

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.019

# 基于模糊动态贝叶斯网络的 桥梁挂篮施工安全风险分析

熊雨轩<sup>1</sup>, 贺文宇<sup>1</sup>, 刘贵香<sup>2</sup>, 阮茂青<sup>2</sup>, 程华才<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中铁北京工程局集团有限公司, 北京 102308; 3. 安徽省高速公路试验检测研究中心有限公司, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**针对挂篮施工过程中安全风险随时间演变的动态特征,文章提出基于模糊动态贝叶斯网络(fuzzy dynamic Bayesian network, FDBN)的桥梁挂篮安全风险分析方法。从结构、行为、环境、流程4个方面对桥梁挂篮施工的危险源进行分类;采用故障树分析挂篮坍塌事故的成因和风险因素,并将故障树模型转化为贝叶斯网络拓扑结构,再结合观测节点建立桥梁挂篮坍塌事故风险动态贝叶斯网络(dynamic Bayesian network, DBN)模型;采用模糊集理论和专家判断法确定DBN模型参数预测施工过程中风险概率的动态演变,进而根据施工现场远程监测的信息,实时更新FDBN模型动态风险分析结果;以实际桥梁挂篮施工为例,验证该方法的有效性。结果表明:该方法结合施工现场的实时监测数据,能够科学、准确地预测桥梁挂篮安全风险的概率变化,为桥梁挂篮施工安全风险提供管理参考。

**关键词:**桥梁挂篮;动态贝叶斯网络(DBN);模糊集理论;监测数据;实时更新;安全风险分析

**中图分类号:**TU997 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)11-1564-08

## Safety risk analysis of bridge hanging basket construction based on fuzzy dynamic Bayesian network

XIONG Yuxuan<sup>1</sup>, HE Wenyu<sup>1</sup>, LIU Guixiang<sup>2</sup>, RUAN Maoqing<sup>2</sup>, CHENG Huacai<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. China Railway Beijing Engineering Group Co., Ltd., Beijing 102308, China; 3. Anhui Expressway Engineering Test and Research Center Co., Ltd., Hefei 230031, China)

**Abstract:** In view of the dynamic characteristics of safety risk evolution over time in the construction process of bridge hanging baskets, this paper puts forward a fuzzy dynamic Bayesian network (FDBN) based safety risk analysis method for bridge hanging baskets. Firstly, the hazard sources of bridge hanging basket construction are classified from four aspects: structure, behavior, environment and process. Secondly, fault tree is used to analyze the causes and risk factors of the collapse accident, and the fault tree model is transformed into a Bayesian network topology, and then combined with observation nodes, a dynamic Bayesian network (DBN) model is established. Then, fuzzy set theory and expert judgment method are used to determine the parameters of DBN model, predict the dynamic evolution of risk probability during construction, and update the dynamic risk analysis results of FDBN model in real time according to the remote monitoring information of construction site. Finally, a practical bridge basket construction is taken as an example to verify the effectiveness of the proposed method. The results show that the method combined with the real-time monitoring data of construction site can predict the probability change of the safety risk of bridge hanging baskets scientifically.

**收稿日期:**2023-07-11; **修回日期:**2023-08-22

**基金项目:**安徽省自然科学基金杰出青年基金资助项目(2208085J20);安徽省交通控股集团有限公司科技资助项目(JKKJ-2021-01)

**作者简介:**熊雨轩(2000—),男,湖南益阳人,合肥工业大学硕士生;

贺文宇(1986—),男,江西萍乡人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: wyhe@hfut.edu.cn.

and accurately, and can provide a reference for the safety risk management of bridge hanging basket construction.

**Key words:** bridge hanging basket; dynamic Bayesian network(DBN); fuzzy set theory; monitoring data; real-time updates; safety risk analysis

## 0 引言

悬臂浇筑法被广泛应用于大跨度连续梁施工,挂篮结构是悬臂浇筑法区别于其他桥梁施工方法的重要内容。由于桥梁挂篮在施工过程中需反复安装和拆卸锚固结构,且挂篮本身自重极大、施工周期短、工艺复杂、不确定因素多,挂篮施工过程中的安全事故时有发生。因此,对桥梁挂篮施工过程进行安全风险分析,建立动态风险评估方法具有重要的工程实际意义。

