



基于DSM+SWN的公路工程变更管理研究

袁剑波*, 王璇

长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙, 410114

摘要: 公路工程变更对项目进度、成本和质量产生显著影响。以公路工程为研究背景, 基于设计结构矩阵(DSM)和小世界网络模型(SWN), 构建出新的综合评估模型, 旨在为公路工程变更分析提供有力支持。该模型能够预测工程变更的传播扩散风险, 帮助公路工程项目经理提前识别变更的潜在影响, 从而主动制定有效的变更管理策略, 优化变更实施过程, 降低变更对项目进度、成本和质量的负面影响。通过实际公路工程变更案例的应用, 验证了该模型的有效性, 证明其能够为公路工程变更管理提供科学依据, 提升变更管理的主动性和系统性。

关键词: 设计结构矩阵; 小世界网络模型; 工程变更; 工程变更模型; 工程变更风险

中图分类号: U415.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(XXXX)XX-0001-15

引言

公路工程是一项规模宏大、耗资巨大的基础设施建设项目, 其施工周期往往跨越数年, 甚至更长。常常受到天气、地形等客观因素的影响, 引发工程变更问题。这些变更会导致项目的进度、成本和质量等目标的偏离^[1]。在一些大型跨海桥梁项目中面临着众多技术和环境上的挑战。例如, 在黄茅海大桥^[2]建设过程中面临着超强台风的频繁侵袭和复杂航道带来的通

航及船撞风险。这些不可预见的自然条件要求项目团队对原计划进行调整, 以确保桥梁的安全性和功能性; 在港珠澳大桥^[3]建设过程中, 面临着地质条件复杂的问题, 设计方案需要不断调整以适应实际情况, 导致成本的增加。杭州湾跨海铁路大桥^[4]位于世界三大强潮海湾之一, 施工技术难度大, 生态环保要求高, 在建设过程中设计和施工面临着多方面的挑战, 导致工期和成本增加。因此, 深入研究公路工程变更, 对于预测工程变更影响和提升工程质量具有重要价值。

收稿日期: 2025-01-09; **修回日期:** 2025-03-24

基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(202039)

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)

王璇(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为工程项目管理。E-mail: 825826699@qq.com

引用格式: 袁剑波, 王璇. 基于DSM+SWN的公路工程变更管理研究[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20250005.. CSTR: 32282.14.JES.20250005

Yuan Jianbo*, Wang Xuan. Research on Change Management in Highway Engineering Based on DSM + SWN[J]. Journal of Engineering Studies, DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20250005.. CSTR: 32282.14.JES.20250005

在工程变更管理领域，国内外学者已经进行了广泛的研究。在工程变更因素的研究方面，Bitamba等^[5]针对刚果（金）的工程项目实际状况，对导致工程变更发生的因素进行了分析，识别出地质条件不确定性、政策法规频繁调整、承包商能力不足和供应链中断四大核心变更诱因；姚亚峰^[6]基于云南省公路工程实例，分析出地质勘察质量不足是公路工程变更设计的核心诱因，提出“精细化地质勘察-动态设计反馈”模型，并结合BIM技术实现地质数据实时更新；在工程变更风险控制方面，Samin等^[7]识别出地质条件不确定性、政策法规频繁调整等核心变更诱因，提出“分级响应策略”，试点工程项目应用后变更频率显著降低；胡靖堂等^[8]通过分析昆明某教学楼施工阶段的成本管理和风险控制问题，发现设计变更、索赔频繁及监管不力是导致成本超支和工期延误的主要因素，提出了一套综合管理方案，引入信息化平台实现动态成本监控、建立材料供应链管理体系以降低浪费等；葛芙蓉等^[9]识别出高速公路项目施工中的主要核心风险，引入模糊层次分析法量化风险等级，提出分级响应策略，使项目风险事件发生率大幅降低；在风险预测方面，孙成双^[10]构建了基于多Agent技术的工程项目风险管理系统，通过分布式Agent协同实现风险识别、评估与应对的自动化；郭于明^[11]提出基于小世界网络（SWN）的设计变更传播风险预测方法，识别产品开发网络中的脆弱环节。该方法可提前预测变更传播的“雪崩效应”，关键节点识别准确率达91%。这些文献对于预测工程变更传播扩散风险提供了理论依据和方法论支持，有助于项目管理者更主动地预测和应对工程变更风险。但在传统的工程变更管理中，管理者往往是在变更发生后才采取应对措施^[12]，缺乏在变更发生前进行系统分析和预测的方法。这种被动应对方式可能会导致项目成本增加、工期延长，甚至影响建筑的质量和安全性。

因此，本研究在充分考虑间接影响和潜在风险的情况下，采用设计结构矩阵（design structure matrix, DSM）和小世界网络模型（small-world network, SWN）构建一个综合框架来预测工程项目可能产生的变更并评估变更对项目进度、成本和质量的影响，从而为工程变更管理提供更主动、系统的分析和预测

方法。

1 公路工程项目变更指标

通过全面梳理涵盖不同地区、不同类型的公路工程历史项目数据，收集以往公路工程中出现的各种变更案例，总结归纳出变更发生的常见类型和关键因素。其次，结合问卷调查的方式，向公路工程领域的一线工程师、项目经理及施工人员发放问卷180份，通过线上与线下相结合的方式回收问卷162份，回收率为90%。经数据清洗后，剔除填写不完整、逻辑矛盾等无效问卷18份，最终有效问卷为144份，有效回收率达88.9%。通过对问卷结果的统计分析，进一步确定变更指标的重要性和相关性。最后，组建由行业内资深专家构成的评审团队（其中高校教授占50%、设计院高级工程师占30%、施工企业总工程师占10%），对初步筛选出的变更指标进行深入讨论和评估，分析各指标之间的逻辑关系，对项目目标的影响路径以及在不同工程场景下的适用性。

综合历史数据、问卷调查和专家访谈的结果，最终确定公路工程项目中可能出现的工程变更指标，包括设计变更、施工变更、材料设备变更、成本预算变更、进度变更、质量和保修变更和新增工程变更等7大类^[13-15]，如表1所示，并对每个类别进行细分，以确保所选取的指标能够全面、准确地反映公路工程变更的实际情况，为后续的工程变更分析模型构建提供科学合理的依据。

对公路工程项目的变更进行分析，发现变更之间存在着相互依赖的关系。这种依赖性表明一个变更可能会触发或影响其他变更的发生。因此，需要进一步对工程变更进行变更传播扩散分析，包括依赖性分析并计算工程变更的传播强度，来确定工程变更对公路工程项目的影响程度。

