

中文引用格式: ZOU Patrick X W, 梁琨昊. 智慧高速公路系统本质安全化评价指标体系[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(9): 28-35.

英文引用格式: ZOU Patrick X W, LIANG Kunhao. Developing an assessment criteria and method for intrinsic safety of smart highway system [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 28-35.

智慧高速公路系统本质安全化评价指标体系*

ZOU Patrick X W^{1, 2}教授, 梁琨昊^{**1, 2}

(1 长安大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710064;

2 长安大学 道路基础设施数字化教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064)

中图分类号: X913.4

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1511

基金项目: 国家自然科学基金资助(72371036); 中央高校基本科研业务费资助(300102234302)。

【摘要】 为提升智慧高速公路本质安全水平, 提出一种基于潜在狄利克雷分布(LDA)主题模型的智慧高速公路本质安全评价指标识别方法。界定智慧高速公路本质安全内涵, 基于我国15个省市智慧高速公路建设指南文本, 应用词频-逆文档频率(TF-IDF)算法和LDA主题模型提取语料主题及关键词, 结合相关文献规范及专家访谈和评价, 构建智慧高速公路本质安全评价指标体系, 该体系涵盖安全感知与监测能力、交通运行安全保障能力、安全决策支持能力、系统与设备可靠性4个一级指标及15个二级指标, 并阐释各二级指标内涵; 应用网络层次分析法(ANP)揭示智慧高速公路本质安全评价指标间的交互关系, 运用Super Decision软件确定各级评价指标的权重。研究结果表明: 数据传输可靠性、机电设备运行可靠性、安全风险预测与评估能力等指标对智慧高速公路本质安全水平的影响最为显著。所构建的方法能够高效地从文本中挖掘出有效数据信息, 提升本质安全评价的客观性与准确性, 从而为智慧高速公路本质安全设计与管理提供指导。

【关键词】 智慧高速公路; 本质安全; 评价指标体系; 潜在狄利克雷分布(LDA)主题模型; 网络层次分析法(ANP)

Developing an assessment criteria and method for intrinsic safety of smart highway system

ZOU Patrick X W^{1, 2}, LIANG Kunhao^{**1, 2}

(1 School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

2 Engineering Research Center of Highway Infrastructure Digitalization of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: This study developed a method for identifying intrinsic safety evaluation indicators and the associated assessment methods based on the LDA topic model. Firstly, the definition of intrinsic safety for smart highway was proposed. Guidelines for smart highway construction from 15 provinces and municipalities were collected. The Term Frequency-Inverse Document Frequency (TF-IDF) algorithm and the LDA topic model were applied to extract topics and keywords from the corpus. By integrating relevant standards and expert evaluation, an intrinsic safety performance evaluation index system for smart highway

* 文章编号: 1003-3033(2025)09-0028-08; 收稿日期: 2025-04-12; 修稿日期: 2025-07-10

** 通信作者: 梁琨昊(2001—), 男, 广西百色人, 硕士研究生, 主要研究方向为公路本质安全管理。E-mail: 1431672176@qq.com。

was established. This index system included four first-level indicators: safety perception and monitoring capability, traffic operation safety assurance capability, safety decision support capability, and system and equipment reliability, which are further divided into 15 second-level indicators. The connotation of each second-level indicator was described. Subsequently, the interactive relationships among the evaluation indicators of the intrinsic safety performance of smart highway were calculated using the ANP, and the weights of each evaluation indicator were determined using the Super Decision software. The results show that data transmission reliability, electromechanical equipment operation reliability, safety risk prediction and assessment capability are key indicators affecting the intrinsic safety level of smart highways. The developed evaluation methodology enables efficient extraction of valid data from textual sources, thereby enhancing the objectivity and accuracy of intrinsic safety assessment. This approach provides actionable guidance for advancing intrinsic safety development in smart highway.

