

基于模糊贝叶斯网络的盾构隧道坍塌风险评估

查春华¹ 王心志²

1.南昌轨道交通集团有限公司, 江西 南昌 330013

2.大连海事大学交通运输系, 辽宁 大连 116026

[摘要]随着城市轨道交通和地下空间开发的快速推进,盾构隧道施工所面临的坍塌风险问题愈发突出,尤其是在临近建筑物密集的区域,风险评估与管控显得尤为关键。传统风险评估方法依赖专家经验,主观性较强且缺乏动态性。文中引入模糊逻辑与贝叶斯网络相结合的模糊贝叶斯模型,对盾构隧道坍塌风险进行系统研究。通过对地质条件、自然环境、施工因素等多类风险源进行量化建模,构建模糊ISM结构与贝叶斯网络拓扑关系,实现了风险因素间复杂关联与传递关系的刻画。结合南昌地铁2号线东延工程辛楞区间的实际案例,验证了模型的适用性与有效性。结果表明,模糊贝叶斯模型在风险等级判定上较传统层次分析法精度更高,能够有效识别临近建筑物、管片因素等关键致险源,并显著提升风险预测的客观性与准确性,为类似工程提供科学的风险评估与决策支持。

[关键词]盾构隧道;坍塌风险;临近建筑物;模糊逻辑;贝叶斯网络;风险评估

DOI: 10.33142/aem.v7i8.17749

中图分类号: TU712

文献标识码: A

Risk Assessment of Shield Tunnel Collapse Based on Fuzzy Bayes Network

ZHA Chunhua¹, WANG Xinzhi²

1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330013, China

2. Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China

Abstract: With the rapid advancement of urban rail transit and underground space development, the collapse risk problem faced by shield tunnel construction has become increasingly prominent, especially in areas with dense buildings, where risk assessment and control are particularly critical. Traditional risk assessment methods rely on expert experience, are highly subjective, and lack dynamism. The fuzzy Bayes model combining fuzzy logic and Bayes network is introduced in the article to systematically study the risk of shield tunnel collapse. By quantitatively modeling multiple types of risk sources such as geological conditions, natural environment, and construction factors, a fuzzy ISM structure and Bayes network topology relationship were constructed to characterize the complex correlations and transmission relationships between risk factors. The applicability and effectiveness of the model were verified by combining the actual case of Xinleng section of Nanchang Metro Line 2 East Extension Project. The results show that the fuzzy Bayes model has higher accuracy in risk level determination than the traditional Analytic Hierarchy Process, which can effectively identify key risk sources such as adjacent buildings and pipe segments, and significantly improve the objectivity and accuracy of risk prediction, providing scientific risk assessment and decision support for similar projects.

Keywords: shield tunnel; collapse risk; adjacent buildings; fuzzy logic; Bayes network; risk assessment

引言

深盾构隧道施工过程中,风险评估是确保施工安全和顺利进行的重要环节。目前,已有国内学者尝试将一些方法与技术应用于隧道等工程建设的风险预测中,如常昇宏等提出对经典的LEC风险评价法进行修正改进,使其更适应隧道施工现场的特点,并通过实例验证改进方法能够更准确地识别和量化隧道施工中的关键风险源^[1]。吴忠坦构建了一个高斯Copula与贝叶斯网络结合的模式(GCBN),用以在不完全与不确定信息条件下定量和定性分析盾构下穿既有隧道施工的安全风险,识别敏感因素并实现动态预警管控^[2]。杨刚运用HFACS结合贝叶斯网络,对公路施工中坍塌事故的人因致因进行了系统识别与定量分析,以识别关键人因因素并提出针对性的预防控制

建议^[3]。章龙管等设计了一种将故障树分析法与贝叶斯网络相融合的风险预测模型,通过分析盾构机报警数据识别可能导致盾构施工重大风险事件发展的关键故障路径,并在地铁盾构工程中验证模型的可靠性及预警能力^[4]。随着深度学习技术和大数据分析的发展,结合模糊逻辑和贝叶斯网络,可以实现对施工风险的量化评估和动态管理,从而提高风险评估的科学性和准确性。

