



基于 ANP-SD 模型的跨海大桥施工阶段造价风险控制与仿真研究

袁剑波*, 曾恬宁, 刘顶立, 郭平

长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114

摘要: 为降低跨海大桥施工阶段的造价风险, 本文识别了 24 个风险指标, 并通过网络层次分析法确定权重。基于系统动力学方法 (SD), 构建了造价风险控制模型, 并以 HMH 跨海大桥为案例验证其有效性。结果表明, 项目团队协调、操作能力不匹配、项目进度变更、设计图纸中的错误、漏项, 以及施工子项目工艺流程不合理等为主要高风险因素。通过“单一策略控制”和“组合策略控制”进行仿真模拟, 结果显示组合策略更有效地降低了风险值。结论表明, 高风险指标需优先考虑, 并通过减少风险间的交互作用, 可以有效降低造价超支的可能性。

关键词: 跨海大桥; 造价风险; 网络层次分析法; 系统动力学; 组合策略控制

中图分类号: U418.8

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2026)03-0342-16

引言

随着中国综合国力的提升和交通事业的发展, 跨海大桥成为桥梁建设的新趋势, 它不仅缩短了交通距离, 促进了经济发展, 还节约了土地资源、降低了维护成本, 并具有保护生态和旅游观赏的价值。然而,

跨海大桥的建设面临着工程规模大、条件复杂、科技含量高和施工周期长等挑战, 常伴随着巨额投资和不可预测的成本。经不完全统计, 我国多个跨海大桥项目存在造价超支问题(表 1)^[1-7]。究其原因, 除项目本身复杂多变、风险模糊未知、相关定额不全、不可抗力的外界环境影响等因素外^[8], 跨海大桥施工阶段造

收稿日期: 2024-06-20; **修回日期:** 2024-08-23

基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(2020039); 湖南省研究生科研创新项目(CX20200826)

作者简介: *袁剑波(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为工程经济、项目管理。E-mail: yuanjb01@163.com(通讯作者)

曾恬宁(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为工程经济、项目管理。E-mail: 1625876580@qq.com

刘顶立(1990—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为公共安全规划及火灾风险防控。

郭平(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为工程经济、项目管理。

引用格式: 袁剑波, 曾恬宁, 刘顶立, 等. 基于 ANP-SD 模型的跨海大桥施工阶段造价风险控制与仿真研究[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2026, 18(3): 342-357. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240080. CSTR: 32282.14.JES.20240080

YUAN J B, ZENG T N, LIU D L et al. Research on Cost Risk Control and Simulation of Construction Stage for Cross-sea Bridges Based on ANP-SD Model[J]. Journal of Engineering Studies, 2026, 18(3): 343-358. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240080. CSTR:32282.14.JES.20240080

价风险的交互性及其传递路径的不明确性也是导致造价控制困难的关键因素之一。

关于跨海大桥造价控制的研究, 研究者们^[9-11]通过实际情况分析, 识别了造价控制的风险并提出了控制方案。张建等^[12]通过显著性成本分析和灵敏度分析方法, 找出了影响跨海大桥成本的重要项目——钢管桩、混凝土箱梁、钢围堰和敏感因素——施工用电、钢管桩、混凝土、钢筋、钢桁梁、钢围堰以及大型运输船等。这些研究通过文献查阅、实例分析和模型验证等方法, 独立分析了各种风险的影响及控制措施。然而, 由于跨海大桥是一个复杂的开放系统, 单一风险措施难以避免造价超支, 这促使学者们越来越关注风险间的交互关系。段晓晨等^[13]基于系统动力学, 分析了高铁区域水、动植物环境与建设投资等要素的相互作用和因果关系, 得出现场管理智能化水平、企业管理智能化水平、信息化建设程度对造价均有负反馈作用。周涛等^[14]基于系统动力学方法对知识价值与全过程工程咨询核心能力关系进行仿真分析, 揭示了知识价值链对全过程工程咨询核心能力的作用机理, 表明在知识价值链的作用下, 全过程工程咨询的各项核心能力随时间推移逐渐增长且增长速率逐渐加快。江新等^[15]利用网络层次分析法确定风险指标重要度, 构建了敏感性水利工程社会稳定风险演化系统动力学模型, 厘清其相关关系、模拟风险传播路径, 确定影响敏感性水利工程社会稳定的主要风险为公众风险感知。

尽管上述研究已经为造价控制提供了丰富的理论基础, 但大部分研究仍然局限于单一风险的识别和控制, 缺乏对跨海大桥复杂系统中多种风险相互作用的

综合分析。此外, 跨海大桥的已有研究多侧重于工程全过程的宏观层面进行探讨, 缺少针对具体项目施工阶段的精细化研究。因此, 本文以跨海大桥造价控制难点为研究对象, 聚焦其施工阶段的造价风险识别, 将网络层次分析法和系统动力学相结合, 构建了造价风险评估的系统动力学(system dynamics, SD)模型。并通过模型仿真, 验证并优化防范策略, 得出适用于跨海大桥项目的造价风险控制方法。

1 跨海大桥施工阶段造价风险指标分析

跨海大桥施工系统是一个内外部资源丰富且复杂的巨系统, 在此系统中, 各种风险伴随产生。首先, 跨海大桥的建设受自然环境和市场环境的影响很大, 如台风、地震的发生和政策法规的变动等都会对建设过程产生显著影响。其次, 施工人员素质、项目团队能力、人员培训质量等管理因素, 以及不可抗力导致的变更索赔、施工方案及技艺、合同不规范、内外部经济风险, 也会对施工阶段造价产生巨大影响。

因此, 全面准确地识别跨海大桥施工阶段造价风险是建立有效风险模型和进行造价控制研究的基础。鉴于跨海大桥施工系统的复杂性和动态性, 其造价风险需要从多元角度分析。在构建风险指标体系时, 可从环境、管理、施工组织设计、变更及索赔、合同、经济等角度提取指标集合。首先, 采用文献分析法, 在中国知网(CNKI)上以“造价风险”“跨海大桥成本”“大型工程管理”“施工风险控制”等关键词进行搜索, 共获取相关文献157篇。根据相关度、引用频次、发表时间等标准, 筛选匹配研究内容的文

表1 国内大型跨海大桥超支情况

Table 1 Overrun of large sea crossing bridges in China

通车时间	项目名称	批复概算/亿元	实际造价/亿元	超支比/%	来源
2008.5.1	杭州湾大桥主体工程	118.00	138.00	16.95	李成祥等 ^[2]
2009.12.25	金塘大桥	76.90	77.00	0.13	刘辉 ^[3]
2011.6.30	胶州湾大桥	100.00	147.92	47.92	张哉麟 ^[4]
2012.12.29	象山港大桥	70.00	75.00	7.14	宁波市人民政府公报 ^[5]
2013.7.19	嘉绍大桥	62.80	63.50	1.11	袁喆 ^[6]
2015.5.12	泉州湾大桥	69.23	70.00	1.11	黄林昊 ^[7]
2018.10.24	港珠澳大桥主体工程	381.18	480.00	25.92	广东省交通运输厅 ^[8]

献^[16-25], 并从中挑选出适用于跨海大桥施工阶段造价风险指标的初始集合。随后, 结合苏通大桥、杭州湾大桥和港珠澳大桥等案例对指标进行优化。最后, 组织专家组(人员组成如表2)进行讨论、筛选和补充, 最终整理得出跨海大桥施工阶段的24个造价风险指标, 并按上述6种提取角度进行分类, 形成跨海大桥施工阶段造价风险指标体系, 如表3所示。