近年来,国内外学者对桥梁安全的研究集中于桥梁本身的受力情况、抗震性能和承载能力等方面,对桥梁安全风险管理的研究主要集中于对桥梁整体结构的安全风险评估,只是将挂篮作为其中一个风险因素考虑。然而挂篮作为悬臂浇筑法的重要内容,对桥梁施工安全有着极其重要的影响,因此有必要对桥梁挂篮施工安全进行更深入的研究。目前国内外学者对桥梁挂篮的研究主要是数值模拟挂篮悬臂施工过程,研究挂篮结构的受力分析和结构优化<sup>[1-4]</sup>,如挂篮结构应力和变形分布、行走系统抗倾覆性能等;桥梁挂篮的关键施工技术和监控技术<sup>[5-7]</sup>;挂篮结构的自振频率和振型<sup>[8]</sup>等动力特性。但对桥梁挂篮施工安全风险分析的研究相对较少。

目前,层次分析法、故障树分析法、模糊综合评价法、蒙特卡洛法等风险评估方法被广泛应用于各个研究领域。然而,这些方法大多为静态风险评估,桥梁挂篮施工风险是随着时间推移而动态变化的,静态风险评估已不适应动态变化的风险因素。文献[9]提出贝叶斯网络(Bayesian network, BN)方法,贝叶斯网络结合了概率论、图论等多种理论,具有不确定性推理和数据分析的能力,在复杂领域推理计算和逻辑关系描述等方面有着一定的优势,当前贝叶斯网络已经成功应用于多个领域<sup>[10-16]</sup>。

目前已有相关学者使用贝叶斯网络分析桥梁挂篮安全风险。文献[17]研究贝叶斯网络方法在桥梁挂篮施工安全风险动态评估的可行性,整理桥梁挂篮施工的危险源清单,基于贝叶斯网络模型判断出工程安全风险可接受程度,并诊断出对

事故影响最大的风险因素;文献[18]探讨桥梁挂篮安全风险的风险概率,明确风险等级的判断标准,并对贝叶斯网络方法进行优化。联合模糊集理论和贝叶斯网络方法的互补性和优越性,文献[19]构建多态模糊贝叶斯网络模型,实现基坑施工中的动态风险分析;文献[20]构建模糊动态贝叶斯网络,识别出关键风险因素,提出3个公理并验证模糊动态贝叶斯网络模型的有效性;文献[21]将风险分析与现场监测数据相结合,结果表明能较好反映施工过程中的突发风险事件。

鉴于模糊动态贝叶斯网络的优越性,本文提出一种基于模糊动态贝叶斯网络(fuzzy dynamic Bayesian network, FDBN)的桥梁挂篮安全风险分析方法。首先建立挂篮施工过程中的危险源清单,采用故障树分析法构建坍塌事故的故障树模型;其次基于贝叶斯网络拓扑结构和观测节点建立桥梁挂篮坍塌事故风险动态贝叶斯网络(dynamic Bayesian network, DBN)模型,并结合专家判断法、模糊集理论和相似性聚合方法(similarity aggregation method, SAM)获取 FDBN 模型根节点先验概率、其他节点条件概率和动态节点转移概率;然后通过远程监测系统监测施工现场的风险因素,实时更新 FDBN 模型安全风险概率;最后采用工程实例验证方法的有效性和合理性,以期挂篮安全风险管理的提供借鉴和参考。

## 1 风险分析方法

### 1.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络强调对先验信息的运用,因为桥梁挂篮施工事故的历史数据难以获取,而挂篮的设计图纸、有限元模拟、施工现场环境、施工人员管理、施工工艺等多方位的先验信息更容易获取,所以可以采用贝叶斯网络对桥梁挂篮结构进行风险管理。

贝叶斯网络的主要构成部分为节点、有向弧、先验概率和条件概率,其中:节点表示风险因素;有向弧表示各节点之间的因果关系;先验概率表示事件发生之前对事件发生的概率估计;条件概率表示子节点与父节点之间逻辑关系。

联合概率分布表示多个事件共同发生的概

率,根据贝叶斯网络的网络结构和条件概率可以得到每个基本事件的概率。贝叶斯网络将变量  $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  上的联合概率分布  $P(X)$  表示为:

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P_a(X_i)) \quad (1)$$

其中:  $P_a(X_i)$  为节点  $X_i$  在贝叶斯网络上父节点的集合;  $X_i \in X$ 。

### 1.2 动态贝叶斯网络

动态贝叶斯网络<sup>[22]</sup>是基于贝叶斯网络在时间上的扩展,其动态并不是网络结构本身随时间而变化,而是观测数据随时间而变化。DBN 由初始网络  $B_0$  和转移网络  $B_1$  组成,初始网络就是简单贝叶斯网络模型本身,转移网络是在 2 个时间片上连接的贝叶斯网络模型。DBN 由一系列时间片和时间链接组成,它反映变量的概率依赖性和状态随时间的变化。一般 DBN 模型通常满足以下 2 个特点:

1) 贝叶斯网络的拓扑结构在不同的时间片内是相同的,且相邻时间片之间由弧与弧进行连接。

2) 在时间片  $t$  内的节点概率只与时间片  $t_1$  和  $t+1$  内的节点概率有关,与其他时间片的节点无关。

### 1.3 基于监测数据的实时更新评估

通过在桥梁挂篮施工现场设置高清摄像头、二维超声风速仪、挠度仪等仪器,可以远程获取施工现场的实时情况,获得新的节点观测数据。

在 DBN 上设置观测节点和动态节点,观测数据既可以更新动态节点的状态,又能通过观测节点反馈最终桥梁挂篮坍塌风险概率,从而更新后验概率,即

$$P(X | E) = \frac{P(X, E)}{P(E)} = \frac{P(X, E)}{\sum_X P(X, E)} \quad (2)$$

DBN 建模时,首先确定观测节点的观测阈值,并离散化为多个状态;然后取监测数据的最不利值作为输入 DBN 模型的观测证据,进而更新风险评估结果<sup>[22]</sup>。

### 1.4 模糊集理论

模糊集理论<sup>[23]</sup>可以用来处理不精确、模棱两可或部分正确的信息,允许将主观判断和语言表达转换为可量化的数值数据。

模糊数和隶属函数是模糊集理论的基本方面,使用接受 0~1 之间数值的隶属函数,模糊数字表示专家意见中的不确定性。隶属度函数

$\mu_A(x)$  的值表示集合  $A$  中隶属于  $x$  的程度。梯形模糊数由 4 个实数进行表征,与其他隶属函数相比,梯形隶属函数在准确性和实用性方面更具优势。梯形隶属函数计算公式为:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1; \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 < x \leq a_2; \\ 1, & a_2 < x \leq a_3; \\ \frac{x - a_4}{a_3 - a_4}, & a_3 < x \leq a_4; \\ 0, & x < a_4 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$  为一组梯形数组。

对于人类的记忆能力,最适合人类判断的语言术语数量在 5~9 之间。本文拟使用 9 个语言术语来估计事件的发生概率。要求专家使用极低 EL、很低 VL、低 L、较低 ML、中 M、较高 MH、高 H、很高 VH、极高 EH 9 个术语描述事件发生的概率。语言术语及其对应的梯形模糊数见表 1 所列。

表 1 语言术语及模糊数

术语	意义	梯形模糊数
EL	发生的概率特别低	(0.0, 0.0, 0.1, 0.2)
VL	发生的概率非常低	(0.1, 0.2, 0.2, 0.3)
L	少数情况下可能发生	(0.2, 0.3, 0.3, 0.4)
ML	概率介于低和中之间	(0.3, 0.4, 0.4, 0.5)
M	发生的概率中等	(0.4, 0.5, 0.5, 0.6)
MH	概率介于高和中之间	(0.5, 0.6, 0.6, 0.7)
H	很可能会发生	(0.6, 0.7, 0.7, 0.8)
VH	发生的概率非常高	(0.7, 0.8, 0.8, 0.9)
EH	发生的概率特别高	(0.8, 0.9, 1.0, 1.0)

### 1.5 桥梁挂篮安全风险分析流程

桥梁挂篮安全风险的分析流程如图 1 所示。

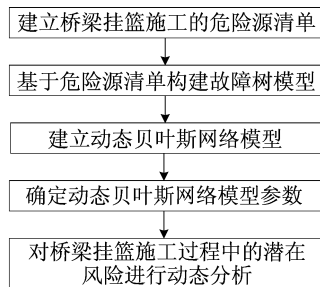


图 1 桥梁挂篮安全风险分析流程

分析流程主要包括如下步骤:

1) 建立桥梁挂篮施工的危险源清单。收集基本信息,基于历年桥梁挂篮施工事故统计分析并结合专家调研和文献调研,总结桥梁挂篮事故

的影响因素。

2) 基于危险源清单构建故障树模型。通过故障树分析法(fault tree analysis, FTA)找出桥梁挂篮施工事故的潜在原因,得到桥梁挂篮施工事故的风险因素及其因果关系。

