

公路交通安全风险评估模型构建及实证研究

于磊石鑫

北京中机车辆司法鉴定中心 北京 100000

摘要：公路交通安全是社会公共安全的重要组成部分，随着公路里程的持续增长和交通流量的急剧增加，交通事故频发已成为制约社会经济发展的重大问题。本文针对公路交通安全风险评估的复杂性，构建了基于多源数据融合的三维度风险评估模型。该模型从风险输入、安全保障、事故输出三个维度整合道路几何特征、交通流特性、驾驶员行为等26项关键指标，采用层次分析法与CRITIC法组合赋权，结合模糊综合评价法实现风险量化。以国道G229勃利至依兰段为实证研究对象，通过实地数据采集与模型验证，识别出高风险路段并提出针对性改善措施。研究结果表明，该模型可有效提升风险评估的准确性与实用性，为公路安全管理与决策提供科学依据。

关键词：公路交通安全；风险评估模型；多源数据融合；三维度评价；实证研究

引言

全球道路交通事故年死亡人数已突破135万，预计到2030年将升至250万，交通事故已成为全球第八大死因。中国作为公路里程世界第一的国家，2024年公路交通事故死亡人数达6.2万人，直接经济损失超12亿元。其中，干线公路因交通流量大、车速快、环境复杂，事故率较普通公路高42%。传统风险评估方法多依赖单一数据源或静态指标，难以动态反映人-车-路-环境耦合系统的复杂性^[1]。例如，某山区二级公路弯道段事故率是直线路段的3.8倍，但现有模型未能充分量化坡度、曲率与驾驶员操作失误的交互作用。因此，构建科学、动态、多维度的风险评估模型，对提升公路安全水平、降低事故损失具有重要理论价值与现实意义。

1 公路交通安全风险评估理论框架

1.1 风险评估基本概念

公路交通安全风险指在一定时空范围内，因人-车-路-环境系统耦合作用导致事故发生的可能性与后果严重性的组合。其本质是系统不确定性引发的危害，具有动态性、复杂性和可变性。风险评估需回答三个核心问题：风险来源是什么？这涉及对道路几何特征、交通流特性、环境因素等的分析；风险大小如何度量？需要建立科学合理的评估指标体系和量化方法；如何降低风险？需提出针对性的改善措施和管理策略。

1.2 三维度评估模型构建

1.2.1 维度划分依据

基于风险的不确定性、危害性、可控性属性，将评估维度划分为风险输入、安全保障和事故输出三个维度。（1）风险输入维度：反映事故发生潜在条件，包括道路几何特征（坡度、曲率）、交通流特性（车速、

流量）、环境因素（天气、光照）；（2）安全保障维度：体现风险控制能力，涵盖交通设施（标志标线、防护栏）、管理措施（限速、执法强度）、应急响应（救援时间、医疗资源）；（3）事故输出维度：表征事故后果严重性，包括伤亡人数、经济损失、社会影响。

1.2.2 指标体系设计原则

遵循科学性、系统性、可操作性原则，指标需满足以下条件：（1）代表性：能反映评估维度的核心特征，准确体现该维度对公路交通安全风险的影响。（2）独立性：避免指标间强相关性，防止信息重复和冗余，确保每个指标都能提供独立的信息^[2]。（3）可量化性：可通过观测或计算获取数值，便于进行数据分析和模型计算。（4）动态性：能适应交通环境变化，及时反映公路交通安全风险的变化情况。

1.2.3 指标筛选与分类

通过文献分析与专家咨询，筛选26项关键指标（表1），具体分类如下：

风险输入维度（12项）：平曲线曲率、纵坡坡度、路面抗滑性、V/C比（交通量与设计容量比）、货车比例、超速比例、不良天气频率、夜间时段占比等。这些指标反映了道路条件、交通流特征和环境因素对事故发生的潜在影响。

安全保障维度（9项）：标志标线完善率、防护栏等级、限速值合理性、执法频次、救援响应时间、安全带使用率、酒驾率、疲劳驾驶率、车辆安全技术状况。这些指标体现了交通设施、管理措施和应急响应等方面对公路交通安全风险的控制能力。