2 公路工程变更分析模型构建

2.1 公路工程变更网络拓扑结构

由于公路工程变更之间存在着内在联系，将工程

表1 公路工程变更分类
Table 1 Classification of highway engineering changes

一级指标	二级指标	编号	含义
设计变更	路线优化	1	对公路路线进行调整, 以适应地形变化或减少对环境影响
	结构调整	2	对公路桥梁、隧道等设计进行修改, 提高结构性能或降低成本
	功能变更	3	改变公路的使用功能, 如增加或减少车道数量
	外观修改	4	对公路沿线设施外观进行修改, 以提升美观性或符合标准
	系统升级	5	对公路的交通管理系统、照明系统等进行技术升级或更新
施工变更	方法变更	6	根据现场条件或技术进步, 改变施工方法以提高施工效率
	顺序调整	7	调整施工工序或工作流程, 以适应施工条件或优化施工进度
	工艺改进	8	采用新的施工工艺或技术, 以提高施工质量或降低成本
	安全强化	9	加强施工现场的安全措施, 以保护工人安全和防止事故
材料设备变更	技术更新	10	引入新的技术进行优化和升级, 以提高施工效率, 降低施工成本
	材料替换	11	由于供应问题或性能要求变更, 替换原设计中使用的材料
	设备升级	12	更新或替换老旧设备, 以提高性能或满足新的功能需求
	规格调整	13	根据实际需求或设计变更, 调整材料或设备的规格
	品牌更换	14	由于质量、价格或供应原因, 更换材料或设备的供应商或品牌
成本预算变更	费用增减	15	设计变更、施工条件变化等因素, 导致工程费用的增加或减少
	预算调整	16	根据项目进展和市场变化, 对项目预算进行调整
	成本控制	17	采取措施控制项目成本, 以确保项目在预算范围内完成
进度变更	工期延长	18	不可预见因素或施工难度增加, 导致项目完成时间延长
	进度压缩	19	通过优化施工计划和增加资源投入, 缩短项目完成时间
	时间表变更	20	根据项目进展和资源状况, 调整项目时间安排
质量和保修变更	标准提升	21	提高工程质量标准, 以满足更高的使用要求或安全标准
	保修期调整	22	根据合同条款或产品质量, 调整工程的保修期限
	质量控制	23	加强质量管理措施, 以确保工程质量符合标准
新增工程变更	功能扩展	24	增加新的功能区域或设施, 以满足扩展的使用需求, 如服务区
	容量增加	25	扩大公路的通行能力, 以适应交通量的增长
	项目附加	26	增加新的子项目或附属设施, 如绿化工程、排水系统

变更节点指标进行拓扑, 利用聚类算法对项目的拓扑结构进行模块化聚类分析^[16], 得到工程项目变更不同的分类、相互依赖关系以及网络结构中更容易受到变更影响的节点^[17], 分为高聚类区域和低聚类区域。在高聚类区域存在冗余连接, 低聚类区域存在长程连接, 工程变更网络遵循 SWN^[18]的特性。SWN 是介于规则网络和随机网络之间的一种具有独特拓扑结构的网络模型^[19], 具有较短的平均路径长度和较大的聚类系数特征。

图 1 中编号 1~26 所代表的含义与表 1 中公路工程项目中的一个节点变更二级指标相对应。利用 SWN

来构建和分析工程变更网络传播的模型, 并对节点之间的关联关系进行分析, 包括节点之间的传播扩散分析和依赖性分析, 可预测变更的传播趋势, 评估潜在风险^[20], 其中, DSM 可通过矩阵形式系统表示工程变更指标间的直接依赖关系, 量化节点间的交互强度, 为识别关键变更路径提供结构化分析基础, 可预测变更的传播趋势, 评估潜在风险。

2.1.1 节点传播扩散分析 在公路工程项目中, 采用 DSM+SWN 综合性分析模型分析变更之间的依赖关系以及对变更产生的影响。图 2 展示了公路工程变更在网络中的传播扩散过程。变更从一个初始节点 (如

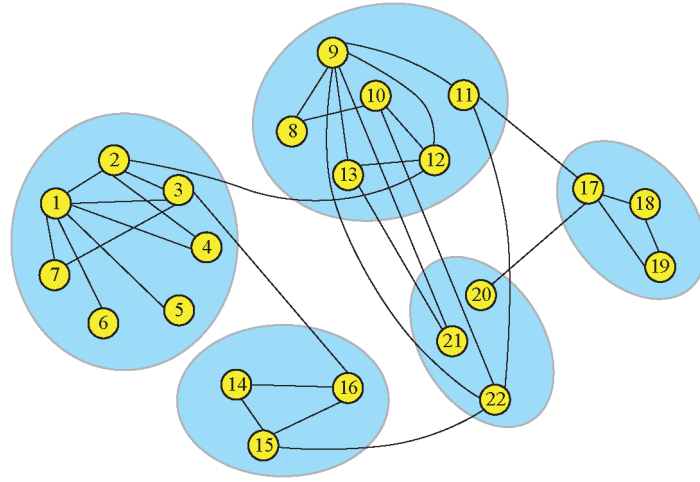


图1 公路工程变更网络拓扑结构

Figure 1 Network topology diagram of a change in highway engineering project

设计变更)开始,通过直接和间接的依赖关系迅速扩散到其他节点。图中的箭头表示变更传播的方向,路径长度表示变更传播的复杂性。小世界网络的特性使得变更能够迅速从一个初始节点(点A)扩散到直接相连的节点,并且由于网络中节点的高聚类系数和短平均路径长度,这种影响可以迅速跨越模块边界,传播到相邻模块,最终在整个网络中完成扩散。工程项目中的变更往往是相互依赖的,一个变更可能会触发或影响其他变更的发生。而扩散的过程是通过分析变更之间的直接和间接依赖性,预测变更的传播趋势,评估潜在风险,并制定相应的变更策略来管理和控制这些变更,以减少对项目进度、成本和质量的负面影响。

2.1.2 节点依赖性分析 公路工程变更之间存在着内在逻辑关系,公路工程拓扑网络的节点之间存在依赖

性,分为直接依赖性和间接依赖性。DSM能够表示系统中各节点之间的交互关系。将公路工程变更项目的变更指标构建成DSM^[21-24]。矩阵中的数据表示项目变更中各指标之间的依赖关系,基于设计结构矩阵,分析各元素指标之间的内在关系。如图3所示。

通过直接风险和间接风险来衡量节点之间的依赖

	a	b	c	d	e	f
a	1	×	×		×	
b	×	1		×	×	×
c	×		1	×	×	×
d		×	×	1		
e	×	×	×		1	
f		×	×			1

图3 公路工程变更的设计结构矩阵(DSM) (“×”表示两个变更指标之间存在直接依赖关系,即一个变更可能会直接影响到另一个变更的发生;空白单元格则表示不存在直接依赖关系。“×”的位置和数量反映了变更指标之间的复杂依赖关系)

Figure 3 Design structure matrix for highway engineering change (“×” indicates a direct dependency between two change indicators, meaning that one change may directly influence the occurrence of the other; blank cells signify the absence of a direct dependency relationship. The positions and quantity of “×” reflect the complex interdependencies among the change indicators)

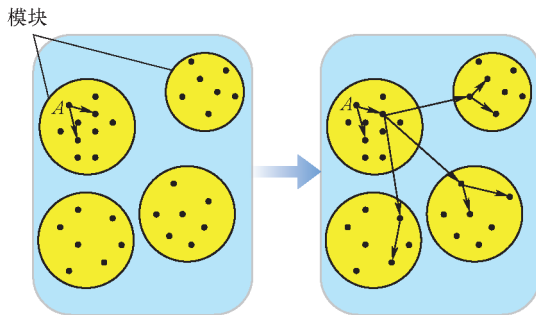


图2 公路工程变更传播扩散模型

Figure 2 Highway engineering change propagation and diffusion model

性。其中直接依赖性反映为变更在节点间传播的直接可能性和影响。直接风险为变更传播的直接可能性与其产生影响的乘积。图4展示了变更之间的直接可能性、影响和风险矩阵。矩阵中的每个单元格表示一个变更对另一个变更的直接影响程度和可能性。通过计算直接风险（可能性×影响），可以评估变更之间的直接风险水平。基于实际工程数据和专家经验综合得出数值，通过上述方法，确保数值的科学性和实用性，能够为项目管理者提供准确的变更风险评估依据。

