

摘 要

2019年9月《交通强国建设纲要》印发，我国公路建设领域投资规模逐年增加态势，与此同时大规模的公路建设项目也伴随着诸多安全风险的问题，尤其是在项目施工阶段。

本文通过归纳总结项目施工阶段评价指标选取方法、风险管理转为风险预警的趋势三个维度，探讨了公路建设项目施工阶段风险预警评价体系构建应该注意的实际问题。采用文献阅读法与专家咨询法相结合的方法来确定公路建设项目施工阶段风险预警评价指标，基于统计分析法进行风险识别后选取关键性指标，初步构建公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系。同时基于模糊一致偏好关系，结合三角模糊理论，构建公路建设项目施工阶段风险预警评价模型；在权威专家组的指导下，构建划分公路建设项目施工阶段风险预警等级。

最后，本文依托成绵公路建设项目，将基于三角模糊数法建立的风险预警评价模型应用在该工程实际中，对施工阶段工程风险进行分析和评估，评估结果验证了该模型的实际应用性、可行性和有效性。同时依据成绵公路建设项目施工阶段风险预警评价分析，紧紧围绕项目实际情况，针对项目建设施工阶段突出的实际问题提出了风险相应措施。

关键词：公路项目，指标体系，风险预警，三角模糊数

Abstract

In september2019, the outline for the construction of a powerful transportation country was issued. The investment scale in China's highway construction field is increasing year by year. At the same time, large-scale highway construction projects are also accompanied by many safety risks, especially in the project construction stage.

This paper discusses the practical problems that should be paid attention to in the construction of risk early warning evaluation system in the construction stage of highway construction project by summarizing the three dimensions of the selection method of evaluation indexes in the construction stage of the project and the trend from risk management to risk early warning. The combination of literature reading method and expert investigation method is used to determine the risk early warning evaluation index of highway construction project construction stage, and the key index is selected after risk identification based on statistical analysis method to construct the risk early warning evaluation index system of highway construction project construction stage. At the same time, based on the fuzzy consistent preference relationship, combined with the triangular fuzzy theory, this paper constructs the risk early warning evaluation model of highway construction project in the construction stage; Under the guidance of the authoritative expert group, build and divide the risk early warning level of highway construction project construction stage.

Finally, relying on the Chengmian highway construction project, this paper applies the risk early warning evaluation model based on the triangular fuzzy number method to the actual project, analyzes and evaluates the project risk in the construction stage of the project, and the evaluation results verify the practical applicability of the model, feasibility, effectiveness. At the same time, according to the risk early warning evaluation and analysis of the Chengmian highway construction project in the construction stage, and focusing on the actual situation of the project, the corresponding measures for risk response are put forward for the prominent practical problems in the construction stage of the project.

Key words: Highway Project, Index System, Risk Early Warning, Triangular Fuzzy
Number Meth

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究意义.....	2
1.3 国内外研究现状.....	3
1.3.1 国外研究现状.....	3
1.3.2 国内研究现状.....	4
1.3.3 国内外研究现状评述.....	6
1.4 研究内容与方法.....	6
1.5 技术路线.....	7
第二章 基础理论综述	9
2.1 风险管理理论.....	9
2.1.1 风险管理的定义.....	9
2.1.2 公路建设项目施工阶段风险管理.....	10
2.2 风险预警.....	11
2.2.1 风险预警的定义.....	11
2.2.2 公路建设项目施工阶段风险预警.....	11
2.3 本章小结.....	12
第三章 公路建设项目施工阶段风险预警指标体系构建	13
3.1 构建预警评价体系应该注意的问题.....	13
3.1.1 综合评价风险评价指标.....	13
3.1.2 综合考量施工阶段在风险规避中的经济性.....	13
3.1.3 风险管理转为风险预警的趋势分析.....	13
3.2 初步构建项目风险预警评价指标体系.....	14
3.2.1 风险预警评价指标选取原则.....	14
3.2.2 风险预警评价指标选取方法.....	15
3.2.3 风险预警评价指标体系初步构建.....	15
3.3 风险预警评价指标体系优化.....	18
3.3.1 调查问卷的设计.....	18

3.3.2 调查问卷发放的对象.....	18
3.3.3 调查问卷发放方式和回收.....	19
3.3.4 调查问卷的信度与效度分析.....	19
3.4 本章小结.....	25
第四章 公路建设项目施工阶段风险预警模型.....	26
4.1 风险预警评价指标权重.....	26
4.1.1 模糊一致偏好关系.....	26
4.1.2 风险预警评价指标权重的确定.....	27
4.2 风险预警评价模型建立.....	28
4.2.1 三角模糊数法定义.....	29
4.2.2 基于三角模糊数风险预警模型的评估步骤.....	30
4.3 风险预警等级划分.....	32
4.4 本章小结.....	33
第五章 公路建设项目施工阶段风险预警模型应用.....	34
5.1 成绵高速项目基本概况.....	34
5.1.1 建设背景.....	34
5.1.2 项目规模.....	35
5.1.3 技术标准.....	35
5.2 成绵高速项目建设条件.....	35
5.2.1 气象及水文条件.....	35
5.2.2 构造及地质条件.....	37
5.2.3 不良地质.....	37
5.2.4 特殊性岩土.....	38
5.3 成绵高速项目施工阶段重难点风险.....	39
5.3.1 路基工程风险.....	39
5.3.2 桥梁工程风险.....	40
5.3.3 互通工程风险.....	42
5.4 成绵高速项目施工阶段风险预警评价及分析.....	43
5.4.1 风险预警评价指标权重的确定与分析.....	43

5.4.2 基于三角模糊数的风险预警评价.....	46
5.4.3 风险预警评价结果的综合分析.....	49
5.5 成绵高速项目施工阶段风险应对措施.....	51
5.6 本章小结.....	54
结论与展望.....	55
结论.....	55
展望.....	55
参考文献.....	57
附 录.....	61
致 谢.....	68

第一章 绪论

1.1 研究背景

道路通，百业兴。公路作为交通领域重要的基础设施之一，对国民经济的不断发展有着至关重要的作用。伴随着近些年公路建设项目的蓬勃发展，在提升国内的综合实力、优化运输的同时，拉动了国内经济增长，成为目前我国实现现代化重要的手段之一。根据报告统计，2020年全国公路货运规模占全社会货运总规模的比重达到74%^[1]，未来国内公路交通仍然是最主要的货运方式。

2019年9月，国家提出了要加快“交通强国”建设步伐，并印发了《交通强国建设纲要》。据交通运输部统计数据显示，2021全年实际完成公路建设投资25995亿元，比上年增长6.0%，根据近几年我国公路市场规模发展趋势，预计2025年公路市场规模将达到2.84万亿元，我国公路建设规模将继续保持稳定上升趋势，如图1.1所示。

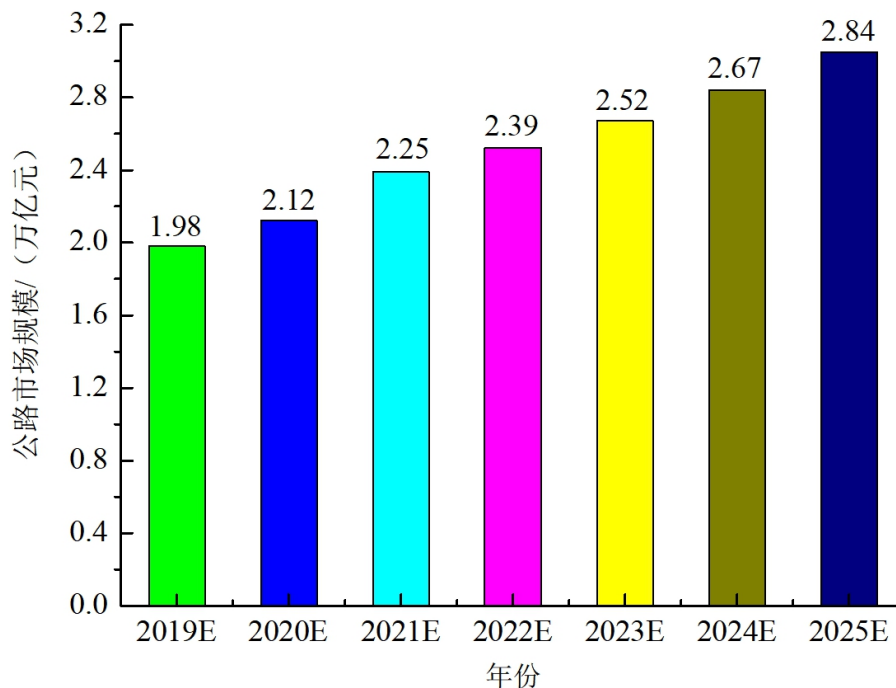


图 1.1 国内 2019 年—2025 年公路建设行业市场规模

在取得傲人成绩的同时，公路建设项目也要面对和克服施工过程中的诸多安全风险问题。公路建设项目相对比一般民用建（构）筑工程，涉及更多复杂的风险因素，如公路结构形式复杂（大跨径桥梁、高墩台、跨江河、软土地基等）、设计标准高、