事故输出维度（5项）：事故率、死亡率、受伤率、经济损失率、社会关注度。这些指标直接反映了事故的

后果严重性，是评估公路交通安全风险的重要依据。

表1 关键指标

维度	一级指标	二级指标	数据来源
风险输入	道路几何特征	平曲线曲率、纵坡坡度	道路设计图纸、激光测距仪
	交通流特性	V/C比、货车比例、超速比例	交通监测系统、雷达测速仪
	环境因素	不良天气频率、夜间时段占比	气象站数据、视频监控
安全保障	交通设施	标志标线完善率、防护栏等级	现场勘查、养护记录
	管理措施	限速值合理性、执法频次	交通管理部门统计、问卷调查
	应急响应	救援响应时间、医疗资源密度	急救中心记录、GIS地图
事故输出	事故后果	事故率、死亡率、经济损失率	公安交管部门事故数据库

2 风险评估模型方法

2.1 组合赋权法确定指标权重

2.1.1 层次分析法（AHP）

AHP通过专家打分构建判断矩阵，计算指标主观权重。具体步骤如下：（1）构建层次结构模型（目标层-准则层-指标层），明确各层次之间的关系和指标的分类。（2）设计1—9标度问卷，邀请10名交通领域专家对指标重要性两两比较。专家根据经验和对公路交通安全风险的认识，对指标进行打分^[3]。（3）计算判断矩阵特征向量，进行一致性检验（CR < 0.1）。一致性检验是为了确保专家打分的合理性和一致性，避免出现逻辑矛盾。（4）归一化处理得到主观权重 w_i^a 。

2.1.2 CRITIC法

CRITIC法基于指标变异性与冲突性计算客观权重。具体步骤如下：（1）数据标准化处理（消除量纲影响），使不同指标的数据具有可比性。（2）计算指标标准差 σ_j 反映变异性，标准差越大，说明指标的变异程度越大，对评估结果的影响也越大。（3）计算相关系数矩阵 r_{ij} 反映冲突性，相关系数越小，说明指标之间的冲突性越大，提供的信息越独立。（4）计算信息量 $C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij})$ ，信息量越大，说明指标的重要性越高。（5）归一化处理得到客观权重 w_i^c 。

2.1.3 组合赋权

采用线性加权法融合主，最优组合系数 $\beta = 0.5$ （通过目标函数最小化确定），综合权重计算公式为： $w_i = \beta w_i^a + (1 - \beta) w_i^c$ 。组合赋权法综合考虑了主观经验和客观数据，提高了指标权重的科学性和合理性。

2.2 模糊综合评价法

2.2.1 模糊集构建

将风险等级划分为5级：Ⅰ（低风险）、Ⅱ（较低风险）、Ⅲ（中等风险）、Ⅳ（较高风险）、Ⅴ（高风险）。采用梯形隶属度函数定义指标对各等级的隶属度 r_{ij} 。梯形隶属度函数可以更好地描述指标值与风险等级之间的模糊关系，使评价结果更加准确。

2.2.2 多级评价模型

一级评价：对准则层指标进行模糊运算，得到评价矩阵A,B,C。通过模糊运算，将各准则层指标的隶属度进行综合，得到准则层的评价结果。

二级评价：整合准则层结果，计算目标层评价矩阵 $R^{[4]}$ 。将准则层的评价结果进行进一步综合，得到目标层的评价矩阵，反映公路交通安全风险的总体情况。

风险等级判定：根据最大隶属度原则确定最终风险等级。最大隶属度原则是指在评价矩阵中，选择隶属度最大的等级作为最终的风险等级。

3 实证研究——以国道 G229 勃利至依兰段为例

3.1 研究区域概况

国道G229勃利至依兰段全长117km，双向两车道，设计时速80km/h，沿线穿越山区、村镇、桥梁等复杂路段。2024年事故统计显示，该路段事故率达4.2次/km·年，高于全省平均水平2.8次/km·年，其中弯道段事故占比61%，夜间事故占比54%。这些数据表明该路段存在较高的交通安全风险，需要进行深入的风险评估和改善。

3.2 数据采集与处理

3.2.1 数据来源

（1）道路几何数据：通过激光测距仪、全站仪采集平曲线曲率、纵坡坡度、路面抗滑性等；（2）交通流数据：利用微波检测器、雷达测速仪获取车速、流量、货车比例；（3）环境数据：从气象站获取降雨、降雪、雾天频率；（4）事故数据：从公安交管部门调取2020—2024年事故记录，包括时间、地点、类型、伤亡情况；（5）管理数据：通过问卷调查与现场勘查获取标志标线完善率、防护栏等级、限速值等。

3.2.2 数据预处理

对缺失值采用均值插补，异常值采用3 σ 准则剔除，数据标准化采用min-max法。数据预处理可以提高数据的质量和可靠性，为后续的模型计算和分析提供准确的数据支持。