网络节点之间的间接依赖性指的是一个节点通过其他节点影响到另一个节点的能力，基于设计结构矩阵中各元素之间的交互关系，识别所有可能的间接路径。例如由于施工进度的延长，材料供应计划也需要调整。原本计划在第3个月供应的混凝土可能需要推迟到第4个月，可能导致材料供应商的供应计划重新安排，甚至需要额外的仓储费用。这种材料供应的变更并非直接由设计变更引起，而是通过施工变更和进度变更间接导致的。由于间接依赖性导致工程变更造成的风险，根据工程变更的直接风险进行组合计算间接风险。

2.1.3 组合传播风险分析 由于公路工程项目变更之间具有依赖性，反映为直接风险和间接风险，为控制工程变更传播风险，需考虑网络节点之间的直接和间接路径效果组合，在形式上表现为传播树，如图5所示。使用关键路径法（CPM）^[25]对节点进行组合风险分析。节点之间的依赖关系会对工程变更传播扩散造成影响，进而影响到变更传播风险。下面采用CPM方法对节点进行组合风险分析^{[11]2553}。

组合传播风险分析的详细推导过程：计算从一个设计节点的变更导致另一个设计节点变更的平均概率。无论是直接路径还是间接路径，或是两者的混合，组合影响是对受影响节点的总体影响，概率约为1。

图5中，垂直线代表“与”（ $\cap$ ），水平线代表“或”（ $\cup$ ）。对传播树进行求和时，从距离变更起始节点最远的地方开始。

对于“与”关系（ $\cap$ ）：

$$I_{b,u} \cap I_{b,v} = I_{b,u} \times I_{b,v} \quad (1)$$

对于“或”关系（ $\cup$ ）：

$$I_{b,u} \cup I_{b,v} = I_{b,u} + I_{b,v} - (I_{b,u} \times I_{b,v}) = 1 - ((1 - I_{b,u}) \times (1 - I_{b,v})) \quad (2)$$

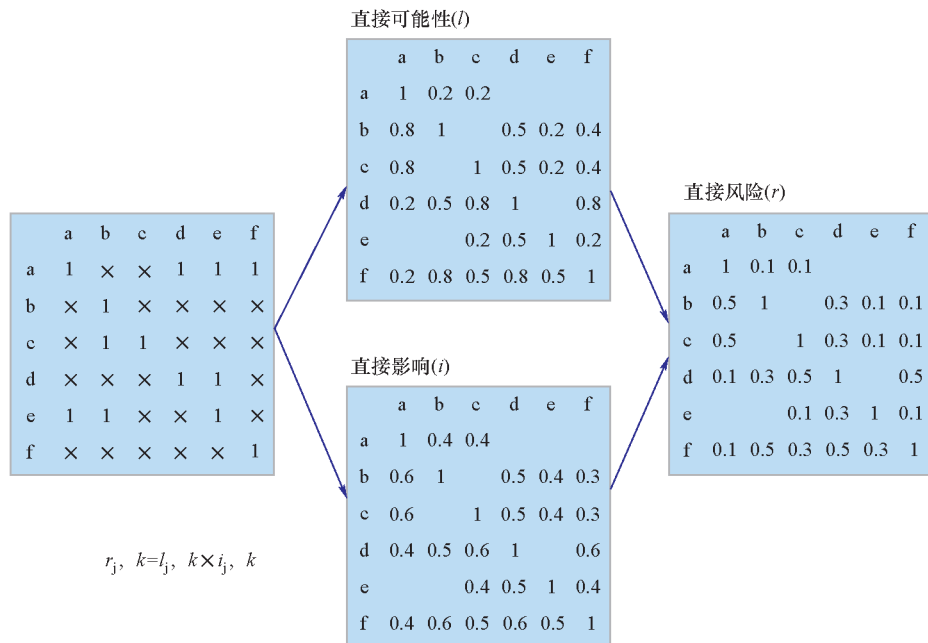


图4 公路工程变更的直接可能性、直接影响和直接风险矩阵

Figure 4 The direct possibilities, direct impacts, and direct risk matrix of highway project changes

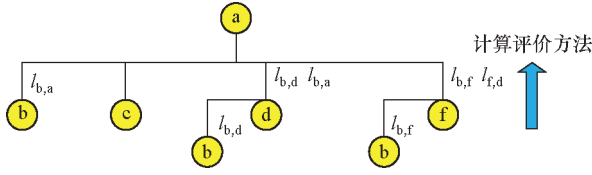


图5 变更树的与/或计算

Figure 5 Change tree with/without calculations

式中， u 表示处于从 a 至 b 变更影响树倒数第二层的所有节点。

组合可能性是一个设计节点的变更导致另一个设计节点变更的平均概率。设 $R_{b,a}$ 是从节点 a 到 b 的变更传播组合风险，

$$R_{b,a} = 1 - \prod(1 - \rho_{b,u}) \quad (3)$$

其中

$$\rho_{b,u} = \sigma_{u,a} l_{b,u} i_{b,u} \quad (4)$$

式中， $\rho_{b,u}$ 是从 u 至 b 的变更传播风险； $\sigma_{u,a}$ 是变更从 a 到达 u 的可能性； $l_{b,u}$ 是变更从 u 到达 b 的直接可能性； $i_{b,u}$ 是变更从 u 到达 b 的直接影响。

上述算法的执行过程如图6所示。

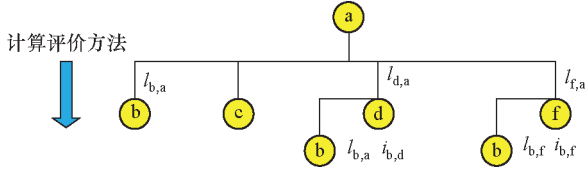


图6 组合传播风险计算

Figure 6 Calculation of combined propagation risk

图6中，到达节点 d 与 f 的可能性 $\sigma_{u,a}$ 分别为 $l_{d,a}$ 和 $l_{f,a}$ ，而从节点 d 与 f 到达 b 的变更传播直接可能性分别为 $l_{b,d}$ 和 $l_{b,f}$ ，它们分别具有直接影响 $i_{b,d}$ 和 $i_{b,f}$ 。组合传播风险的计算过程为自顶向下，则

$$\begin{aligned} R_{b,a} &= 1 - \prod(1 - \rho_{b,u}) = \\ &= 1 - (1 - \rho_{b,a}) \times (1 - \rho_{b,d}) \times (1 - \rho_{b,f}) = \\ &= 1 - (1 - l_{b,a} \times i_{b,a}) \times (1 - \sigma_{d,a} \times l_{b,d} \times i_{b,d}) \times (1 - \sigma_{f,a} \times l_{b,f} \times i_{b,f}) = \\ &= 1 - (1 - l_{b,a} \times i_{b,a}) \times (1 - l_{d,a} \times l_{b,d} \times i_{b,d}) \times (1 - l_{f,a} \times l_{b,f} \times i_{b,f}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $R_{b,a}$ 是从节点 a 到 b 的变更传播组合风险； $l_{b,u}$ 是变更从 u 到达 b 的直接可能性； $i_{b,u}$ 是变更从 u 到达 b 的直接影响。

① 为遵循学术伦理及管理规范，本文案例作匿名化处理。

3 案例分析

3.1 实例验证

RC大道建设工程位于A市科技新区^①，是连接该市新兴科技园区与市中心的关键交通干线。该工程北起科技园区的创新大道，南至市中心的商业核心区，全长约3.2 km。作为该市科技新区的交通动脉，该项目的建设对于促进区域经济发展、提升城市形象、改善居民出行条件具有重大意义。该道路还规划有两座跨河大桥和一座地下隧道，以适应地形和环境要求。工程范围包括道路建设、桥梁工程、隧道工程、排水系统、照明系统、绿化景观以及智能交通系统等。建设工程预计总投资额为2.5亿RMB，资金来源包括政府财政拨款、银行贷款以及社会资本合作（public-private-partnership）模式。