施工难度大、质量要求高等特点，对公路项目中建设单位的管控水平、监理单位的监管能力，以及施工单位的施工组织、技术管理、质量控制、安全管理水平等要求极其严格^[2]。但公路建设项目施工阶段所发生的安全事故，时有发生。如 2017 年 2 月 6 日，云南小磨高速公路高空坠落事故，造成 4 人死亡；同年 8 月 19 日，海南万洋高速公路二标段高空坠落事故，造成 1 人死亡；2018 年 9 月 15 日，四川汶马公路隧道项目突水事故，造成 6 人死亡；同年 9 月 30 日，河北荣乌高速公路坍塌事故；2019 年 4 月 1 日，云南宜毕高速公路公路瓦斯爆炸事故，造成 7 人死亡；同年 11 月 26 日，云南云凤高速公路涌水事故，造成 12 死亡。公路建设项目施工阶段的安全生产事故不胜枚举，这些安全事故对人民和国民经济都产生了不良影响，并造成了严重的损失。

随着国内现行公路建设项目安全生产法律法规、标准规范等不断的补充和完善，加大了对企业、对人的处罚力度，安全大形势总体已稳定向好，但公路建设项目安全生产事故深层次的问题，应须持续深入研究。因此，本文针对公路建设项目施工阶段安全风险展开研究，通过科学合理的评价方法深入分析，促使施工项目管理人员更好的掌控风险，进一步提升安全风险管理水平，防范、避免、杜绝施工阶段生产安全事故的发生。

1.2 研究意义

随着公路交通基础的投入不断加大，建设规模不断扩大，公路建设过程中存在很多风险因素，且这些因素之间的关系错综复杂，任何一个风险都有可能带来项目建设过程的失败，从而导致大的经济损失和资源的浪费的严重后果，还会影响到企业未来的战略发展。因此，企业在修建公路项目时需要针对具体的风险问题建立预警机制，避免这些风险因素带来的危害。论文研究主要是为了提高国内公路建设项目中风险应对和管控理念，运用科学的风险管控模式避免因风险引起的损失，能够由被动接受风险问题带来的损失转变为主动预防预警的管理意识，对公路项目在建设过程中的风险问题采取主动防范，根据特定公路建设项目的特点，分析施工阶段中存在的风险因素，获取风险信息后及时建立风险预警指标体系，并对这些风险指标进行量化分析。

本文依托成绵公路项目管理实践，将公路建设项目施工阶段风险预警评价模型进行应用，验证模型的可行性和有效性；并根据成绵公路项目施工阶段风险预警评价分析结果，结合项目实际情况，提出成绵公路项目施工阶段风险管控措施。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 国外研究现状

发达国家对公路建设项目的安全管理、风险评价等问题高度重视，其法律法规、标准规范及管理体系建设相对于国内比较健全。如美国的《职业安全与健康法》（1970）、《道路安全设计与操作指南》（AASHTO, 1997）、《国家公路作业区安全计划》、《施工区安全指南》，新西兰的《道路施工安全指南》等严格规定了安全、风险等管理措施和保障义务以及施工作业的要求，降低了公路建设项目施工过程中事故发生的概率。另外，国外学者关于风险预警评价指标体系构建和评价方法也是深入的分析研究，如 Perera（2014）等人，利用德尔菲法针对人的不安全行为，构建项目施工阶段的关键性风险因素^[3]。

Sawacha（2015）研究公路建设项目安全风险事故致因因素，通过对致因因素的提取构建了公路建设项目风险评价指标体系^[4]。

Ankit（2016）从理论研究着手，提出公路建设项目风险评价的程序，指出公路建设项目要基于全寿命周期的角度对潜在风险因素进行风险识别^[5]。

Shi（2016）整合了公路建设项目安全风险数据，构建风险指标体系，利用层次分析法对指标的权重进行排序，提出基于综合评价方法进行评价^[6]。

Tawelian（2016）利用 BIM 模型分析苏格兰高速公路路基的安全稳定性，通过对路基的沉陷度来分析施工过程的风险因素^[7]。

Adeleke（2018）通过研究组织管理因素对施工阶段的影响，结果表明组织管理因素对施工阶段的安全风险具有正向影响，同时构建合理的规章制度和有效的措施对风险进行管控^[8]。

Liu（2019）等人从人、物、环境角度构建安全风险评价指标体系，提出降低安全风险事故的措施^[9]。

Nasirzadeh (2019) 将施工过程中风险分成两大类, 即内部风险、外部风险, 利用事故树分析法评估风险发生的概率^[10]。

Koulinas (2019) 利用模糊综合分析法对施工项目的安全风险指标进行排序, 指出人员坠落事故是安全风险管控中最突出的安全风险^[11]。

Yan (2019) 认为道路工程在建设过程中存在很多不确定性因素, 而且这些因素具有模糊性, 通过构建模糊物元模型分析施工过程风险指标的影响度^[12]。

Providakis (2019) 以 BIM 模型为技术手段构建公路隧道施工过程中临边建筑物沉降监测模型, 并提出施工过程中安全风险控制措施^[13]。

Tang (2020) 分析柬埔寨高速公路施工过程中的安全性, 利用 Dynamo 软件的二次开发, 结合 Python 编程对路面施工的安全风险进行分析^[14]。

Kumar (2020) 利用调查法, 依托风险管理理论, 对公路建设项目的风险因素进行层次化分类, 构建施工环境、技术等风险因素评价指标体系^[15]。

Qazi (2021) 认为风险评价就是要构建一个可操作性、灵活性、系统性的评价体系, 并基于蒙特卡洛模型对公路建设施工阶段的人员、机械设备等因素进行评价分析, 提出施工阶段人员、机械设备在风险管理方面的有效措施^[16]。

1.3.2 国内研究现状

近年来, 国内在公路建设项目施工过程中安全风险越来越重视, 针对公路建设项目施工过程的安全风险的研究成果也颇具成绩。如桂志敬 (2018) 指出公路建设项目风险控制的重要性, 以湖南公路隧道坍塌事故为例, 基于数值模拟研究, 指出《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南 (试行)》在实际项目中应用方面的不足^[17]。

叶咸 (2018) 对山区高速公路高边坡施工过程进行分析, 依据总体风险评估的方法、评估流程, 基于 Geo-studio 软件模拟构建边坡安全的稳定性分析模型, 并在云南某高速公路边坡施工中应用, 验证了该模型计算结果的可靠性, 并提出公路建设项目边坡安全风险控制措施^[18]。

柴继昶 (2018) 引入墩柱高度指标, 利用模糊层次法构建评价指标体系, 并确定权重, 通过改进的德尔菲法对宁夏某公路建设过程中风险度进行评估^[19]。

李娟（2018）以沪蓉西公路工程为例，从管理因素、人的因素、物的因素和环境因素四个维度构建评价体系，基于物元模型分析沪蓉西公路施工安全状况，并确定了施工现场的安全等级^[20]。

杨波（2018）以公路工程项目为依托，分析得出安全风险管控的要点是危险源辨识，提出风险预控是公路建设工程项目的关键，构建了风险管控体系，强调超前预控是公路工程项目安全风险的重要举措^[21]。

