

# 复杂环境下铁路桥梁转体施工风险智能识别与动态评估模型研究

陈 龙 王洪泽 安磊基 郭明明

中铁建大桥工程局集团第四工程有限公司 黑龙江哈尔滨 15000

**摘 要：**铁路桥梁转体施工作为跨越既有线与重要交通通道时常用的一种特殊工法，能够有效减少对既有线路运营的干扰并提升施工效率。然而，在复杂环境条件下实施该工法，往往面临风险因素多、演化快和不确定性强等问题。传统风险评估方法以静态定性分析为主，缺乏动态更新和智能决策支持功能，难以满足现代工程对实时风险管控的需求。针对这一问题，本文提出了一种铁路桥梁转体施工风险智能识别与动态评估模型。该模型首先在系统调研文献和既有工程经验的基础上，构建了涵盖环境、结构、施工和管理四个维度的风险指标体系，并通过专家访谈和层次分析法对指标进行加权；随后采用模糊综合评价方法解决定性指标的量化难题，再结合贝叶斯网络建立风险因果关系，实现风险概率随施工进展的动态更新；最后以某跨铁路转体桥为案例进行工程验证。结果表明，该模型能够较准确地识别风险来源，识别准确率较传统静态方法提高约18%，且在摩阻力突增风险的预测中实现了约48小时的提前预警，为现场施工决策提供了有效支持。研究表明，将模糊综合评价与贝叶斯推理相结合的动态风险评估方法在复杂环境下的铁路桥梁转体施工中具有良好的工程适用性和推广价值。

**关键词：**铁路桥梁；转体施工；风险识别；动态评估；贝叶斯网络；模糊综合评价

## 引言

铁路桥梁转体施工工法因能够在短时间内完成大跨桥梁的就位而被广泛应用于跨越铁路、公路及城市轨道交通的重要节点工程中<sup>[1]</sup>。与传统的顶推或逐跨架设方法相比，转体施工能在不中断交通或最小化交通影响的前提下完成大跨度结构的施工，具有施工周期短、社会干扰小的优势。然而，随着铁路运营密度的提升以及城市建设空间日益紧张，转体施工所处环境往往更加复杂，既要面对地质条件多变、地下水丰富、气象条件极端化的外部挑战，又要应对桥梁自重大、支承系统复杂、施工工序多环节耦合等内部因素带来的风险<sup>[2]</sup>。

现有研究在风险评估方面取得了一定成果，但大多数方法仍以施工前的静态风险识别为主，通常依赖专家经验和层次分析法等手段来确定风险等级<sup>[3]</sup>。这类方法虽然能够在总体上把握施工可能面临的主要风险，但存在两个突出问题：其一，难以反映风险随施工进度而发生的动态变化；其二，无法结合实时监测数据对突发风险进行预测和预警，导致风险控制往往滞后于风险发生本身。随着智能传感技术和信息化施工平台的发展，实时监测数据的获取已经成为可能，如何将这些数据有效地融入风险评估体系，实现风险的动态识别与智能评估，

成为当前亟待解决的问题。

本文在系统梳理既有研究成果的基础上，结合文献调研、专家访谈以及多个转体施工工程的实践经验，构建了涵盖环境、结构、施工和管理四大类的风险指标体系。在方法上，采用模糊综合评价来实现定性指标的量化，并利用贝叶斯网络的因果推理能力将风险指标与监测数据关联起来，从而实现风险概率的动态更新。通过工程案例验证，该模型能够有效识别和预测复杂环境下的关键风险，为施工现场的风险管理和应急决策提供了可操作的技术路径。

## 一、风险识别与指标体系

风险识别是构建动态评估模型的前提。基于大量文献调研与专家访谈，本文将铁路桥梁转体施工风险划分为环境、结构、施工和管理四个维度。

在环境维度上，地质条件的差异是首要因素，土层分布复杂或软弱地基容易导致支承系统变形，从而增加转体过程中的不确定性。地下水位的变化则会影响基础承载力，特别是在雨季或地下水丰富的地区，可能导致桩基承载力下降或地基渗透破坏。此外，极端气象条件如大风、暴雨和低温结冰等，均可能直接威胁施工安全，

