doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202601007

基于贝叶斯推断的公路隧道施工风险概率评估方法

张杨永,张学亮,李琼涛
(同纳检测认证集团有限公司,上海　200331)

摘要:针对隧道施工过程中围岩条件复杂、施工扰动频繁,传统基于静态阈值或单一监测指标的风险评价方法难以准确反映施工风险的动态变化问题,本文提出一种基于多源监测数据与动态贝叶斯推断的隧道施工风险概率评估方法,通过对围岩内部位移、围岩压力、锚杆轴力和钢拱架应力等监测信息的数据同步、异常处理与特征重构,建立统一的时序监测特征体系;构建动态贝叶斯网络模型,实现风险概率随施工推进的递推更新;最后结合工程实例对模型进行验证。结果表明,风险后验概率随施工过程呈现出明显的阶段性演化特征,即在初期支护稳定阶段风险水平较低,在掌子面推进及强扰动阶段风险概率显著升高,在支护体系形成后逐步回落;该演化特征与围岩变形发展及支护受力调整过程具有良好一致性。

关键词:隧道施工;施工风险评估;多源监测数据;动态贝叶斯推断;风险概率;不确定性量化
中图分类号:U455;O212.8　**文献标志码**:A　**文章编号**:1671-5322(2026)01-0056-08

A Bayesian Inference-based Risk Probability Assessment Method for Highway Tunnel Construction

ZHANG Yangyong, ZHANG Xueliang, LI Qiongtao
(Tongna Testing and Certification Group Co. Ltd., Shanghai　200331, China)

Abstract: Given the complex geological conditions and frequent construction disturbances during tunnel excavation, traditional risk evaluation methods based on static thresholds or single monitoring indicators are often unable to accurately reflect the dynamic evolution of construction risks. To address this issue, this study proposes a tunnel construction risk probability assessment method based on multi-source monitoring data and dynamic Bayesian inference. By synchronizing heterogeneous monitoring data, performing anomaly processing and feature reconstruction on surrounding rock internal displacement, surrounding rock pressure, rock-bolt axial force, and steel arch stress, a unified time-series monitoring feature system is established. A dynamic Bayesian network model is then constructed to realize the recursive updating of risk probability with construction progress. Finally, the proposed method is verified through an engineering case study.The results indicate that the posterior risk probability exhibits distinct stage-dependent evolutionary characteristics during construction: the risk level remains low during the initial support stabilization stage, increases significantly during the excavation advance and strong disturbance stage, and gradually decreases after the formation of the support system. This evolutionary trend shows good consistency with the development of surrounding rock deformation and the adjustment of support structural forces.

Keywords: tunnel construction; construction risk assessment; multi-source monitoring data; dynamic Bayesian inference; risk probability; uncertainty quantification

收稿日期:2025-11-22
作者简介:张杨永(1982—),男,江苏淮安人,高级工程师,博士,主要研究方向为隧道施工监控。

公路隧道施工过程中，围岩结构受开挖卸荷、施工扰动及支护体系作用的共同影响，其变形与受力状态呈现出显著的时序演化特征。在软弱破碎围岩或复杂地质条件下，围岩稳定性对施工工序变化高度敏感，风险状态往往随施工推进不断调整。如何在施工过程中准确识别风险演化趋势，是隧道施工安全控制中的关键问题[1]。

现有隧道施工风险评估方法主要包括基于规范限值的经验判别方法、基于单一监测指标的阈值预警方法以及基于统计分析或数值模拟的风险分析方法。上述方法在工程实践中具有一定的应用基础，但普遍存在两方面的不足：一是多采用静态判据，难以反映风险状态随施工推进的动态变化；二是在监测信息不完整或不确定的情况下，风险判断结果的稳定性和可信程度难以量化，限制了在复杂施工阶段的适用性[2-3]。

随着自动化监测技术的发展，隧道施工过程中可获取的监测信息逐渐呈现出多源化和连续化的特征。围岩内部位移、围岩压力、锚杆轴力及钢拱架应力等监测量能够从不同侧面反映围岩—支护体系的响应行为，为施工风险识别提供了更加丰富的数据基础[4-5]。然而，不同监测量在量纲、采样频率及响应机制上存在显著差异，监测数据往往伴随噪声、缺失及异常波动，如何对多源监测信息进行统一表达并有效用于风险评估，仍是亟需解决的问题。