涂圣文（2019）认为公路路堑高边坡工程在施工过程中具有不确定性、模糊性，引入云模型理论，构建了高边坡工程施工风险评估指标体系，并基于改进 CRITIC 法与云模型分析风险等级^[22]。

吴翠（2019）首先对国内公路建设项目安全建设和管理现状进行探讨，提出幕阜山区公路项目安全风险点，构建安全风险点评价指标体系，基于量化模型对幕阜山区公路项目进行综合评价，同时提出应对措施^[23]。

吴光水（2019）认为安全风险管理体系是基于技术、管理、文化、法规等基础上构建的，通过分析重庆石黔高速公路工程项目建设特征，识别筛选出影响该项目安全施工的主要因素，并采用德尔菲法对风险进行量化评估分析^[24]。

许克玺（2019）对 S25 静宁至天水高速公路建设中的危险源进行分类，研究施工企业的安全管理方式，通过人的因素、组织因素等构建评价指标体系，基于 OWA—灰色模糊综合评价模型进行评价，依据评价结果，指出该项目管控存在的不足，并提出了应对措施^[25]。

李云鹏（2019）通过对剑榕高速公路工程项目施工现场进行风险辨识，对项目的重大风险进行分析并提出控制措施^[26]。

李京航（2020）阐述了当前国内安全风险管控的意义，指出中开高速公路 TJ-8 项目在安全风险管理和控制的不足，从五个角度分析施工安全风险并构建了评价指标体系，确定指标权重，基于肯特指数法对该项目施工阶段安全风险进行综合评估，提出安全风险应对策略^[27]。

李荀（2020）认为公路建设项目安全评价的意义是为了掌握公路建设的安全状况，按照科学性等 5 项原则，基于灵敏度分析的风险因素识别方法从 5 个方面 17 个指标构建了公路安全评价指标体系^[28]。

郑向莞（2020）首先分析近几年公路项目施工过程中发生爆炸事故的致因机理，论证了安全风险管控的重要性；其次通过 LEC 法对湖北某公路隧道施工项目施工高危作业风险因素进行系统辨识，构建了4个一级指标和16个二级指标安全评价指标体系，并基于云模型建立公路隧道施工高危作业安全评价模型^[29]。

程淑薇（2021）指出公路建设项目施工过程中发生事故导致的原因主要是人为失误、标准不够严格等，同时从安全管理的基础理论出发，结合文献资料分析事故发生本质特征和等级，提出施工现场危险源识别方法，依托萍莲高速公路项目，从人、物、标准、环境条件构建了评价指标体系，同时运用多层次模糊综合评价法进行评估^[30]。

1.3.3 国内外研究现状评述

前文主要是从公路建设项目施工过程中风险预警评价指标体系构建和评价模型等方面进行文献综述。上述的研究国内对公路建设项目施工过程中风险研究侧重点和角度都有所不同。国内相对于国外研究起步较晚，管理水平还是存在一定的不足，但在应用方面国内还是具有较多的成果。然而国内外关于公路建设项目施工过程中风险预警评价指标体系更多的还是从经济风险、管理风险、环保风险、成本风险、进度风险等维度构建的，在查阅中发现还是存在一些不足，本文为了能够更好地反映施工阶段生产安全的态势，立足实际，围绕施工技术、施工现场、施工组织三个关键风险因素方面，构建公路建设项目施工过程中风险预警评价指标体系，为国内公路建设项目施工阶段风险过程管理提供一定的参考和借鉴。

1.4 研究内容与方法

本文通过文献检索，阐述风险预警与风险管理理论；基于此对公路建设项目施工阶段风险进行识别，初步构建的风险预警指标体系，并通过调查问卷的方式对初步构建的风险预警指标进行优化处理；根据模糊一致偏好关系及三角模糊数法构建风险预警评价模型进行风险分析，并依托成绵公路项目建设，利用建立的模型进行工程实际应用对该项目建设施工阶段进行综合评估；同时依据评估结果，提出了与之相对应的风险应对措施，以降低风险发生概率，确保公路建设项目施工阶段的生产安全。本文具体主要研究内容如下：

(1) 梳理国内外相关文献,系统地了解当前公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系、风险预警评价模型研究的成果,结合公路建设项目施工阶段复杂性、系统性的特点,提出本文研究拟解决的问题。

(2) 从定量和定性结合的方式、施工阶段评价指标选取方法、由风险管理转为风险预警的趋势三个维度探讨构建公路建设项目施工阶段风险预警评价体系应该注意的问题。

(3) 采用文献阅读法与专家咨询法相结合的方法进行风险指标识别和选取,初步确定公路建设项目施工阶段风险预警评价指标,基于统计分析法选取关键性指标,构建公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系。

(4) 选择模糊一致偏好关系确定公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系中指标的权重,基于模糊一致偏好关系结合三角模糊数构建公路建设项目施工阶段风险预警评价模型。立足公路建设项目施工阶段风险管控的特点,结合权威专家组的指导下,划分公路建设项目施工阶段风险预警等级。

(5) 依托成绵公路项目,将本文提出的公路建设项目施工阶段风险预警评价模型应用,进一步论证模型工程实际应用的可行性和有效性;结合工程实际问题进行风险评估,提出风险应对相应措施。

1.5 技术路线

根据《风险管理指南》(BS ISO 31000:2018)^[32],风险管理流程包括系统地将政策、程序和实践应用于沟通和咨询,建立环境和评估、处理、监测、审查、记录和报告风险的活动。