2 跨海大桥施工阶段造价风险评估模型构建

跨海大桥作为连接不同地区的重要基础设施, 持

表2 评分专家组

Table 2 Rating expert group

单位	职务/职称	人数/名
科研院校	教授	1
	副教授	2
跨海大桥施工单位	总工程师	1
	商务部部长	1
	造价员	2
	施工员	2

续地参与着信息、物质与经济的交换过程。在这一过程中, 各种风险不仅各自存在, 还可能通过信息传递

表3 跨海大桥施工阶段造价风险指标体系

Table 3 Cost risk index system of sea crossing bridge construction stage

风险子系统	风险指标	来源
环境子系统(A)	台风、地震等突发自然灾害(A1)	潘放 ^[16] 、任传普 ^[22] 、杭州湾大桥案例分析、港珠澳大桥案例分析
	海泥、潮汐等不良建设环境(A2)	潘放 ^[16] 、港珠澳大桥案例分析
	政治风险(A3)	廖钰然 ^[18] 、Cheng ^[19] 、任传普 ^[22]
	海洋环保要求高(A4)	杭州湾大桥案例分析、专家组意见
管理子系统(B)	项目团队协调、操作能力不匹配(B1)	阙云龙等 ^[17] 、Cheng ^[19]
	施工资源管理风险(B2)	潘放 ^[16] 、阙云龙等 ^[17] 、Ma等 ^[20]
	造价人员限额意识不强(B3)	阙云龙等 ^[17] 、Cheng ^[19]
	进度管理风险(B4)	潘放 ^[16] 、阙云龙等 ^[17] 、Ma等 ^[20] 、胡靖堂等 ^[21]
	团队人员培训风险(B5)	廖钰然 ^[18] 、Cheng ^[19]
	施工人员技术素质风险(B6)	阙云龙等 ^[17] 、廖钰然 ^[18] 、胡靖堂等 ^[21] 、任传普 ^[22]
变更及索赔子系统(C)	项目进度变更风险(C1)	阙云龙等 ^[17] 、廖钰然 ^[18] 、Cheng等 ^[19] 、Ma等 ^[20] 、胡靖堂等 ^[21] 、朱文喜等 ^[23]
	设计图纸中的错误、漏项风险(C2)	潘放 ^[16] 、廖钰然 ^[18] 、Ma等 ^[20] 、胡靖堂等 ^[21] 、任传普 ^[22]
	技术变更风险(C3)	潘放 ^[16] 、廖钰然 ^[18] 、胡靖堂等 ^[21] 、任传普 ^[22]
	施工图量差风险(C4)	廖钰然 ^[18] 、胡靖堂等 ^[21] 、朱文喜等 ^[23]
	索赔风险(C5)	阙云龙等 ^[17] 、廖钰然 ^[18] 、Cheng等 ^[19] 、Ma等 ^[20] 、胡靖堂等 ^[21]
施工组织设计子系统(D)	外海定额计价标准缺失(D1)	潘放 ^[16]
	施工子项目工艺流程不合理(D2)	阙云龙等 ^[17] 、廖钰然 ^[18] 、Cheng等 ^[19]
	施工技术复杂性(D3)	阙云龙等 ^[17] 、廖钰然 ^[18] 、Cheng等 ^[19] 、胡靖堂等 ^[21] 、任传普 ^[22] 、朱文喜等 ^[23] 、孟昭辉等 ^[24]
	材料海上运输风险(D4)	潘放 ^[16] 、苏通大桥案例分析
	临时工程超常规投入(D5)	潘放 ^[16] 、港珠澳大桥案例分析
合同子系统(E)	合同纠纷(E1)	阙云龙等 ^[17] 、Cheng等 ^[19] 、Ma等 ^[20] 、杨震 ^[25]
	在合同中未明确规定工程范围(E2)	阙云龙等 ^[17] 、廖钰然 ^[18] 、朱文喜等 ^[23]
	建设方资金供应不及时(F1)	Cheng等 ^[19] 、Ma等 ^[20] 、任传普 ^[22]
经济子系统(F)	建筑材料价格上涨(F2)	阙云龙等 ^[17] 、廖钰然 ^[18] 、胡靖堂等 ^[21] 、任传普 ^[22] 、朱文喜等 ^[23] 、孟昭辉等 ^[24]

相互作用, 对其他风险产生影响。因此, 构建一个能深入探究和明确这些风险间相互关系及传递路径的风险模型, 对于实现跨海大桥造价的有效控制至关重要。

2.1 网络层次分析法确定风险指标权重

网络层次分析法(ANP)是 Saaty^[26]于 20 世纪 90 年代提出的一种适用于复杂结构的决策方法, ANP 处理问题时既能考虑到同一元素集内各元素之间的相互影响, 即内部依存性; 又能考虑到不同元素集之间的相互影响, 即外部依存性。目前已被广泛运用于安全评价^[27]、武器军事研究^[28]、风险分析^[29-30]、产业经济^[31]等方面。在跨海大桥施工过程中, 造价风险间存在相互依赖、相互影响的关系, 采用 ANP 不仅能有效反映出子系统中内在及外在联系, 同时能正确计算出各风险指标的全局权重。

首先, 邀请了专家组对指标间的相互关系进行判断, 并据此构建了相应的 ANP 网络结构, 如图 1 所示。图中跨海大桥施工阶段的造价风险为控制层, 具体造价风险为网络层。接下来, 专家组继续对存在相互关系的风险指标采用 1~9 标度法进行打分, 形成风险判断矩阵, 具体打分标准如表 4 所示。然后, 将矩阵数据导入 Super Decisions 软件, 通过超矩阵、加权超矩阵、极限超矩阵的 3 次计算, 检验一致性确保其小于 1。最终得出了各风险指标的权重值。这一过程保证了风险分析的科学性和准确性, 为后续的风险控制提供了可靠的依据。

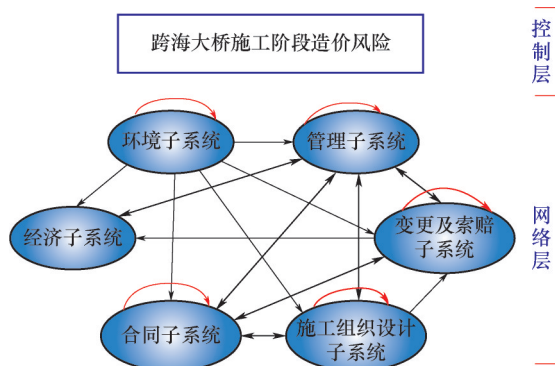


图1 跨海大桥施工阶段造价风险 ANP 网络结构

Figure 1 ANP network structure of cost risk during construction of sea crossing bridge

表4 1~9 标度法

Table 4 1~9 scaling method

标度	含义
1	A 与 B 一样重要
3	A 比 B 略重要
5	A 强烈比 B 重要
7	A 极其强烈的比 B 更重要
9	A 完全比 B 重要
2、4、6、8	处于相邻两个标度间重要

2.2 系统动力学构建造价风险评估模型

系统动力学(System Dynamics)是一门研究系统动态复杂性的科学, 主要用于研究复杂系统的结构、功能与动态行为之间的关系, 常被用于资源分配^[32]、防空信息^[33]、演化及预测^[34-35]等。建立系统动力学模型可以在动态环境下观察和分析不同风险之间的传递途径以及它们的因果关联, 从而为跨海大桥施工阶段造价风险控制的分析与决策提供理论和实证支持。

2.2.1 系统情景假设 为真实还原跨海大桥施工真实环境且使构建的 SD 模型能针对性地研究风险间的交互关系对造价控制的影响, 对模型进行如下假设:

(1)在建设过程中, 政府政策、环保要求、台风地震等极端自然灾害, 海泥潮汐等不良建设环境对系统的影响相对稳定。

(2)本模型初始风险值为 0, 即建设前期准备工作完善, 未产生任何风险。

(3)施工管理者具备一定的造价风险管理能力, 但不完全消除造价风险的影响。

(4)各风险从项目开始建设起, 逐渐对跨海大桥造价产生不同程度的影响, 至项目完工, 各风险停止作用。

(5)施工决算时不存在因工程质量问题导致的返工情况。

2.2.2 系统因果关系分析 为清晰地展示系统中的反馈机制和变量间的相互作用, 使变量间的因果关系直观化, 构建造价风险因果回路图。本系统由 24 项变量和 37 条回路组成, 其中变量为第 1 节中筛选得到的 24 项风险指标, 37 条回路均为正反馈回路, 即存在

相关关系的风险间均为正向影响。为了便于理解,以“政治风险→材料海上运输风险→项目进度变更风险→进度管理风险”为例进行解析:当政府出台海上运输船只等限令,致使海上运输量变小从而增加项目进度变更的可能,而当进度变更发生后为保证项目维持原工期,项目的进度管理难度增大、风险加剧。系统其余因果关系均以此分析可得图2,其中个别变量(如建设方资金供应不及时)未构成回路意味着这些变量之间的关系是线性的,即一个变量的变化直接影响另一个变量的变化,而没有形成一个闭环的反馈机制。