数据来源于RC大道建设工程的实际变更记录和专家访谈。具体数据收集时间为2018年1月至2020年12月，涵盖了RC大道建设工程项目从开工到竣工的整个过程。实际工程数据来自项目进度报告和变更记录，其中直接可能性的数值是基于过去两年内所有变更事件的发生频率计算得出的；直接影响程度的数值是基于变更事件对项目进度、成本和质量的实际影响评估得出的。专家访谈部分，邀请了5位具有10年以上公路工程变更管理经验的专家，通过半结构化访谈收集了他们的意见。专家意见通过德尔菲法汇总，并与实际工程数据相结合，最终确定矩阵中的数值。数据通过交叉验证确保数据的一致性。同时，与类似项目的实际数据进行了对比验证，确保数据的合理性。访谈内容见表2。

结合以往类似工程的历史变更实例和相关专家经验^[26-27]，对RC大道建设工程的实际数据进行深入分析得出该工程的工程变更类型主要有设计变更、施工变更、材料设备变更、成本预算变更、进度变更、质量和保修变更和新增工程变更等7大类，细化为路线优化、结构调整、功能变更、外观修改、系统升级、方法变更等，对以上公路工程的变更过程进行分析。

假设DSM+SWN能够准确捕捉变更传播的复杂

表2 公路工程变更管理专家访谈内容表
Table 2 Expert interview content sheet for highway engineering change management

访谈主题	专家观点/经验总结	实际案例/数据支持	与 DSM+SWN 模型的关联
变更类型识别	公路工程变更主要集中在设计阶段（如路线优化、结构调整）和施工阶段（方法变更、顺序调整）	案例：黄茅海大桥因台风频发导致结构设计多次调整	通过 DSM 矩阵量化设计变更与施工变更的直接依赖关系（如路线优化→施工方法变更）
变更传播路径	变更传播呈现“链式反应”，设计变更通过施工变更间接影响材料供应及进度（如路线优化→施工顺序→材料延迟）	数据分析：路线优化直接导致施工变更的可能性为 0.85，间接导致材料供应延迟的综合风险为 0.665	利用 SWN 模型识别高聚类节点（如设计变更）和长程连接（设计变更→材料变更），预测跨模块传播风险
风险评估方法	须结合历史数据与专家经验，采用定量（如风险矩阵）与定性（如德尔菲法）相结合的方式评估变更影响	数据来源：专家对变更影响的评分与实际项目数据交叉验证，一致性达 85%	DSM 矩阵定量计算直接风险（可能性×影响），SWN 识别关键路径，组合风险模型（CPM）评估间接传播风险
关键节点识别	设计变更中的“路线优化”和施工变更中的“顺序调整”是高风险节点，易引发连锁反应	案例：RC 大道因路线优化导致施工进度延长 15%，间接增加仓储成本 200 万 RMB	DSM 矩阵显示路线优化对施工变更的直接影响程度为 0.8；SWN 分析显示其位于高聚类区域，传播路径短
管理策略建议	建议建立动态预警机制，提前协调设计与施工团队，并采用信息化平台实现变更数据实时同步	案例：昆明某教学楼通过动态成本监控将超支率降低 12%；港澳大桥采用 BIM 技术优化变更响应	DSM+SWN 模型支持动态预警，集成物联网数据可提升模型动态响应能力
模型应用场景	模型适用于复杂地形项目（如跨海桥梁）和多阶段工程（设计、施工、运维），需结合项目特性调整参数	案例：杭州湾跨海铁路大桥通过模块化分析优化设计变更传播路径，工期缩短 10%	SWN 的模块化特性（高聚类区域）支持复杂项目的分段管理；DSM 提供结构化依赖关系，适不同工程阶段的需求

性，但实际应用中可能存在模型简化的情况，在未来的研究中增加样本量以提高结果的可靠性和普适性。数据收集时要采用定量和定性相结合的方法。定量数据主要来源于项目的进度报告和成本记录，定性数据通过半结构化访谈和案例研究获得。得到的初始直接可能性矩阵和初始直接影响矩阵见表 3~表 6。

表 3 展示了工程变更直接影响可能性矩阵。矩阵中的数值表示一个变更直接导致另一个变更发生的可能性。数值越高，表示直接可能性越大。通过分析该矩阵，可以识别出变更之间最直接的依赖关系。“设计变更→施工变更”的直接可能性为 0.85，表明设计变更（如路线优化或结构设计调整）有很高的概率直接引发施工方法或顺序的调整。例如，路线优化可能导致施工设备的进场路径或施工顺序发生变化，从而直接影响施工计划。

表 4 展示了工程变更直接影响程度矩阵。矩阵中的数值表示一个变更对另一个变更的直接影响程度。数值越高，表示影响越显著。通过分析该矩阵，可以评估变更之间的直接风险水平。

根据初始直接可能性矩阵和初始直接影响矩阵对

应数据值和 CPM 方法求得变更综合影响矩阵和变更综合风险矩阵并对其进行项目的风险分析和预测。

表 5 展示了工程变更的综合可能性矩阵。矩阵中的数值表示考虑直接和间接依赖关系后，一个变更导致另一个变更发生的综合可能性。通过分析该矩阵，可以全面评估变更传播的风险。

表 6 展示了工程变更的综合影响程度矩阵。矩阵中的数值表示考虑直接和间接依赖关系后，一个变更对另一个变更的综合影响程度。通过分析该矩阵，可以全面评估变更传播的潜在风险。

根据表 3~表 6 的数据以及 CPM 方法的分析结果，可以清晰地量化每种工程变更之间的相互影响程度。例如，“路线优化→费用增减”的直接可能性为 0.80，表明路线优化有很高的概率直接造成项目费用的调整。进一步分析综合影响矩阵和综合风险矩阵，得出路线优化不仅直接影响费用，还通过顺序调整间接影响材料变更和进度变更。例如，路线优化可能导致施工设备的进场路径或施工顺序发生变化，从而影响材料的供应计划和施工进度。