3) 建立动态贝叶斯网络模型。将桥梁挂篮施工事故的故障树模型映射为贝叶斯网络拓扑结构,将 BN 在时间上扩展,并结合实时监测系统建立动态贝叶斯网络模型。

4) 确定动态贝叶斯网络模型参数。首先通过专家判断法和模糊集理论分别对桥梁挂篮施工事故动态贝叶斯网络模型中事件的先验概率和条件概率进行专家打分,确定专家权重;然后采用梯形模糊数对以上专家的评价进行概率模糊计算;最后再对模糊概率进行去模糊化处理得到精确的概率。

5) 基于所建立的桥梁挂篮施工事故的 FD-BN 模型,对桥梁挂篮施工过程中的潜在风险进行动态分析。

## 2 动态风险分析过程

### 2.1 桥梁挂篮施工风险识别

本文基于挂篮施工事故统计分析并结合专家和文献调研,以桥梁挂篮坍塌事故为分析对象,从结构、行为、环境、流程 4 个方面对桥梁挂篮坍塌事故的危险源进行分类。

1) 结构类危险源主要包括挂篮构件系统稳定性、挂篮设计强度不满足要求,挂篮荷载失衡,行走系统抗倾覆性能不佳,构件连接不紧固;结构

构件刚度不足,构件损坏、弯曲、截面削减,模板刚度不足,挂篮轨道梁连接不紧固,结构构件出厂质量不合格;挂篮构件损耗。

2) 行为类危险源包括施工人员疲劳作业、夜晚作业;施工人员资质不满足要求;安全监督检查不到位;施工安全技术交底不到位。

3) 环境类危险源有水上作业,大风、大雨等恶劣天气。

4) 流程类危险源主要有挂篮组拼流程错误、挂篮安拆技术不合理、两侧挂篮组拼不同步、同侧挂篮行走速度不一致、挂篮行走速度过快、混凝土浇筑过快、混凝土保养不到位、行走轨道安装违规操作。

从危险源清单中选取风险因素,将桥梁挂篮坍塌事故定义为顶事件,综合考虑挂篮结构稳定性、挂篮构件安全性、挂篮施工工艺、桥梁混凝土强度 4 个方面对挂篮坍塌事故的影响,建立故障树模型,如图 2 所示。图 2 中各个节点的名称见表 2 所列。

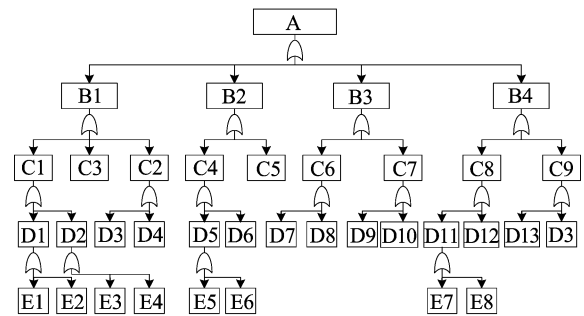


图 2 桥梁挂篮坍塌事故故障树模型

表 2 桥梁挂篮坍塌事故节点名称

节点	名称	节点	名称
B1	挂篮结构稳定性不足	D5	挂篮结构构件刚度不足
B2	挂篮构件安全性不足	D6	构件损坏、弯曲、截面削减
B3	挂篮施工工艺缺陷	D7	挂篮拼装顺序错误
B4	桥梁混凝土强度不足	D8	两侧挂篮组拼不同步
C1	挂篮构件系统稳定性不足	D9	同侧挂篮行走速度不一致
C2	挂篮设计稳定性不合理	D10	挂篮行走速度过快
C3	挂篮荷载失衡	D11	混凝土浇筑过快
C4	挂篮自身构件问题	D12	模板结构强度及刚度不满足
C5	挂篮设计强度不合理	D13	混凝土配合比或养生不到位
C6	挂篮安装工艺缺陷	E1	挂篮行走轨道安装违规操作
C7	挂篮行走工艺缺陷	E2	挂篮两节轨道梁连接不紧固
C8	混凝土施工缺陷	E3	作业人员疲劳作业、夜晚作业
C9	混凝土保养缺陷	E4	挂篮安全监督检查不到位
D1	挂篮行走系统抗倾覆性不佳	E5	挂篮结构构件出厂质量不合格
D2	挂篮构件连接不紧固	E6	挂篮构件损耗
D3	自然环境不满足	E7	挂篮施工人员无相关资质
D4	挂篮施工安全技术交底不到位	E8	挂篮安装拆卸方案不合理