本文旨在描述风险评价模块中的核心方法,具体阐述该模块中核心模型的构建过程与应用效果。首先分析了现有风险评估方法的局限性和构建模糊贝叶斯模型的必要性,结合现有盾构隧道坍塌事故案例,确定盾构隧洞坍塌事故的风险等级标准和影响因素;通过现有案例计算模糊贝叶斯模型中的参数,确定风险因素和事故等级之间的关

系性,得到各因素对盾构隧道坍塌的影响程度;最后将训练后的模糊贝叶斯模型应用于具体项目,将该模型输出的评估结果与传统的层次分析法对比,判断该模型的准确性。

1 模糊贝叶斯模型理论基础

1.1 模糊逻辑

模糊逻辑是对经典逻辑的扩展,旨在处理不确定性与模糊性问题。其核心特征在于真值取值不再局限于“真”或“假”,而是在二者之间形成连续区间,从而能够更好地适应复杂的决策环境。模糊集合作为模糊逻辑的基础,引入隶属函数以量化元素与集合的关联程度,并通过并、交、补等运算实现灵活的信息整合。

在模糊推理中,常采用 IF-THEN 规则以模拟专家的思维方式。输入数据经模糊化后,被映射至不同的模糊集合(如“低”“中”“高”风险),每个集合由相应的隶属函数刻画模糊程度。随后,系统通过规则激活与结果聚合生成模糊输出,并经过去模糊化得到明确的判断结果。

首先,在模糊化阶段,通过相应的隶属函数将实际输入数据转换为模糊值,以便于后续的推理。其次,在规则激活阶段,依据模糊输入激活满足条件的 IF-THEN 规则,并计算每条规则的支持度,即其隶属度。第三步,聚合阶段将所有激活规则产生的输出相结合,从而形成综合的模糊输出。最后,在去模糊化阶段,通过采用如重心法等技术,将模糊输出转化为具体的决策值,以实现可操作性。

1.2 模糊逻辑

模糊综合评价法的数学模型如下:

(1) 指标集 $(F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\})$ 可以根据一些属性划分为几个指标子集: $F_i = \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in}\}, i = 1, 2, 3, \dots, m$ 。

(2) 通过计算得出各指标子集 F_i 的综合判断。 F_i 的指标对应的权向量: $w_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{in})$ 。

其中 $s_{i1} + s_{i2} + \dots + s_{in} = 1$ 。基于隶属函数,依次得到第一步判断矩阵 B 和评价向量 A_i : $A_i = W_i B_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ir}), i = 1, \dots, m$ 。

(3) 如果将每个 F_i 视为一个因子,则索引集 F 将是另一个子集。由此,可以形成第二步判断矩阵: $A = (A_1, A_2, \dots, A_m) T$ 。

作为 F 的一部分的每个 F_i 都反映了某种属性,因此可以通过对 F_i 的重要性比较得到权重分布向量: $w = (s_1, s_2, \dots, s_m)$ 。

然后通过以下公式推导出第二步判断向量: $F = w \cdot a = (f_1, f_2, \dots, f_r)$ 。

最后,根据最大隶属度原则,对对象的判断等级: $f_j = \max\{f_1, f_2, \dots, f_r\}$ 。

定性分析是国际上广泛应用的综合评价方法之一。在风险评价方法的选择中,应结合桥梁工程项目管理的特点,确保其客观性、可操作性与有效性。本文采用模糊综合评价法对风险进行分析与评价。该方法基于模糊数学的理论与工具,将多种定性因素转化为可量化的指标,从而实现科学合理的结论。模糊综合评价通过构建判断矩阵,并利

用准则函数确定各评价指标的权重,再按偏好排序,对评价对象进行全面而定量的评判,为科学决策提供有效依据。

1.2 贝叶斯网络

贝叶斯网络作为概率图模型使用有向无环图和节点之间的结构条件概率来描述给定问题中复杂变量之间的因果关系。其数学定义式如下:

$$BN = (D, P) = (V, E, P) \quad (1)$$

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (2)$$

$$E = \{v_i v_j | v_i, v_j \in V\} \quad (3)$$

$$P = \{P(v_i | Pa(v_i)), v_i \in V\} = \{P(v_i | v_1, v_2, \dots, v_{i-1})\} \quad (4)$$

