

基于ISM-BN的海底隧道工程进度风险评估研究

张菲菲

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年3月27日; 发布日期: 2025年4月29日

摘要

海底隧道工程作为跨海交通体系的重要组成部分, 其建设过程面临地质复杂、环境敏感、技术高难等多重挑战, 进度风险管理存在显著特殊性。本文以某大型海底隧道工程为研究对象, 聚焦进度风险分析的理论与方法创新, 基于解释结构模型和贝叶斯网络模型, 构建“风险识别-层级解析-因果推理”的全链条研究框架, 旨在解决如何系统识别独特性进度风险因素、量化风险因素的相互作用关系与层级结构以及追溯关键风险致因链并提出精准防控策略的问题。

关键词

海底隧道工程, 进度风险管理, 风险评估, 贝叶斯网络, 解释结构模型

A Study on Schedule Risk Assessment of Subsea Tunnel Engineering Based on ISM-BN

Feifei Zhang

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Mar. 27th, 2025; published: Apr. 29th, 2025

Abstract

As a critical component of cross-sea transportation systems, subsea tunnel engineering faces multifaceted challenges during construction, including geological complexity, environmental sensitivity, and technical sophistication, resulting in unique characteristics in schedule risk management. This study focuses on a large-scale subsea tunnel engineering, aiming to advance theoretical and

methodological innovations in schedule risk analysis. By integrating the Interpretive Structural Model (ISM) and Bayesian Network (BN), a comprehensive research framework encompassing “risk identification, hierarchical analysis, and causal inference” is developed. The objectives are to systematically identify unique schedule risk factors, quantify their interactions and hierarchical relationships, and trace critical causal chains to propose targeted risk mitigation strategies.

Keywords

Subsea Tunnel Engineering, Schedule Risk Management, Risk Assessment, Bayesian Network (BN), Interpretive Structural Model (ISM)

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的加速和区域经济一体化的推进，对高效交通基础设施的需求日益增加，地下空间的开发受到广泛关注，隧道及地下工程的建设已经取得了丰富的成果，我国目前完成的隧道数量以及长度均位居世界第一[1]；水下隧道同样蓬勃发展，至今开工建设的水下隧道约 300 条，其中海底隧道超过 10 条[2]，我国内地首条海底隧道厦门翔安海底隧道于 2010 年竣工通车。近年来，海底隧道工程规模的显著提升[1]，其工程建设周期更长、施工地质条件更复杂、建设技术难度更大，施工过程中面临着更多的风险，包括安全风险、技术风险、环境风险、进度风险及其他风险[3][4]。进度控制一直是工程项目建设关注的焦点[5]，海底隧道工程作为国家重点战略项目，如期完工是发挥社会效益和经济效益的重要保证。在此现实背景下，研究海底隧道工程的进度管理问题，具有一定的必要性。

随着风险管理研究的不断深入，目前已经形成了一些应用广泛的风险分析方法，例如集对分析法(Set Pair Analysis, SPA)、主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)、层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, AHP)、事件树分析法(Event Tree Analysis, ETA)等。这些风险分析方法为风险管理提供了丰富的途径，但也存在一些局限性。与其他风险分析方法相比，贝叶斯网络方法对于风险分析的核心优势在于[6][7]：首先能够结合不同信息来源用于定量分析，同时也不要求数据的完整性；其次能够处理分析多因素交互作用影响，表明风险的传导路径，适用于复杂系统风险分析；此外还能够基于贝叶斯定理实现双向推理，既可预测风险后果(前向推理)，也可追溯风险根源(后向诊断)。因此，贝叶斯网络能够有效适应海底隧道工程复杂系统和风险因素的特性，克服传统风险分析方法在客观性、准确性、系统关系表达和推理方面的不足，为海底隧道工程进度风险因素的研究与分析提供了成熟的理论基础和分析工具。为了从根本上实现对隧道工程施工风险和进度目标的有效控制，提高海底隧道工程项目的综合效益，有必要开展识别海底隧道工程施工进度风险因素的贝叶斯网络模型的研究。

2. 研究综述

2.1. 隧道工程进度风险管理相关研究

隧道工程风险管理的代表人物是美国的 Einstein [8][9]，他指出了隧道工程风险分析的特点和应遵循的理念，为隧道项目的风险分析提供了理论依据。国内最早针对隧道风险管理的研究是同济大学的丁士昭教授对上海地铁建设过程中关于风险和保险的模式研究[10]。随着隧道工程技术的提升和项目管理理

论的发展,针对隧道工程进度风险管理和控制的研究现状呈现出多方法、多角度的研究趋势,为隧道工程的进度管理提供了丰富的理论基础和实践指导。

首先,传统工程进度风险管理的相关理论和方法被广泛应用于隧道工程中。Moret 等[11]基于蒙特卡洛模拟构建了预测铁路隧道施工成本和进度的不确定性模型,考虑了施工过程中的可变性、重复活动之间的相关性和破坏性事件这三个不确定性来源。Hyun 等[12]对盾构法隧道施工的安全风险因素进行分析,借助故障树法 FTA 和层次分析法 AHP 评估隧道施工的风险水平。其次,许多学者将隧道工程在施工技术、施工方法与施工环境等方面的独特性纳入了进度风险研究中。Marco [13]对全球许多大型铁路或公路隧道工程的数据集进行了实证分析,研究了影响大型隧道建设成本超支和进度延误的主要因素,认为工程规模和复杂性是导致大型隧道建设项目典型性能表现不佳的重要因素;王鹏[14]通过类比分析方法,提出了影响复杂艰险高原山区铁路进度目标的 6 个主要因素,包括高原气候、区域特点地形地貌等特征因素。

其次,随着信息技术水平的提升和建筑行业的数字化发展,建筑信息模型 BIM 等信息化技术和机器学习等人工智能方法为进度风险管理提供了更为精确和高效的工具[15][16]。Mahmood Zadeh 等[17]使用机器学习方法和元启发式优化算法来预测进度和成本参数,认为对隧道进度和成本影响最大的因素分别是钻井机械系统和地下水的影响。目前普遍认为人工智能等信息技术的广泛采用是必然的趋势,但考虑到建筑业固有的复杂性[18],这些方法在建设工程项目的工期估算实践中还面临着数据质量和模型适用性等挑战。Liu 等[19]认为地质条件是长距离隧道施工中最重要不确定因素,提出了一种鲸鱼优化算法改进的随机森林(WOA-RF)方法,为地质不确定性下长距离隧道施工进度调度和风险控制提供科学依据。

与陆上隧道相比,海底隧道工程通常规模更大、施工更复杂,进度风险管理也面临更大的挑战。从地质条件来看[20]-[22],海底隧道施工区域的地质条件复杂,需穿越断层破碎带、高渗透性砂层等复杂地层,同时承受高压地下水与海水渗流的双重作用,容易出现工程灾害;从施工环境方面[23][24],海底隧道工程通常位于海洋生态环境区域,施工环境进一步限制了海底隧道施工窗口期与工艺的选择;此外,海底隧道施工技术的特殊性[25][26]与长距离、多工种的协同难度,使得海底隧道工程呈现出高复杂性特征。目前针对海底隧道风险管理的研究主要聚焦在安全风险与施工风险方面。王梦恕[27]对海底隧道的设计、施工和运营的安全风险进行了系统性分析,为我国海底隧道的风险研究工作做出了突破性的贡献。Dammyr 等[28]对挪威海底隧道地质工况风险进行了深入的研究。谭光宗[29]对海底隧道钻爆法、沉管法、盾构法分别进行风险分析和评估。在进度风险管理方面,Heeyoung 等[30]以盾构隧道工程为研究对象进行风险管理研究,同时对项目进度过度延迟现象进行了分析。李一勇等[31]以沉管浮运安装为主线,梳理了沉管隧道工程施工的关键线路,并提出了进度管理的方法和建议。王焰[32]分析了断层破碎带等 4 种典型地层条件下,大直径盾构隧道的掘进速度及刀具磨损情况,为盾构隧道施工进度管理提供参考。