3.3 模型计算与结果分析

3.3.1 权重计算

通过AHP与CRITIC法计算指标权重（表2），结果显示：

风险输入维度权重最高（0.52），其中平曲线曲率（0.18）、V/C比（0.15）、不良天气频率（0.12）贡献显著。这表明道路几何特征、交通流特性和环境因素对公路交通安全风险的影响较大。

安全保障维度权重次之（0.31），标志标线完善率（0.11）、救援响应时间（0.09）影响较大。说明交通设施和应急响应方面的保障措施对降低公路交通安全风险具有重要作用。

事故输出维度权重最低（0.17），事故率（0.08）、死亡率（0.05）为主要指标。事故输出维度反映了事故的后果严重性，虽然权重较低，但也是评估公路交通安全风险不可忽视的方面。

表2 指标权重

维度	指标	主观权重	客观权重	综合权重
风险输入	平曲线曲率	0.20	0.16	0.18
	V/C比	0.18	0.12	0.15
	不良天气频率	0.15	0.09	0.12
安全保障	标志标线完善率	0.12	0.10	0.11
	救援响应时间	0.10	0.08	0.09
事故输出	事故率	0.09	0.07	0.08
	死亡率	0.06	0.04	0.05

3.3.2 风险等级评价

将路段划分为6个评价单元，计算各单元风险等级（表3）。结果显示：

R3、R4路段为高风险（Ⅳ级），主要因平曲线曲率 $>8^\circ$ 、V/C比 >0.8 、夜间事故率 $>60\%$ 。这些路段道路几何条件复杂，交通流量大，夜间能见度低，容易导致事故发生。

R1、R2路段为中等风险（Ⅲ级），需加强标志标线与限速管理。这些路段存在一定的交通安全风险，通过加强交通设施和管理措施可以降低风险。

R5、R6路段为较低风险（Ⅱ级），可维持现有管理措施。这些路段交通安全状况相对较好，但仍需持续关注和管理。

表3 风险等级

路段	风险输入得分	安全保障得分	事故输出得分	综合风险等级
R1	0.62	0.58	0.45	Ⅲ
R2	0.59	0.61	0.48	Ⅲ
R3	0.85	0.49	0.72	Ⅳ
R4	0.82	0.52	0.68	Ⅳ
R5	0.55	0.65	0.51	Ⅱ
R6	0.58	0.63	0.53	Ⅱ

3.4 高风险路段改善措施

针对R3、R4路段，提出以下改善方案：（1）工程措施：增设凸面镜、减速标线，优化弯道超高设计。凸面镜可以扩大驾驶员的视野，减速标线可以提醒驾驶员减速，优化弯道超高设计可以提高车辆的行驶稳定性。（2）管理措施：夜间限速降至60km/h，增加巡逻频次。降低夜间限速可以减少车辆的行驶速度，降低事故发生的概率和后果严重性，增加巡逻频次可以及时发现和处理交通违法行为和突发事件。（3）技术措施：安装智能警示系统，实时发布天气与路况信息。智能警示系统可以根据天气和路况实时发布警示信息，提醒驾驶员注意安全，提高驾驶员的警惕性。实施后跟踪显示，事故率下降41%，死亡率下降53%，验证了模型的有效性。这表明通过采取针对性的改善措施，可以有效降低公路交通安全风险，提高公路的安全性。

4 结语

本研究构建的“风险输入-安全保障-事故输出”三维度评估模型，全面量化公路交通安全风险，综合考虑多方面因素，克服传统模型局限；AHP-CRITIC组合赋权法平衡主客观权重，提高评估结果科学性；实证研究验证了模型有效性与实用性，能准确识别高风险路段，为安全改善提供决策支持。不过，研究也存在不足，目前模型数据时效性受限，主要依赖静态和历史数据，未来可融合浮动车、手机信令等实时数据；未考虑自动驾驶、车路协同等新技术对风险的影响，需动态更新指标体系；且模型主要针对国道，未来可拓展至高速公路、城市道路等多类型公路，以提升模型通用性，使其更好适应不同场景下的公路安全管理需求。

参考文献

[1]施鹏,马南,马明义,等.交通枢纽公共安全风险评估模型研究[J].交通工程,2025,25(02):39-44+63.
[2]孙祥龙,刘凯铸.普通干线公路交通安全风险三维度评价模型[J].交通科技与经济,2023,25(05):25-32.
[3]洪东.西部地区道路交通安全风险预警模型研究及应用[J].西部交通科技,2022,(09):152-154+168.
[4]项震宇,陈军,朱文文,等.基于深度学习的交通安全风险预测模型甄选与应用——以金义东干线公路为例[J].交通世界,2025,(Z1):1-7.