### 2.2 DBN 模型构建

故障树和贝叶斯网络的映射关系如图 3 所示,将桥梁挂篮坍塌事故的故障树模型映射为 BN 模型。

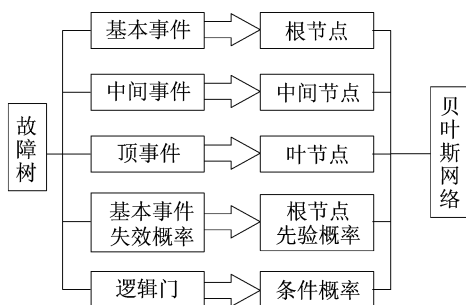


图 3 故障树与贝叶斯网络映射关系

通过在施工现场布置压力传感器、拉力传感器、挠度计位移传感器、高清摄像机和二维超声风速仪等设备,实时监测挂篮结构应力和挠度变化、施工现场风速和风向、工人行为、机械碰撞情况、恶劣天气情况等。

将挂篮结构竖向挠度值  $S$  和挠度变形速率  $V$  设为证据节点。挂篮结构竖向挠度的控制范围通常在  $-20 \sim 20$  mm 之间,挠度变形速率的控制范围小于  $2$  mm/d。

根据桥梁挂篮施工监测的特点、行业标准和专家经验,以规范中挂篮结构的最大挠度为测量控制值,将挂篮结构竖向挠度值  $S$  设为如下 3 个状态:竖向挠度值超过测量控制值的设为 1 级风险;超过控制值 70%但未超过控制值的设为 2 级风险;小于控制值 70%的设为 3 级风险。沉降变形速率  $V$  设为如下 2 个状态:变形速率大于控制值的设为 1 级风险;小于控制值的设为 2 级风险。风险状态见表 3 所列。

表 3 风险状态

风险等级	$S/\text{mm}$	$V/(\text{mm}/\text{d})$
1	$\geq 20$	$\geq 2$
2	$14 \leq S < 20$	$< 2$
3	$0 \leq S < 14$	

选择风险概率随时间变化的根节点作为动态节点。将节点  $E_2$ 、 $E_4$ 、 $E_6$ 、 $D_6$ 、 $D_{12}$  作为动态节点,将前一个时间片与后一个时间片的动态节点连接,建立桥梁挂篮坍塌事故动态贝叶斯网络,如图 4 所示。

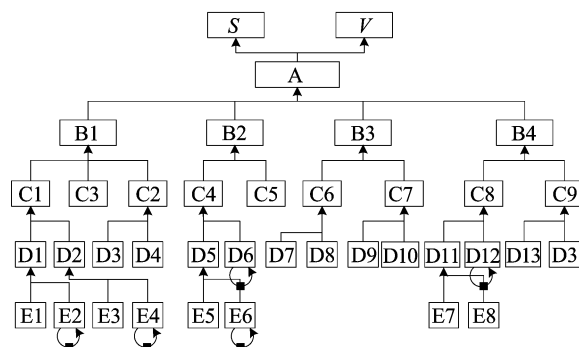


图 4 桥梁挂篮坍塌事故动态贝叶斯网络

### 2.3 DBN 模型参数的确定

由于桥梁挂篮施工的历史事故资料相对缺乏,本文结合专家调查法、模糊集理论和 SAM 法得到先验概率、条件概率和转移概率。

为了获得数值概率值,必须将语言表达式转换为模糊数字。每个人在评估可能性时都有独特的视角,因此根据权重系数汇总专家的意见至关重要。

相似性聚合方法 SAM 用于统一每组专家的语言评价术语。假设每个专家  $E_k (k = 1, 2, \dots, M)$  使用一组指定的语言术语表达对事件的评价,然后将其转换为相关的模糊数字。SAM 方法步骤如下。

1) 确定专家权重。按照专家分类标准及评分确定每位专家的权重得分,专家的权重值为该专家的权重得分与所有专家的总权重之比,专家分类标准及评分见表 4 所列。

2) 计算一致程度(相似度)。设  $E_u, E_v$  为每对专家,  $S_w(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v)$  为专家的评价,  $S_w(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v) \in [0, 1]$ 。根据 SAM 方法,将  $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ 、 $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3, b_4)$  定义为专家意见的梯形隶属函数。 $S(\tilde{A}, \tilde{B})$  的相似度函数定义为:

$$S(\tilde{A}, \tilde{B}) = 1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |a_i - b_i| \quad (4)$$

$S(\tilde{A}, \tilde{B})$  取值范围为  $0 \sim 1$ , 当结果越接近 1 时,相似度越高。

3) 计算专家的平均一致度  $A_A(E_u)$ 。其计算公式为:

$$A_A(E_u) = \frac{1}{M-1} \sum_{\substack{v=1 \\ u \neq v}}^M S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v) \quad (5)$$