式中 D 表示贝叶斯网络的拓扑结构, $D = (V, E)$; V 表示 BN 中节点变量的集合; E 表示节点集和节点间依赖关系集; P 是具有因果关系的两个节点之间的条件概率的集合; $Pa(v_i)$ 为节点 v_i 的父节点。

在拓扑结构中,具有关联性或因果关系的变量通过箭头相连,而没有因果关系或条件独立的变量之间则不连接箭头。根据条件独立性和链式法则,可以通过各个变量的条件概率分布推导出贝叶斯网络(BN)联合的概率分布及局部条件概率。

1.2 模糊贝叶斯模型

为了更准确、有效地评估盾构隧道项目的风险概率,本节提出了一种基于模糊贝叶斯网络(MFBN)的风险概率评估方法,具体施工过程如图1所示。

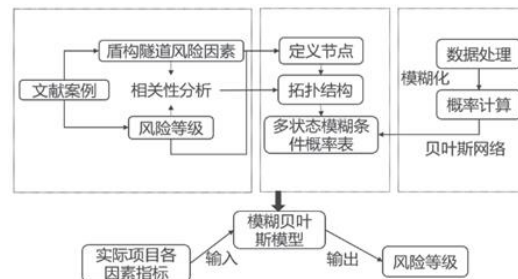


图1 模糊贝叶斯结构图

所提出的方法包括以下4个步骤:对大量文献中存在案例进行整理,得到多个项目案例的风险等级与对应的影响因素;确定节点即风险影响因素,对各影响因素以及风险等级进行相关性分析,确定拓扑结构,确定多状态模糊条件概率表;根据模糊规则对各类因素定量化,计算概率表中概率分布,确立模糊贝叶斯模型;结合实际盾构施工项目,应用模糊贝叶斯模型评价风险并提出优化决策。

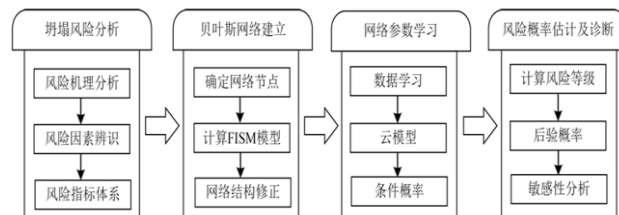


图2 模糊贝叶斯模型风险评估流程

2 模糊贝叶斯模型建立

2.1 风险等级指标

盾构隧道施工面临多重风险,其中复杂的地质条件易引发坍塌、大变形及突水涌泥等事故,其中坍塌是最主要的事故类型。同时,盾构法施工环节繁多,若防护措施不足,也可能诱发塌方风险。坍塌事故对工程实施、经济效益与安全保障均具有深远影响。在工程层面,坍塌常导致施工延误和资源配置调整,从而增加工期与管理成本;在经济层面,事故可能造成设备损坏、赔偿支出、保险费用上升及后续造价增加,显著降低投资回报率;在安全层面,坍塌直接威胁施工人员生命安全,显著提升伤亡风险。

根据国际隧道协会发布的隧道工程风险管理指南,隧道施工期间风险等级可以被划分为五级,划分规则如表 1 所示。

表 1 风险等级划分规则

风险等级	I	II	III	IV	V
区间	<0.0003	0.0003~0.003	0.003~0.03	0.03~0.3	>0.3
中心值	0.0001	0.001	0.01	0.1	1
风险概率描述	极不可能发生	不太可能发生	偶尔发生	可能发生	极可能发生

2.2 风险因素指标

(1) 地质条件

盾构隧道工程的安全性高度依赖地质条件,其中围岩等级、地下水位、地层结构及岩性与风化程度是关键影响因素。高等级围岩具有良好的力学性能,可提供稳定支撑,而低等级围岩因强度不足易引发变形与失稳。地下水位升高会增加孔隙水压力,降低土体有效应力和抗剪强度,从而显著加剧坍塌风险。风化作用则削弱岩体强度并改变水文地质条件,进一步加大隧道不稳定性。上述因素相互作用,共同构成复杂的地质环境,对盾构隧道施工安全产生深远影响。