在风险建模方法方面，贝叶斯推断因能够在不确定条件下融合先验知识与观测证据，被广泛应用于工程风险分析领域。通过构建变量之间的条件依赖关系，贝叶斯模型可实现风险状态的概率化表征，并在引入新信息后对风险判断进行更新。然而，传统贝叶斯网络多基于静态结构，难以直接描述风险状态随时间演化的过程，限制了在施工全过程风险评估中的应用[6-7]。

针对上述问题，本文提出一种基于多源监测数据与动态贝叶斯推断的隧道施工风险概率评估方法。通过对多源监测数据进行同步处理、异常修正与特征重构，建立统一的时序监测特征体系，并在此基础上构建动态贝叶斯网络模型，实现施工风险概率的递推更新与阶段性刻画；同时，引入风险后验概率的不确定性量化方法，对风险评估结果的稳定性和可信程度进行分析；最后，通过工程实例系统分析模型输出结果与围岩变形、支护受力演化之间的对应关系，验证所提方法在施工风险动态识别与工程应用中的有效性。

1　隧道施工风险评估的理论基础

1.1　多源监测数据体系及其时序特征

隧道施工过程中，围岩卸荷与支护体系受力重分布相互耦合，形成具有显著时序特征的动力响应过程。围岩与支护体系的状态主要通过锚杆轴力、围岩压力、钢拱架应力及围岩内部位移等监测指标加以表征，这些监测量分别反映了锚固体系受力水平、围岩对支护结构的作用状态、初期支护构件的受力变化以及围岩变形的发展特征。

上述监测指标在量纲、采样频率及响应特性方面存在差异，并表现出明显的时间依赖性和阶段演化特征。为使其适用于后续的概率推断与动态更新分析，需要对多源监测数据进行统一的时间尺度处理与结构化特征表示，构建适用于贝叶斯风险评估的时序输入体系。

设施工过程离散为$t=1,2,\cdots,N$个时间步，经过归一化、同步及噪声剔除处理后，形成时刻t的监测特征向量为

$$z_t=[z_{t,1},z_{t,2},\cdots,z_{t,n}]^{\mathrm{T}},\ j=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

式(1)中的$z_{t,j}$表示第j类监测特征，包括原始测量值、变化率、增量及其他反映变形阶段性的派生特征。该结构化表达方式使不同监测量在同一框架下可比，为构建风险状态的条件概率模型提供了统一的数据基础。

监测指标对风险状态的影响并非相互独立，而是通过围岩变形、支护体系承载能力以及施工扰动等因素的耦合作用共同驱动风险演化过程。例如，围岩内部位移的增大通常伴随围岩压力水平的变化，并引起锚杆轴力与钢拱架应力的重新分配，反映围岩-支护体系受力状态的整体调整。当上述监测量出现协同变化时，往往意味着围岩稳定性发生转折，风险状态随之演化。因此，在风险模型构建过程中，有必要保留多源监测指标之间的联合效应，使围岩内部位移、围岩压力、锚杆轴力及钢拱架应力这些具有明确物理指向性和良好解释基础的指标，作为风险推断中的关键观测量。

1.2　贝叶斯推断及条件概率结构

贝叶斯推断以既有认知为基础，通过观测信息对系统状态进行概率化分析。设S为风险状

态,D为监测数据,则风险状态在监测数据作用下的后验概率可按式(2)进行更新。

$$P(S|D)=\frac{P(D|S)P(S)}{P(D)} \tag{2}$$

式中:$P(S|D)$表示综合监测信息后的风险;$P(D|S)$为似然函数;$P(S)$为先验分布;$P(D)$为证据概率(归一化因子)。

式(2)风险评估模型的核心在于构建变量之间的条件依赖关系,使监测量D能够通过似然项影响风险状态的更新。

贝叶斯网络以有向无环图描述变量之间的依赖结构。对于包含n个变量的系统,在有向无环图结构约束下,其联合概率分布可分解为各节点在父节点条件下条件概率的乘积[8],公式如下:

$$P(X_1,X_2,\cdots,X_n)=\prod_{i=1}^{n}P(X_i|P_{ai}) \tag{3}$$

式中:X_i表示贝叶斯网络中的第i个随机变量,P_{ai}为节点X_i的父节点集合。

通过合理构建节点之间的因果结构,可使监测量、地质条件及施工扰动共同作用于风险状态节点,实现多因素耦合下的风险概率计算。在隧道施工这样的时变系统中,风险状态具有明显的时间依赖性,可以引用动态贝叶斯网络(dynamic Bayesian network,DBN)描述状态随时间的递推关系。设S_t为施工时刻t的风险状态,S_{t-1}为前一时刻风险状态,$\boldsymbol{D}_t$为时刻t的检测特征向量,则DBN中的状态转移模型和观测模型分别刻画S_t对S_{t-1}的依赖,以及D_t对当前状态的响应特性。在此基础上,风险状态的后验分布可写为:

$$P(S_t|D_t,S_{t-1})=\frac{P(D_t|S_t)P(S_t|S_{t-1})}{\sum_{s\in\mathcal{S}}[P(D_t|S_t=s)P(S_t=s|S_{t-1})]} \tag{4}$$