根据式 (1)~式 (5) 计算得到

表3 公路工程变更的直接影响可能性矩阵

Table 3 Possibility matrix for direct impact of highway engineering changes

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	1	0.7	0.5	0.3	0.4	0.6	0.5	0.4	0.3	0.5	0.4	0.3	0.2	0.8	0.7	0.6	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.4
2	0.7	1	0.6	0.4	0.5	0.7	0.6	0.5	0.4	0.7	0.4	0.5	0.6	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.7	0.6	0.7	0.6	0.5
3	0.5	0.6	1	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.5	0.4	0.3	0.2	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.4	0.5	0.4	0.3
4	0.3	0.4	0.3	1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1
5	0.4	0.5	0.4	0.3	1	0.4	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	0.2	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.4	0.3	0.2
6	0.6	0.7	0.5	0.2	0.4	1	0.7	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.8	0.7	0.6	0.7	0.6	0.5	0.5	4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.4
7	0.5	0.6	0.4	0.2	0.3	0.7	1	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.4	0.5	0.4	0.3
8	0.4	0.5	0.3	0.1	0.3	0.5	0.4	1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.4	0.3	0.2
9	0.3	0.4	0.2	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2	1	0.2	0.5	0.1	0.1	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1
10	0.6	0.7	0.5	0.3	0.8	0.7	0.6	0.9	0.4	1	0	0.8	0.4	0.3	0.7	0.6	0.5	0.6	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.6	0.5	0.4
11	0.5	0.7	0.5	0.2	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.7	1	0.5	0.4	0.8	0.7	0.6	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.4
12	0.4	0.6	0.4	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1	0.7	0.5	1	0.4	0.7	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3
13	0.3	0.5	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.5	0.5	0.3	1	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.4	0.3	0.2
14	0.2	0.4	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.3	0.4	1	0.5	0.4	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2
15	0.8	0.9	0.7	0.5	0.6	0.8	0.7	0.6	0.5	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9	1	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.7	0.8	0.7	0.6
16	0.7	0.8	0.6	0.4	0.5	0.7	0.6	0.5	0.4	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.8	1	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.7	0.7	0.6	0.6
17	0.6	0.7	0.5	0.3	0.4	0.6	0.5	0.4	0.3	0.6	0.5	0.4	0.3	0.8	0.8	0.7	1	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.4
18	0.7	0.8	0.6	0.2	0.5	0.7	0.6	0.5	0.4	0.7	0.6	0.5	0.4	0.7	0.6	0.5	0.4	1	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.5	0.4
19	0.6	0.6	0.5	0.3	0.4	0.6	0.5	0.4	0.3	0.6	0.5	0.4	0.3	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	1	0.3	0.5	0.4	0.6	0.7	0.6	0.5
20	0.5	0.6	0.4	0.3	0.3	0.5	0.4	0.3	0.2	0.5	0.4	0.3	0.2	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	1	0.2	0.4	0.3	0.4	0.2	0.3
21	0.5	0.6	0.4	0.2	0.3	0.5	0.4	0.3	0.2	0.5	0.4	0.3	0.2	0.7	0.6	0.5	0.7	0.7	0.5	0.4	1	0.3	0.5	0.5	0.4	0.4
22	0.4	0.5	0.3	0.1	0.2	0.4	0.3	0.2	0.1	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.5	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	1	0.4	0.5	0.4	0.3
23	0.3	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	1	0.4	0.3	0.2
24	0.5	0.6	0.5	0.3	0.4	0.6	0.4	0.3	0.2	0.5	0.4	0.3	0.2	0.7	0.6	0.5	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	0.7	1	0.2	0.5
25	0.6	0.7	0.5	0.3	0.4	0.6	0.5	0.4	0.3	0.6	0.5	0.4	0.3	0.8	0.7	0.6	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.7	0.6	1	0.5
26	0.4	0.5	0.4	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.3	0.2	0.1	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.5	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	1

注:表中编号1~26代表的含义与表1中节点变更二级指标对应。

$$R_{b,a} = 1 - (1 - l_{b,a} \times i_{b,a}) \times (1 - l_{b,a} \times l_{b,d} \times i_{b,d}) \times (1 - l_{f,a} \times l_{b,f} \times i_{b,f}) \quad (6)$$

$$R(\text{路线优化}) = 1 -$$

$$(1 - 0.7 \times 0.6)(1 - 0.6 \times 0.4)(1 - 0.3 \times 0.8) \approx 1 - 0.335 \approx 0.665 \quad (7)$$

路线优化的组合传播风险为0.665,表明其对整

个项目的潜在影响较大。具体而言,路线优化不仅直接影响施工变更,还通过施工变更间接影响材料供应和进度安排,最终导致项目成本增加和工期延长。

$$R(\text{工期延长}) = 1 -$$

$$(1 - 0.6 \times 0.8)(1 - 0.3 \times 0.6)(1 - 0.5 \times 0.6) \approx 1 - 0.298 \approx 0.702 \quad (8)$$

表4 公路工程变更的直接影响程度矩阵
Table 4 Degree of direct impact matrix for highway engineering changes

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	1	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	0.3	0.5	0.4	0.3	0.2	0.4	0.5	0.3	0.5	0.5	0.6	0.3	0.4	0.3	0.4	0.6	0.4	0.4
2	0.6	1	0.6	0.4	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.5	0.4	0.9	0.8	0.5	0.7	0.5	0.6	0.6	0.5	0.4	0.6	0.7	0.4	0.5
3	0.3	0.6	1	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.5	0.4	0.3	0.2	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.4	0.5	0.4	0.3
4	0.2	0.4	0.3	1	0.3	0.4	0.2	0.2	0.1	0.4	0.2	0.3	0.1	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.4	0.3	0.2	0.1
5	0.3	0.5	0.4	0.4	1	0.4	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	0.2	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.4	0.3	0.2
6	0.3	0.7	0.5	0.4	0.3	1	0.7	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.8	0.7	0.6	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.4
7	0.4	0.6	0.4	0.2	0.4	0.7	1	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1	0.7	0.5	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.4	0.5	0.4	0.3
8	0.4	0.5	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.4	0.3	0.2
9	0.3	0.4	0.2	0.1	0.2	0.4	0.5	0.2	1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.5	0.6	0.4	0.7	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1
10	0.4	0.7	0.2	0.3	0.8	0.7	0.1	0.7	0.4	1	0.5	0.8	0.4	0.3	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.5	0.3	0.4	0.6	0.5	0.4
11	0.5	0.7	0.5	0.4	0.4	0.5	0.1	0.3	0.1	0.7	1	0.5	0.4	0.8	0.7	0.5	0.5	0.2	0.5	0.5	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.4
12	0.4	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1	0.3	0.5	1	0.4	0.7	0.6	0.5	0.4	0.5	0.2	0.4	0.5	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3
13	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.2	0.1	0.4	0.5	0.3	1	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.4	0.3	0.4
14	0.3	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4	0.1	0.5	0.3	0.4	0.3	0.5	1	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2
15	0.5	0.4	0.5	0.4	0.6	0.8	0.3	0.6	0.4	0.4	0.7	0.5	0.5	0.9	1	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.7	0.8	0.7	0.6
16	0.7	0.3	0.4	0.5	0.5	0.7	0.3	0.4	0.3	0.3	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	1	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6
17	0.6	0.4	0.5	0.3	0.4	0.6	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.8	0.4	1	0.6	0.5	0.3	0.4	0.3	0.5	0.2	0.5	0.4
18	0.7	0.4	0.6	0.2	0.5	0.7	0.2	0.5	0.3	0.4	0.6	0.5	0.4	0.7	0.6	0.5	0.7	1	0.4	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.5	0.6
19	0.4	0.6	0.5	0.3	0.4	0.6	0.2	0.4	0.2	0.5	0.5	0.4	0.3	0.8	0.7	0.6	0.5	0.3	1	0.3	0.5	0.4	0.6	0.7	0.4	0.5
20	0.5	0.6	0.4	0.2	0.3	0.5	0.1	0.3	0.2	0.4	0.4	0.3	0.2	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3
21	0.2	0.6	0.4	0.1	0.3	0.5	0.3	0.2	0.1	0.5	0.4	0.3	0.2	0.7	0.6	0.5	0.7	0.7	0.5	0.7	1	0.3	0.5	0.5	0.4	0.4
22	0.3	0.5	0.3	0.2	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.4	0.2	0.4	0.3	0.5	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	1	0.4	0.5	0.4	0.3
23	0.3	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.5	0.4	0.2	0.2	0.1	0.5	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.3	0.3	1	0.4	0.3	0.2
24	0.5	0.5	0.5	0.3	0.4	0.5	0.2	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.7	1	0.6	0.5
25	0.6	0.5	0.5	0.3	0.4	0.6	0.5	0.3	0.1	0.5	0.5	0.4	0.2	0.4	0.4	0.6	0.8	0.5	0.6	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	1	0.5
26	0.4	0.4	0.4	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.1	0.6	0.5	0.3	0.3	0.4	0.3	0.5	0.4	0.3	0.5	0.6	0.4	1