(2) 自然条件因素

自然条件是影响盾构隧道施工安全的重要外部因素,其中降雨量、埋深比及临近构筑物尤为关键。降雨会导致土体孔隙水压力升高、有效应力降低,进而引发土体强度下降甚至液化,在强降雨情境下还可能增加隧道荷载,显著加剧坍塌风险。埋深比决定隧道所受的地表荷载大小,合理的埋深比有助于提高稳定性,而过低则可能导致承压不足和变形失稳,并对地下水运移及土体应力分布产生不利影响。临近构筑物则可能通过地基向隧道施加附加荷载,同时隧道施工扰动也可能破坏周边建筑物稳定性,从而引发连锁风险。

(3) 施工条件

在盾构隧道施工中,工程技术因素是影响安全的重要环节,主要包括设备运行、掘进控制及管片结构等方面。盾构机及相关机械的稳定运行直接关系到施工安全,若设备性能或适应性不足,可能引发偏差与事故。掘进过程中需严格控制盾构姿态、推力与速度,以及渣土与管片运输

环节,以保证施工质量与稳定性。管片结构方面,则需充分考虑承载能力、稳定性及抗震性能,合理选择材料与工艺,以确保结构的强度与耐久性,从而提升隧道整体的安全性与可靠性。

3 模糊贝叶斯网络

3.1 模糊 ISM 模型

(1)模糊 ISM 模型即贝叶斯拓扑结构计算过程如下:

步骤 1: 界定目标系统,通过资料的统计与分析明确导致灾害发生的风险因素,各因素用集合表示为 X :

$$X = \{X_1, X_2, X_3 \dots X_n\} \quad (5)$$

步骤 2: 通过计算模糊关联矩阵,得到各风险因素之间的模糊关联程度。根据盾构隧道施工坍塌事故案例数据的统计分析,若风险因素 X_i 与风险因素 X_j 在事故发生的某一环节中产生了联系,则计算 $a_{ij} = a_{ij} + 1$,得到关联矩阵 A_x 。通过隶属度函数 b_{ij} 将 A_x 转化为模糊关联矩阵 B ,模糊关联矩阵 B 中各元素表示风险影响因素 X_i 与 X_j 之间的关联程度强弱的评分。隶属度函数 b_{ij} 可以表示为:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{i*} + a_{*j} - a_{ij}} \quad (6)$$

式中, b_{ij} 为矩阵 B 中元素; a_{i*} 为矩阵 B 第 i 行元素求和; a_{*j} 为矩阵 B 第 j 列元素求和。模糊关联矩阵 B 中各风险因素 a_{ij} 都是取值为 0~1 之间的实数,值越大表明关联强度越高,反之则越低。风险因素之间若无关联则取值为 0。

步骤 3: 选取合理的阈值 λ ,由模糊关联矩阵 B 推导出邻接矩阵 C ,即可将模糊 ISM 转为 ISM 计算。模糊矩阵 B 中所有元素均为[0,1]区间内的实数,为计算两两元素间的可达关系,选取一个合适的阈值 将各元素的值转换为 0 或 1 的关系,邻接矩阵 C 中元素 C_{ij}^0 可表示为:

$$C_{ij}^0 = \begin{cases} 1 & b_{ij} \geq \lambda \\ 0 & b_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (7)$$

步骤 4: 计算可达矩阵 D 。对邻接矩阵 C 做若干次布尔代数运算直至满足上式的要求。若所得可达矩阵 D 出现联通或发散的情况时,则需调整阈值 λ 的大小,重复步骤 3。