式中:$P(S_t|D_t,S_{t-1})$为已知上一时刻风险状态与当前监测信息条件下的风险后验概率,表示施工推进过程中风险状态的实时更新结果;$P(D_t|S_t)$为观测似然函数,表征在给定风险状态下监测特征的统计分布;$P(S_t|S_{t-1})$为状态转移概率,反映风险在相邻时间步之间的演化规律;s表示风险状态$\mathcal{S}$中的某一具体状态(如低风险、中风险、高风险等)。

1.3 风险演化机理及其概率表征

隧道施工风险的形成受到围岩结构特性、支护受力状态及施工扰动强度等多因素影响,其演化过程呈现阶段性、累积性和随机性。围岩通常经历由弹性阶段向塑性阶段的过渡,其变形速率及波动幅度在接近极限状态时显著增加;支护体系内力分布随变形发展不断调整,并可能在局部构件出现非线性响应;钻爆、出渣与支护作业的周期性扰动会进一步增加状态的不确定性。

为使上述机理具有可计算的形式,需将多因素联合作用下的风险状态表示为条件概率函数。采用多变量条件概率的展开形式可以表示为:

$$P(A|G_i)=\sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J}[P(A|D_j,C_k,M_m,G_i)\times P(D_j|G_i)\times P(C_k|G_i)\times P(M_m|G_i)] \tag{5}$$

式中:A表示风险事件;G_i表示地质分级;D_j、C_k、M_m分别表示施工扰动、围岩结构特征和支护能力等因素的分类变量;$P(A|D_j,C_k,M_m,G_i)$表示在给定围岩分级G_i以及施工扰动、围岩结构特征和支护状态组合条件下风险事件发生的条件概率;$P(D_j|G_i)$、$P(C_k|G_i)$、$P(M_m|G_i)$分别表示在围岩分级G_i条件下施工扰动、围岩结构特征和支护响应状态处于相应等级的条件概率。

风险事件后果的失效概率可采用指数型分布进行拟合,其累积分布函数$F(d)$可表达为:

$$F(d)=1-\exp[-\alpha(d-d_0)] \tag{6}$$

式中:d表示与风险事件后果相关的影响量(如损失程度、关键响应量或超限幅值);d_0为起始阈值或基准水平;$\alpha>0$为控制失效概率随d增长速度的尺度参数。

该指数型累积分布函数描述了围岩或支护在受力增大或扰动增强情况下,失效概率随后果量的变化规律。

2 构建风险评估模型

2.1 模型总框架

为反映施工风险随时间变化的特点,本文构建了基于DBN的风险评估模型,将地质条件、施工方式、监测信息与风险状态纳入统一的概率框架,并通过时序推理实现风险状态的持续更新。

模型总体框架如图1所示。该框架以施工过程中的多源监测信息为核心输入,将围岩条件、施工方式与实时监测响应统一纳入动态贝叶斯推理体系,通过数据处理、特征构造与时序推理,实现施工风险状态的动态更新与概率评估。模型综合考虑前一时刻风险状态与当前监测数据的共同作用,并输出随施工推进演化的风险后验概率及风险等级结果,为施工风险识别与调控提供依据。