综上所述,我国海底隧道工程风险管理研究虽然取得了一些成果,但在进度风险管理方面还缺乏系统性和全面性的研究。本文将结合工程实践,基于风险管理理论对海底隧道工程进度风险进行识别、分析、评估,并提出适用的风险应对措施和进度管控措施。

2.2. 贝叶斯网络在风险管理中的应用研究

贝叶斯网络因其概率论、图论和决策分析的优势,已被广泛应用于风险管理领域,包括质量风险、投资风险、安全风险、进度风险等方面。Hon 等[33]系统回顾了贝叶斯方法在工程管理研究中的应用,总结了贝叶斯网络在工程管理中的 11 个应用领域的研究,其中安全管理和风险管理是应用最多的。在隧道与地下工程领域,周圆媛等[34]通过贝叶斯优化算法建立岩溶区盾构隧道施工安全风险评估模型。肖琪琳等[35]收集了我国地铁施工安全事故数据,构建贝叶斯网络对地铁施工安全风险进行诊断推理,认为关键

风险因素为施工测量数据不准确、施工组织或施工方案不详细及操作过程连接不合理。Koseoglu 等[36]提出了一种基于贝叶斯信念网络(BBN)的隧道掘进机(TBM)施工进度风险评估方法,分析了地质条件和盾构机施工方法对工程延误的影响作用。Ou X 等[37]基于 50 例典型隧道塌陷案例,构建了基于参数学习的公路隧道塌方的动态贝叶斯网络风险评价方法,从水文地质条件、施工技术、施工管理三方面建立了风险指标体系。

总体而言,贝叶斯网络模型已经在风险管理领域取得了丰富的研究成果。其模型发展已经日趋成熟,能够有效适应海底隧道工程复杂系统和风险因素的特性,为海底隧道工程进度风险因素的研究与分析提供了成熟的理论基础和分析工具。

3. 海底隧道工程进度风险因素识别

3.1. 基于文献研究的海底隧道工程进度风险因素

现有研究对风险因素的分类尚未形成统一框架,且不同工程背景下的风险优先级存在显著差异。国内外有不少学者对海底隧道工程进度风险因素进行了多种角度的研究和探索,为整合碎片化研究成果,本文基于文献研究法,系统梳理了国内外现有研究成果,聚焦海底隧道工程进度风险的共性因素与分类逻辑,归纳了现有文献中高频提及的 4 类核心风险:

1) 环境风险因素: 环境风险包括自然环境和社会环境风险。首先,自然环境风险包括自然界中多种可预测的以及不可预测的风险,主要分为水文气象和工程地质两个方面。水文气象条件包括冬季寒潮大风、台风、潮位、波浪等恶劣气象海况,会给施工带来很大影响。工程地质条件是指海底隧道通常会穿越复杂的地质单元,常存在断层、软弱夹层、岩溶发育等不良地质现象。其次,社会环境风险主要包含社会影响、环境保护等方面。海底隧道施工可能对沿线居民的生活和出行造成不便,引发社会不稳定因素。此外,海底隧道工程规模大、复杂性高,需严格遵守国家有关海域施工、海事行政许可管理规定的政策,实现工程的社会效益。

2) 施工技术风险因素: 首先,海底隧道的地质勘探难度大。海底隧道通常采取在海平面上进行地质勘探与在隧道内部进行地质勘探相结合的方法,但仍很难准确掌握施工区域内的水文地质情况,只能采取被动应对的方式。其次,施工方法难度大。海底隧道工程常见的施工方法包括钻爆法、盾构法和沉管法等,施工工艺复杂,工序众多,可能诱发风险事故的因素繁杂。

3) 施工管理风险因素: 管理性因素对海底隧道施工进度影响主要体现在施工组织管理、施工现场管理、资源配置和安全管理等方面。施工组织设计不合理、定制设备材料的供应不及时或质量不合格、安全管理不到位,都可能影响工程进度。

4) 组织协调风险因素: 海底隧道工程通常规模大、施工参与方众多,包括项目实施各方、相关政府部门和其他相关单位(如公安系统、交通管理部门等),可能涉及许多外部审批与配合工作,协调不畅往往会导致工程进度滞后。

3.2. 基于工程资料统计的海底隧道工程进度风险因素

3.2.1. 工程概况

本研究以 QJ 海底隧道工程为研究对象,该工程作为连接滨海城市核心区与新兴经济区的重要交通通道,具有显著的战略价值。工程主体由双向六车道海底隧道构成,总长度约 17.5 公里,最大埋深达海平面以下 115 米,整体建设规模与施工难度均处于国际领先水平。

该海底隧道工程项目总工期 72 个月。实际进度监测显示,受复杂地质条件、设备故障频发及外部供应链波动等因素影响,施工进度严重落后于原定计划,且实际进度与计划进度的偏差有持续扩大的风险,

对安全、质量、成本等其他项目目标的实现造成巨大的压力，亟待通过系统性风险分析实现精准管控。

3.2.2. 海底隧道施工进度情况统计

该海底隧道工程在建设前期对施工进度提出了明确的进度管控目标，并在施工过程中建立了严格的施工日志、监理日志等数据记录制度。本文选取了自 2022 年 9 月开工至 2024 年 9 月期间、涵盖 6 个标段的共计 602 份施工周报，根据周报中“上周计划工作完成情况”记录表及其他进度相关信息统计进度风险因素。经文本识别、数据清洗和校准后，共保留 430 条进度计划未完成记录，摘录部分如表 1 所示：

Table 1. Statistics on the non-completion of construction programme of the subsea tunnel engineering (Partial)
表 1. 该海底隧道工程施工进度计划未完成情况统计(部分)

日期	标段	作业事项	施工内容	完成情况	未完成原因
2022/11/26	TJ-03	施工组织设计的报审	/	/	等待业主组织统一评审
2023/4/28	TJ-03	主线小里程	主线小里程上台阶开挖及支护本周计划完成	75%	小里程掌子面围岩较破碎，现场进行超前帷幕注浆，进尺减小
2023/6/23	TJ-02	主线明挖隧道	基坑开挖计划施工完成 1000 m ³	50%	基坑围护结构监测预警，停工整顿
2023/12/22	TJ-04	服务隧道	开挖计划完成 9 m	70%	因出水进行帷幕注浆停 4 d，开挖台架修补停 1 d。
2024/4/12	TJ-04	北线隧道	小里程仰拱计划完成 36 m	33%	小里程底板混凝土返工处理
.....					