而既有道路或铁路交通的干扰则对施工组织和应急处置形成约束。这些外部因素具有高度不确定性，是风险的重要外部来源。

在结构维度上，桥梁上部结构自重过大往往导致支点反力增大，使得转体过程中的摩阻力显著增加。一旦摩阻力出现突变，将严重影响转体同步性和施工安全。支承系统的可靠性也是结构风险的关键环节，其在长时间荷载作用下可能发生疲劳或损坏，进而引发结构失稳。这些风险因素与桥梁自身的设计和受力特性密切相关，是转体施工的核心风险来源<sup>[4]</sup>。

施工维度的风险主要发生在操作环节。施工设备可能因长时间高强度运转出现故障；转体过程中若不同步则会造成梁体局部应力集中，甚至导致结构裂缝或永久变形；同步控制的失效也会造成施工偏差，影响转体精度与安全性。这类风险虽然通常短时间暴发，但后果严重，需要在施工组织中重点防控。

管理维度的风险往往是间接性的。组织协调不力可能导致不同施工工序之间衔接不畅，信息传递延误可能使现场未能及时响应监测数据的异常，而应急预案的缺陷则会在事故发生后放大损失。虽然管理风险不像结构或施工风险那样直接作用于桥梁实体，但其在风险应对和控制中的作用极为关键。

综合来看，铁路桥梁转体施工的风险是由外部环境、内部结构特性、施工操作不确定性与管理水平共同作用的结果。为确保评估的系统性，本文将风险指标进一步细化为四个一级指标、十二个二级指标及三十余个三级描述，并通过专家打分与层次分析法对指标权重进行确定，从而为后续模型的定量计算提供了基础。

## 二、模糊综合评价与贝叶斯网络融合

本文采用模糊综合评价与贝叶斯网络相结合的方法。模糊综合评价适用于处理定性与定量信息混合的情况，通过设定隶属函数将“复杂”“较差”等模糊语言变量转化为数值，解决了传统风险评估中无法量化的难题。评价集的构建覆盖了“低风险”“中等风险”“较高风险”和“高风险”等多个等级，隶属函数采用三角函数形式，能够较好反映风险程度的模糊边界。权重分配则综合采用专家打分与层次分析法（AHP），通过一致性检验保证了权重分配的合理性。

在模糊综合评价得到各风险因子的量化结果后，这些结果被输入贝叶斯网络作为条件概率的初始值。贝叶斯网络通过构建有向无环图来描述各风险因子之间的因

果关系，网络节点包括环境、结构、施工、管理等风险因子，边的方向表示因果依赖。条件概率表初始值由历史数据和专家意见共同确定。随着施工监测数据的实时输入，网络会基于贝叶斯公式更新各节点的后验概率，从而实现风险概率的动态推理。

具体而言，当监测到某一关键参数（如摩阻力、支点反力或同步偏差）接近预警阈值时，其输入节点的状态将发生变化，贝叶斯网络随之更新风险输出节点的概率分布。例如，当监测显示摩阻力逐渐升高，网络将推理出结构风险和总体风险概率随之增加，并输出对应的风险等级。该方法不仅能够反映风险随时间的演化，还能在多种风险因素交互作用下给出综合判断，提升了评估的科学性和实用性。

## 三、工程案例应用

为验证所提模型的工程适用性，本文选取一座铁路跨线转体桥作为应用案例，该桥全长128米，转体重量约为5600吨，需在既有高速铁路与市政主干道上方进行转体就位操作，工程对施工安全与线形精度均提出了严格的要求。工程实际施工被划分为基础施工、转体前准备、转体实施与对接闭合四个主要阶段，不同阶段的风险侧重点存在明显差异。施工前期基于专家打分与模糊综合评价得到的整体风险指数为0.62，表明工程处于较高风险水平，进一步分析显示环境与结构因素对总体风险的贡献最大，分别占比约为0.28与0.33，而施工与管理因素的初始权重相对较小但不可忽视。进入转体实施阶段后，现场布设的测量与监测系统实时采集了包括瞬时风速、累计降雨、支点反力、转体摩阻力、梁体挠度与同步控制偏差等关键参数，这些参数被按分钟级或小时级频率输入模型进行动态推理。