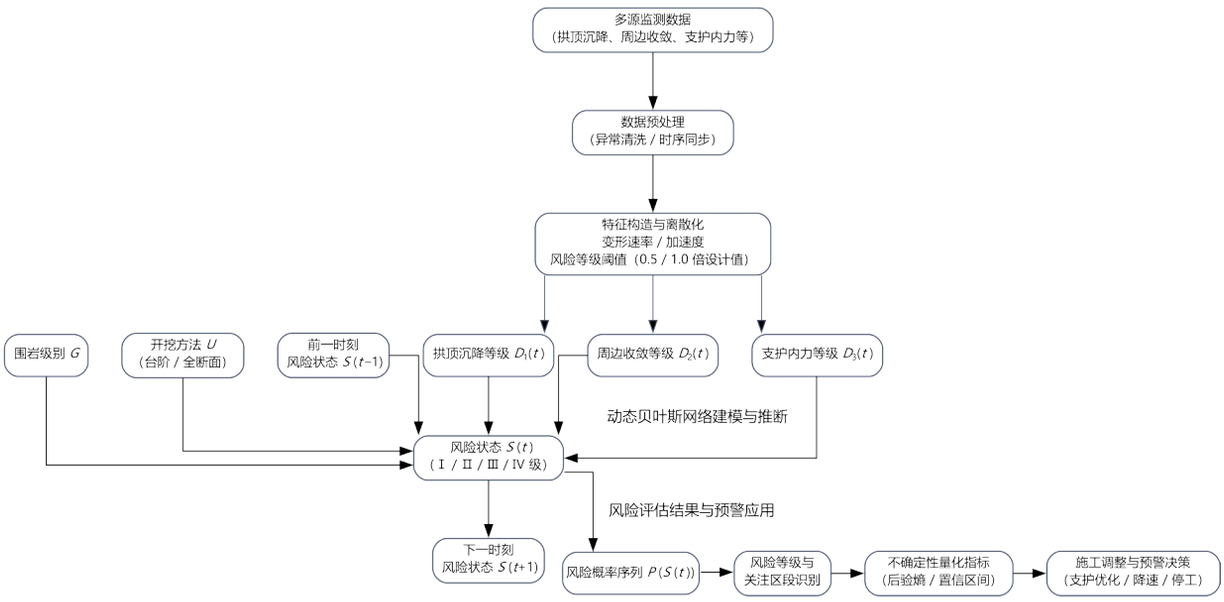


图 1　风险评估模型总体结构示意图

Fig. 1　Overall structure of the risk assessment model

风险状态采用 4 级离散形式表示，并根据拱顶沉降和周边收敛相对于初期支护设计值的比例进行划分，具体分级标准见表 1。鉴于监测量的连续变化，难以直接用于离散概率模型分析，需对沉降和收敛的时序数据进行结构化处理。本文从变形速率、变化趋势及其阶段特征等方面提取特征，并结合相关规范要求和工程经验，将沉降与收敛监测指标划分为若干离散等级，具体分级标准见表 2。

2.2　基于 DBN 的风险状态更新机制

在风险状态与监测特征的等级化表达基础上，通过引入时间序列关系与状态转移机制，采用 DBN 方法将相邻时刻的风险状态与持续输入的监测数据进行耦合，实现风险概率的连续更新与状态递推。这种建模方式能够反映隧道施工过程中风险累积、缓释及突变等非平稳特征，避免静态模型在多工况切换条件下产生的信息割裂问题。隧道施工风险状态整体更新机制如图 2 所示。

DBN 的核心在于对风险状态时间依赖性的显式刻画。当前时刻的风险状态不仅受围岩级别、开挖方法等外部条件约束，还受到前一时刻风险状态的持续影响，也就是说，在未引入新监测数据的情况下，可以根据前一时刻的风险状态及外部条件对当前风险状态进行先验预测；随着监测数据的持续输入，当新的监测数据完成预处理与特征离散化后，即可输入模型并对预测结果进行修正，从而形成当前时刻风险状态的后验分布。该过程在时间序列上的不断重复，即可构成风险状态的动态更新链。

从概率结构角度看，风险状态更新遵循条件独立假设，即在给定当前风险状态的条件下，不同监测指标之间相互独立；而在时间维度上，当前风险状态仅与前一时刻状态相关。这一结构假设使得风险状态、监测数据与外部条件之间的依赖关系能够被有效分解，从而降低模型复杂度并提升推断效率。同时，风险状态后验分布呈现出逐步收敛的特征，在工程上体现为风险识别由

表 1　围岩拱顶沉降与周边收敛监测特征随施工阶段变化

Table 1　Variation of monitoring data for crown settlement and perimeter convergence with construction stages

风险等级	拱顶沉降判据	周边收敛判据	典型监测特征	响应措施
Ⅰ级	$H \leqslant 0.5H_{des}$	$C \leqslant 0.5C_{des}$	变形速率低、变化平稳	正常监测频率实施
Ⅱ级	$0.5H_{des} < H \leqslant H_{des}$	$0.5C_{des} < C \leqslant C_{des}$	变形逐渐增大但无加速趋势	提高监测频率
Ⅲ级	$H_{des} < H \leqslant 1.5H_{des}$	$C_{des} < C \leqslant 1.5C_{des}$	局部或阶段性加速变形	调整支护参数、加强初期支护刚度
Ⅳ级	$H > 1.5H_{des}$	$C > 1.5C_{des}$	变形显著加速、趋势不稳定	停止开挖并采取应急加固措施