本文依据海底隧道工程特性，遵循全面性、科学性、可行性原则，在文献分析的基础上结合工程资料统计，识别出 4 类共计 20 个海底隧道工程进度风险因素，具体清单如表 2 所示。

Table 2. List of schedule risk factors for the subsea tunnel engineering
表 2. 海底隧道工程进度风险因素清单

一级风险因素	二级风险因素	编码	引证文献
环境因素	涌水/渗水风险	A1	刘世伟等(2018) [21]，Xue 等(2019) [38]
	岩性不稳定风险	A2	Pyvind 等(2017) [28]，Zhang 等(2024) [20]
	社会政策影响	A3	Wang 等(2020) [39]，Sihombing 等(2021) [40]
	极端天气影响	A4	Forcael 等(2018) [41]，杨东辉(2021) [42]
施工技术风险因素	技术/工法调整	A5	Hong 等(2017) [26]，Niu 等(2022) [4]
	施工功效不足	A6	何建辉(2019) [43]，Konyukhov (2022) [44]
	勘察设计误差	A7	Zhang 等(2023) [3]，Sun 等(2023) [25]
组织协调风险因素	作业班组变更	A8	李政道等(2020) [45]
	外部协调冲突	A9	赵泽斌等(2018) [46]，Koseoglu 等(2021) [36]
施工管理风险因素	作业面限制	A10	黄建文等(2017) [47]，李小雪(2023) [48]
	材料设备供应不足	A11	Sihombing 等(2021) [40]，Koseoglu 等(2021) [36]

续表

施工界面模糊	A12	Andiyan (2021) [49], 李小雪(2023) [48]
工序衔接不畅	A13	Shelake 等(2022) [50], Andiyan (2021) [49]
设备故障维修	A14	Marco 等(2021) [13], Koseoglu 等(2021) [36]
施工质量不合格	A15	李政道等(2020) [45], 申建红(2022)等[51]
设备安装调试延迟	A16	Marco 等(2021) [13], Koseoglu 等(2021) [36]
评审验收延迟	A17	赵泽斌等(2018) [46]
动态安全监管	A18	Hong 等(2017) [26], 李小雪(2023) [48]
现场安全隐患	A19	Marco 等(2021) [13], 田水承等(2023) [52]
资金拨付延迟	A20	Wang 等(2020) [39], 李政道等(2020) [45]

3.3. 海底隧道工程进度风险等级评估

3.3.1. 风险矩阵

工程中的风险可定义为事故发生概率及其造成损失的组合，风险矩阵即是一种用于评估和管理风险的工具，通过将风险的可能性(发生概率)和影响程度(造成损失的严重性)进行量化，从而确定风险的优先级。其核心原理是基于风险事件发生的概率和风险事件的影响程度两个维度来评估风险评估。

本文风险等级矩阵如表 3 所示，其中 R1、R2、R3 分别表示低风险、中风险、高风险。

Table 3. Risk matrix

表 3. 风险矩阵

风险等级		风险损失				
		A 非常严重	B 严重的	C 需重视的	D 需关注的	E 可忽略的
发生可能性	1. 频繁出现	R1	R1	R1	R2	R2
	2. 可能出现	R1	R1	R2	R2	R2
	3. 偶尔出现	R1	R2	R2	R2	R3
	4. 很少出现	R2	R2	R2	R3	R3
	5. 几乎不出现	R2	R2	R3	R3	R3

3.3.2. 风险因素等级评估

Table 4. Overall risk ranking assessment of schedule risk factors for subsea tunnel engineering

表 4. 海底隧道工程进度风险因素的整体风险等级评估

编码	发生概率评级	损失评级	风险等级	编码	发生概率评级	损失评级	风险等级
A1	1	3	R1	A11	2	4	R2
A2	2	3	R2	A12	3	3	R2
A3	3	2	R2	A13	3	2	R2
A4	4	2	R2	A14	3	3	R2
A5	3	3	R2	A15	4	3	R2
A6	3	3	R2	A16	4	3	R2

续表

A7	5	4	R2	A17	4	2	R2
A8	3	2	R2	A18	4	4	R3
A9	3	3	R2	A19	5	3	R3
A10	1	2	R1	A20	5	2	R2

参照表 3 的海底隧道工程进度风险矩阵，以工程资料统计的风险因素发生频次评估发生可能性，以工程资料统计的风险因素导致平均滞后天数评估风险损失，以 R1、R2、R3 对项目的所有施工进度风险因素进行评估和衡量，所有因素的风险等级评估情况如表 4 所示。根据统计结果，R1 等级的高风险因素主要包括 A1 涌水/渗水风险和 A10 作业面限制。下一步将利用以上的统计数据 and 结论，借助贝叶斯网络，对海底隧道工程的施工进度风险进行建模研究和分析。

4. 海底隧道工程风险因素评估模型构建

4.1. 海底隧道工程进度风险因素的解释结构模型

Table 5. Reachable set R, antecedent set Q, and their intersection set T

表 5. 可达集、先行集与交集

	可达集 $R(A_i)$	先行集 $Q(A_i)$	交集 $T(A_i)$
1	1, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20	1, 7	1
2	2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20	2, 7	2
3	3, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 20	3	3
4	4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20	4	4
5	5, 6	1, 2, 4, 5, 7, 18	5
6	6	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 18	6
7	1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20	7	7
8	6, 8, 10, 12, 13	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 18	8
9	6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 20	1, 2, 3, 4, 7, 9, 18	9
10	10	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 12, 18, 19	10
11	11, 13, 16	1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 18, 20	11
12	6, 10, 12, 13	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 12, 18	12
13	13	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20	13
14	13, 14, 15, 16, 17	1, 2, 3, 4, 7, 9, 14, 18, 20	14
15	13, 15, 17	1, 2, 3, 4, 7, 9, 14, 15, 20	15
16	13, 16	1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14, 16, 18, 20	16
17	17	1, 2, 3, 4, 7, 9, 14, 15, 17, 18, 19, 20	17
18	5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20	1, 2, 4, 7, 18	18
19	10, 17, 19	19	19
20	11, 13, 14, 15, 16, 17, 20	1, 2, 3, 4, 7, 9, 18, 20	20

在 3.2 节已经确定了 20 个海底隧道工程进度风险因素及编码，基于工程资料统计数据的词频共现分

析及因果关系梳理，得到邻接矩阵 A。根据布尔运算逻辑用 python 程序求解，5 次迭代后得到可达矩阵 M。对可达矩阵 M 进行层级分解得到可达集 R、先行集 Q 以及可达集与先行集的交集 T，如表 5 所示。

层级分解是依据可达集等于交集的原则来逐层抽取风险因素，依据层级分解的结果能够清楚看出海底隧道工程进度风险因素之间的层次关系。从上表 5 中可以看出 A6、A10、A13、A17 满足条件，故抽取 A6、A10、A13、A17 为第一层风险因素。逐层抽取后得到最终的分层结果如表 6 所示：

Table 6. Result of hierarchical decomposition

表 6. 风险因素分层结果

层级	风险因素编号	风险因素
L1	A6, A10, A13, A17	施工功效不足、作业面限制、工序衔接限制、验收评审延迟
L2	A5, A12, A15, A16, A19	技术/工法调整、施工界面模糊、施工质量不合格、设备安装调试延迟、现场安全隐患
L3	A8, A11, A14	作业班组变更、材料设备供应不足、设备故障维修
L4	A20	资金拨付延迟
L5	A9	外部协调冲突
L6	A3, A18	社会政策影响、动态安全监管
L7	A1, A2, A4	涌水/渗水风险、岩性不稳定风险、极端天气影响
L8	A7	勘察/设计误差