结合公路工程建设项目施工阶段风险管控实际,确定本文的研究技术路线,如图 1.2 所示。

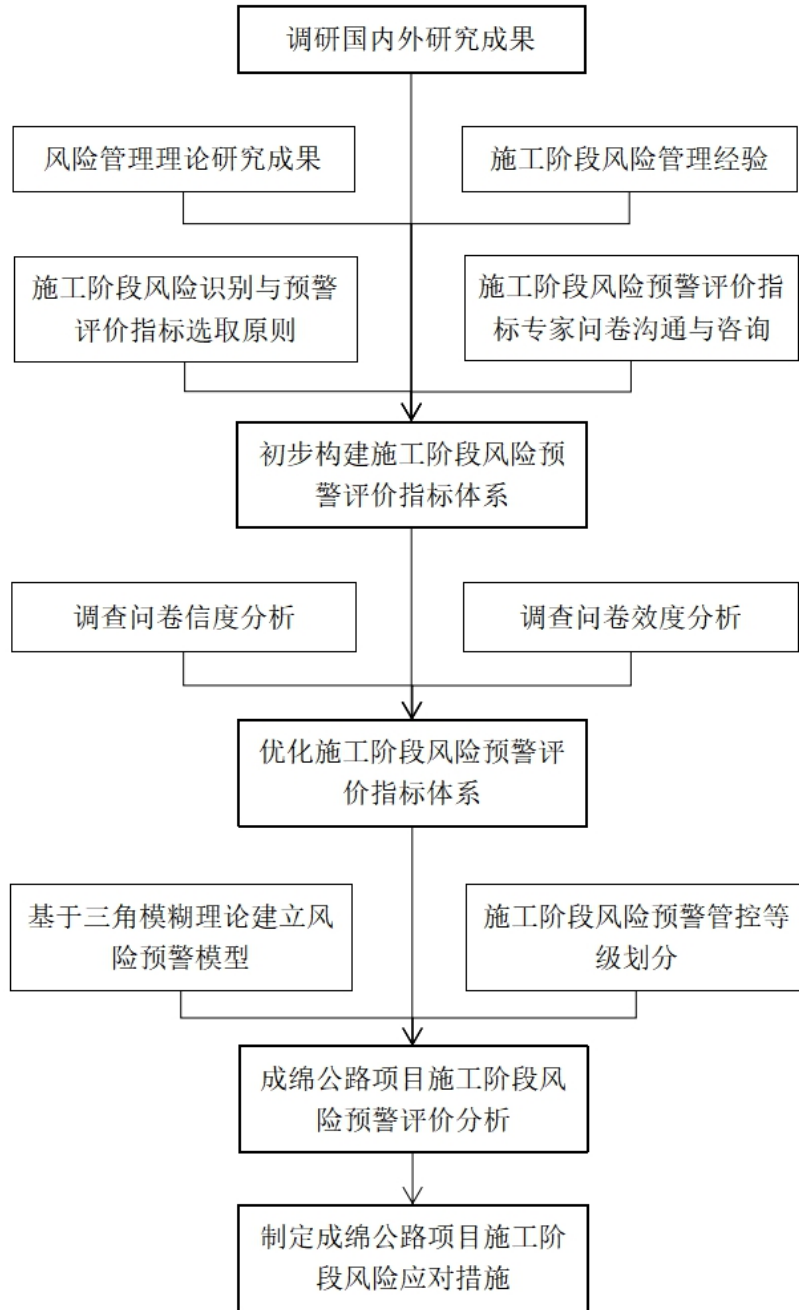


图 1.2 技术路线图

第二章 基础理论综述

2.1 风险管理理论

2.1.1 风险管理的定义

(1) 风险

截至目前，国内外关于风险的定义众多，梳理国内外相关文献，总结出相对于比较具有代表性的定义如表 2.1 所示。

表 2.1 国内外有关风险的定义

代表人（组织）	定义	风险特性
Gashaw Tesfaye（2022）	风险因素相互影响、相互作用所产生的结果 ^[31] 。	
BS ISO（2018）	未来结果的不确定性 ^[32] 。	
侯云飞（2020）	损失所产生的破坏程度 ^[33] 。	不确定性 相对性 可变性
丛旭辉（2021）	随着环境、时间的变化而变化 ^[34] 。	损害性 因果性
赵坤（2016）	损失产生的可能性大小 ^[35] 。	
《风险管理术语》GB/T 23694-2013	某一事件发生的概率和其后果的组合 ^[36] 。	

纵观国内外学者对风险的定义有着不同的理解，而且从不同角度提出了风险的定义，但主要还是从风险因素相互影响、相互作用、破坏程度、未来结果等方面对风险进行了定义。

公路建设项目施工阶段风险是指在项目施工过程中存在的各种确定性、不确定性及可变性风险因素，这些风险因素包括自然环境引起的风险因素、施工现场的风险因素、施工技术带来的风险因素以及组织管理自身缺失造成的风险因素。

(2) 风险管理

风险管理是一种系统过程，通过对研究对象的风险因素识别、分析和评估及提出应对措施，以达到对风险全面、系统的管理目标。常见的风险管理目标如表 2-2 所示。

表 2.2 常见的风险管理目标表

目标类型	含义	内容分类	内容分类含义
事前目标	是指通过合理的方案、方法、措施减少、避免、杜绝风险事故的发生，将可能发生或可能造成的经济影响、社会影响降到最低 ^[40] 。	经济	用最少的风险投入成本，实现风险应对的最大收益。
		社会	对社会履职尽责，避免风险事故的发生。
		安全	保证项目在实施过程中安全性满足各项要求。
事后目标	是指风险事故发生后，针对风险因素采取与之相应的风险应对方案进行应对，从而减少风险事故带来的各种损失 ^[41] 。	维持生产	当发生风险事故后，能够维持自身生产现状
		稳定收入	当发生风险事故后，保证自身的收益。
		社会责任	当发生风险事故后，能够承担自身应该承担的责任和义务，确保履职尽责。

2.1.2 公路建设项目施工阶段风险管理

公路建设项目施工阶段风险管理是基于管理者采取特定的方法对风险因素进行识别、分析和处理，进而认识风险，并通过风险控制、转移等方式将公路建设项目施工阶段风险因素管控，以避免风险事故的发生，并减少其带来的损失^[42]。一般来讲，公路建设项目施工阶段风险管理主要是由风险因素的识别、分析、评估及相应措施这几个关键环节构成。

(1) 风险因素识别

风险因素识别是公路建设项目施工阶段风险管理的基础。公路建设项目施工阶段风险因素识别主要是针对造成项目施工阶段发生风险事故的不确定因素。识别过程一般是通过收集资料、分析资料、确定风险因素、归类总结风险因素及编写报告。公路建设项目施工阶段风险识别报告中的因素要讲究主次、轻重、全面、系统，不然可能会导致后续项目施工阶段风险评价结果缺乏科学性、合理性。

(2) 风险因素分析和评估

风险因素分析和评估是公路建设项目施工阶段风险因素识别和制定相应措施环节之间的“桥梁”。公路建设项目施工阶段风险分析和评估是一种量化的过程，一般以研究对象为依托，选择科学合理的量化分析方法，如专家打分法、三角模糊数法等方法，将定性的语言和定量的数据进行转换，得到风险因素的危害程度，进而转变为风险应对的信息。

(3) 风险应对措施

风险应对措施是公路建设项目施工阶段风险因素分析和评估的反馈结果。公路建设项目施工阶段风险应对措施是根据风险分析和评估的结果制定与之相对应的措施，从而避免项目施工阶段风险事故的发生。

2.2 风险预警

2.2.1 风险预警的定义

风险预警就是针对不同研究对象的特点，将可能出现或导致的生产安全事故的危险因素提前进行风险辨识，通过对辨识出的危险因素进行监控获得相应的变化趋势，依托风险评价方法对风险因素状态进行评估，将得到因素变化强弱程度与事前设定的预警等级进行对比，进而判断是否存在风险，并提出相对应的措施^[37, 38]。因此，在进行风险预警前要建立一套系统的、完整的预警评价指标体系，并对其分析处理；其次要选择科学合理的预警评价模型，对事先构建的评价指标体系进行综合评判；最后按照设定的预警区间，进行对比判断，根据判断结果提出与之相对应的管控措施。

风险预警是风险管理目标实现的一种方式，相对于传统风险管理方式，它具有超前性、主动性、信息化、数据化的优势。

2.2.2 公路建设项目施工阶段风险预警

公路建设项目施工阶段风险预警是根据项目施工阶段的特点，通过对施工阶段风险因素的变化监测，将获取的风险因素数据进行分析处理得到相关的信息，按照预警信息进行相对应的风险控制措施^[39]。风险预警是公路建设项目施工阶段风险管理的准则，它充分体现了公路建设项目施工阶段生产安全的特点和管理水平。公路建设项目施工阶段风险预警研究主要有两个方面：（1）公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系的构建；（2）公路建设项目施工阶段风险预警分析。前者是公路建设项目施工

阶段风险预警分析的基础，后者是公路建设项目施工阶段风险预警反馈结果。本文研究公路建设项目施工阶段风险预警的逻辑框架，如图 2.1 所示。

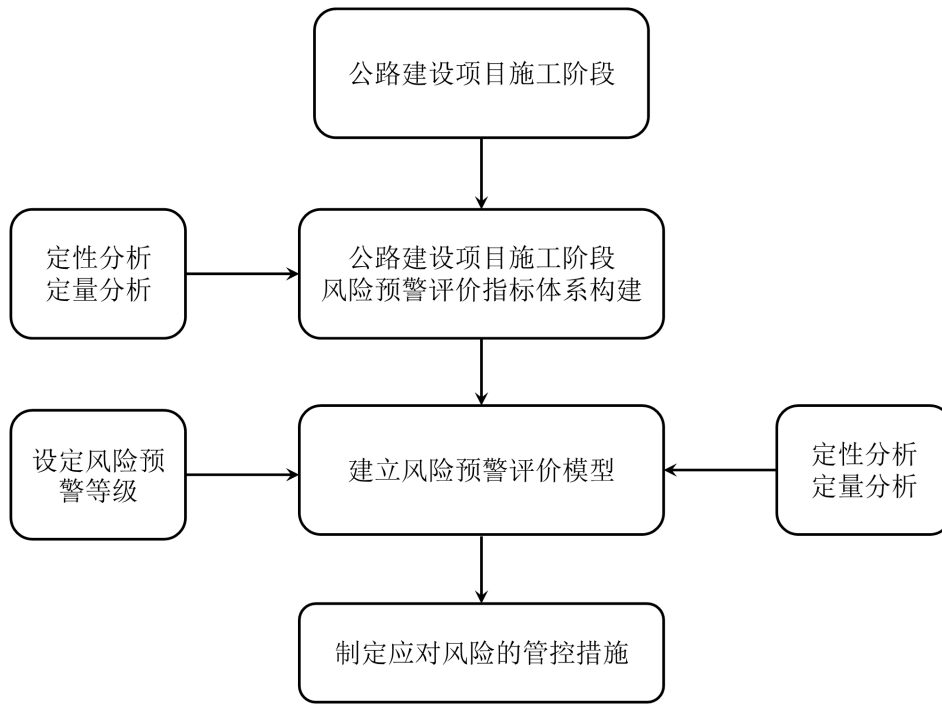


图 2.1 公路建设项目施工阶段风险预警的逻辑框架

2.3 本章小结

本章通过阐述风险、风险管理理论、风险预警定义、公路建设项目施工阶段风险预警研究及管理目标等理论内容，对公路建设项目施工阶段风险理论进行了系统性的归纳总结，并以此为理论研究基础，为后续本文展开的研究内容奠定理论基础。