注：H 为实际监测拱顶沉降值，C 为实际监测周边收敛值，H_{des}、C_{des} 分别为初期支护拱顶沉降和周边收敛设计允许控制值。

表 2　监测特征的结构化表达与离散化方法

Table 2　Structured representation and discretization of monitoring features

监测量类型	原始量测数据	结构化特征	离散化方式	工程含义
拱顶沉降 $H(t)$	位移时序	沉降速率:$\Delta H/\Delta t$	低/中/高	反映变形发展速度
		沉降加速度:$\Delta^2 H/\Delta t^2$	正/零/负	区分趋稳、线性或加速变形
		沉降等级	Ⅰ/Ⅱ/Ⅲ	用于构建离散型观测节点
周边收敛 $C(t)$	位移时序	收敛速率:$\Delta C/\Delta t$	低/中/高	反映围岩收敛趋势
		收敛趋势符号	正/零/负	判断结构松动或趋稳
		收敛等级	Ⅰ/Ⅱ/Ⅲ	用于构建离散型观测节点
异常检测	时序残差	异常指标(基于 3σ 或 IQR)	正常/异常	识别突变或仪器异常
综合特征	多特征组合	综合特征向量:$[H_{\text{rate}}, H_{\text{acc}}, C_{\text{rate}}, C_{\text{acc}}]$	k-means 三级离散化	表征整体变形特征模式

注:沉降速率与收敛速率由相邻量测时刻的增量计算得到,加速度由速率变化获得;趋势符号用于刻画变形方向性特征;异常指标用于识别突变或监测异常;一级至三级离散等级用于输入贝叶斯网络的观测节点。

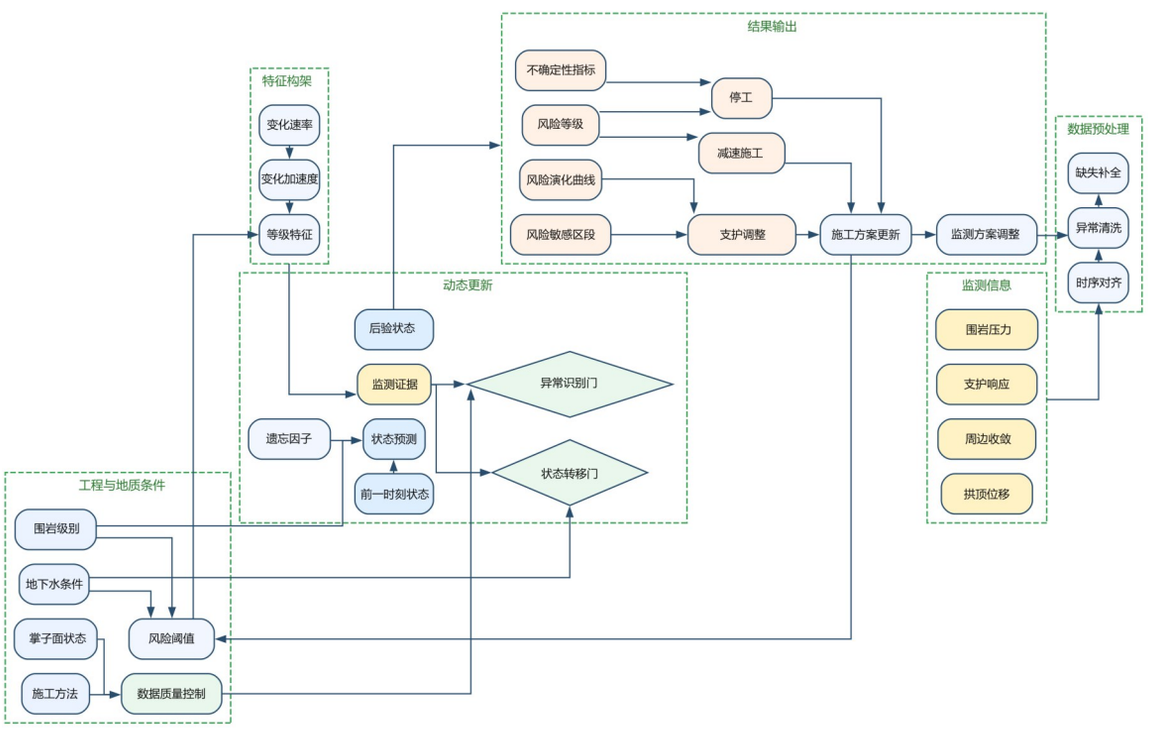


图 2　隧道施工风险状态动态更新与决策反馈机制

Fig. 2　Dynamic updating and decision feedback mechanism for tunnel construction risk states