FINAL

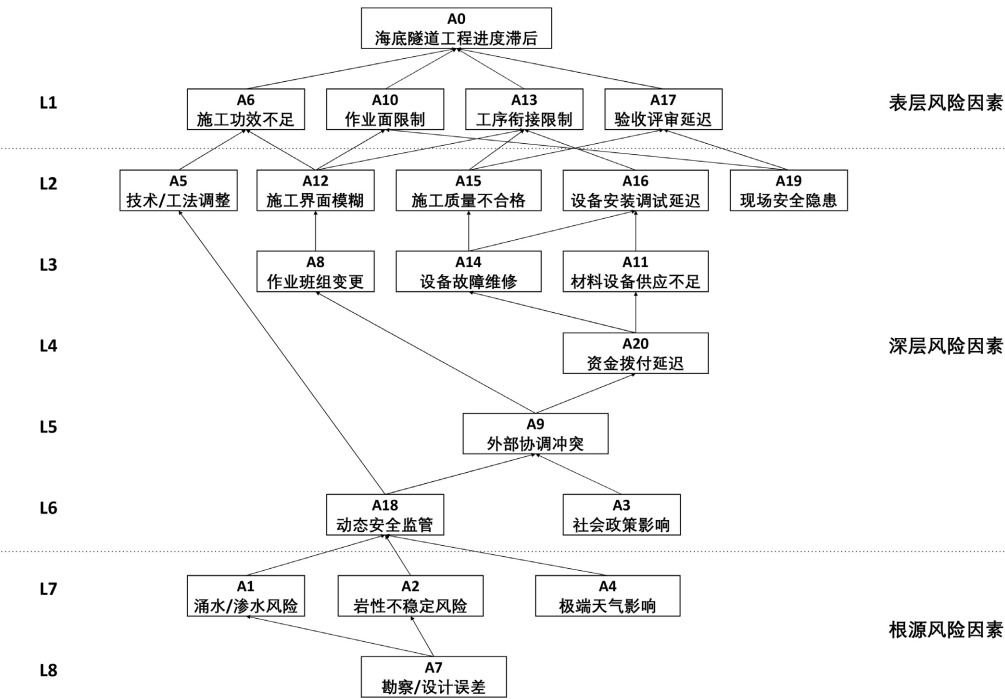


Figure 1. Bayesian network node
图 1. 贝叶斯网络节点

依据海底隧道工程进度风险因素层次分解的结果得到各风险因素的层次结构，依据可达矩阵 M 对各风险因素进行有向连接，最终建立的海底隧道工程进度风险因素的解释结构模型如图 1 所示。

4.2. 海底隧道工程进度风险因素的贝叶斯网络模型

4.2.1. 贝叶斯网络结构学习

由于解释结构模型与贝叶斯网络在建立原则上存在一致性，因此将解释结构模型转换与贝叶斯网络结构进行转换，得到贝叶斯网络如图 2 所示，其中网络结构中的节点与风险因素一一对应。

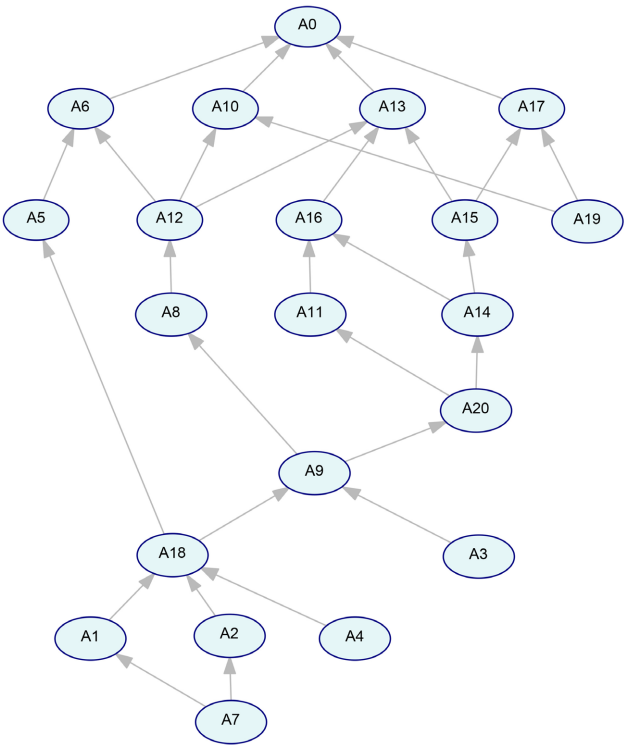


Figure 2. Bayesian network structure
图 2. 贝叶斯网络结构

4.2.2. 贝叶斯网络参数学习

Table 7. Risk ranking statistics for each node (Partial)
表 7. 各节点风险等级统计(部分)

周	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11		A19	A20
w1	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3		R3	R3
w2	R3	R3	R3	R3	R2	R3	R3	R3	R3	R2	R3		R3	R3
w3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3		R3	R3
w4	R3	R3	R3	R3	R2	R3	R3	R3	R3	R3	R3		R3	R3
w5	R2	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R2	R3		R3	R3
w6	R3	R3	R2	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R2	R3		R3	R3
.....														

本文基于工程资料统计得到了样本数量有限但是数据连续完整的样本集, 适合应用最大似然估计法进行贝叶斯网络的参数学习。本研究统计了该海底隧道工程自 2022 年 9 月开工至 2024 年 9 月期间(共计 104 周)的施工进度情况, 应用 3.3 节风险矩阵法, 对各节点的风险等级进行了科学评估, 评估结果如表 7 所示。

由于节点分布未知, 选用 EM 算法解决此类问题, 将初始节点概率分布设为均匀分布, 即每个状态的概率初始值均设为 1/3。在 GeNie4.0 软件中导入经规范化处理的数据, 选择最大似然估计法进行参数学习, 贝叶斯网络参数学习的结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出: 海底隧道工程进度处于高风险的概率为 21%, 中风险的概率为 44%, 低风险的概率为 35%, 表明该海底隧道工程进度整体风险水平较高, 与实际情况相符。