2.2.3 系统流图创建 为深入探究各变量之间的动态变化过程,基于造价风险因果关系图,借助仿真软件Vensim,构建造价风险系统流图。如图3所示,流图包含7个状态变量、8个速率变量、24个辅助变量。

2.2.4 仿真模型方程分析 为体现跨海大桥施工阶段的造价风险复杂且具有强交互性的特点,特对传统风险计算公式进行改造,设计变量的方程中风险值随风险传递而产生变化,如式(1)。

$$R_{ij} = X_{ij} + \sum (X_{ij} \omega_{ij} \partial) \quad (1)$$

式中, R_{ij} 为第 i 个子系统中第 j 个造价风险指标的风险值; X_{ij} 为第 i 个子系统中第 j 个造价风险指标的风险影响程度; ω_{ij} 为第 i 个子系统中第 j 个造价风险指标的全局权重; ∂ 为常数,当被计算风险对计算风险存在影响时,取1,当被计算风险对计算风险不存在影响时,取0。

环境风险、管理风险、变更及索赔风险、施工组织设计风险、合同风险、经济风险变量方程为:

$$R_i = \sum X_{ij} \omega_{ij} \quad (2)$$

式中, R_i 为第 i 个子系统的风险值。

造价风险增量方程:

$$R_a = \sum R_i \omega_i \quad (3)$$

式中, R_a 为造价风险的增量; ω_i 为第 i 个系统权重。

跨海大桥施工阶段造价风险方程:

$$R = R_a - R_d \quad (4)$$

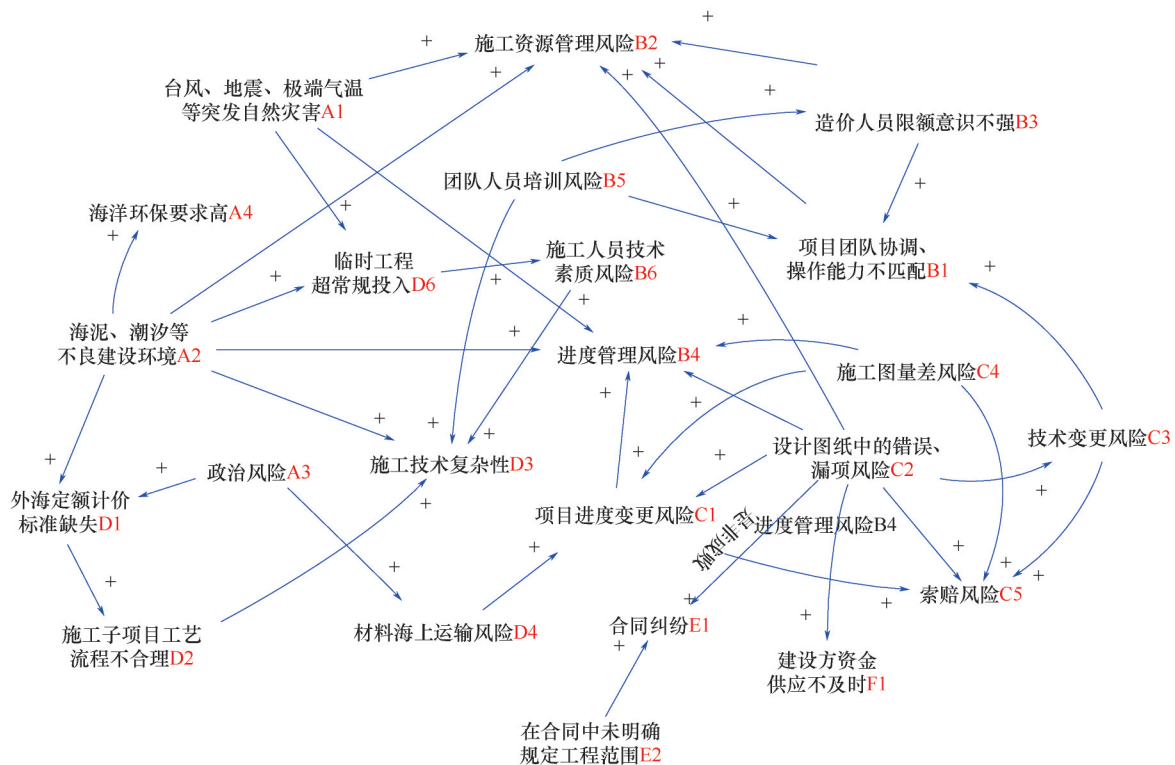


图2 造价风险因果关系图

Figure 2 Cost risk causality diagram

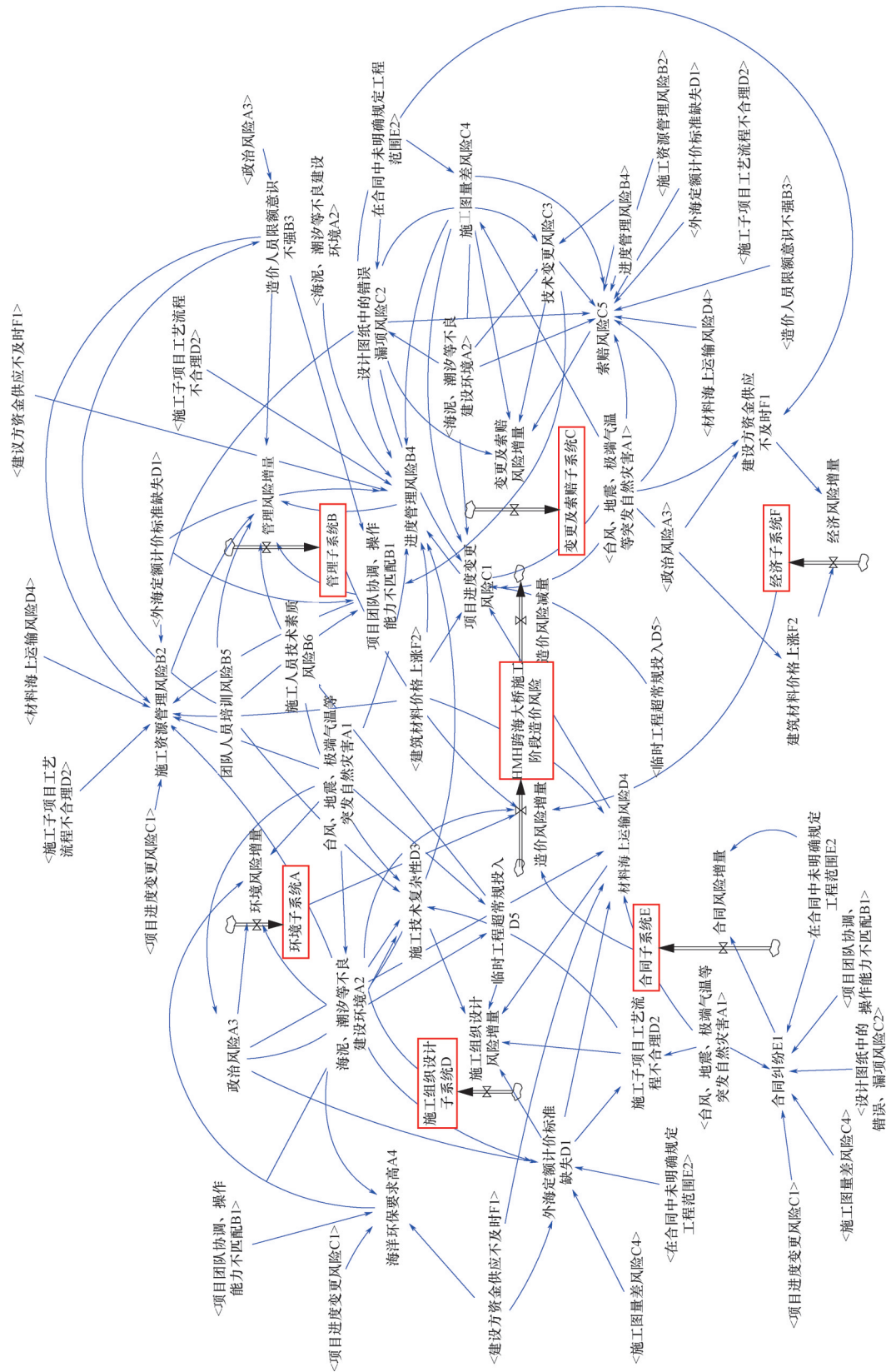


图3 造价风险系统流程图

Figure 3 Cost risk system flow chart

式中, R_d 为造价风险减量。

3 实例分析

HMH 跨海大桥工程^①, 位于广东省珠三角区域。路线全长约 30.87 km, 跨海段里程约 14.35 km, 预计施工工期 4 年。项目总投资的 60% 由广东省、珠海市、江门市三方各按 1/3 的比例承担, 其余 40% 通过发行收费公路专项债券筹集, 债务通过车辆通行费收入偿还, 不足部分按照省市出资比例承担。