“预警性判断”向“确定性决策”的转变,与实际施工风险认知的演化规律相一致[1]。

为适应施工条件变化及模型长期运行过程中出现信息衰减的问题,在动态更新过程中引入遗忘机制,对历史信息的影响权重进行调节。当施工工况或围岩响应特征发生显著变化时,模型能够降低早期数据对当前判断的影响强度,避免风险状态被历史信息“锁定”,从而提高模型对突变风险的敏感性。

在风险状态更新的基础上,还需进一步对风险概率输出结果进行工程化处理。通过对关注级与危险级风险概率的聚合,形成综合风险指标,用于表征当前施工阶段的整体风险水平;同时,引入后验不确定性指标对风险判断的可信程度进行刻画,使风险评估结果不仅给出风险大小,还能够反映其稳定性与可靠性。最终,动态贝叶斯网络所输出的风险概率序列、风险等级变化趋势及不确定性信息共同构成风险决策的依据,并通过施工调整与监测反馈形成闭环更新机制,实现隧道施工风险的持续跟踪与动态控制。

3　工程实践与模型应用验证

3.1　试验段概况与监测系统布设

为验证模型在实际施工场景中的适用性，选取某高速公路隧道Ⅴ级围岩区段作为试验段。该区段围岩破碎，还含裂隙水，稳定性较差；衬砌结构采用复合式，其中初期支护由喷射混凝土、钢筋网和工字钢组成，二次衬砌采用C35钢筋混凝土。在复杂荷载和施工扰动共同作用下，隧道围岩与支护体系呈现典型的时变变形与受力特征，适合作为模型的验证对象。

试验段监测系统通过在施工现场布设的多类型监测点，对围岩变形及支护体系受力状态进行持续观测。监测点布设遵循《公路隧道施工技术规范（JTG/T 3660—2020）》[9]的相关要求，在拱顶、拱腰、边墙及仰拱位置形成闭合断面监测体系，并沿隧道轴向随掌子面推进方向以6~12 m间距设置典型监测断面，以反映围岩-支护体系在施工过程中的力-形演化特征。典型断面监测点布置形式及各类传感器空间分布见图3，现场监测系统整体布设情况见图4。

监测数据主要包括围岩内部位移、围岩压力、锚杆轴力和钢拱架应力等，其中围岩内部位移用于反映围岩变形的发展及时序特征，围岩压力用于表征围岩对初期支护结构的作用水平，锚杆轴力和钢拱架应力用于刻画锚固体系及初期支护构件的受力变化情况。各类监测量在施工期间保持良好的时间连续性与数据完整性，并按统一的时间步长采集，再集中汇总至监测平台进行管理与处理，从而为后续的风险评估模型输入与风险状态识别提供了可靠的数据基础。

3.2　围岩变形监测数据特征分析

为保证数据的可比性与连续性，原始监测序列在分析前需进行缺测补齐、异常点复核及量纲统一处理。经过处理的不同施工阶段的多源监测指标统计如表3所示。

由表3拱顶沉降与周边收敛的监测结果可见，围岩变形在不同施工阶段呈现出明显的阶段性演化特征。在初期支护稳定阶段（掌子面前方围岩扰动较弱、初期支护已形成基本承载结构），拱顶沉降与周边收敛整体较小，变形发展缓慢，围岩-支护体系已初步建立承载关系，断面稳定性较好，施工扰动对围岩响应的影响有限；随着掌子面逐步接近监测断面，施工进入已开挖未支护的暴露阶段，围岩卸荷效应逐渐显现，拱顶沉降与周边收敛同步增大，变形发展速度加快，围岩稳定性明显受施工扰动影响，此时支护体系尚未形成有效约束，风险状态由相对稳定向活跃阶段过渡；当施工进入掌子面强扰动阶段（掌子面位于监测断面附近）时，围岩变形与支护受力调整最为剧烈，拱顶沉降与周边收敛呈现同步加速特征，围岩结构发生显著重分布，支护体系承载水平迅速提升，该阶段围岩-支护体系响应集中，是施工过程中风险最为敏感和集中的阶段；随着支护措施的逐步完善，施工进入支护闭合后变形收敛阶段，围岩变形发展明显放缓，拱顶沉降与周边收敛趋于稳定，围岩-支护体系逐步建立新的受力平衡状态，断面稳定性得到有效恢复，风险水平随之降低。