注:表中编号1~26代表的含义与表1中节点变更二级指标对应。

工期延长的高传播风险,表明其对项目的潜在影响极为显著。这一风险不仅体现在直接的经济成本增加上,还通过一系列间接路径对项目的整体进度、质量控制和资源分配产生连锁反应。例如,工期延长可能导致材料供应计划的调整,进而影响施工进度和质

量标准的实现。

3.2 有效性验证

在传统的变更管理中,管理者通常在变更发生后才采取应对措施,缺乏系统性的预测和分析工具。本

表5 公路工程变更的综合可能性矩阵

Table 5 Comprehensive possibility matrix for highway engineering changes

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	1	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.5	0.7	0.7	0.2	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.5	0.5	0.1
2	0.4	1	0.5	0.2	0.4	0.4	0.5	0.6	0.5	0.6	0.4	0.8	0.4	0.7	0.2	0.6	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.5	0.3	0.1	0.5
3	0.5	0.4	1	0.3	0.2	0.4	0.3	0.7	0.4	0.4	0.5	0.4	0.3	0.8	0.5	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.4	0.1	0.5	0.2	0.3	0.3
4	0.5	0.6	0.4	1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.7	0.4	0.5	0.5	0.2	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0.5	0.1	0.5
5	0.6	0.5	0.5	0.4	1	0.6	0.2	0.7	0.6	0.6	0.3	0.7	0.4	0.5	0.2	0.5	0.7	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5
6	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	1	0.4	0.7	0.6	0.4	0.6	0.4	0.7	0.5	0.7	0.4	0.2	0.2	0.4	0.4	0.2	0.4	0.1	0.3	0.3	0.1
7	0.4	0.7	0.6	0.3	0.3	0.6	1	0.3	0.4	0.6	0.4	0.7	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.1	0.4	0.3	0.1	0.3	0.4	0.2	0.3	0.1
8	0.2	0.5	0.7	0.7	0.4	0.6	0.5	1	0.7	0.6	0.6	0.1	0.4	0.4	0.3	0.1	0.3	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2
9	0.4	0.6	0.8	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	1	0.3	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.6	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.3	0.3	0.1	0.4	0.1
10	0.3	0.5	0.7	0.5	0.3	0.6	0.6	0.3	0.6	1	0.3	0.6	0.3	0.3	0.4	0.4	0.6	0.2	0.6	0.3	0.1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.1
11	0.2	0.4	0.5	0.4	0.4	0.1	0.1	0.5	0.4	0.6	1	0.7	0.1	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.1	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2
12	0.4	0.3	0.5	0.5	0.1	0.3	0.1	0.7	0.3	0.4	0.1	1	0.6	0.1	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.4	0.1	0.1	0.4	0.4	0.3	0.1
13	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.6	0.3	0.1	0.6	0.3	1	0.6	0.1	0.1	0.6	0.4	0.6	0.2	0.2	0.4	0.1	0.1	0.4	0.3
14	0.3	0.3	0.6	0.3	0.5	0.6	0.4	0.5	0.3	0.1	0.6	0.4	0.3	1	0.5	0.6	0.5	0.3	0.2	0.5	0.3	0.3	0.4	0.3	0.5	0.3
15	0.2	0.2	0.5	0.4	0.3	0.1	0.5	0.6	0.6	0.3	0.3	0.7	0.3	0.1	1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.1	0.4	0.5	0.2	0.3	0.5
16	0.1	0.2	0.8	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.7	0.4	0.3	0.1	0.2	0.2	0.3	1	0.2	0.1	0.1	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	0.3
17	0.6	0.6	0.7	0.3	0.2	0.6	0.4	0.6	0.6	0.3	0.4	0.5	0.1	0.4	0.2	0.3	1	0.3	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2	0.4	0.2	0.5
18	0.5	0.5	0.4	0.6	0.3	0.6	0.3	0.3	0.6	0.4	0.7	0.1	0.1	0.3	0.1	0.5	0.2	1	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3
19	0.5	0.4	0.3	0.5	0.2	0.4	0.3	0.1	0.7	0.1	0.3	0.1	0.4	0.1	0.5	0.3	0.2	0.1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3	0.4
20	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	1	0.4	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1
21	0.3	0.3	0.2	0.2	0	0.3	0.3	0.3	0.1	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.2	0.1	1	0.3	0.1	0.5	0.3	0.3
22	0.3	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.7	0.3	0.5	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	1	0.1	0.3	0.1	0.5
23	0.4	0.5	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4	0.3	0.1	0.2	0.1	0.1	0.6	0.2	0.3	0.2	0.6	0.1	0.2	0.3	1	0.2	0.1	0.1
24	0.3	0.1	0.4	0.5	0.2	0.4	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2	0.4	0.5	0.2	0.4	0.6	0.2	0.1	0.4	0.6	0.3	0.5	0.4	1	0.3	0.3
25	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3	0.1	1	0.1
26	0.4	0.3	0.1	0.1	0.4	0.3	0.4	0.2	0.4	0.5	0.2	0.1	0.1	0.4	0.1	0.3	0.1	0.1	0.5	0.1	0.4	0.5	0.2	0.5	0.3	1

注:表中编号1~26代表的含义与表1中节点变更二级指标对应。

文通过实际案例数据,对比了传统变更管理方法与本文方法在变更风险预测和管理效果上的差异。传统方法在处理变更时,主要依赖于经验判断和事后调整。例如,在设计变更发生后,项目团队通常需要花费额外的时间重新评估施工计划和预算,导致项目进度延误和成本增加。采用本文提出的基于DSM+SWN的综合分析方法,项目团队能够在变更发生前预测其潜

在影响,并制定合理的变更方案。通过表3~表6的数据分析和CPM方法,项目团队提前识别不同的变更对项目目标的潜在风险,能够建立变更预警机制,提前与团队沟通,确保变更的必要性和可行性。对于可能影响施工的关键变更,提前调整施工计划,减少对进度的影响,确保项目按时完成。本文的方法在变更风险预测和管理效果上显著优于传统方法,能够为项

表6 工程变更的综合影响程度矩阵
Table 6 Comprehensive impact degree matrix of engineering changes in construction projects