3.1 基于 ANP 风险指标权重确定

根据 HMH 跨海大桥的实际情况, 并结合图 1 所建立的风险网络结构, 本文运用 Super Decisions 软件对施工阶段造价风险指标的权重进行了求解。结果表明: 在子系统中, 施工组织设计风险的权重系数最大, 为 0.3591; 在风险指标中, 进度管理风险的权重系数最大, 为 0.1803, 其次为施工资源管理风险(0.1053)和技术变更风险(0.0853)。尽管某些指标如经济风险(0.0581)和环境风险(0.0173)的权重值较小, 但为了保证指标体系的完整性并减小系统误差, 这些权重较小的指标仍被保留, 而未进行删减。此外, 为了更全面地评估风险指标, 本文邀请了第 1 节提到的专家组对各风险指标的影响程度进行了 1~10 的打分, 其中 10 代表影响程度最大, 1 代表影响程度最小, 分数逐级递减表示影响程度逐渐减小, 见表 5。

3.2 基于 SD 的造价风险控制模型构建

通过查阅相关文献、实地考察 HMH 项目并征询专家意见, 共收集了 15 条造价风险管控策略(见表 6)^[9,11,36-39], 用于对 24 项风险进行一对一控制。将这些策略作为变量代入风险评估模型中, 得出了施加控制策略后的 HMH 跨海大桥施工阶段造价风险评估 SD 模型(以下简称“模型”)。如图 4 所示, 风险控制策略以红色字体表示, 红色虚线箭头指向其所控制的风险。

① 遵循研究伦理和学术管理, 本文对所涉及的案例进行了匿名化处理。

表 5 HMH 跨海大桥施工阶段造价风险指标权重及影响程度

Table 5 Cost risk weight of HMH sea crossing bridge at construction stage

风险子系统	风险子系统全局权重	风险指标	风险指标全局权重	风险指标影响程度
A	0.0173	A1	0.0016	7.0
		A2	0.0006	5.4
		A3	0.0009	4.2
		A4	0.0712	0.4
B	0.2492	B1	0.0087	6.4
		B2	0.1053	5.0
		B3	0.0060	6.0
		B4	0.1803	5.0
		B5	0.0178	5.2
		B6	0.0473	3.2
C	0.1535	C1	0.0366	5.8
		C2	0.0415	6.0
		C3	0.0853	3.2
		C4	0.0029	4.2
		C5	0.0706	4.0
D	0.3591	D2	0.0169	3.8
		D3	0.0328	5.6
		D4	0.0429	5.2
		D5	0.0582	6.8
		D6	0.0273	6.4
E	0.1627	E1	0.0831	4.2
		E2	0.0002	6.0
F	0.0581	F1	0.0559	4.2
		F2	0.0059	6.0

3.3 有效性验证

为了简化模型的有效性验证过程, 在量化风险防控策略时, 将所有策略变量赋值为 0, 而其他变量则根据 ANP 计算得到的数值输入到模型方程中。运行模型, 将一级风险指标的仿真结果与 HMH 跨海大桥项目的实际运营状况进行了比较分析, 一级风险指标的仿真结果如图 5 所示。

仿真结果显示, 按风险值从高到低的排序依次为: 管理风险、变更及索赔风险、施工组织设计风险、合同风险、经济风险, 以及环境风险。特别是管

表6 HMH跨海大桥施工阶段造价风险管控策略
Table 6 Cost risk strategy of HMH sea crossing bridge at construction stage

风险管控策略名称	控制风险	来源
S1 修建运输栈桥	B4、D4	实地考察
S2 审核施工图图纸	C3、C4、D2、D5	李跃军等 ^[38]
S3 采取工厂化生产, 标准化制作节段梁、箱梁	B2、F2	实地考察
S4 严格审核设计变更	C2	李鹏 ^[36] 、韩玉海 ^[37] 、李跃军等 ^[38] 、黄亚华 ^[39]
S5 提高工程前期设计方案水平	C3、D3	张永财等 ^[9]
S6 严格审查现场签证	C1、C5	李鹏 ^[36] 、韩玉海 ^[37]
S7 提高预留预备金和风险储备金的比重	D5、F1、F2	张永财等 ^[9]
S8 合理划分标段	D2	实地考察
S9 加强合同管理	E1、E2	莫钧 ^[11] 、黄亚华 ^[39]
S10 采用“钢栈桥+平台+码头”施工	D3	实地考察
S11 教育培训制度	B1、B5、B6	实地考察
S12 建立海上混凝土搅拌厂	F2	实地考察
S13 开展行业外海定额研究	D1	张永财等 ^[9]
S14 加强造价管理与BIM、大数据的对接	B3	张永财等 ^[9]
S15 重视施工招标	B1、B6	黄亚华 ^[39]

理风险、变更及索赔风险、施工组织设计风险这三项风险指标的上升趋势较为明显,这一现象归因于这些风险指标之间的影响关系较为复杂且交错。随着施工进度的推进,这些造价风险的相互影响及其累积效应导致风险值的上升速率逐渐加快。施工合同通常在施工前签订,因此在施工初期,由于合同条款不符合项目实际情况而产生的合同风险较为常见。然而,随着施工流程的逐步规范化,合同风险的增加概率逐渐减小,最终趋于零。HMH跨海大桥项目的资金由政府出资60%和通过政府债券融资的40%资金组成,资金链得到了政府的保障,资金供应短缺的风险较低。在项目决策阶段,业主单位已经进行了造价估算、设计预算和施工图预算等多重财务预测,对资金需求量有明确的预估和接受能力,因此经济风险的上升幅度有限。此外,模型假设在建设过程中,各种环境因素和不可抗力对系统的影响是稳定的,因此环境风险的变化幅度最小。

综合上述分析,模型能够准确反映HMH跨海大桥项目施工阶段风险的动态变化及其对项目造价的影响,有效性得到了确认。

3.4 模型仿真结果分析

运行风险评估模型,得到图6,表明在HMH跨海大桥工程项目施工阶段,整体造价风险呈逐渐上升趋势,风险值范围位于[0, 1368.45]之间且风险增长并非呈现出一致的均匀上升态势,而是表现为初期缓慢上升,随后上升速度逐步加快。这一现象的原因可归结于施工初期阶段,工程子项目处于启动初期,此时的施工支出较低,且通常不会有多个子项目同时进行,造价风险之间的相互作用程度较小,导致风险上升速度较慢。然而,随着工程进入中后期,资金的大量投入及多项工作的并行引起风险之间的相互作用增强,从而使风险值快速升高,造价控制难度随之增加。因此,在研究跨海大桥施工阶段的造价控制策略时,有必要考虑不同风险间的相互关系及其对整体风险水平的影响。

3.5 造价风险控制研究

3.5.1 风险等级划分 传统的风险等级划分通常基于综合风险发生概率和风险损失程度,但这种方法难以适应跨海大桥造价风险的交互特征。为合理划分风险等级,本文设计了“风险影响程度”和“影响风险指