总体来看，拱顶沉降与周边收敛在施工过程中表现出清晰的阶段性演化规律，其变化趋势能

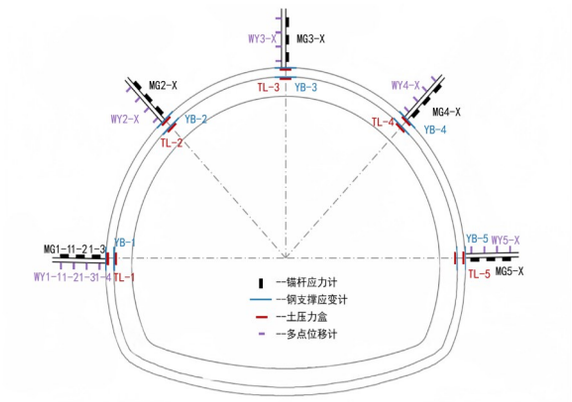


图3　隧道典型断面监测布置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of monitoring layout for a typical tunnel cross-section



图4　施工现场监测系统布设

Fig. 4　On-site deployment of the monitoring system

表 3 不同施工阶段多源监测指标统计

Table 3 Multi-source monitoring parameters across construction stages

施工阶段	围岩内部位移均值/mm	位移变化率/(mm·d^{-1})	位移标准差/mm	围岩压力均值/MPa	压力变化率/(MPa·d^{-1})	锚杆轴力均值/kN	轴力变化率/(kN·d^{-1})	钢拱架应力均值/MPa
初期支护稳定阶段	2. 1	0. 30	0. 15	0. 18	0. 005	62	1. 0	78
已开挖未支护暴露阶段	6. 4	0. 78	0. 42	0. 36	0. 013	98	2. 6	121
掌子面强扰动阶段	14. 2	1. 65	0. 95	0. 64	0. 030	162	5. 9	195
支护闭合后变形收敛阶段	8. 1	0. 46	0. 28	0. 34	0. 009	110	1. 7	136

够较好地反映围岩稳定状态及施工扰动强度的变化过程,为后续风险概率模型中风险状态的判定与动态更新提供了必要的工程依据。

3. 3 风险概率动态更新结果与模型有效性验证

基于前述多源监测数据处理结果及动态贝叶斯网络风险推断模型,对施工全过程的风险后验概率进行持续更新,得到图 5 所示的风险概率动态演化曲线。该曲线反映了在监测信息不断引入的条件下,模型对施工风险状态的实时修正过程,可用于验证风险评估模型对不同施工阶段风险变化的响应能力。

从图 5 的整体变化趋势看,风险后验概率在已开挖并完成初期支护的稳定阶段保持在较低水平,波动幅度较小,表明围岩–支护体系处于相对稳定状态,模型输出与现场变形受控的实际情况一致。随着施工进入已开挖未及时支护的暴露阶段,风险概率呈现持续上升趋势,反映围岩约束条件削弱、变形累积效应增强,模型能够对风险积累过程作出前瞻性响应。在掌子面强扰动阶段,风险后验概率迅速升高,并一度超过预警阈值,表明在围岩卸荷集中、施工扰动增强的条件下,风险状态显著恶化,模型对施工扰动敏感性较高,能够捕捉围岩稳定性变化的关键时段。结合前文变形速率阶段性特征可知,风险概率峰值对应于围岩变形发展最为活跃的区段,验证了动态贝叶斯模型在风险识别上的一致性与合理性。随着初期支护逐步闭合并发挥整体约束作用,风险后验概率逐渐回落并趋于平稳,最终降至提示阈值附近,表明围岩变形进入收敛阶段,风险状态得到有效控制。该过程体现了模型在引入新的监测数据后,能够通过先验–后验递推机制及时修正风险判断,避免对早期高风险状态的滞后判定。