步骤 5: 分解可达矩阵 D 。利用可达矩阵的区级间划分和强连通块划分,得到系统骨架矩阵 C 。

(2) 隧道坍塌风险影响因素变量集合

在 5.3.1 中分析了坍塌风险影响因素并建立了风险评价指标,为方便处理,将这些指标进行编码,如表 2 所示。

表 2 风险指标编码

编码	风险指标	编码	风险指标	编码	风险指标
X_1	围岩等级	X_2	地下水位	X_3	风化等级
X_4	降雨量	X_5	埋深比	X_6	临近建筑物
X_7	盾构机设备风险	X_8	掘进控制	X_9	盾构管片因素

注:隧道坍塌编码为 X_0 。

(3) 模糊关联矩阵与可达矩阵的计算

在计算过程中,首先基于隧道坍塌事故的演化逻辑构建风险因素关联数据矩阵 A_x ,其基本原则是若风险因素 X_i 与 X_j 之间存在关联,则相应矩阵元素 a_{ij} 的数值相应增加;随后通过引入隶属度函数对矩阵 A_x 进行归一化处理,从而得到模糊关联矩阵 $B=b_{ij}$,以刻画风险因素之间的模糊相关性。在此基础上,通过设定阈值 λ 对模糊关联强度进行筛选,具体判别规则为:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & b_{ij} \geq \lambda \\ 0, & b_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (8)$$

当阈值取 $\lambda=0.05$ 时,可以得到邻接矩阵 C ,该矩阵能够揭示风险因素之间的直接影响关系。进一步地,利用布尔代数运算方法对邻接矩阵 C 进行迭代计算,形成可达矩阵 D ,从而反映系统中各风险因素之间的间接传递性与可达性关系,为后续隧道坍塌风险因素的层次结构建模奠定基础。

(6) 确定最终的模糊贝叶斯结构

通过 FISM 模型将隧道施工坍塌风险评估体系分为多个层级,由于可能会忽略各因素之间的跨级关系以及同一层级各因素之间的相互影响。进一步对模型进行修正以得出风险演化路径和贝叶斯网络结构;最后,根据本工程的特点对结构图进行核查,删除了部分冗余关联关系,并将目标节点 X_0 用字母 T 表示,得到贝叶斯网络托盘拓扑结构如图 3 所示。

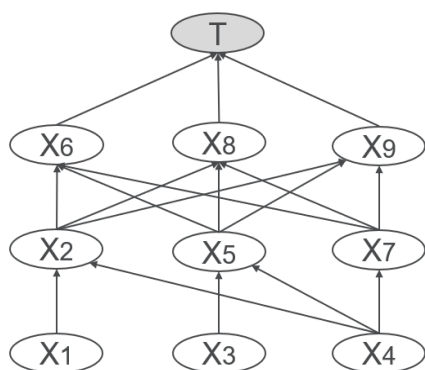


图3 贝叶斯网络拓扑结构

3.2 模糊 ISM 模型

本节使用 MATLAB 软件构建贝叶斯网络模型,对数据进行训练及验证,获取贝叶斯网络参数。结合现有的隧道坍塌事故案例和参考文献,从中选择共收集了 60 组隧道案例数据,由最大期望算法(EM)对坍塌事故案例进行数据学习。训练数据与验证数据比例为 5:1。将案例数据导入 MATLAB 软件进行计算,模型经过多次迭代后达到收敛,得到各节点的概率分布情况,父节点的先验概率如表 3 所示。

表3 先验概率表

节点	先验概率				
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
X ₁	0.356	0.211	0.267	0.071	0.021
X ₂	0.141	0.233	0.145	0.121	0.254
X ₃	0.044	0.262	0.131	0.147	0.311
X ₄	0.078	0.059	0.260	0.157	0.446
X ₅	0.187	0.221	0.231	0.145	0.129
X ₇	0.238	0.061	0.334	0.287	0.145

4 模型验证分析

4.1 风险因素

(1) 工程简介

本章研究对象为南昌市地铁 02 标段东延工程辛楞区间段。该区间隧道下穿高密度建筑群,地质水文条件复杂,施工风险较高。根据风险评估要求,将盾构隧道底板埋深 1.5H 范围内的建(构)筑物视为风险对象,并综合考虑盾构掘进与临近建筑物的相互作用。该区域地下水资源丰富,水位受地层差异及季节性影响显著,雨季上涨时易诱发软土液化。土层以黏土和粉土为主,含水量高时开挖难度增大,易发生塌方;砂层分布不均亦对隧道稳定性形成挑战。