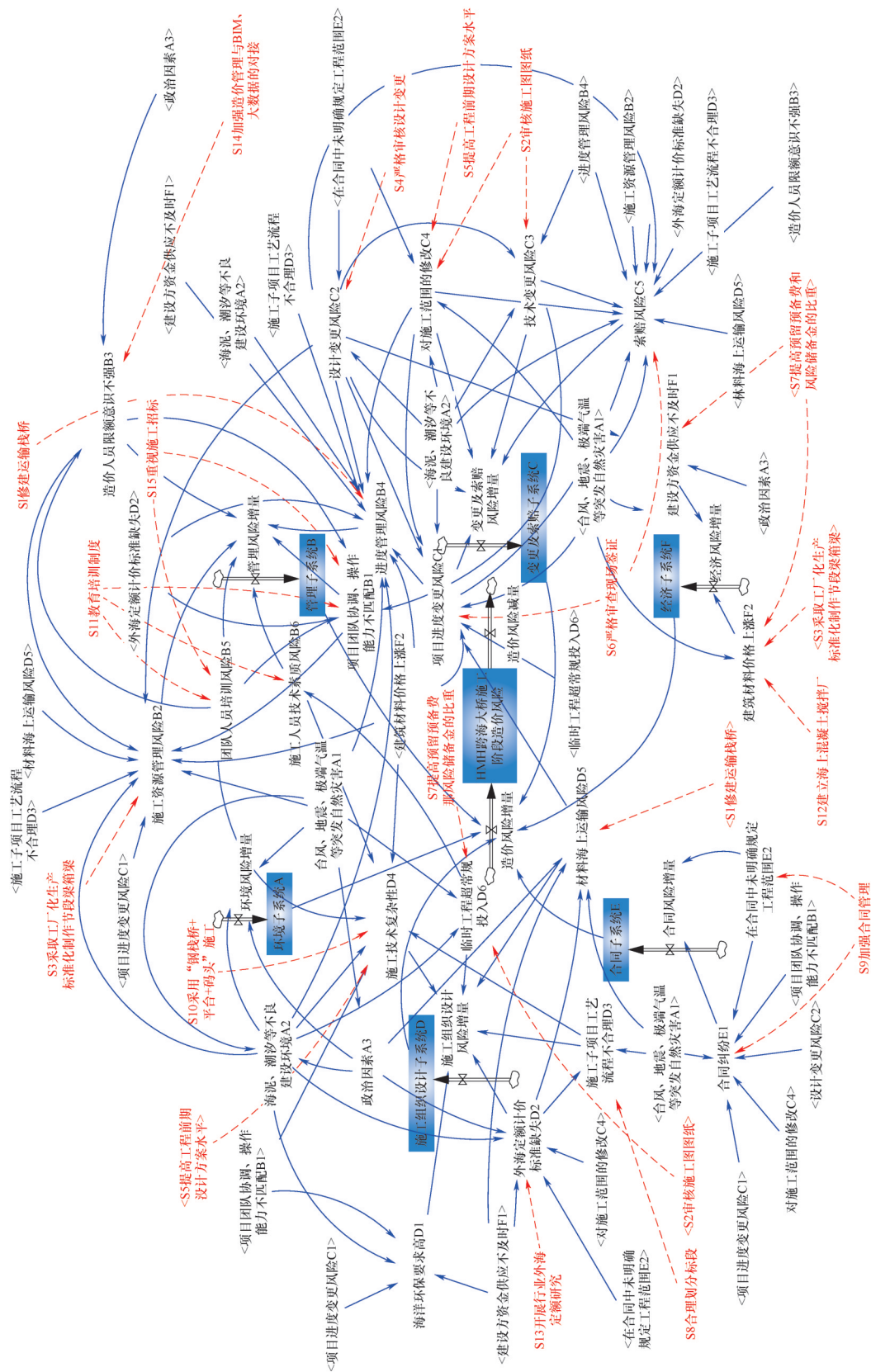


图4 施加管控策略的HMH跨海大桥施工阶段造价风险评估SD模型

Figure 4 SD model for cost risk assessment of HMH sea crossing bridge at construction stage with control strategy

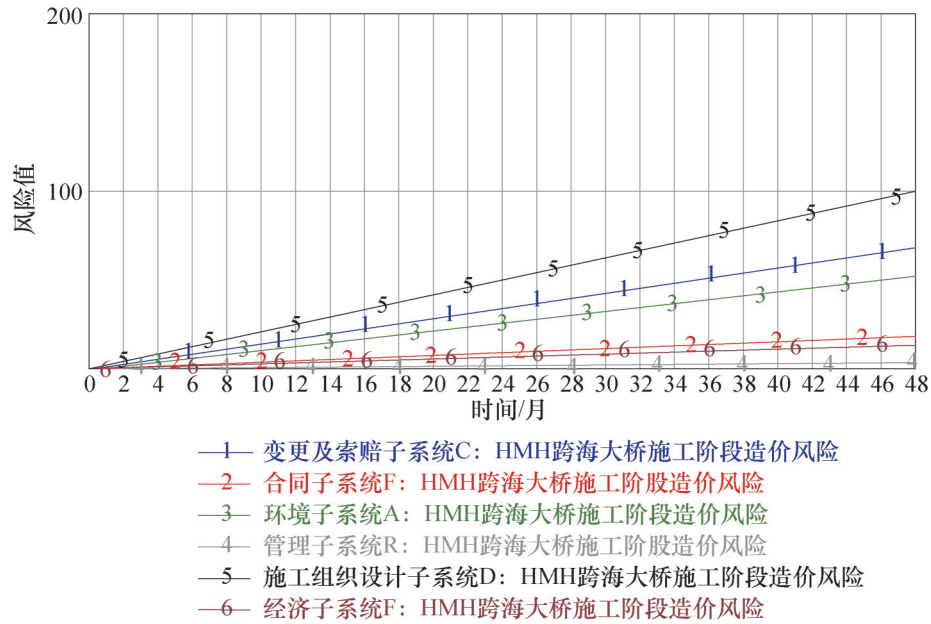


图5 子系统风险水平
Figure 5 Risk level of primary risk indicators

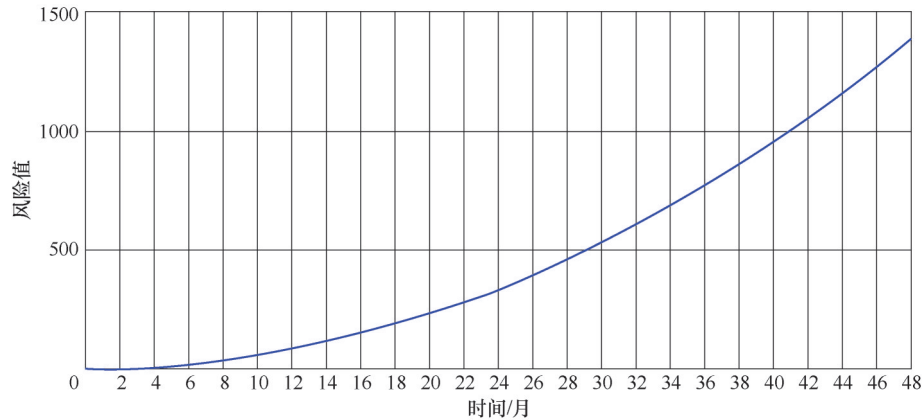


图6 HMH跨海大桥施工阶段造价风险水平
Figure 6 Cost risk level of HMH sea crossing bridge at construction stage

标个数”两项分类依据，并以平均影响程度和平均影响风险指标个数作为临界值。计算过程如下，见式(5)、式(6)。

平均风险影响程度：

$$AVG_S = \frac{\sum X_{ij}}{24} \quad (5)$$

式中， AVG_S 为平均风险影响程度。

平均影响风险指标个数：

$$AVG_n = \frac{\sum N_{ij}}{24} \quad (6)$$

式中， AVG_n 为平均影响风险指标个数； N_{ij} 为第*i*个子系统中第*j*个造价风险指标影响其余风险指标的个数。

经计算，平均风险影响程度为5，平均影响风险指标个数为6.1。因此，将影响程度大于5且影响风险指标个数大于6.1的风险设定为高风险，影响程度小于5且影响风险指标个数小于6.1的风险设定为低风险，影响程度小于等于5或影响风险指标个数小于等于6.1的风险设定为中风险。具体分类结果见表7。

