrupted Metro Network[J]. *Railway Transport and Economy*, 2024, 46(6): 198–206, 214.
- [13] 雷 崇, 孙 波, 张东明. 基于易损性分析的地铁车站抗震韧性评价方法[J]. *铁道工程学报*, 2024, 41(10): 117–126.
- LEI Chong, SUN Bo, ZHANG Dongming. A Method for Evaluating the Seismic Resilience of Subway Stations Based on Vulnerability Analysis[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2024, 41(10): 117–126.
- [14] 李子瞳, 杨 勇, 张力丰, 等. 基于多维度韧性评估的地铁枢纽瓶颈识别[J]. *铁道运输与经济*, 2026, 48(2): 130–141.
- LI Zitong, YANG Yong, ZHANG Lifeng, et al. Identifying Bottlenecks in Metro Hubs Based on a Multidimensional Resilience Assessment[J]. *Railway Transport and Economy*, 2026, 48(2): 130–141.
- [15] 张志清, 宋 欣, 付金秀. 基于投影寻踪法的城市道路横断面评价方法[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(12): 41–47, 93.
- ZHANG Zhiqing, SONG Xin, FU Jinxiu. Evaluation Method of Urban Road Cross-Section Based on Projection Pursuit Method[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2022, 41(12): 41–47, 93.
- [16] 李一楠, 何之煜, 刘雅晴, 等. 基于PSO算法的高速铁路列控车载设备可靠性优化研究[J]. *铁道运输与经济*, 2023, 45(10): 156–162.
- LI Yinan, HE Zhiyu, LIU Yaqing, et al. Research on Reliability Optimization of Train Control On-Board Equipment for High Speed Railways Based on PSO Algorithm[J]. *Railway Transport and Economy*, 2023, 45(10): 156–162.

(责任编辑 刘宁馨)