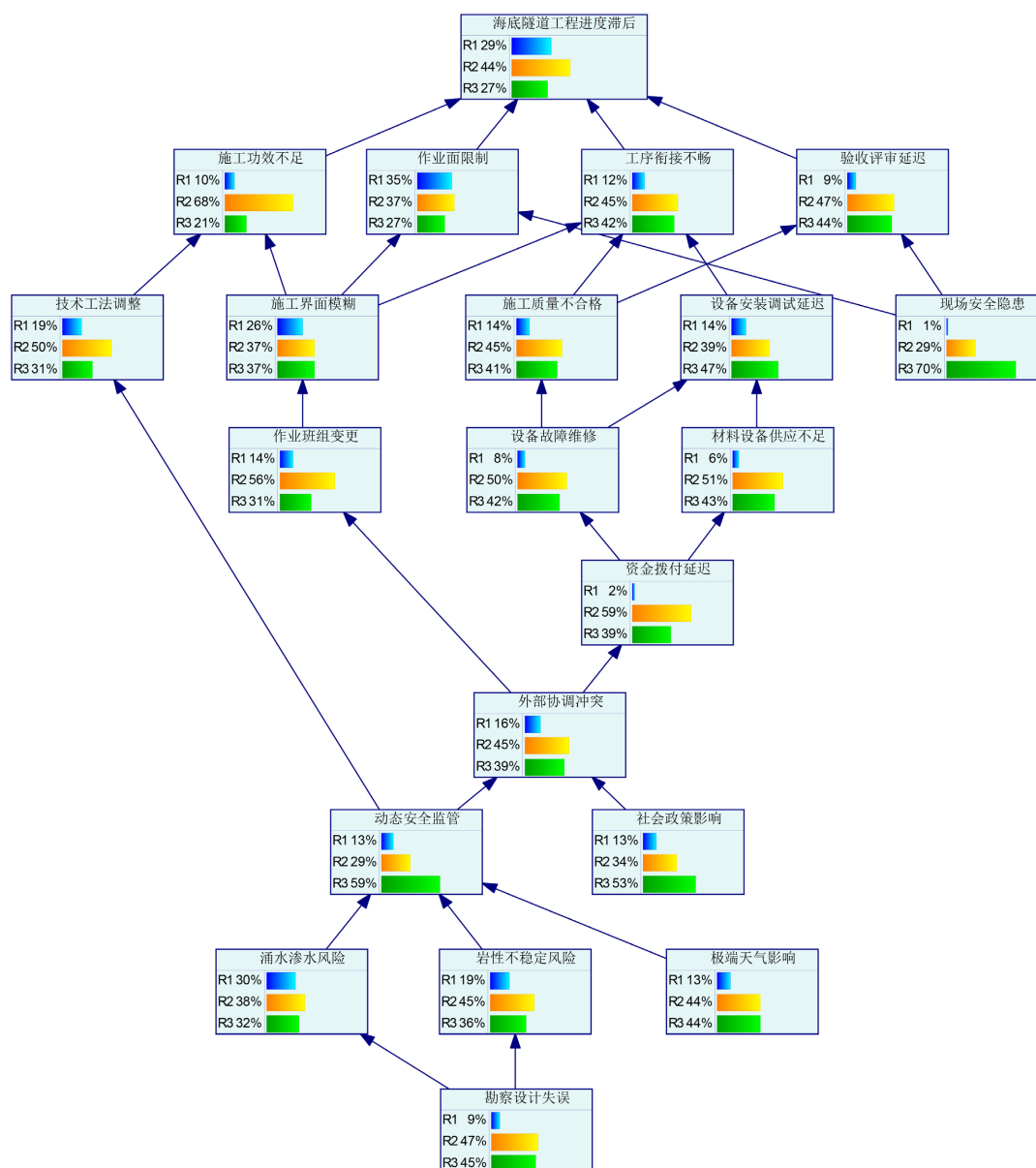


Figure 3. Results of Bayesian network parameter learning
图 3. 贝叶斯网络参数学习结果

5. 海底隧道工程贝叶斯网络模型推理分析

5.1. 贝叶斯网络诊断推理

利用 GeNIe4.0 软件进行贝叶斯网络诊断推理，将节点 A0 海底隧道工程进度滞后的风险等级 R1 发生概率设为 100%，进行反向诊断推理，得到每个节点在目标事件发生状态下的后验概率，如图 4 所示。

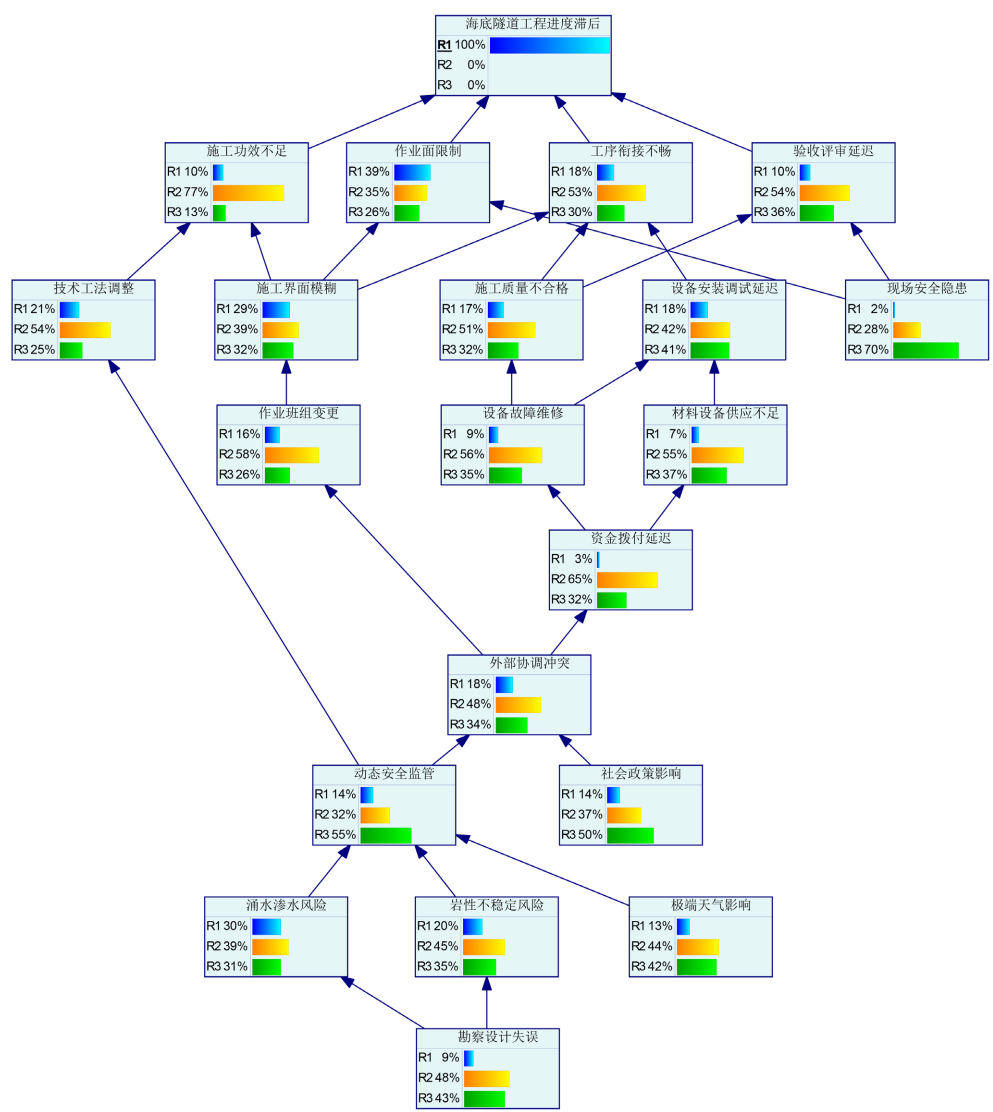


Figure 4. Bayesian network diagnostic inference analysis
图 4. 贝叶斯网络推理分析

由图 4 可知，当节点 A0 海底隧道工程进度滞后处于高风险等级 R1 状态的概率为 100%时，其他 20 个节点高风险等级 R1 状态的概率较高(超过 20%)的风险因素包括:A10 作业面限制、A12 施工界面模糊、A1 涌水/渗水风险和 A2 岩性不稳定风险。因此以上 4 个风险因素是海底隧道工程进度风险的关键因素。这与 3.3 节根据风险矩阵法评估的结果相符。其合理性可从以下三方面展开论述。

首先，根据第四章海底隧道工程解释结构模型层级划分的结果，A1 涌水/渗水风险与 A2 岩性不稳定风险位于 L7 层，属于根源性风险因素，会直接限制施工可行性。在贝叶斯网络中，A1 与 A2 作为核心

父节点,以多路径传导的方式直接或间接影响超过 70%子节点,其变化将对系统整体的进度风险产生重要影响。其次,根据第三章风险矩阵分析结果,本工程实例中因狭窄作业面限制而导致施工中断或进度滞后的频次极高,进度损失等级较高,被评估为高风险等级 R1。作业面狭窄属于低驱动力、高依赖性的依赖因素,受施工管理的复杂性和资源分配的局限性影响,风险发生概率进一步增加,因此属于关键风险因素。最后,尽管 A12 在前文研究过程中风险等级并不突出,但其隐性传导特性易引发其他风险因素的协同失效机制,间接放大进度偏差,例如通过施工界面模糊→工序冲突→资源浪费/质量缺陷→进度滞后,体现了管理层面的不足。

总的来说,贝叶斯网络推理分析的结果体现了关键风险因素之间的耦合作用。A1 与 A2 作为根源性地质风险因素,通过触发技术问题(如支护失效)与管理问题(如资源调配失误)形成复合风险链;A10 与 A12 则凸显了施工组织缺陷,其与地质风险的叠加效应体现了地质-技术-管理的链式反应过程,进一步放大了海底隧道工程进度损失。