第三章 公路建设项目施工阶段风险预警指标体系构建

3.1 构建预警评价体系应该注意的问题

3.1.1 综合评价风险评价指标

在构建公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系过程中，需要将定量和定性两种分析方法相结合。定量分析具有客观公正准确的特点，然而在评价的过程中受到公路建设项目施工阶段固有特性的影响。如建设项目条件的差异性、信息数据收集的困难复杂性、工耗多、成本高等相关条件限制，反而不能用最高效、系统的方式对公路建设项目风险评价作出合理的评价。在公路建设项目施工阶段中虽然很多风险指标不易量化，但通过咨询业内相关工作经验丰富的管理人员和专家，对这些风险指标进行有效评价后，就可以更快捷地获取需要的信息数据。公路建设项目施工阶段中的定性分析是对定量分析的补充，弥补定量分析的不足。

3.1.2 综合考量施工阶段在风险规避中的经济性

公路建设项目施工阶段实施管理活动的过程，本身就是具有经济性的活动管理，任何项目管理最终的出发角度就是用最小的付出得到最高的回报，公路建设项目施工阶段风险预警评价也是同样的道理^[43]。根据公路建设项目的特性，管理者在判断如何避免风险的方法上，也是尽量降低经济损失的直接反应。

具体方法为：判断获得的公路建设项目施工阶段风险信息，对判断产生的直接效益和可能带来的风险损失进行对比，当直接效益远大于风险损失时，可以认为该建设项目施工阶段可以持续运行，反之该建设项目需要停止并检查；另一方面，还要判断公路建设项目施工阶段所产生的间接效益和风险带来的间接损失。此时我们在考虑经济性时，必须要将定性的指标考虑到整个范畴内。

3.1.3 风险管理转为风险预警的趋势分析

公路建设项目施工阶段风险评价指标体系评价，是整个项目全员性的风险管理范畴，而不简单是项目施工阶段管理决策者一个人的事情。在公路建设项目施工阶段过程中，我们必须遵循一个准则，凡是有涉及风险存在的每个组织机构都应该参与到整个公路建设施工阶段过程中，这样既可以保障组织机构之间的信息共享互通，也可

以确保每个组织机构之间构建多元化的预警管理机制，以确保风险信息组织机构之间传递通道流畅^[44]。公路建设项目在实施的过程中，面对在进行风险管理时项目成员应具有预见性，而不是被动地接受事后处理这一行为。在对公路项目管理的过程中，项目组成员应提前识别可能会发生的风险，同时要能快速分析出即将发生的风险可能造成的后果和带来的损失程度，并及时提出风险应对的防范措施，从而减少风险损失。

3.2 初步构建项目风险预警评价指标体系

3.2.1 风险预警评价指标选取原则

公路建设项目施工阶段风险预警评价指标选取要完全符合评价对象的特点存在一定的难度，必须要充分考虑指标之间的关系，将指标之间的内生关系梳理。因此，本文在选择公路建设项目施工阶段风险预警评价指标时，要坚持以全面性、灵敏性、互相匹配、层次性、可操作性等原则为建立指标体系的基础。

(1) 全面性

选取公路建设项目施工阶段风险预警评价指标，必须要全面性地综合考量施工阶段产生的风险因素。这样选取公路建设项目施工阶段风险预警评价指标才能全面性的真实表现出公路建设项目施工阶段风险预警评价过程中项目风险的实际情况，有利于该项目本身的实际效益，也能满足该项目最终的建设目标需求。

(2) 灵敏性

选取的公路建设项目施工阶段风险预警评价指标，主要体现了评价对象在实际施工过程中对工程实际情况的真实反映。面对施工时存在的风险，可以及时地调整施工流程，可以有效地显示施工过程中的变化，以达到实际的建设需求。根据公路建设施工阶段所处的自然环境、项目特点、管理的方式等不同，在施工过程中也需要考虑不同工序实施过程中的指标变化，在设置指标选取时，应该还具有一定的弹性，做到有张有弛，便于应对风险。

(3) 层次性

公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系由多个二级指标和三级指标构建而成，各个指标层之间层次鲜明、逻辑顺序层层递进。不同的指标之间的关系也存在潜

在的关联，必须理清各个指标因素之间的关系，做到条理性强、逻辑结构合理，要清楚地认识到公路建设项目风险的特点，并合理部署应对项目产生风险的应对策略。

(4) 可操作性

构建的公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系，应用在公路建设项目施工阶段中具有操作科学合理性。选取的指标必须要符合该项目特点，必须要简单、清楚、明确的目的性，避免构建的指标和实际应用产生的不一致性。

3.2.2 风险预警评价指标选取方法

在筛选公路建设项目施工阶段评价指标时，首先要对公路建设项目施工阶段建设安全现状有所了解，然后梳理施工阶段安全风险因素，并对相关因素进行分析，合并相似因素或者删除不需要的因素，从而构建科学有效的施工阶段风险预警评价指标体系。常见的公路建设项目施工阶段评价指标筛选方法：文献阅读法、专家咨询法^[45-46]等。

本文主要采用文献阅读法与专家咨询法相结合的方法来确定公路建设项目施工阶段评价指标，通过研究相关文献列举的施工阶段风险因素并确定侧重点，系统分析项目施工阶段风险预警评价指标，确保施工阶段风险研究具有科学性、全面、有效性。

构建公路建设项目施工阶段评价指标体系，主要有两个步骤：

第一步：利用网络等文献检索工具，选取近 5 年内关于公路建设项目施工阶段风险指标的文献，通过对文献分析提取公路建设项目施工阶段评价指标。然后根据研究对象施工阶段风险特点，经归纳总结，同文献中提取的指标进行集合。

第二步：通过专家对指标进行打分，基于统计分析法选取关键性指标，构建公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系。

3.2.3 风险预警评价指标体系初步构建

公路建设项目风险评价的关键基础是建立风险评价指标体系，风险评价指标的选择是否合理，会对风险评价结果产生直接影响关系。在选取评价指标时，我们要考虑到指标数量的合理性，指标过多会产生信息冗余的现象，指标数量过少会导致统计信息不完全，不能对产生的风险评价作出科学的判断。而选择指标的质量上，我们必须充分考虑风险产生的潜在因素，需要和风险产生原因具有相关性，这样便有利于对风

险产生的问题作出准确的分析。因此，公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系，必须先经过初步选取评价指标，在经过合理的筛选后最终确定实用性强的综合评价指标体系。

本文评价指标选择以文献检索为主，对近 5 年内公路建设项目施工阶段风险指标研究文献中列举的相关因素进行归纳并综合分析。如常明（2018）在文章中提出施工阶段风险指标包括：设计变更频繁、恶劣的施工环境、材料供给不及时、施工组织设计方案不合理、现场地质条件勘测不到位、施工工艺问题、机械设备损坏、施工人员安全意识不足、作业人员的错误操作等^[38]。陈芊（2017）在文章中提出施工阶段风险指标包括：施工方法和工艺水平、地质条件、地下水及气候条件、作业人员是否存在安全作业违规行为、安全教育与培训、组织和进度安排管理、现场物料、大型设备安拆安全控制、施工设备的检测等^[39]。许克玺（2019）在文章中提出施工阶段风险指标包括：危险源的管理与控制、安全应急预案、安全教育与培训、机械设备先进性等。王永思在文章中提出施工阶段风险指标包括：招投标错误风险、技术设计风险、合同条款不清晰或错误风险、迟延完工风险、内部不协调风险等^[25]。