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	1	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.4	0.4
2	0.5	1	0.3	0.2	0.7	0.3	0.3	0.7	0.5	0.4	0.7	0.6	0.8	0.4	0.3	0.4	0.1	0.4	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.1	0.1
3	0.6	0.5	1	0.6	0.6	0.6	0.7	0.4	0.6	0.8	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3
4	0.5	0.4	0.5	1	0.4	0.7	0.4	0.3	0.4	0.7	0.4	0.8	0.4	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1	0.4	0.2	0.4	0.3
5	0.4	0.3	0.4	0.6	1	0.4	0.5	0.4	0.5	0.3	0.6	0.6	0.6	0.2	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.5	0.5	0.3	0.2	0.3	0.4
6	0.5	0.3	0.3	0.4	0.5	1	0.5	0.7	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.8	0.2	0.4	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2
7	0.1	0.3	0.4	0.5	0.4	0.7	1	0.5	0.4	0.3	0.5	0.5	0.7	0.4	0.6	0.7	0.4	0.2	0.3	0.4	0.1	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4
8	0.7	0.5	0.7	0.2	0.2	0.5	0.8	1	0.5	0.4	0.8	0.8	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.2	0.1	0.4	0.5	0.4	0.4	0.2
9	0.6	0.5	0.5	0.2	0.5	0.8	0.5	0.5	1	0.3	0.6	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.3	0.3	0.4	0.1	0.5	0.3	0.5	0.3	0.4	0.1
10	0.5	0.4	0.6	0.7	0.4	0.3	0.8	0.5	0.8	1	0.4	0.5	0.4	0.7	0.6	0.4	0.2	0.3	0.3	0.4	0.1	0.1	0.4	0.2	0.1	0.2
11	0.8	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.5	0.4	1	0.8	0.3	0.4	0.6	0.4	0.3	0.1	0.2	0.4	0.7	0.4	0.3	0.1	0.1	0.2
12	0.7	0.5	0.3	0.5	0.3	0.8	0.4	0.4	0.5	0.8	0.4	1	0.5	0.2	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.5	0.3	0.4	0.1	0.3	0.3
13	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3	0.8	0.2	0.3	0.3	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.3	0.1	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3
14	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.4	0.4	0.3	0.1	0.4	0.4	0.1	0.3	0.2	0.2	0.4	0.2
15	0.1	0.4	0.2	0.7	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.2	0.8	0.3	0.2	1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2	0.5	0.6	0.2	0.5	0.4	0.1
16	0.4	0.2	0.5	0.4	0.4	0.2	0.5	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.2	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4
17	0.4	0.2	0.3	0.5	0.5	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	1	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3
18	0.3	0.1	0.5	0.3	0.3	0.4	0.2	0.4	0.3	0.1	0.2	0.8	0.3	0.2	0.2	0.4	0.2	1	0.3	0.5	0.4	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2
19	0.2	0.3	0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.3	0.5	0.3	0.4	0.6	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.2	1	0.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.5
20	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	1	0.3	0.2	0.3	0.3	0.5	0.2
21	0.2	0.3	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.1	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	1	0.4	0.5	0.3	0.3	0.2
22	0.1	0.4	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.4	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2	1	0.3	0.2	0.2	0.1
23	0.1	0.5	0.5	0.4	0.6	0.4	0.3	0.3	0.1	0.3	0.2	0.3	0.4	0.1	0.1	0.3	0.4	0.5	0.2	0.2	0.4	0.2	1	0.1	0.3	0.2
24	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.6	0.4	0.3	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.4	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	1	0.4	0.3
25	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.4	0.1	0.1	0.3	0.4	0.3	1	0.1
26	0.2	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.1	0.3	0.4	0.3	0.1	0.2	0.1	0.4	0.3	0.3	0.1	0.5	0.1	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	1

注:表中编号1~26代表的含义与表1中节点变更二级指标对应。

目管理者提供科学的决策支持,制定合理的变更方案,提升变更管理的主动性和系统性。

4 结论

本文以公路工程变更管理为背景,提出了基于设

计结构矩阵(DSM)与小世界网络模型(SWN)的综合分析框架,旨在解决传统变更管理中被动应对、风险预测不足等问题,突破了传统被动式变更管理模式的局限性,结论如下。

(1) 研究综合“DSM+SWN”构建出工程变更传播扩散模型。二者的融合突破了传统线性分析方法的

局限,实现了对多路径、跨模块风险传播的量化评估,提前识别高风险变更路径,为项目管理者提供动态预警机制。

(2) 该模型可广泛应用于公路工程的设计、施工和运维阶段。例如,在跨海桥梁或复杂地形公路项目中,通过预测设计变更对材料供应和施工顺序的间接影响,可提前协调供应商与施工团队,避免资源

冲突。

(3) 本模型仍存在以下改进方向:当前模型依赖历史数据和静态假设,未来可结合物联网实时监测数据,开发动态更新算法,提升模型对施工环境变化的响应能力。通过集成机器学习算法和可视化平台,实现风险预测的自动化和交互式管理,降低专家经验依赖,提升中小型项目的适用性。

参考文献

- [1] Alnuaimi A S, Taha R A, Al Mohsin M, et al. Causes, effects, benefits, and remedies of change orders on public construction projects in Oman[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2010, 136(5): 615-622.
- [2] 张书含, 苏艳慧, 王晓辉, 等. 黄茅海大桥钢箱梁长效防腐智能涂装施工技术[J]. *公路*, 2024, 69(10): 183-187.
Zhang S H, Su Y H, Wang X H, et al. Construction technology of long-term anti-corrosion intelligent coating for steel box girder of Huang Mao Sea bridge[J]. *Highway*, 2024, 69(10): 183-187.
- [3] 陈越, 苏宗贤. 港珠澳大桥岛隧工程技术挑战[J]. *现代隧道技术*, 2024, 61(2): 214-222.
Chen Y, Su Z X. Technical challenges in the artificial island and immersed tunnel works of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge project[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2024, 61(2): 214-222.
- [4] 张建. 杭州湾跨海铁路大桥总体设计与关键技术研究[J]. *铁道工程学报*, 2022, 39(10): 7-12, 99.
Zhang J. Research on the overall design and key technology of Hangzhou Bay Cross-Sea Railway Bridge[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2022, 39(10): 7-12, 99.
- [5] Bitamba B F, An S H. Construction project change management in the democratic republic of the Congo: Status, causes, and impacts[J]. *Sustainability*, 2020, 12(22): 9766.
- [6] 姚亚峰. 公路工程变更设计质量的主要影响因素分析[J]. *公路*, 2014, 59(7): 295-299.
Yao Y F. Analysis on main influencing factors of highway engineering change design quality[J]. *Highway*, 2014, 59(7): 295-299.
- [7] Halou M I K, Samin R, Ahmad M. Impacts of change management on risk and cost management of a construction projects[J]. *Journal of Project Management*, 2019: 157-164.
- [8] 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.
- [9] 葛芙蓉, 黄尧. 高速公路项目风险管理研究[J]. *公路*, 2020, 65(6): 170-172.
Ge F R, Huang Y. Research on risk management of expressway project[J]. *Highway*, 2020, 65(6): 170-172.
- [10] 孙成双, 王要武. 基于多Agent技术的工程项目风险管理系统构架[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(6): 776-778.
Sun C S, Wang Y W. A multi-agent based system framework for construction project risk management[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(6): 776-778.
- [11] 郭于明. 产品开发网络中的设计变更传播风险预测[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(10): 2547-2558.
Guo Y M. Predication of design change propagation risk in product development network[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(10): 2547-2558.
- [12] 杜永安, 陈军. 京石高速公路改扩建工程计量和变更工作管理[J]. *公路*, 2018, 63(2): 178-181.
Du Y A, Chen J. Measurement and change management of reconstruction and expansion project of Beijing-Shijiazhuang Expressway[J]. *Highway*, 2018, 63(2): 178-181.
- [13] 方俊. 建设项目工程变更的管理与控制[J]. *建筑经济*, 2004, 25(10): 54-58.
Fang J. Management and control of engineering changes in construction projects[J]. *Construction Economy*, 2004, 25(10): 54-58.