5.2. 贝叶斯网络最大致因链分析

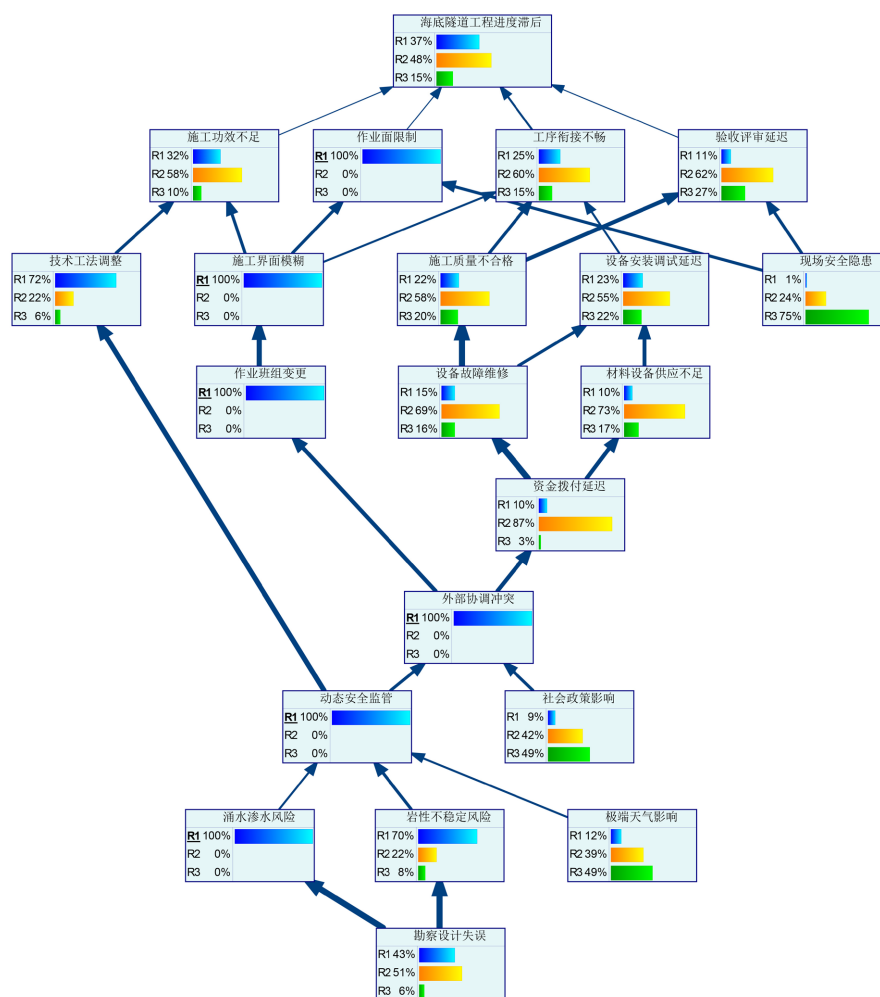


Figure 5. Maximum causal chain analysis of Bayesian networks

图 5. 贝叶斯网络最大致因链分析

从节点 A0 海底隧道工程进度滞后开始,依次找到后验概率最大的父节点,从而推导出造成海底隧道

工程进度风险的最大概率致因链。最终得到海底隧道工程进度风险贝叶斯网络模型的最大致因链为 A7 勘察/设计失误→A1 涌水/渗水风险→A18 动态安全监管→A9 外部协调冲突→A8 作业班组变更→A12 施工界面模糊→A10 作业面限制→A0 海底隧道工程进度滞后。推断过程如图 5 所示。

最大致因链反映了从源头设计缺陷到末端施工受阻的全链条风险传导逻辑。本节推理得出的最大致因链为 A7 勘察/设计失误→A1 涌水/渗水风险→A18 动态安全监管→A9 外部协调冲突→A8 作业班组变更→A12 施工界面模糊→A10 作业面限制→A0 海底隧道工程进度滞后，这一结论具有内在合理性，但也需结合工程实际进一步审视其适用边界。

从因果链来看，勘察设计作为工程起点，其误差经工程地质条件显化为施工中的涌水/渗水事故，进而因施工安全监管与协调机制失效，引发班组更替与界面混乱，最终导致作业面资源挤占和进度失控。这一路径符合复杂工程系统中“技术失误→管理失能→组织失调”的典型风险放大规律，但也需注意两点潜在偏差：其一，动态安全监管(A18)与外部协调冲突(A9)的因果关系可能受第三方干预(如政策突变)影响，需补充环境变量(A3 社会政策影响)；其二，作业班组变更(A8)对施工界面模糊(A12)的作用强度可能因项目管理成熟度而异，提高项目管理成熟度能够有效降低整体进度风险。

5.3. 贝叶斯网络敏感性推理

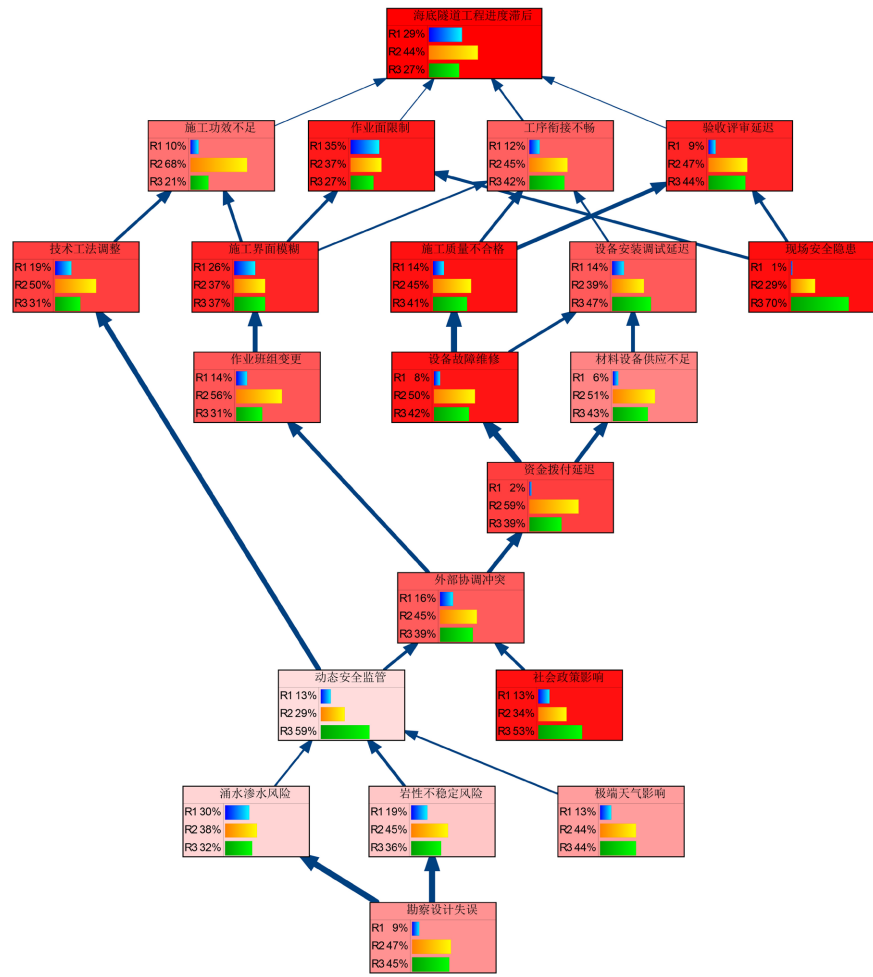


Figure 6. Bayesian network sensitivity inference
图 6. 贝叶斯网络敏感性推理

敏感性推理是指通过改变参数大小来验证参数的变化对目标节点发生概率的影响，高灵敏性参数的改变会对目标节点的影响更为显著。在 GeNIe4.0 软件中将节点 A0 海底隧道工程进度滞后设置为目标节点，进行敏感性分析，即可得到海底隧道工程进度风险敏感性分析结果，如图 6 所示。图中颜色的深浅代表了风险因素对海底隧道工程风险的影响程度，颜色越深则影响程度越高。

根据 GeNIe4.0 软件计算得到的每个节点的敏感性得分值最大值、最小值和平均值，将敏感性最大值排序如表 8 所示。

Table 8. Ranking of sensitivity scores for node
表 8. 节点敏感性得分排序

编码	风险因素	敏感度
A19	现场安全隐患	0.071
A3	社会政策影响	0.07
A15	施工质量不合格	0.069
A14	设备故障维修	0.067
A10	作业面限制	0.064