通过对上述文献总结和分析，识别并选取了合理的公路建设项目施工阶段风险预警评价指标；然后选择公路建设项目中具有丰富风险管理经验的人员进行咨询，对选取的评价指标进行充分讨论，是否具有全面性、灵敏性、层次性、可操作性，专家信息见附录 C。表 10 位专家根据公路建设项目施工阶段风险特点进行识别、总结、归类、分析，所得的评价指标同文献中提取的指标进行集合，按照施工技术（A）、施工现场（B）、施工组织（C）三个维度进行归类，初步构建公路建设项目施工阶段风险的评价指标体系，具体如表 3.2 所示。

表 3.2 施工阶段风险预警评价指标体系的初步构建指标

一级指标	二级指标	三级指标
施工技术（A）	路基工程风险 A1	土石方开挖施工风险 A11
		土方填筑施工风险 A12
		路基不均匀沉降 A13
		混凝土及砌体防护工程风险 A14
	桥梁工程风险 A2	深桩基施工风险 A21

第三章 公路建设项目施工阶段风险预警指标体系构建

一级指标	二级指标	三级指标
施工现场 (B)	隧道工程风险 A3	围堰施工风险 A22
		高墩柱施工风险 A23
		大跨梁施工风险 A24
		混凝土工程风险 A25
		开挖施工风险 A31
	其他工程风险 A4	爆破施工风险 A32
		塌方风险 A33
		突泥突水风险 A34
	技术管理风险 A5	临建工程安全风险 A41
		临时工程安全风险 A42
		设计方案与施工脱离风险 A51
		设计变更或图纸供应不及时 A52
		特殊工艺的技术要求不明确 A53
	行为人风险 B1	技术管理能力不足 A54
		现场协调能力不足 A55
技术考核不规范 B11		
应急处理能力不足 B12		
自然条件风险 B2	现场监管不力 B13	
	操作违规 B14	
	不良地质因素 B21	
	恶劣自然天气灾害 B22	
	地勘偏差影响 B23	
重大危险源 B3	火工品管理 B31	
	高边坡滑塌 B32	
	特种设备事故 B33	
施工组织 (C)	合同风险 C1	合同形式问题 C11
		合同对象问题 C12

一级指标	二级指标	三级指标
		合同条款不明确 C13
		进场前施工准备不足 C21
		安全生产教育和培训不足 C22
	组织风险 C2	应急预案及抢险措施不足 C23
		设备材料供应不及时 C24
		施工组织和工筹不当 C25

3.3 风险预警评价指标体系优化

3.3.1 调查问卷的设计

在经过对 10 位专家意见的整合基础上,初步构建了施工阶段风险预警评价指标体系。为满足项目施工阶段风险预警评价指标选取原则,通过调查问卷的方式,采用统计分析的方法对上述初步构建的风险预警评价指标体系进行优化。

调查问卷设计主要包括三个内容:

- (1) 针对公路建设项目施工阶段的基本情况进行简单的描述;
- (2) 发放调查问卷的业内专家基本情况;
- (3) 利用 Likert 五点量表,按照重要程度 1~5 的分值进行打分(具体内容见附录)。

3.3.2 调查问卷发放的对象

本次公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系优化调查问卷发放对象,主要集中在公路项目建设单位、公路项目勘察设计单位、公路项目施工单位、公路项目监理单位,具体对象占比如表 3.3 所示。

表 3.3 发放调查问卷对象的占比情况表

基本信息	数量	百分比/(%)
性别	男	91 70.0
	女	39 30.0
工作经验	1~5 年	15 11.5
	6~10 年	35 26.9
	11~15 年	40 30.8

	15 年以上	40	30.8
工作单位	公路项目建设单位	25	19.2
	公路项目施工单位	40	30.8
	公路项目勘察设计单位	25	19.2
	公路项目监理单位	40	30.8

3.3.3 调查问卷发放方式和回收

(1) 风险预警评价指标体系优化调查问卷发放方式

为了避免因回收进度影响研究进度，本次风险预警评价指标调查问卷发放的方式主要采取两种方式：文档调查和网页调查形式。

(2) 风险预警评价指标体系优化调查问卷回收

调查问卷总发放数量为 130 份，实际回收 104 份，其中包括 8 份为无效问卷，符合本次调查的合格问卷为 96 份，有效率为 73.8%，其中发放的调查问卷回收对象占比如表 3.4 所示。

表 3.4 发放调查问卷的回收对象占比情况表

类别	数量/（份）	百分比/（%）
公路项目建设单位	16	16.7%
公路项目施工单位	34	35.4%
公路项目勘察设计单位	15	15.6%
公路项目监理单位	31	32.3%
总计/（份）	96	100.0%

3.3.4 调查问卷的信度与效度分析

(1) 调查问卷的信度分析

调查问卷的信度分析主要是利用统计分析软件，将得到的评价指标进行量化分析，剔除不合理的初选指标。采用量表的信度分析其主要目的合理的分析出指标的影响程度，客观地度量出被测结果的一致性和指标体系的可靠性。

利用统计软件中Cronbach's α 系数（克隆巴哈系数法）作为指标合理性的参考依据。若出现Cronbach's α 系数表现的程大，一致性也较高，那么说明所选取的指标则具

有一定的研究价值与意义，该指标在后续的分析结果中也具有较高的真实性；反之说明所选取的指标不具有代表性，需要从新选取指标或者剔除指标。Cronbach's α 系数公式为：

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum s_i^2}{s^2}\right) \quad (3.1)$$

式中： k 是量表包含的题数， $\sum s_i^2$ 是量表题项的方差总和， s^2 是量表题项加总平均后方差。

信度分析过程中，通过设置不同的阈值，当 Cronbach's α 系数大于等于 0.6 时，表示处于可以接受的指标水平；当 Cronbach's α 系数在 0.7~0.8 时，属于较高的可信区间；当 Cronbach's α 系数超过 0.8 时，被认为此次指标调查问卷可信度很高。反之，若当 Cronbach's α 系数低于 0.6 时，则需考虑设计的公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系是否合理。

本文采用统计软件 SPSS17.0 对项目调查问卷进行 Cronbach's α 系数的量化检验，具体结果如表 3.5 所示。

表 3.5 信度分析结果表

指标名称	题项	删除本项后 Cronbach's α	Cronbach's α
路基工程风险 A1	A11	0.897	0.913
	A12	0.566	
	A13	0.893	
	A14	0.874	
桥梁工程风险 A2	A21	0.886	0.906
	A22	0.884	
	A23	0.875	
	A24	0.898	
	A25	0.897	
隧道工程风险 A3	A31	0.862	0.918
	A32	0.891	
	A33	0.916	
	A34	0.885	

第三章 公路建设项目施工阶段风险预警指标体系构建

指标名称	题项	删除本项后 Cronbach's α	Cronbach's α
其他工程风险 A4	A41	0.574	0.920
	A42	0.522	
	A51	0.878	
	A52	0.860	
技术管理风险 A5	A53	0.846	0.906
	A54	0.826	
	A55	0.532	
行为人风险 B1	B11	0.906	0.914
	B12	0.887	
	B13	0.861	
	B14	0.853	
	B21	0.907	
自然条件风险 B2	B22	0.888	0.920
	B23	0.894	
	B31	0.901	
重大危险源 B3	B32	0.873	0.904
	B33	0.861	
	C11	0.588	
合同风险 C1	C12	0.592	0.910
	C13	0.566	
	C21	0.841	
组织风险 C2	C22	0.893	0.922
	C23	0.884	
	C24	0.867	
	C25	0.896	
	C25	0.896	

从上表中 A12、A41、A42、A55、C11、C12、C13 的 Cronbach's α 系数值均小于 0.6，故将 A12、A41、A42、A55、C11、C12、C13 剔除。除 A12、A41、A12、A41、