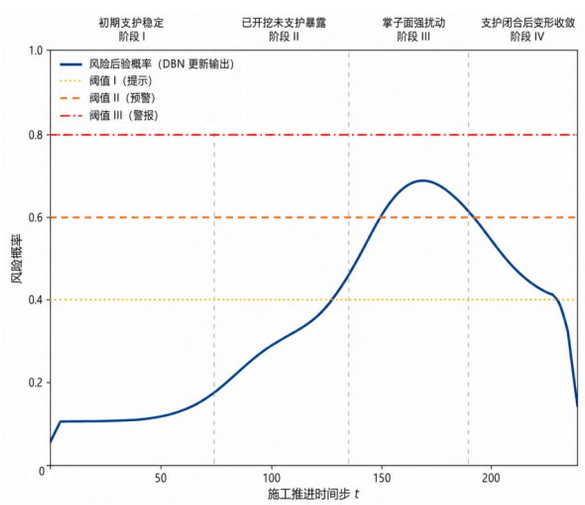


图 5 隧道施工风险概率的动态演化过程

Fig. 5 Dynamic evolution of tunnel construction risk probability

此外,图 5 中设置的提示、预警与警报阈值为风险概率的工程分级提供了直观依据。风险后验概率与阈值区间的对应关系,使得不同施工阶段的风险等级具有明确的判别标准,为现场风险预警与施工调整提供了量化支撑。整体来看,风险概率动态演化结果与施工阶段划分、围岩变形规律及支护作用过程保持良好的一致性,表明所构建的动态贝叶斯风险评估模型在施工风险识别与跟踪方面具有较好的适用性和工程解释性。

4 结论

基于多源监测数据与动态贝叶斯推断理论,本文构建了一种适用于公路隧道施工过程的风险概率动态评估方法,并通过工程实例对模型的合理性、有效性及工程适用性进行了系统分析,得到主要结论如下:

1) 通过对拱顶沉降、周边收敛、围岩压力及支护受力等监测量进行归一化处理、时间同步、

异常清洗及特征重构，实现了多源信息在同一概率推断框架下的结构化表达；在此基础上，构建了基于动态贝叶斯推断的施工风险概率更新方法，通过引入前一时刻风险状态与当前监测数据的时序耦合，实现风险状态的先验-后验递推更新，使得输出的风险后验概率能够随施工变化呈现出清晰的阶段性演化规律，即在初期支护稳定阶段风险水平较低，在掌子面推进及强扰动阶段风险概率显著上升，并在支护闭合后逐步回落。该演化特征与围岩变形速率、收敛发展及支护受力调整的阶段性变化保持高度一致，验证了所构建模型在刻画施工风险时序演化方面的合理性和有效性。

2）通过引入风险后验概率分布的置信区间，对不同施工阶段风险评估结果的离散程度进行表达。模型在输出风险后验概率演化曲线时，同步给出了对应的概率波动区间，用于反映施工过程中风险概率随时间变化的区间特征。工程实例结果表明，在掌子面强扰动阶段，风险概率区间明显扩大；而在支护闭合完成后的收敛阶段，风险概率区间逐步减小，与风险概率演化曲线所反映的阶段性变化规律保持一致。

综上所述，本文提出的动态贝叶斯风险评估方法能够实现隧道施工过程中风险状态的连续量化与不确定性表达，对复杂围岩条件下的风险演化具有良好的敏感性和稳定性。研究成果可为隧道施工风险预警、支护参数调整及施工组织优化提供定量依据，具有较好的工程推广价值。

参考文献：

[1] 罗惠中，卞士海，黄强. 岩质公路隧道坍塌动态风险评估方法[J]. 数学的实践与认识，2025，55（10）：241-250.

[2] 戴维，刘峰，芮易，等. 基于贝叶斯理论和TSP波速的围岩等级预测方法[J/OL]. 人民长江，2025，56(12)：159-66.

[3] 邹鹤民. 基于贝叶斯网络的公路隧道围岩失稳风险评估及系统开发[J]. 地质科技通报，2024，43(6)：89-101.

[4] 吴定远，赵立财. 基于贝叶斯分类算法的隧道开挖安全风险概率评价[J]. 水电能源科学，2024，42(4)：115-118.

[5] 梁宇，吕大刚，孟建宇. 基于贝叶斯网络的地下隧道多灾害风险评估[J]. 地下空间与工程学报，2023，19(S1)：368-380.

[6] 陈伟先，欧孝夺，吴昱芳，等. 基于灰色模糊贝叶斯网络的隧道坍塌风险评估方法[J]. 桂林理工大学学报，2022，42(3)：642-648.

[7] 卢鑫月，许成顺，侯本伟，等. 基于动态贝叶斯网络的地铁隧道施工风险评估[J]. 岩土工程学报，2022，44(3)：492-501.

[8] KHAKZAD N，KHAN F，AMYOTTE P. Risk-based design of process systems using discrete-time Bayesian networks[J]. Reliability Engineering & System Safety，2013，109：5-17.

[9] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工技术规范：JTG/T 3660—2020[S]. 北京：人民交通出版社股份有限公司，2020.

（责任编辑：李华云）