- [14] 任雅茹, 尹贻林, 尚应应. 工程变更对合同价款的影响机理研究[J]. 项目管理技术, 2018, 16(2): 40-48.
Ren Y R, Yin Y L, Shang Y Y. Study on the influence mechanism of engineering change on contract price[J]. Project Management Technology, 2018, 16(2): 40-48.
- [15] 郑宏波. 铁路工程勘察设计项目集成化管理研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 115-119.
Zheng H B. Research on the integration management of railway construction survey and design project[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(12): 115-119.
- [16] 乔虎, 莫蓉, 向颖. 变更路径预测支持的自适应模块建模[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(12): 2358-2366.
Qiao H, Mo R, Xiang Y. Adaptive module modeling by predicting change path[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(12): 2358-2366.
- [17] 范碧霞, 刘帅. 复杂网络理论在供应链管理中的应用研究[J]. 商业经济研究, 2017(18): 97-98.
Fan B X, Liu S. Research on the application of complex network theory in supply chain management[J]. Journal of Commercial Economics, 2017(18): 97-98.
- [18] 李锋, 魏莹. 小世界网络下病毒性信息传播的仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(9): 1790-1801.
Li F, Wei Y. Simulation analysis of viral-style information diffusion in small world networks[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9): 1790-1801.
- [19] 郑耿忠, 刘三阳, 齐小刚. 基于小世界网络模型的无线传感器网络拓扑研究综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(12): 1761-1768.
Zheng G Z, Liu S Y, Qi X G. Survey on topology of wireless sensor networks based on small world network model[J]. Control and Decision, 2010, 25(12): 1761-1768.
- [20] 来逢波, 许冰, 续颖, 等. 高铁复杂网络拓扑特征及节点中心性研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(6): 14-22.
Lai F B, Xu B, Xu Y, et al. Study on topological characteristics and node centrality of high-speed railway complex network[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(6): 14-22.
- [21] 李从东, 章志伟, 曹策俊, 等. 复杂产品设计变更传播路径的多目标优选[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(3): 842-856.
Li C D, Zhang Z W, Cao C J, et al. Multi-objective optimization of design change propagation paths in complex product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(3): 842-856.
- [22] Cheng H, Chu X N. A network-based assessment approach for change impacts on complex product[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(4): 1419-1431.
- [23] Latora V, Marchiori M. Efficient behavior of small-world networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 87(19): 198701.
- [24] Braha D, Bar-Yam Y. Topology of large-scale engineering problem-solving networks[J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2004, 69 (1 pt 2): 016113.
- [25] Clarkson P J, Simons C, Eckert C. Predicting change propagation in complex design[J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(5): 788-797.
- [26] 赵庆武. 基于施工总承包模式下的地铁风险管理研究[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(7): 100-105, 115.
Zhao Q W. Research on metro risk management under construction general contracting mode[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(7): 100-105, 115.
- [27] 王淑雨, 韩同银, 王莹莹. 铁路工程项目利益相关方识别及影响力评估[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(3): 107-111.
Wang S Y, Han T Y, Wang Y Y. Research on the influence assessment about the stakeholders of railway construction projects[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(3): 107-111.

Research on Change Management in Highway Engineering Based on DSM + SWN

Yuan Jianbo*, Wang Xuan

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

Highlights

Integrated DSM and SWN model predicts engineering change propagation risks in highway projects.

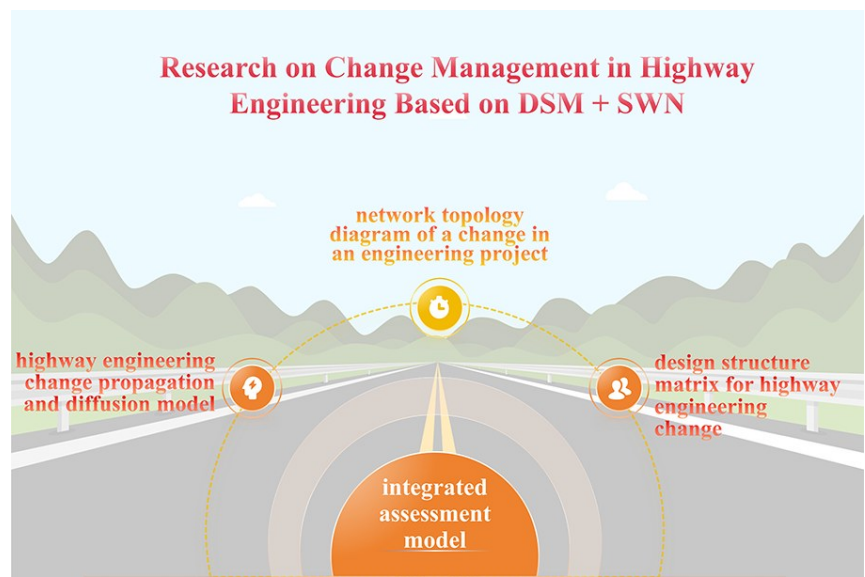
Identified high-risk nodes like route optimization and construction sequence adjustments.

Model quantifies direct and indirect dependencies, revealing hidden change impacts.

Case study validates model effectiveness in proactive change management.

Future work includes real-time IoT data integration for dynamic risk assessment.

Graphical Abstract



Abstract: Road engineering projects are complex undertakings that are highly susceptible to changes due to various factors such as weather conditions, geological uncertainties, technological advancements, and evolving project requirements. These changes can have significant impacts on project progress, cost, and quality. Traditional change management approaches are often reactive, addressing changes only after they occur, which can lead to increased costs, extended project durations, and compromised quality. To address these challenges, this study aims to develop a proactive and systematic approach to change management by constructing a novel integrated assessment model based on the Design Structure Matrix (DSM) and the Small-World Network Model (SWN). The goal is to predict the propagation and diffusion risks of engineering changes, enabling project managers to identify potential impacts in advance and formulate effective change management strategies.

The study employs a multi-method approach combining historical data analysis, questionnaire surveys, expert interviews, and model validation through a case study. Firstly, historical data from various road engineering projects are analyzed to identify common types of changes and their underlying causes. A comprehensive survey involving 180 questionnaires is distributed to frontline engineers, project managers, and construction workers, with a final effective response rate of 88.9% after data cleaning. The survey results are further validated by a panel of industry experts, including university professors, senior engineers from design institutes, and chief engineers from construction companies. The DSM is utilized to quantify the direct dependencies between different change indicators, while the SWN model is employed to analyze the propagation paths and the potential diffusion risks of changes within the project network. The Critical Path Method (CPM) is also applied to assess the combined propagation risks of changes. The model's effectiveness is validated through a case study of the RC Avenue Construction Project in City A, which includes multiple complex structures such as bridges and tunnels.

The study identifies seven major categories of engineering changes, including design changes, construction changes, material and equipment changes, cost budget changes, schedule changes, quality and warranty changes, and additional engineering changes. Each category is further divided into specific subcategories to provide a detailed analysis. The DSM+SWN model is validated through the RC Avenue Construction Project, which demonstrates that the model can effectively predict the propagation paths and combined risks of changes. For instance, the probability of route optimization directly causing

construction changes is 0.85, and its combined propagation risk to the entire project is 0.665. The model also identifies high-risk nodes such as route optimization and construction sequence adjustment, which are prone to triggering chain reactions affecting project progress and cost. The results show that the model can provide early warnings and support dynamic decision-making, thereby reducing the negative impacts of changes on project progress, cost, and quality.

The study concludes that the proposed DSM+SWN model provides a robust and proactive approach to managing engineering changes in road construction projects. It offers a dynamic early warning mechanism that allows project managers to anticipate potential risks and optimize change implementation processes. The model's application in the RC Avenue Construction Project demonstrates its effectiveness in reducing the negative impacts of changes on project progress, cost, and quality. Future research could focus on integrating real-time data from IoT sensors to enhance the model's responsiveness to dynamic construction environments. Additionally, incorporating machine learning algorithms and developing interactive visualization platforms could further automate risk prediction and improve the model's applicability to small and medium-sized projects. The study's findings have significant implications for improving the efficiency and reliability of change management in road engineering projects, contributing to both academic research and practical applications in the field of engineering management. The innovative aspects of this study include the integration of DSM and SWN models to address the complex dependencies and propagation paths of changes, providing a more comprehensive and proactive approach compared to traditional methods. This approach not only enhances the scientific basis for change management but also supports more effective and systematic decision-making in road engineering projects.

Keywords: design structure matrix; small-world network model; engineering changes; engineering changes model; change propagation risk analysis