表7 HMH跨海大桥造价风险指标等级

Table 7 Cost risk index grade of HMH sea crossing bridge

风险等级	指标
高风险	B1、C1、C2、D2
中风险	B2、B3、B4、B6、B7、C3、D3、D4、D5、E2、F2
低风险	C4、C5、D1、E1、F1

由于环境风险不受人为主控, 因此未列入等级划分中。

3.5.2 风险控制仿真及结果分析 对施加了策略的风险模型进行仿真分析, 采用“单一策略控制”和“组合策略控制”两种方式。单一策略控制是指仅对某一特定风险施加控制措施, 而不干预其他风险; 组合策略控制则是在控制某一特定风险的同时, 针对与其相关的前缘风险同时采取综合控制措施。以高风险为例, 通过对比单一策略控制与组合策略控制的效果, 旨在识别出更为有效的造价风险控制方法。

(1)单一策略控制。将模型中策略变量赋值后运行模型, 得到高风险单一控制风险水平如图7。图中显示, 采取了单一策略控制的风险值存在不同程度的下降, 控制效果优劣排序依次为: 合理划分标段S9、严格审查现场签证S7、严格审核设计变更S5、重视施工招标S16。风险值降低范围在[1317.15, 1364.99], 降低比例在[0.25%, 3.75%]。

(2)组合策略控制。为对高风险实施组合策略控制, 需要对高风险及其相关的前缘风险同时进行管理和防控。故对高风险的前缘风险进行整理, 如表8所

示。再对模型应用组合策略控制, 运行结果见图8。高风险指标经过组合策略控制后的风险值下降程度按优劣顺序排列如下: 项目进度变更风险(C1)、施工子项目工艺流程不合理(D2)、项目团队协调与操作能力不匹配(B1), 以及设计变更风险(C2)。风险值的降低范围在[1122.97, 1308.46], 降低比例为[4.38%, 17.94%]。

表8 高风险的前缘风险

Table 8 High risk leading edge risk table

高风险	前缘风险
B1	B3、B5、C3、D2
C1	B1、B4、B6、D2、D3、D4
C2	C4、E1、E2
D3	B1、C3、D3

对单一策略控制与组合策略控制的效果进行比较分析, 研究结果表明: 后者降低跨海大桥施工阶段造价风险的效果更为显著。

4 结论

跨海大桥作为国家重大交通基础设施, 其施工阶段的造价风险控制直接关系到项目的投资效益与成败。针对跨海大桥施工系统复杂、风险交互性强且动态演化显著的特点, 本文构建了基于ANP-SD(网络层次分析法-系统动力学)的造价风险评估与控制模型, 并以HMH跨海大桥为案例进行了实证仿真。得

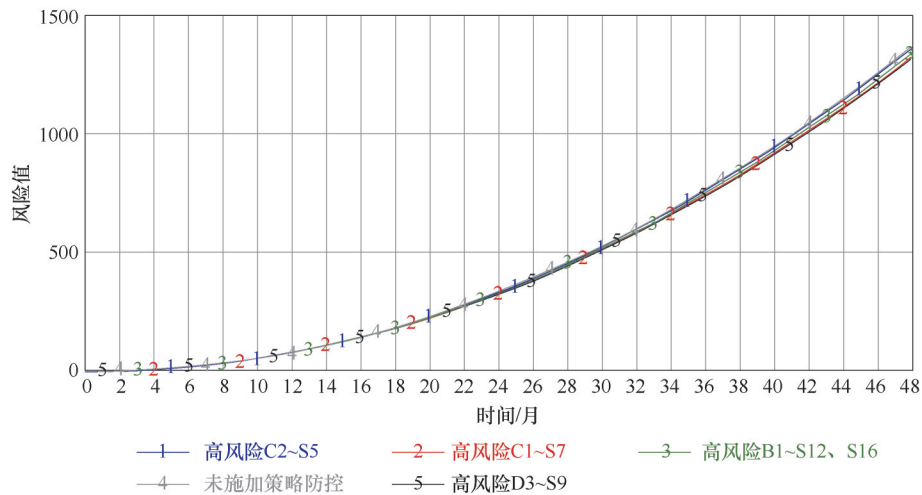


图7 高风险单一控制风险水平

Figure 7 High risk single control risk level

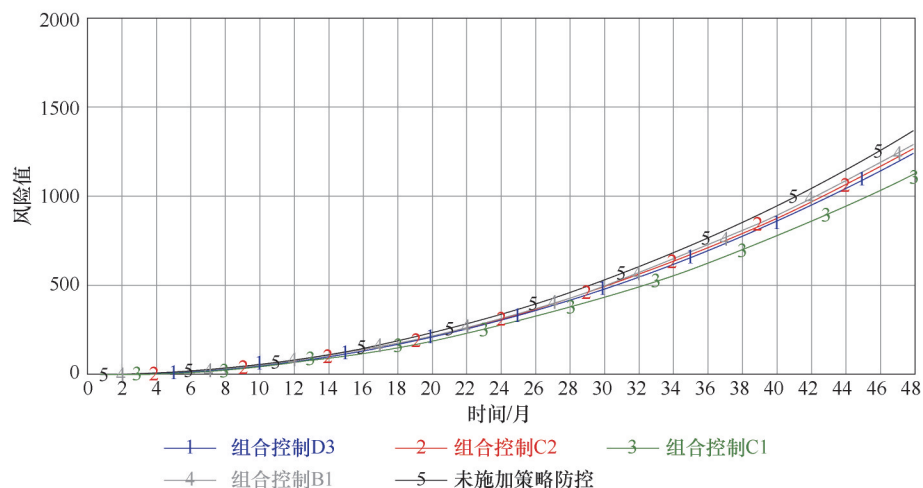


图8 高风险组合控制风险水平

Figure 8 Control the Risk Level of High-Risk Portfolios

出以下主要结论与启示。

(1) 风险演化呈现显著的“累积加速”特征与子系统差异性。仿真结果揭示, 跨海大桥施工阶段的造价风险并非线性增长, 而是呈现出明显的“初期平缓、中后期加速累积”的动态演化趋势。这主要是由于施工初期工作面较小, 风险交互作用弱; 而随着工程推进, 资金大量投入、多作业面并行, 风险因素间的耦合效应被放大, 导致风险值快速攀升。此外, 不同子系统的风险变化规律存在显著差异: 管理风险、变更及索赔风险受施工进度和内外环境影响较大, 波动明显且呈持续上升态势; 而合同风险在施工初期较高, 随着流程规范逐渐受控; 经济风险和环境风险则相对稳定。这一发现提示管理者, 造价控制的重心应随工期动态调整, 尤其需警惕中后期的“风险爆发”。

(2) 识别出关键高风险指标及其交互作用机理。通过模型仿真与风险等级划分, 本文精准识别出影响跨海大桥造价的核心“致险因子”。其中, 项目团队协调与操作能力不匹配 (B1)、项目进度变更风险 (C1)、设计图纸中的错误与漏项风险 (C2)、以及施工子项目工艺流程不合理 (D2) 被判定为高风险指标。这些指标之所以成为“高风险”, 不仅因其自身影响程度大, 更关键的是它们处于风险网络的“枢纽”位置, 能通过正反馈回路引发连锁反应。例如, 设计图纸的漏项 (C2) 会直接导致施工工艺流程的

变更 (D2), 进而引发进度延误 (C1) 和索赔风险, 最终造成造价的指数级攀升。

(3) “组合策略控制”优于“单一策略控制”的有效性验证。单一策略的局限性: 仅针对某一特定风险采取措施 (如仅“严格审核设计变更”), 虽然能小幅降低风险值 (降低比例约 0.25%~3.75%), 但由于忽略了风险间的前缘驱动关系, 治标不治本, 整体控制效果有限。组合策略的优越性: 在控制高风险指标的同时, 对其相关的前缘风险 (如资源管理、人员素质、合同条款等) 进行协同管控, 能显著切断风险传递路径。仿真显示, 组合策略下风险值的降低比例可达 4.38%~17.94%, 控制效果远优于单一策略。这证明了只有通过多维度、系统性的干预, 才能有效阻断风险在网络中的传播。