其中,  $M$  为专家总数量。

4) 计算专家的相对一致性  $R_A(E_u)$ 。其计算公式为:

$$R_A(E_u) = \frac{A_A(E_u)}{\sum_{u=1}^M A_A(E_u)} \quad (6)$$

5) 专家的共识系数  $C_C(E_u)$  程度预测。共识系数是衡量专家意见一致程度的指标,计算公式为:

$$C_C(E_u) = \beta \omega(E_u) + (1 - \beta)R_A(E_u) \quad (7)$$

其中,  $\beta$  为相似法中的乐观系数(松弛因子),表示  $\omega(E_u)$  优于  $R_A(E_u)$  的程度,取值范围为  $0 \sim 1$ 。式(7)表明专家权重系数在确定相对相关性方面的重要性。“0”表示无偏好,即选择同质专家组;“1”表示专家意见的一致程度,与权重数值相同。

6) 计算专家判断集合  $\tilde{R}_{AG}$ 。其计算公式为:

$$\tilde{R}_{AG} = C_C(E_1)\tilde{R}_1 + C_C(E_2)\tilde{R}_2 + \dots + C_C(E_M)\tilde{R}_M \quad (8)$$

表 4 专家分类标准及评分

标准	类别	评分
教育背景	博士	5
	硕士	4
	学士	3
	其他	2
从业年限/a	>20	5
	16~20	4
	11~15	3
	6~10	2
	≤5	1
专业职位及职称	项目经理	5
	教授	4
	工程师/副教授	3
	其他	2

聚合完成后将模糊数转换为实数值,采用面积中心法将梯形模糊数  $\tilde{R}_{AG}$  转化为实数值  $F_{PS}$ ,  $F_{PS}$  计算公式为:

$$F_{PS} = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \mu(x) x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \mu(x) dx} = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} dx} = \frac{1}{3} \frac{(a_4 + a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 a_2}{a_3 + a_4 - a_1 - a_2} \quad (9)$$

### 2.4 基于 FDBN 模型的风险动态分析

建立动态贝叶斯网络模型,将获得的模型参

数进行初步推理,在无证据输入情况下预测挂篮坍塌事故风险概率随时间的动态变化。

根据在施工现场布置的多个监测设备,实时获取监测数据,并将监测数据反馈到事故节点,修正 FDBN 的评估结果,实时更新网络。

## 3 实例分析

### 3.1 工程概况

某单塔双索面矮塔斜拉桥跨径为(80+150+85) m,全长 315 m,主梁采用单箱四室悬臂直腹板预应力混凝土连续箱梁。

### 3.2 DBN 模型参数

本文邀请 3 位挂篮施工领域的专家,在对工程资料充分了解的基础上,采用调查问卷的方式对各节点的发生概率进行评价。专家信息和权重见表 5 所列。

表 5 专家信息和权重

专家	教育背景	从业年限/a	专业职称	权重
1	学士	11~15	工程师	0.333 3
2	学士	6~10	工程师	0.296 3
3	硕士	11~15	副教授	0.370 4

以根节点 E6 的聚合计算过程为例,专家 1 的评价为 VL;专家 2 的评价为 L;专家 3 的评价为 L。采用 2.3 节的方法进行计算,结果见表 6 所列。表 6 中,  $R_{AG} = (0.167 3, 0.267 3, 0.267 3, 0.367 3)$ 。

表 6 根节点 E6 聚合计算结果

参数	数值	参数	数值
$S_{12}$	0.900 0	$C_C(E_3)$	0.354 8
$S_{13}$	0.900 0	$R_A(E_1)$	0.321 4
$S_{23}$	1.000 0	$R_A(E_2)$	0.339 3
$A_A(E_1)$	0.900 0	$R_A(E_3)$	0.339 3
$A_A(E_2)$	0.950 0	$\omega(E_1)$	0.333 3
$A_A(E_3)$	0.950 0	$\omega(E_2)$	0.296 3
$C_C(E_1)$	0.327 4	$\omega(E_3)$	0.370 4
$C_C(E_2)$	0.317 8		

通过式(9)将模糊数组  $R_{AG}$  转化为实数值,得到根节点 E6 处于“严重”状态的发生概率为 0.267 3。其余根节点采用同样的方法处理,最终全部根节点的先验概率见表 7 所列。