结合图 6 和表 8 可以看出，A19 现场安全隐患、A3 社会政策影响、A15 施工质量不合格、A14 设备故障维修和 A10 作业面限制对目标节点的敏感度较高，说明这些风险因素微小的变化都可能会对海底隧道工程进度产生较大的影响。这一结果具有合理性与现实依据。A19 现场安全隐患的高敏感性源于海底隧道封闭施工环境与高风险作业的叠加效应，一旦发生安全事故就会导致停工，引发进度延误。A3 社会政策影响的敏感性凸显了海底隧道工程与外部环境的强关联性，社会政策的变动可能还会使项目陷入停滞。A15 施工质量不合格与 A14 设备故障的敏感性则揭示了工程内在技术系统的脆弱性，在海底高腐蚀性环境下，设备损耗加速，微小质量缺陷可能演变为结构渗漏甚至作业面坍塌，造成严重的进度延误。A10 作业面限制作为终端影响因素，其敏感性反映了施工组织安排失当的累积效应，将引发“多米诺骨牌”式作业拥堵，导致工程进度的滞后。因此在工程建设过程中应重点关注敏感性因素。

5.4. 风险管控建议

1) 针对关键风险因素的管控建议

海底隧道工程进度风险的关键因素为 A1 涌水/渗水风险、A2 岩性不稳定风险、A10 作业面限制和 A12 施工界面模糊。针对地质条件问题，施工前应加强地质勘查和预测，利用超前地质预报和超前钻探技术识别风险区域，优化施工方案。针对注浆堵水施工频率高的问题，调整注浆堵水策略，选用高效材料和设备，提高堵水效果。同时需加强现场施工管理，明确施工界面划分，细化界面管理协议，避免施工效率低下。利用数字信息平台整合施工数据，优化施工组织设计，提升空间利用率。

2) 针对最大致因链风险因素的管控建议

海底隧道工程进度风险的最大致因链为：A7 勘察/设计失误→A1 涌水/渗水风险→A18 动态安全监管→A9 外部协调冲突→A8 作业班组变更→A12 施工界面模糊→A10 作业面限制→A0 海底隧道工程进度滞后。最大致因链揭示了海底隧道工程进度风险的级联放大效应，其管控需跳出单点应对思维，转向全链条协同干预，阻断风险传导。首先，勘察设计阶段应对根源因素进行防控，地质勘察可以采用创新探测技术提高勘察准确性。设计阶段需采纳“韧性设计”理念，对可能存在的地质风险做好应急预案。施工过程中应对涌水渗水情况做出实时响应，做好支护和排水措施。其次，对动态安全监管(A18)与外部协调

冲突(A9)的管控需依托数字技术打破信息孤岛,可利用数字平台实现风险链预警,集成地质监测数据、施工进度看板和外部审批流程,提高工作效率。最后,通过优化施工组织设计实现作业面资源的弹性配置,减少作业面限制对进度的影响。

3) 针对敏感性风险因素的管控建议

对海底隧道工程进度风险敏感性最大的五个因素分别是 A19 现场安全隐患、A3 社会政策影响、A15 施工质量不合格、A14 设备故障维修和 A10 作业面限制。为此需构建“预防-缓冲-适应”三位一体的风险管控体系,推行“智能安全网格化”实现安全管理,建立“政策沙盒”预演机制模拟不同政策情景下的施工方案。此外可加强技术培训和现场施工管理,避免施工质量不合格问题或设备故障问题,降低对施工进度影响。

6. 结论与启示

本研究以某海底隧道工程项目为依托,系统地探讨了海底隧道工程进度风险因素的识别、分析和管理工作,形成了较为完善的海底隧道工程进度风险评价体系。主要研究结论如下:

1) 海底隧道工程进度风险因素的系统识别:通过文献综述和现场调研,结合工程实践数据,系统地识别了影响海底隧道工程进度的主要风险因素,包括施工功效不足、作业面限制、工序衔接限制、技术/工法调整、施工质量不合格、设备安装调试延迟、材料设备供应不足、外部协调冲突、社会政策影响、极端天气影响、岩性不稳定风险、勘察设计误差、资金拨付延迟等。这些风险因素涵盖了施工管理、技术、环境、组织等多个方面,为后续的风险分析和管理工作提供了全面的基础。

2) 基于解释结构模型-贝叶斯网络的进度风险分析模型:通过构建基于 ISM 层级结构的贝叶斯网络模型,识别了海底隧道工程进度风险的关键因素及最大致因链,为风险管理提供了明确的方向,也验证了该方法在海底隧道进度风险管理中的适用性。

3) 风险管理对策和建议:针对模型分析结果,结合案例研究提出了具体的风险管理对策和建议,为实际工程中的风险管理提供了参考。

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述 2022 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
- [2] 肖明清, 孙文昊, 曲立清, 等. 胶州湾第二海底隧道总体设计方案研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(2): 199-216.
- [3] Zhang, D. (2023) An Overview of Subsea Tunnel Construction. In: *Key Technologies for Safety Construction of Mined Subsea Tunnels*, Springer, 1-48. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8753-3_1
- [4] Niu, F., Cai, Y., Liao, H., Li, J., Tang, K., Wang, Q., et al. (2022) Unfavorable Geology and Mitigation Measures for Water Inrush Hazard during Subsea Tunnel Construction: A Global Review. *Water*, **14**, Article 1592. <https://doi.org/10.3390/w14101592>
- [5] Liu, J.Y. (2012) Schedule Uncertainty Control: A Literature Review. *Physics Procedia*, **33**, 1842-1848. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.05.293>
- [6] Phan, T.D., Smart, J.C.R., Capon, S.J., Hadwen, W.L. and Sahin, O. (2016) Applications of Bayesian Belief Networks in Water Resource Management: A Systematic Review. *Environmental Modelling & Software*, **85**, 98-111. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.006>
- [7] Leu, S. and Chang, C. (2015) Bayesian-Network-Based Fall Risk Evaluation of Steel Construction Projects by Fault Tree Transformation. *Journal of Civil Engineering and Management*, **21**, 334-342. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.890643>
- [8] Einstein, H.H. and Vicky, S.G. (1974) Geological Model for Tunnel Cost Model. *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*, San Francisco, 24-27 June 1974.
- [9] Einstein, H.H. (1996) Risk and Risk Analysis in Rock Engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **11**, 141-155. [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(96\)00014-4](https://doi.org/10.1016/0886-7798(96)00014-4)