(4) 从“被动应对”转向“主动阻断”的管理启示。①强化前期策划, 特别是设计方案的深度审查与施工工艺流程的合理性论证, 从源头减少“设计变更”与“工艺不合理”带来的高风险; ②提升团队协同能力, 建立高效的沟通机制以匹配复杂的施工操作需求; ③实施动态组合管控, 在施工中后期重点监控管理风险与变更风险, 利用 BIM、大数据等信息化手段辅助决策, 通过“技术+管理+合同”的组合拳, 主动阻断风险交互链, 确保工程造价处于受控状态。

参考文献

- [1] 李成祥, 李庆瑞. PPP融资模式下的问题及对策研究——以杭州湾跨海大桥为例[J]. 经济研究导刊, 2019(1): 81-83+101.
Li C X, Li Q R. Research on problems and countermeasures under PPP financing mode: Taking Hangzhou Bay Cross Sea Bridge as an example[J]. Economic Research Guide, 2019(1): 81-83+101.
- [2] 刘辉. 舟山梦圆——舟山跨海大桥建设纪[J]. 今日浙江, 2009(21): 26-28.
Liu H. Zhoushan dream come true: Record of Zhoushan Cross Sea Bridge construction[J]. Zhejiang Today, 2009(21): 26-28
- [3] 张戡麟. 世界最长跨海大桥通车 全长36公里造价148亿[EB/OL]. (2008-12-20)[2024-09-14]. <https://www.chinanews.com.cn/gn/2011/07-01/3149341.shtml>.
Zhang S L. The world's longest sea crossing bridge, with a total length of 36 kilometers and a cost of 14.8 billion[EB/OL]. (2008-12-20) [2024-09-14]. <https://www.chinanews.com.cn/gn/2011/07-01/3149341.shtml>.
- [4] 彩虹飞来为天桥巨龙卧波笑海风——喜迎象山港大桥及接线工程建成通车[J]. 宁波市人民政府公报, 2012(24): 2.
Rainbow flying over as the sky bridge dragon lying on the waves laughing at the sea breeze: Celebrating the completion and opening of Xiangshan Port Bridge and Connection Project[J]. Ningbo Municipal People's Government Gazette, 2012(24): 2.
- [5] 袁喆. 杭州湾上第二座跨海大桥——嘉绍跨海大桥建设进度超六成[EB/OL]. (2011-09-13)[2024-10-14]. https://www.gov.cn/jrzg/2011-09/13/content_1946462.htm.
Yuan Z. The construction progress of the second cross sea bridge on Hangzhou Bay : Jiashao Cross Sea Bridge has exceeded 60%[EB/OL]. (2011-09-13) [2024-10-14]. https://www.gov.cn/jrzg/2011-09/13/content_1946462.htm.
- [6] 黄林昊. 福建最长跨海大桥——泉州湾大桥正式通车[EB/OL]. (2015-05-12)[2024-10-14]. https://www.gov.cn/xinwen/2015-05/12/content_2860756.htm.
Huang L H. The Quanzhou Bay Bridge, the longest sea crossing bridge in Fujian, has officially opened for traffic[EB/OL]. (2015-05-12) [2024-10-14]. https://www.gov.cn/xinwen/2015-05/12/content_2860756.htm.
- [7] 广东省交通运输厅. 港珠澳大桥主体工程[EB/OL]. (2020-04-28)[2024-10-14]. https://td.gd.gov.cn/zwgk_n/jslyxxgk/xmgs/content/post_2961544.html.
Guangdong Provincial Department of Transportation. The main project of the Hong Kong Zhuhai Macao Bridge[EB/OL]. (2020-04-28) [2024-10-14]. https://td.gd.gov.cn/zwgk_n/jslyxxgk/xmgs/content/post_2961544.html.
- [8] 盛昭瀚. 重大工程管理基础理论: 源于中国重大工程管理实践的理论思考[M]. 南京: 南京大学出版社, 2020.
Sheng Z H. Basic Theory of Major Engineering Management: Theoretical Reflections from the Practice of Major Engineering Management in China[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2020.
- [9] 张永财, 高星林, 曾雪芳, 等. 港珠澳大桥主体工程造价特点及管理措施解析[J]. 公路, 2019, 64(8): 175-179.
Zhang Y C, Gao X L, Zeng X F, et al. Analysis on the cost characteristics and management measures of the main project of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Highway, 2019, 64(8): 175-179.
- [10] 高星林, 史福元, 高嵩焱. 关于国内跨海通道重大工程造价管理的思考[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(7): 69-73.
Gao X L, Shi F Y, Gao S Y. Thoughts on the cost management of cross-sea passage mega projects in China[J]. China Harbour Engineering, 2020, 40(7): 69-73.
- [11] 莫钧. 公路跨海通道项目造价控制难点及对策研究[J]. 公路, 2020, 65(7): 228-231.
Mo J. Research on difficulties and countermeasures of cost control of highway cross-sea passage project[J]. Highway, 2020, 65(7): 228-231.
- [12] 张建, 周成杰. 基于FCM-CSIs的跨海铁路大桥投资分析及施工组织优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 347-355.
Zhang J, Zhou C J. Research on cost analysis and construction optimization of cross-sea railway bridge based on FCM-CSIs[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 347-355.
- [13] 段晓晨, 钱睿, 徐达. 高铁区域水与动植物环境影响系统动力学评价方法研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(8): 178-186.
Duan X C, Qian R, Xu D. Study on system dynamics evaluation method of water, plant and animal environment in high-speed railway area [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(8): 178-186.
- [14] 周涛, 王孟钧, 唐晓莹, 等. 知识价值链与全过程工程咨询核心能力作用机理研究: 基于系统动力学的建模与仿真[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1349-1363.
Zhou T, Wang M J, Tang X Y, et al. A system dynamics approach for exploring the influence of knowledge value chains on the core competence of whole-process engineering consulting[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(5): 1349-1363.

- [15] 江新, 李雪莲, 吴静涵, 等. 敏感性水利工程社会稳定风险演化SD模型[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 18-26.
Jiang X, Li X L, Wu J H, et al. SD model of social stability risk evolution for sensitive water conservancy projects[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 18-26.
- [16] 潘放. 黄茅海跨海通道总体方案及创新技术[J]. 桥梁建设, 2021, 51(4): 10-16.
Pan F. Overall design and innovation of Huangmaohai link project[J]. Bridge Construction, 2021, 51(4): 10-16.
- [17] 阙云龙, 魏康. 边疆公路造价偏差的影响因素分析[J]. 公路, 2023, 68(8): 254-258.
Que Y L, Wei K. Analysis on influencing factors of cost deviation of frontier highway[J]. Highway, 2023, 68(8): 254-258.
- [18] 廖钰然. 高速公路工程造价上涨原因分析[J]. 公路, 2023, 68(5): 265-267.
Liao Y R. Analysis on the reasons for the rising cost of expressway engineering[J]. Highway, 2023, 68(5): 265-267.
- [19] Cheng Y M. An exploration into cost-influencing factors on construction projects[J]. International Journal of Project Management, 2014, 32(5): 850-860.
- [20] Ma M X, Tam V W, Le K N, et al. Analysing the impacts of key factors on the price of recycled concrete: a system dynamics model[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80: 108123.
- [21] 胡靖堂, 太艳斌, 太树刚. 工程项目成本管理及风险控制: 以昆明某教学楼为例[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023, 45(S1): 398-406.
Hu J T, Tai Y B, Tai S G. Construction project cost management and risk control: Taking a teaching building in Kunming as an example [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2023, 45(S1): 398-406.
- [22] 任传普. 基于 Monte•Carlo 模拟的工程造价风险评估[J]. 统计与决策, 2013, 29(15): 81-83.
Ren C P. Risk assessment of engineering cost based on Monte Carlo simulation[J]. Statistics & Decision, 2013, 29(15): 81-83.
- [23] 朱文喜, 袁江雅, 何欣, 等. 高速公路工程造价风险群体可拓评价模型[J]. 科技进步与对策, 2012, 29(18): 91-94.
Zhu W X, Yuan J Y, He X, et al. Extension evaluation model of expressway project cost risk group[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2012, 29(18): 91-94.
- [24] 孟昭辉, 王洪礼, 姚士磊, 等. 政府投资重大工程项目组合风险的 VaR 分析[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2012, 14(4): 329-333.
Meng Z H, Wang H L, Yao S L, et al. Combined risks' VaR analysis of major project invested by the government[J]. Journal of Tianjin University (Social Sciences), 2012, 14(4): 329-333.
- [25] 杨震. PPP 模式下渤海湾跨海隧道工程项目风险分担管理研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
Yang Z. Research on risk sharing management of Bohai Bay cross-sea tunnel project under PPP mode[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [26] L. SAATY T. Fundamentals of the analytic network process: Dependence and feedback in decision: Making with a single network[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, (2): 129-157.
- [27] 郑雨茜, 鲍学英. 基于 ANP 和扩展 TOPSIS 法的青藏铁路冻土路基安全性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 605-613.
Zheng Y X, Bao X Y. The safety analysis of the Qinghai-Xizang railway permafrost subgrade based on ANP and the extension of TOPSIS method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(3): 605-613.
- [28] 王宇, 欧宗伟, 程立. 网络层次分析法在光电防护战斗效能评估中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(6): 48-55.
Wang Y, Ou Z W, Cheng L. Application of analytic network process in evaluating the electro-optical protection combat effectiveness[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(6): 48-55.
- [29] 辛晶, 杨玉胜. 基于网络层次分析法的石油化工设施安全风险评估[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 151-154.
Xin J, Yang Y S. Security risk assessment of petrochemical facilities based on analytic network process[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 151-154.
- [30] Balali A, Valipour A, Edwards R, et al. Ranking effective risks on human resources threats in natural gas supply projects using ANP-COPRAS method: case study of Shiraz[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 208: 107442.
- [31] 王卫东. 产业集群网络结构风险预警研究[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2016.
Wang W D. Research on Risk Early Warning of Industrial Cluster Network Structure[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2016.
- [32] 谢洪涛, 卢睿, 刘文荐, 等. 川藏铁路工程物资供应保障策略的系统动力学仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 250-258.
Xie H T, Lu R, Liu W J, et al. System dynamic simulation of material supply support strategy of Sichuan-Xizang railway project[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(1): 250-258.
- [33] 商长安. 防空信息战的系统动力学研究方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2022.
Shang C A. System Dynamics Research Method of Air Defense Information Warfare[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2022.