由于缺乏桥梁挂篮风险事故的历史数据,条

件概率、转移概率的获取方法与根节点先验概率的获取方法一致。

表 7 根节点先验概率

根节点	事件	概率
C2	挂篮设计稳定性不合理	0.077 8
C5	挂篮设计强度不合理	0.077 8
D3	自然环境不满足	0.161 2
D4	安全技术交底不到位	0.161 2
D6	挂篮构件损坏、截面削减	0.330 9
D8	两侧挂篮组拼不同步	0.077 8
D9	同向行走的主桁位移不同步	0.077 8
D10	行走速度不易控制	0.116 2
D11	混凝土浇筑过快	0.163 5
D12	模板结构强度及刚度不满足	0.118 5
D13	混凝土养生不到位	0.161 2
E1	行走轨道安装违规操作	0.369 1
E2	两节轨道梁连接不紧固	0.159 0
E3	安全监督检查不到位	0.269 1
E4	作业人员疲劳作业夜晚作业	0.232 7
E5	结构构件出厂质量不合格	0.116 2
E6	施工过程中挂篮构件损耗	0.267 3
E7	挂篮施工人员无相关资质	0.230 9
E8	挂篮安装拆卸方案不合理	0.077 8

### 3.3 挂篮安全风险动态分析

建立以挂篮坍塌事故为目标节点的 DBN 模型,将获得的 DBN 模型参数进行运算,用于预测可能发生桥梁挂篮坍塌事故的可能性。

选取 2023 年 04 月 03 日至 06 月 11 日为进行挂篮安全风险动态分析的时间区间,按照 1 周为跨度共划分为 10 个时间片(T1~T10)。对 DBN 模型中各节点风险概率自动更新,可以在无证据输入情况下对目标节点安全风险进行动态分析。无证据输入时的挂篮坍塌事故风险动态概率变化如图 5 所示。

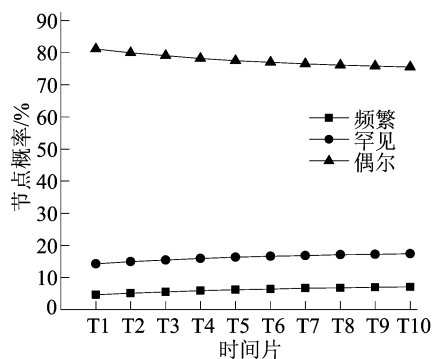


图 5 无证据输入时桥梁挂篮坍塌事故风险动态概率变化

在第 1 个时间片时,挂篮坍塌事故  $A^1$  风险罕见发生的概率为 81.45%,风险偶尔发生的概

率为 14.11%,风险频繁发生的概率为 4.44%;在第 10 个时间片时,风险罕见发生的概率为 76.16%,风险偶尔发生的概率为 17.04%,风险频繁发生的概率为 6.80%。从图 5 可以看出,挂篮坍塌事故风险处于偶尔发生或频繁发生的概率具有增加趋势,但发生概率较小,整体处于 VL 与 EL 之间,结果与现场实际情况相符。

将观测节点的监测数据作为证据输入模糊动态贝叶斯网络,可将监测数据反馈传递到挂篮坍塌事故节点,修正模糊动态贝叶斯网络的评估结果,实时更新网络。

根据现场监测结果,在第 3 个时间片时,监测到施工现场天气恶劣,大风天气导致挂篮结构挠度值短暂超过 20 mm,挠度变化速率小于 2 mm/d。输入监测数据可以得到有证据输入时的挂篮坍塌事故风险动态概率变化,如图 6 所示。

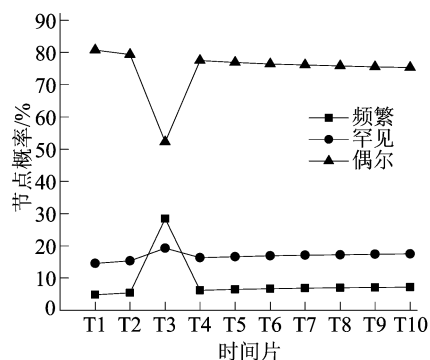


图 6 有证据输入时桥梁挂篮坍塌事故风险动态概率变化

在第 3 个时间片时,挂篮坍塌事故  $A^3$  风险罕见发生的概率为 53.00%,风险偶尔发生的概率为 19.25%,风险频繁发生的概率为 27.75%。从图 6 可以看出,挂篮坍塌事故风险频繁发生的概率大大增加,虽然风险罕见发生的概率仍最大,但需要采取紧急措施,立刻进行防护和检查,结果与现场实际情况相符,可在施工中为管理者提供实时的决策支持。