- [10] 丁士昭. 建设工程项目管理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [11] Moret, Y. and Einstein, H.H. (2016) Construction Cost and Duration Uncertainty Model: Application to High-Speed Rail Line Project. *Journal of Construction Engineering and Management*, **142**, Article 05016010. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001161](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001161)
- [12] Hyun, K., Min, S., Choi, H., Park, J. and Lee, I. (2015) Risk Analysis Using Fault-Tree Analysis (FTA) and Analytic Hierarchy Process (AHP) Applicable to Shield TBM Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **49**, 121-129. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.04.007>
- [13] De Marco, A. and Narbaev, T. (2021) Factors of Schedule and Cost Performance of Tunnel Construction Megaprojects. *The Open Civil Engineering Journal*, **15**, 38-49. <https://doi.org/10.2174/1874149502115010038>
- [14] 王鹏. 基于类比分析法的复杂艰险高原山区铁路施工组织工期指标关键参数研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(9): 155-160.
- [15] Abioye, S.O., Oyedele, L.O., Akanbi, L., Ajayi, A., Davila Delgado, J.M., Bilal, M., et al. (2021) Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Review of Present Status, Opportunities and Future Challenges. *Journal of Building Engineering*, **44**, Article 103299. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103299>
- [16] 黄锦庭, 肖仲华, 张立茂. 基于 BIM 和 NSGA-III 的超高层建筑施工进度多目标优化研究[J]. 工程管理学报, 2024, 38(5): 111-117.
- [17] Mahmoodzadeh, A., Nejati, H.R. and Mohammadi, M. (2022) Optimized Machine Learning Modelling for Predicting the Construction Cost and Duration of Tunnelling Projects. *Automation in Construction*, **139**, Article 104305. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104305>
- [18] Pan, Y. and Zhang, L. (2021) Roles of Artificial Intelligence in Construction Engineering and Management: A Critical Review and Future Trends. *Automation in Construction*, **122**, Article 103517. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>
- [19] Liu, D., Dai, Q., Tang, X., Zhang, R., Lu, T. and Chen, J. (2025) An Improved Random Forest-Based Operation Duration Prediction of Long-Distance Tunnel Construction Considering Geological Uncertainty. *Journal of Computing in Civil Engineering*, **39**, Article 04024060. <https://doi.org/10.1061/jccee5.cpeng-6041>
- [20] Zhang, W., Tang, X., Yang, W., Jiang, J., Zhang, H. and Li, P. (2024) Review of Tunnels and Tunnelling under Unfavourable Geological Conditions. *Geological Journal*, **59**, 2668-2689. <https://doi.org/10.1002/gj.4937>
- [21] 刘世伟, 盛谦, 朱泽奇, 等. 隧道围岩内地下水渗流边界效应影响研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4001-4009.
- [22] Wang, H.N., Wu, L., Jiang, M.J. and Song, F. (2018) Analytical Stress and Displacement Due to Twin Tunneling in an Elastic Semi-Infinite Ground Subjected to Surcharge Loads. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **42**, 809-828. <https://doi.org/10.1002/nag.2764>
- [23] 牛景轶, 金祖权. 海底隧道工程对海洋环境的污染方式、特点及防治[J]. 青岛农业大学学报(社会科学版), 2009, 21(4): 50-55.
- [24] 江崇旭, 那艳玲. 超长跨海隧道环境保障技术难题及对策[J]. 铁道建筑技术, 2022(12): 135-138.
- [25] Sun, Z., Zhang, D. and Fang, Q. (2023) Technologies for Large Cross-Section Subsea Tunnel Construction Using Drilling and Blasting Method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **141**, Article 105161. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105161>
- [26] Wang, Y.F. (2023) Study on Engineering Geological Comprehensive Survey Technology of Jintang Subsea Tunnel. *Railway Standard Design*, **67**, 30-36.
- [27] 王梦恕. 厦门海底隧道设计、施工、运营安全风险[J]. 施工技术, 2005(S1): 7-10.
- [28] Dammyr, P., Nilsen, B. and Gollegger, J. (2017) Feasibility of Tunnel Boring through Weakness Zones in Deep Norwegian Subsea Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **69**, 133-146. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.06.012>
- [29] 谭光宗. 大断面海底隧道建设的安全风险评估与控制对策[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [30] Chung, H., Lee, I., Jung, J. and Park, J. (2019) Bayesian Networks-Based Shield TBM Risk Management System: Methodology Development and Application. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **23**, 452-465. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0912-y>
- [31] 李一勇, 宁进进, 董辉, 等. 外海沉管隧道项目工期策划研究[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(5): 22-26+39.
- [32] 王焰. 沿海复合地层泥水盾构施工适应性分析[J]. 铁道建筑, 2019, 59(7): 65-68+92.
- [33] Hon, C.K.H., Sun, C., Xia, B., Jimmieson, N.L., Way, K.A. and Wu, P.P. (2021) Applications of Bayesian Approaches in Construction Management Research: A Systematic Review. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **29**, 2153-2182. <https://doi.org/10.1108/ecam-10-2020-0817>

- [34] 周圆媛, 何一韬, 赵璟璐, 等. 基于贝叶斯网络的岩溶区盾构隧道施工安全性分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 764-771.
- [35] 肖琪聃, 赵珍妮, 刘林超. 基于贝叶斯网络的地铁项目施工风险管理研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2021, 34(1): 138-144.
- [36] Koseoglu Balta, G.C., Dikmen, I. and Birgonul, M.T. (2021) Bayesian Network Based Decision Support for Predicting and Mitigating Delay Risk in TBM Tunnel Projects. *Automation in Construction*, **129**, Article 103819. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103819>
- [37] Ou, X., Wu, Y., Wu, B., Jiang, J. and Qiu, W. (2022) Dynamic Bayesian Network for Predicting Tunnel-Collapse Risk in the Case of Incomplete Data. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **36**, Article 04022034. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001745](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001745)
- [38] Xue, Y., Li, Z., Li, S., Qiu, D., Su, M., Xu, Z., et al. (2018) Water Inrush Risk Assessment for an Undersea Tunnel Crossing a Fault: An Analytical Model. *Marine Georesources & Geotechnology*, **37**, 816-827. <https://doi.org/10.1080/1064119x.2018.1494230>
- [39] Wang, Z., Liu, Z. and Liu, J. (2020) Risk Identification and Responses of Tunnel Construction Management during the COVID-19 Pandemic. *Advances in Civil Engineering*, **2020**, Article 6620539. <https://doi.org/10.1155/2020/6620539>
- [40] Mauretta, S., Purba, H. and Purba, A. (2020) Risk Identification in Tunnel Construction Project: A Literature Review. *Facta Universitatis-Series: Architecture and Civil Engineering*, **18**, 261-286. <https://doi.org/10.2298/fuace200704019m>
- [41] Forcael, E., Morales, H., Agdas, D., Rodríguez, C. and León, C. (2018) Risk Identification in the Chilean Tunneling Industry. *Engineering Management Journal*, **30**, 203-215. <https://doi.org/10.1080/10429247.2018.1484266>
- [42] 杨东辉. 青岛市 A 海底隧道海上地质勘探施工项目风险管理研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2021.
- [43] 何建辉. 钻爆法与掘进机法在引沁入汾工程中的应用比较[J]. 水利建设与管理, 2019, 39(4): 61-66+84.
- [44] Konyukhov, D.S. (2022) Analysis of Mechanized Tunneling Parameters to Determine the Overcutting Characteristics. *Mining Science and Technology (Russia)*, **7**, 49-56. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-49-56>
- [45] 李政道, 陈哲, 张丽梅, 等. 基于模糊综合评价理论的装配式建筑施工进度风险管理[J]. 建筑施工, 2020, 42(11): 2193-2196.
- [46] 赵泽斌, 满庆鹏. 基于前景理论的重大基础设施工程风险管理行为演化博弈分析[J]. 系统管理学报, 2018, 27(1): 109-117.
- [47] 黄建文, 杨青青, 黄琴, 等. 基于多因素影响下缓冲区设置的进度风险预警[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(1): 33-37+43.
- [48] 李小雪. 城市地下大空间施工安全风险耦合演变机理及应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [49] Andiyani, A., Putra, R.M., Rembulan, G.D. and Tannady, H. (2021) Construction Project Evaluation Using CPM-Crashing, CPM-PERT and CCPM for Minimize Project Delays. *Journal of Physics: Conference Series*, **1933**, Article 012096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1933/1/012096>
- [50] Shelake, A.G., Gogate, N.G. and Rajhans, N.R. (2022) An Integrated Approach for Identification and Prioritization of Risk Factors in Tunnel Construction. *Materials Today: Proceedings*, **65**, 1805-1812. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.855>
- [51] 申建红, 尹琪, 张宇馨, 等. 基于 ISM-BN 的国际铁路工程工期风险预警[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2022, 34(5): 389-397.
- [52] 田水承, 郭谦, 张江江, 等. 基于蒙特卡罗法的建筑工人不安全行为风险评估[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(2): 373-379.