A42、A55、C11、C12、C13 这 7 个指标外，其他公路建设项目施工阶段风险预警评价指标的信度分析均大于 0.8，这表明风险预警评价指标之间的变量相关性都比较好，且指标之间的一致性系数也是满足本次评价的要求。

(2) 调查问卷的效度分析

量表的效度分析是通过对评价指标体系进行统计分析检验，根据检验的结果，分析评价指标能否满足要求，本文在效度分析方面主要对结构效度分析进行检验分析，采用因子分析法对公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系进行检验。

根据KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 值的大小对评价指标进行检验分析，KMO检验统计量是用于比较变量间简单相关系数和偏相关系数的指标，若KMO值大于0.5，则说明 Bartlett球形检验的卡方值具有显著性，便可以进一步对评价指标进行因子分析。KMO 统计值公式为：

$$KMO = \frac{\sum \sum_{i \neq j} r_{ij}^2}{\sum \sum_{i \neq j} r_{ij}^2 + \sum \sum_{i \neq j} r_{ij \cdot 1, 2 \dots k}^2} \quad (3.2)$$

如表 3.6 所示，本文所选的指标经统计软件计算得到 KMO 值为 0.6，符合因子分析的基本要求。

表 3.6 效度检验分析结果表

变量	因子	1	2	3	4	5	6	7	8
路基工程风险 A1	A11	0.928							
	A13	0.941							
	A14	0.930							
	A21		0.919						
	A22		0.932						
桥梁工程风险 A2	A23		0.926						
	A24		0.884						
	A25		0.886						
隧道工程风险 A3	A31			0.828					
	A32			0.864					

第三章 公路建设项目施工阶段风险预警指标体系构建

变量	因子	1	2	3	4	5	6	7	8
技术管理风险 A5	A33			0.887					
	A34			0.798					
	A51				0.824				
	A52				0.812				
	A53				0.520				
	A54				0.820				
行为人风险 B1	B11					0.799			
	B12					0.804			
	B13					0.870			
	B14					0.841			
自然条件风险 B2	B21						0.904		
	B22						0.828		
	B23						0.905		
重大危险源 B3	B31							0.870	
	B32							0.819	
	B33							0.861	
组织风险 C2	C21								0.899
	C22								0.800
	C23								0.815
	C24								0.835
	C25								0.863

从上表 3.6 可以看出，A53 因子得出的载荷值小于 0.6，按照效度检验分析的基本原则，应将该指标剔除。除 A53 指标外，其他评价指标体系中指标得到的数据载荷值均大于 0.7。结果表明，利用该量表进行分析具有较高的有效度，满足要求。

基于统计分析法对公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系中指标的信度和效度检验分析，指标 A12、A41、A42、A53、A55、C11、C12、C13 不满足要求被剔

除，最终确定公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系，包括 3 个一级指标即施工技术 A、施工现场 B、施工组织 C 及 8 个二级指标和 30 个三级指标，如表 3.7 所示。

表 3.7 优化后的公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
施工技术 (A)	路基工程风险 A1	土石方开挖施工风险 A11
		路基不均匀沉降 A13
	桥梁工程风险 A2	混凝土及砌体防护工程风险 A14
		深桩基施工风险 A21
		围堰施工风险 A22
		高墩柱施工风险 A23
		大跨梁施工风险 A24
		混凝土工程风险 A25
	隧道工程风险 A3	开挖施工风险 A31
		爆破施工风险 A32
		塌方风险 A33
		突泥突水风险 A34
	技术管理风险 A5	设计方案与施工脱离风险 A51
		设计变更或图纸供应不及时 A52
技术管理能力不足 A54		
技术考核不规范 B11		
应急处理能力不足 B12		
现场监管不力 B13		
施工现场 (B)	行为风险 B1	操作违规 B14
		不良地质因素 B21
	自然条件风险 B2	恶劣自然天气灾害 B22
		地勘偏差影响 B23
		火工品管理 B31
		高边坡滑塌 B32
重大危险源 B3	特种设备事故 B33	
	施工组织 (C)	组织风险 C2
		进场前施工准备不足 C21

一级指标	二级指标	三级指标
		安全生产教育和培训不足 C22
		应急预案及抢险措施不足 C23
		设备材料供应不及时 C24
		施工组织和工筹不当 C25

3.4 本章小结

本章通过阐述构建风险预警评价体系时注意事项，基于文献调研结果，进行风险预警评价指标识别，确定合理风险预警评价指标选取原则、选取方法，对公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系进行初步构建；然后采用问卷调查的方式，选择公路建设项目相关单位专家，对风险预警评价指标咨询与评估，并采用信度和效度相结合的方法对初步构建的风险预警评价指标体系进行优化，最终确定公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系。

第四章 公路建设项目施工阶段风险预警模型

4.1 风险预警评价指标权重

4.1.1 模糊一致偏好关系

由于公路建设项目施工阶段风险预警评价指标自身具有一定的模糊性，可能会导致某些评价指标不能进行量化分析，因此本节基于模糊一致偏好关系确定公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系中指标的权重。

模糊一致偏好关系是 Herrera-Viedma 等人提出的，该方法是在 AHP(层次分析法)的基础上进行了改进，通过互补和加传递的方式，降低了指标之间相互比较的次数，解决了指标之间不一致情况的发生^[41]。模糊一致偏好关系一直被学术界广泛地应用在各个领域。如邵强(2018)基于模糊一致偏好关系的商业银行操作风险预警研究^[42]。王瑾(2018)基于模糊一致偏好关系对大庆市全面创业环境进行评价^[43]。李琳(2021)基于模糊一致偏好关系的建设单位项目管理能力评价等^[44]。

模糊一致偏好关系主要是由命题 1、命题 2、命题 3 组成：

(1) 命题 1: 指标集为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, 对应的互补乘性偏好关系为: $A = (a_{ij}), a_{ij} \in [\frac{1}{9}, 9]$, 而对应的互补模糊偏好关系为 $P = (p_{ij}), p_{ij} \in [0, 1]$, 则 $P = g(A)$, 即:

$$p_{ij} = g(a_{ij}) = \frac{1}{2}(1 + \log_9(a_{ij})) \quad (4.1)$$

式中: g 是依照研究对象的自身的实际状况而进行调整转换, 为转换函数^[41-43]。

(2) 命题 2: 关于模糊偏好关系 $P = (p_{ij}), p_{ij} \in [0, 1]$, 则:

$$p_{ij} + p_{jk} = \frac{3}{2} \quad (4.2)$$

式中: $\forall i < j < k$ ^[41-43]。

(3) 命题 3: 关于模糊偏好关系 $P = (p_{ij}), p_{ij} \in [0, 1]$, 则:

$$p_{i(i+1)} + p_{(i+1)(i+2)} + \dots + p_{(j-1)j} + p_{jk} = \frac{j-i+1}{2} \quad (4.3)$$

式中: $\forall i < j$ 。

上述命题均非常重要，尤其是命题3，利用这个命题可以对 $n-1$ 个值集 $\{p_{12}, p_{23}, \dots, p_{(n-1)n}\}$ 建立模糊一致偏好关系，该方法比传统的 $\frac{(n-1) \cdot n}{2}$ 次指标之间的比较减少了对比次数^[41-43]。

4.1.2 风险预警评价指标权重的确定

(1) 专家打分

通过邀请与公路建设项目相关领域的专家学者对风险预警评价指标，按照指标的重要性程度采取[1-9]的标度法，进行综合评分，并建立指标之间比较判断矩阵。

公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系中的每个指标 $C_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ，对应专家 $E_k (k = 1, 2, \dots, m)$ ，分别对 C_i 采取 $(n-1)$ 次两两对比：

$$A^k = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & * & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ * \\ C_n \end{matrix} & \begin{vmatrix} I & a_{12}^k & * & * & * \\ * & I & a_{23}^k & * & * \\ * & * & I & a_{ij}^k & * \\ * & * & * & I & a_{(n-1)n}^k \\ * & * & * & * & I \end{vmatrix} \end{matrix} \quad (4.4)$$