## 4 结 论

本文对桥梁挂篮施工的危险源进行识别,并基于模糊动态贝叶斯网络对桥梁挂篮坍塌事故进行动态风险分析,得出如下结论。

1) 基于桥梁挂篮施工事故统计分析并结合专家调研和文献调研,识别挂篮施工的危险源;从结构、行为、环境、流程 4 个方面对桥梁挂篮施工的危险源进行分类,最终得到挂篮施工的危险源

清单,建立桥梁挂篮安全风险分析的基础。

2) 基于模糊动态贝叶斯网络建立桥梁挂篮安全风险动态分析模型,预测施工过程中目标节点风险概率的动态变化。

3) 通过布置在施工现场的监测设备,实时获取监测数据,将监测数据与 FDBN 方法有效结合,修正 FDBN 的评估结果并实时更新网络,实现基于监测数据的实时更新评估,便于施工管理人员及时掌握挂篮施工过程中的风险。

4) 结合合肥市某桥梁工程,验证基于模糊动态贝叶斯网络的桥梁挂篮安全风险分析方法的合理性。

5) 由于缺乏桥梁挂篮施工的历史事故资料,本文的安全风险分析主要采取定性的分析方法,今后将对量化理论模型进行研究。

### [参 考 文 献]

- [1] 邹政权,金立陈. 菱形挂篮施工设计及受力性能分析[J]. 北方交通,2015(10):28-31.
- [2] 吴纪元,程龙树. 菱形挂篮受力分析与结构优化[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版),2020,30(1):17-22.
- [3] 明德江,殷新锋. 宽幅菱形挂篮施工受力分析及设计优化[J]. 公路与汽运,2021(4):140-145.
- [4] 徐玉梁,王力武. 某连续刚构桥菱形挂篮主桁架结构优化及受力性能分析[J]. 广东土木与建筑,2022,29(2):83-85.
- [5] 赵锐. 跨海大桥悬臂浇筑施工菱形挂篮施工力学特性与施工技术[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(2):89-99.
- [6] 叶祖强,段成用. 挂篮悬臂施工监测工作要领[J]. 交通世界,2021(24):37-39.
- [7] 光军伟. 连续箱梁桥挂篮施工监控关键技术研究[D]. 郑州:郑州大学,2017.
- [8] 李海东. 山区高墩桥悬浇法挂篮施工风致响应研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2019.
- [9] PEARL J. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference[M]. Morgan Kaufmann; [s. n. ],1988.
- [10] 孙东亮,陈诗悦. 基于动态贝叶斯模型的氢气管道泄漏风险研究[J]. 安全与环境学报,2022,22(2):901-908.
- [11] 韩哲鹏,张笛. 基于动态贝叶斯网络的船舶电力推进系统可靠性评估[J]. 船舶工程,2021,43(11):118-124.
- [12] 张继信,黄东阳,尤秋菊,等. 基于动态贝叶斯网络的城市综合管廊燃气泄漏动态风险评价[J]. 安全与环境学报,2023,23(10):3455-3464.
- [13] 李辉强,王毅,李丽亚. 基于动态贝叶斯网络的低慢小目标威胁评估[J]. 激光与红外,2022,52(7):1036-1041.
- [14] WANG Z Z, CHEN C. Fuzzy comprehensive Bayesian network-based safety risk assessment for metro construction project[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2017,70:330-342.
- [15] WU X G, JIANG Z, ZHANG L M, et al. Dynamic risk analysis for adjacent buildings in tunneling environments: a Bayesian network-based approach [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2015,29(5):1447-1461.
- [16] 时招伟,魏松杰. 基于贝叶斯网络的 Android 应用风险评估的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(6):753-757.
- [17] 陈露. 基于贝叶斯网络的桥梁挂篮施工安全风险动态评估研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [18] 王立峰,肖子旺,于赛赛. 基于 Bayesian 网络的多塔斜拉桥挂篮系统风险分析的新方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(4):865-873.
- [19] 王成汤,王浩,覃为民,等. 基于多态模糊贝叶斯网络的地铁车站深基坑坍塌可能性评价[J]. 岩土力学,2020,41(5):1670-1679.
- [20] 申建红,刘树鹏. 模糊动态贝叶斯网络在深基坑施工风险演化分析中的应用[J]. 安全与环境学报,2023,23(12):4211-4221.
- [21] 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.
- [22] 肖秦琨,高嵩,高晓光. 动态贝叶斯网络推理学习理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [23] ZADEH L A. Fuzzy sets [J]. Information & Control,1965,8(3):338-353.

(责任编辑 张 镅)