- [34] 袁铁江, 张一瑾, 杨紫娟, 等. 基于系统动力学的氢需求量中长期预测[J]. 中国电力, 2023, 56(10): 11-21.
Yuan T J, Zhang Y J, Yang Z J, et al. Medium and long-term hydrogen load prediction based on system dynamics[J]. Electric Power, 2023, 56(10): 11-21.
- [35] Yu S J, Geng X L, He J J, et al. Evolution analysis of product service ecosystem based on interval Pythagorean fuzzy DEMATEL-ISM-SD combination model[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 421: 138501.
- [36] 李鹏. 城市轨道交通工程造价控制措施探讨[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(8): 89-92.
Li P. Discussion on the construction cost control measures for urban rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(8): 89-92.
- [37] 韩玉海. 论建设项目的工程造价控制[J]. 财经问题研究, 2015(S1): 63-66.
Han Y H. On project cost control of construction projects[J]. Research on Financial and Economic Issues, 2015(S1): 63-66.
- [38] 李跃军, 陈钢. 建设项目全过程工程造价的控制研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(S1): 1071-1075.
Li Y J, Chen G. Research on the control of the whole process of construction project cost[J]. Industrial Construction, 2010, 40(S1): 1071-1075.
- [39] 黄亚华. 浅谈工程造价控制管理与执行招标规定[J]. 世界桥梁, 2009, 37(3): 70-72.
Huang Y H. On construction cost control, management and performing of provisions in tender documents[J]. World Bridges, 2009, 37(3): 70-72.

Research on Cost Risk Control and Simulation of Construction Stage for Cross-sea Bridges Based on ANP-SD Model

YUAN Jianbo*, ZENG Tianning, LIU Dingli, GUO Ping

School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

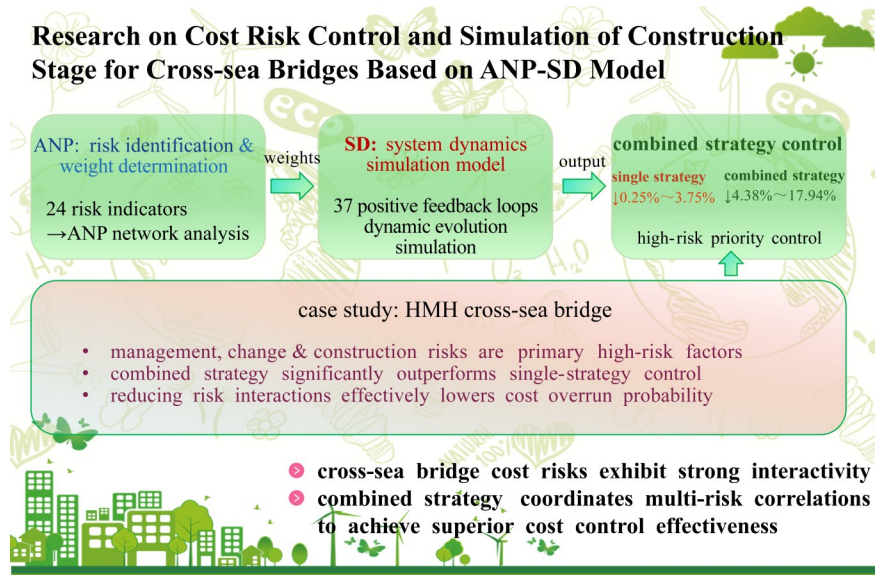
Highlights

An integrated ANP-SD model is proposed to capture the nonlinear interactions and dynamic evolution of construction risks in cross-sea bridge projects.

Critical risk drivers, specifically progress management and technical changes, are identified, revealing a characteristic pattern of accelerated risk accumulation during later construction stages.

Simulation results demonstrate that combined control strategies yield significantly superior risk mitigation compared to single measures, providing a scientific basis for dynamic cost management.

Graphical Abstract



Abstract: In order to reduce the cost overrun risk of cross sea bridge project in the construction stage, this paper discusses the interactive characteristics of cost risk and its control methods. Firstly, the cost risk indicators of 24 construction stages are identified, including project team coordination, mismatching of operation ability, project schedule change risk, design change risk, unreasonable process flow of construction subproject, etc. These indicators may act alone or interactively, resulting in

project cost overruns.

Then, in order to quantitatively analyze the interaction of these risk factors and their impact on the total cost, a SD model for cost risk assessment of sea crossing bridge construction stage is constructed by using network analytic hierarchy process and system dynamics (SD) method. The network analytic hierarchy process can systematically evaluate the importance of each risk factor and its potential impact on the total cost, and determine the relationship between each factor. The system dynamics method simulates the change and interaction of risk factors in time by constructing a dynamic simulation model.

In order to verify the effectiveness of the model, this paper introduces the actual case of HMM sea crossing bridge. Based on this case, an SD model for cost risk assessment of HMM sea crossing bridge in construction phase including control strategy is constructed. The model includes a variety of control strategies, such as reasonable division of bid sections, strict review of on-site visa, strict review of design changes, emphasis on construction bidding, *etc.* Through simulation, this paper compares the effectiveness of "single strategy control" and "combined strategy control" in reducing cost overrun.

The simulation results show that there is a significant interaction between the cost risks in the construction stage, and a single risk control strategy has limited effect in dealing with the complex and changeable risk environment. Single strategy control usually only targets at a specific risk factor, and lacks consideration of other risk factors and their interactions, so it has poor effect in dealing with the comprehensive risks in the complex project environment.

In contrast, the use of combination strategy control, that is, the implementation of a variety of risk management measures at the same time, can more effectively reduce the possibility of cost overrun. Through the comprehensive utilization of the advantages of different measures, the combination strategy can reduce the single risk, coordinate and reduce the interaction between various risks, so as to achieve better control effect.

The simulation further shows that the combination strategy control can significantly reduce the probability of cost overrun and improve the possibility of successful completion of the project within the budget. This discovery provides a theoretical basis and practical guidance for the cost risk management of large-scale engineering projects such as sea crossing bridges, and helps to improve the project management level and success rate.

Keywords: sea crossing bridge; cost risk; analytic network process; system dynamics; combined strategy control