式中： a_{ij}^k 表示风险预警评价指标体系中第 k 个专家对 C_i 指标和 C_j 指标进行比较后的重要性程度。 $a_{ij}^k = 1$ 表示专家认为 C_i 指标和 C_j 指标重要性程度相同； $a_{ij}^k > 1$ 表示专家认为 C_i 指标的重要性程度大于 C_j 的指标重要性程度相同； $a_{ij}^k < 1$ 表示专家认为 C_i 指标的重要性程度与 C_j 的指标重要性程度相同。

(2) 构造模糊偏好关系

利用上述的模糊一致偏好关系，对式(4.4)的矩阵 $\{a_{12}^k, a_{23}^k, \dots, a_{(n-1)n}^k\}$ 进行转化，得到[0,1]中的数值，然后按照模糊一致偏好关系中的命题2和命题3公式进行计算得到 p_{ij}^k ^[41-43]：

$$p^k = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 & * & C_n \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ * \\ C_n \end{matrix} & \left| \begin{array}{ccccc} 1/2 & p^k_{12} & * & * & * \\ 1-p^k_{12} & 1/2 & p^k_{23} & * & * \\ * & 1-p^k_{23} & 1/2 & p^k_{ij} & * \\ * & * & * & 1/2 & p^k_{(n-1)n} \\ * & * & * & * & 1/2 \end{array} \right. & \end{matrix} \quad (4.5)$$

(3) 标准化检验

按照上述公式得到 p^k_{ij} 的结果，若计算结果在 $[0,1]$ 区间，则不需要检验，可直接进行权重计算；如果计算结果不在规定 $[0,1]$ 区间，则需要将计算结果转换到 $[0,1]$ 区间。公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系中，各个指标权重计算要基于所有专家对指标判断的结果，按照式（4.6）进行计算：

$$p_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m p^k_{ij} \quad (4.6)$$

(4) 计算权重

依据 $P = (p_{ij})$ ，计算公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系中每个指标的平均偏好程度，按照式（4.7）进行计算：

$$s_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{ij} \quad (4.7)$$

公路建设项目施工阶段风险预警评价指标体系中每个指标的权重，按照式（4.8）所示计算：

$$w_i = \frac{s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \quad (4.8)$$

4.2 风险预警评价模型建立

当前国内外有关风险预警评价的方法很多，如肯特指数法、人工神经网络、TOPSIS、模糊综合评价法以及聚类分析等多种方法。每种方法拥有各自的优缺点，如肯特指数法是通过计算风险指标概率而获得结果，人工神经网络是模仿人脑结构和功能分析数据的方法。方法的优缺点是方法本身处理问题上的差异，没有最好的方法，只有适应研究对象的方法，本文研究公路建设项目施工阶段风险预警评价，分析实际

研究对象的特点，综合考量不同方法的特性，最终选择基于三角模糊数法构建风险预警评价模型。

三角模糊数法是由荷兰学者 Van Loargoven 提出的一种模糊决策法，该方法属于决策制定思维方法，具有评价尺度灵活，而且评价矩阵通过邀请专家对相应指标进行评分，由 1、2、3、.....、9 这个 9 个数的整数和倒数建立^[45、46]。该方法被广泛应用在各个领域，如王中锋（2021）基于三角模糊数的综采设备系统安全^[46]。崔海洋等人基于三角模糊数法对工程风险进行预测研究^[47、48]。柏茜和刘波（2021）利用三角模糊数研究水利工程项目风险状态^[49]。王柯（2021）面向故障诊断的三角模糊数决策方法研究^[50]。三角模糊数是本身利用语言的转换关系，充分将指标的模糊性、不确定进行数字转化，用定性和定量的分析方法真实有效地反映出安全风险状况，便于管理人员和作业人员及时制定风险控制措施。

4.2.1 三角模糊数法定义

（1）定义1：如果 $a = (a_l, a_m, a_u)$ ，其中 $0 < a_l < a_m < a_u$ ，且 a_l 、 a_u 是 a 的上界和下界， a_m 为中间值，则 a 就是三角模糊数，如式（4.9）所示^[46]。而 $a_l < x < a_m$ 为三角模糊数的特殊函数。

$$a_l(x) = \begin{cases} \frac{x-a_l}{a_m-a_l}, & a_l \leq x \leq a_m \\ 0, & \text{其它} \\ \frac{x-a_u}{a_m-a_u}, & a_m \leq x \leq a_u \end{cases} \quad (4.9)$$

设 $a = (a_l, a_m, a_u)$ ， $\check{b} = (b_l, b_m, b_u)$ ，则三角模糊数的运算法则：

$$a + \check{b} = (a_l + b_l, a_m + b_m, a_u + b_u) \quad (4.10)$$

$$w * a = (wa_l, wa_m, wa_u) \quad (4.11)$$

$$\frac{1}{a} = \left(\frac{1}{a_l}, \frac{1}{a_m}, \frac{1}{a_u} \right) \quad (4.12)$$

在实际的应用中，三角模糊数需进行排序才能够应用和评价^[47]。三角模糊数的排序相对其他方法是较简单，只需要将模糊数转化为单一的数值，利用对应的公式进行计算就可以得出计算结果^[48]。

假设存在一个三角模糊数 $U = (l, m, u)$ ^[50]，其中： l 表示三角模糊数 U 的上界； m 表示三角模糊数 U 的中间值； u 表示三角模糊数 U 的下界，这时只需要通过对指标之间比分局

[1,9]量表表示就可以，利用数字的大小来表示指标之间的重要性。当指标之间的标度等于1时，则说明指标之间的重要性是一致的。

(2) 定义2: 设三角模糊数 $a = (a_l, a_m, a_u)$ ，则:

$$E(a) = \frac{[(1-\lambda)a_l + a_m + \lambda a_u]}{2} \quad (4.13)$$

$E(a)$ 是三角模糊数 a 的期望值， λ 的值是决定了决策者追求风险状况的情况， λ 的取值范围为 $[0,1]$ ^[50]。当 $\lambda > 0.5$ 时，说明决策者偏向于冒险；当 $\lambda < 0.5$ 时，说明决策者偏向于保守；当 $\lambda = 0.5$ 时，说明决策者处于中间， λ 值在应用中通常选择 $\lambda = 0.5$ ，主要是对于决策者的态度是无法获取的，所以保持一种观望的态势^[50]。

(3) 定义3: 假设判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ， $a_{ij} = (a_{lij}, a_{mij}, a_{uij})$ ， $a_{ji} = (a_{lji}, a_{mji}, a_{uji})$ ，

若 $a_{lij} + a_{lji} = a_{mij} + a_{mji} = a_{uij} + a_{uji} = 1$ ， $a_{lii} = a_{mii} = a_{uii} = 0.5$ ，

$0 \leq a_{lij} \leq a_{mij} \leq a_{uij}$ ，其中 $i, j \in N$ ，则 A 为三角模糊数的互补矩阵。

(4) 定义4: $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ，则 $A^E = (E(a_{ij}))_{n \times n}$ 为 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 的期望矩阵。

(5) 定义5: $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ，记 $h_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{ji}}$ ，其中 $i, j \in N$ ，则 $H = (h_{ij})_{n \times n}$ 是 $A = (a_{ij})_{n \times n}$

的互补判断矩阵。

4.2.2 基于三角模糊数风险预警模型的评估步骤

(1) 第一步: 对研究对象的语言变量和三角模糊数进行确定。

确定研究对象为公路建设项目施工阶段风险预警评价指标和邀请的专家学者。假设风险预警评价指标中有 p 项二级指标，则表示为: $C_i (i = 1, 2, \dots, p)$ ；三级指标有 q 项，则表示为: $C_{ij} (j = 1, 2, \dots, q)$ ； n 个评判专家用 $E_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 。利用[1,10]将风险预警评价指标体系的语言变量和三角模糊数进行表示，如表 4.1 所示。

表 4.1 风险预警评价指标体系的语言变量和三角模糊数

语言变量	三角模糊数
很低 (Very Low)	(0, 0, 2.5)
低 (Low)	(0, 2.5, 5)
中 (Middle)	(2.5, 5, 7.5)

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/158004050026006037>