在一次关键的转体作业中，模型基于既有观测与历史条件推断出在转角接近45度时摩阻力出现突变的概率较高，对应的风险概率为0.31。随后实际监测显示当转角达到48度时摩阻力从初始4.6兆帕上升至5.2兆帕，接近设计的控制阈值，此时模型已于约48小时之前发出高风险预警。施工单位据此提前实施了润滑、逐步调整同步推进速率与增加临时同步监控策略，从而将潜在的超限风险控制在可管理范围内，并最终顺利完成了转体作业而未发生结构性损伤或重大事故。通过对整个转体过程的风险指数变化曲线进行统计分析可见，环境风险指数在施工过程中总体维持在0.20到0.25之间波动，表明外部气象与地质条件虽有影响但并未出现剧变；相比之

下, 结构风险指数呈现从0.33上升到0.41的趋势, 反映出随着转体角度增加与荷载重新分配, 桥体本身受力特性带来的风险在逐步显现; 施工风险在同步控制环节一度上升至0.36, 随后在对接闭合后下降至约0.18, 显示出采取的临时控制措施对风险缓解具有明显效果; 管理风险则在0.12到0.15之间轻微波动, 说明管理改进在降低总体风险方面起到了辅助作用。

为了评估模型相对于传统静态评估方法的优势, 本文对比了两类方法在同一工程上的识别与预警效果。传统静态方法在施工前给出了“高风险”总体判定, 但无法细化到施工不同阶段的风险概率, 也无法实现对突发摩阻力变化等动态事件的提前预警。相较之下, 本文模型在该工程上的风险识别准确率提高了约18%, 并在关键事件上实现了约48小时的平均预警提前量, 这一提前量在现场应急处置中具有显著的实用价值, 不仅为采取润滑与同步调控争取了时间, 也避免了可能导致延误与经济损失的应急停工。基于这些量化结果, 模型在工程实操层面的有效性得到了验证, 证明了将模糊评价与贝叶斯推理结合应用于转体施工动态风险评估的可行性与工程价值。

#### 四、讨论与展望

本文提出的风险智能识别与动态评估模型在实际应用中展现出较好的效果, 但仍存在一些改进空间。首先, 指标权重的确定依赖专家意见, 存在一定主观性。未来可通过大规模历史工程数据训练机器学习模型, 自动优化权重分配, 从而提升模型的客观性与自适应能力。其次, 监测数据的完整性和准确性直接影响模型推理结果, 若数据缺失或噪声过大, 可能导致评估偏差。因此有必要进一步发展多源数据融合与异常数据修复技术, 以提高输入数据的可靠性。

此外, 贝叶斯网络虽然能够较好处理小样本条件下的因果推理, 但在大规模数据环境下计算复杂度较高。未来研究可探索结合深度学习与概率图模型的方法, 以实现大规模实时数据的高效处理。另一方面, 数字孪生

技术的发展为风险动态评估提供了新的思路, 将实际工程监测数据与虚拟模型实时耦合, 可以更直观地展示风险演化过程, 并在虚拟环境中模拟不同应对措施的效果。若能将本文模型与数字孪生平台结合, 将进一步提升风险预警的精度与可操作性。

#### 结束语

本文针对复杂环境下铁路桥梁转体施工风险识别与动态评估问题, 提出了一种模糊综合评价与贝叶斯网络相结合的智能评估模型。研究首先在文献调研和专家访谈的基础上构建了涵盖环境、结构、施工和管理四大类的风险指标体系, 并通过模糊综合评价实现定性指标的量化; 随后采用贝叶斯网络建立因果关系图, 实现了风险概率随施工进度动态更新; 最后以某铁路跨线转体桥为案例进行验证, 结果表明模型能够有效识别风险并提前48小时发出预警, 风险识别准确率提升约18%。该研究为铁路桥梁转体施工的风险管控提供了一条切实可行的技术路径, 对提升施工安全水平具有重要意义。未来可结合物联网、大数据与数字孪生等先进技术进一步优化模型, 实现更高水平的智能化与精细化风险管理。

#### 参考文献

- [1] 裴元江, 史彦伟, 李亚非, 等. 基于FAHP-云模型的PC箱梁桥转体施工风险分析与控制[J]. 公路交通科技, 2021, 38(08): 101-109.
- [2] 徐春东, 胡洲, 关俊锋, 等. 跨线铁路转体桥施工技术发展综述[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(06): 54-60. DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20211210.009.
- [3] 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(03): 492-501.
- [4] Wu Y, Wang Y, Liu H, et al. Risk assessment of bridge construction investigated using random forest algorithm[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 20964.