(2) 隧道风险因素

在辛楞区间盾构施工过程中,ZDK43+563~ZDK43+582 标段出现管片凹陷现象,存在潜在的施工安全隐患。施工现场采用专家调查法与层次分析法(AHP)等多种传统风险评价方法,经过综合分析后将该标段隧道坍塌风险评定为 II 级(即不太可能发生)。然而,现有方法如 AHP 与模糊综合评价法仍面临主观性强、针对性不足等局限性。为检验模糊—贝叶斯(fuzzy-Bayes)模型在隧道风险评价中的适用性,本研究选取该风险标段作为验证案例展开分析。

4.2 隧道坍塌风险评估

将影响该标段隧道坍塌的主要因素作为风险评价指标并划分风险等级,构建静态风险评价指标体系。根据发生坍塌的可能性大小,各指标划分为无风险(I级)、低风险(II级)、中风险(III级)、高风险(IV级)和极高风险(V级)共 5 个等级。最终的指标即节点状态分级如表 4 所示。

表4 节点状态划分

序号	节点名称	节点状态划分	
1	围岩等级	VI级围岩	II级
2	地下水位	比较发育	III级
3	风化等级	中等	II级
4	降雨量	较大	III级
5	埋深比	非浅埋	II级
6	临近建筑物	比较影响	III级
7	盾构机设备风险	较低	I级
8	掘进控制	较好	I级
9	盾构管片因素	中等	II级

根据模糊贝叶斯模型得出最终的标段隧道坍塌风险评估如表 5 所示。

表 5 风险评估结果

方法	I 极不可能 发生	II 不太可能 发生	III 偶尔发生	IV 可能发生	V 极可能发生
模糊贝叶斯 模型	1.23%	59.21%	31.84%	6.34%	1.38%
层次分析法	2.17%	30.61%	54.33%	10.34%	2.55%

5 结语

本文围绕临近建筑物盾构隧道智能施工风险评价模块的核心方法展开研究，通过构建模糊贝叶斯网络模型，结合盾构隧道施工过程中的多种风险因素，实现了对施工风险的量化评估和动态管理。本文的结论如下：

(1) 构建了基于模糊贝叶斯网络的风险评估模型，该模型能够有效处理不确定性和模糊性问题，提高了风险评估的科学性和准确性。通过对参数的模糊化，将因素量化考虑，实现了更加客观的评估过程，减少了基于经验等主观干扰，可以提高风险评估的普适性，扩大了应用范围。

(2) 通过确定模糊贝叶斯模型的网络结构，得到了各风险因素之间的关联性以及与坍塌风险之间的联系，进

一步通过敏感性分析，确定了诱导盾构隧道坍塌事故的关键因素，如临近建筑物、盾构管片，这些因素对盾构隧道坍塌的影响显著，为安全施工提供了重要参考，同时在事故发生后可以快速排查重要因素确保施工顺利进行。

(3) 模糊贝叶斯模型应用在南昌轨道交通 2 号线东延工程中的辛楞区间段，验证了其实际应用效果。通过与传统的层次分析法相比，模糊贝叶斯模型的具有更高的评估精度，节约评估时间，减少评估成本。

【参考文献】

- [1]常昇宏,唐娱瑛.LEC 风险评价法的改进及其在隧道施工中的应用[J].交通标准化,2014(9):316.
- [2]吴忠坦.基于高斯 Copula 贝叶斯模型的盾构下穿既有隧道施工风险的分析[J].工业建筑,2023,53(11):55-64.
- [3]杨刚.基于 HFACS 的公路施工坍塌事故人因贝叶斯网络分析[J].公路与汽运,2025(9):18.
- [4]章龙管,刘绥美,李开富,等.基于故障树与贝叶斯网络的地铁盾构施工风险预测 [J]. 现代隧道技术,2021,58(5):21-29.

作者简介：查春华（1986.6—），汉族，江西省共青城市，学历：本科，交通工程方向。