Keywords: smart highway; intrinsic safety; evaluation index system; latent Dirichlet allocation (LDA) topic model; analytic network process (ANP)

0 引 言

近年来,我国公路安全事故频发,给公众出行工作生活带来巨大威胁。《中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报》^[1]显示,我国道路交通事故万车死亡 1.31 人。智慧高速公路作为智慧交通的重要组成部分,是交通运输新质生产力在公路行业的重要组成和体现,其安全性能对保障公众的生命安全发挥着至关重要的作用。在国家政策支持下,我国各省市进行了许多智慧高速公路建设的调研工作,广东省交通运输厅、山东省交通运输厅、浙江省交通运输厅、江苏省交通运输厅、北京市交通委员会等陆续发布了智慧高速公路的建设指南^[2-6],但仍未形成统一的建设标准。因此,识别影响智慧高速公路本质安全的关键因素,构建科学合理的指标体系,对降低事故发生率,提高智慧高速公路的本质安全水平至关重要。

本质安全作为一种新的安全理念,其科学性已经在多个领域得到验证。蔡逸伦等^[7]构建了基于云模型的化工工艺本质安全评价模型。李华等^[8]划分了智慧工地本质安全度等级,构建了智慧工地本质安全度评价指标体系。张任栋等^[9]建立了化工工艺过程本质安全评价指标体系,并计算了各评价指标的主客观组合权重。尽管如此,目前针对公路领域特别是智慧高速公路本质安全仍缺乏系统研究,对智慧高速公路运行情况的安全评价能力和方法薄弱。同时,大多数研究在构建安全评价指标时主要依赖分析人员的知识和经验,导致构建得到的评价指标体系易受主观因素的影响。

鉴于此,笔者拟引入本质安全理念,提出智慧高速公路本质安全的定义,深度文本分析我国 15 个省

市智慧公路建设指南内容,运用潜在狄利克雷分布 (Latent Dirichlet Allocation, LDA) 主题模型提取智慧高速公路本质安全的主题和关键词,结合相关文献规范及专家访谈和评价,提炼出智慧高速公路本质安全评价指标体系,并采用网络层次分析法 (Analytic Network Process, ANP) 计算各指标的权重,进一步弥补目前安全性能评价研究的不足,以期后续智慧高速公路安全水平的评估提供理论支撑,提高智慧高速公路的本质安全水平。

1 智慧高速公路本质安全定义

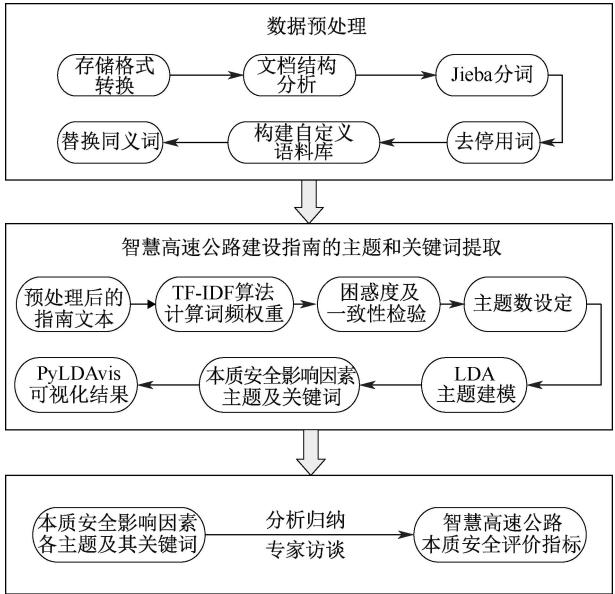
本质安全问题自 20 世纪 90 年代以来,逐步发展成为安全领域的一项热点问题。它的产生反映了当时人们对事故预防技术和安全性的渴望。有人认为这是一种全新的安全理念,有利于从根本上改善人们在事故预防与处理方面的被动局面。本质安全理论的提出改变了传统的安全风险控制理念,把风险控制的重心转移到了风险产生的源头,并衍生出本质安全设计、评估等一系列技术创新与管理理念。《职业安全卫生术语》^[10]将本质安全定义为:通过设计等手段使生产设备或生产系统本身具有安全性,即使在误操作或发生故障的情况下也不会造成事故。

通过回顾本质安全理论的内涵,并分析智慧高速公路的特点,将智慧高速公路本质安全定义为:将高速公路与新一代信息技术深度融合,通过运用 5G、物联网、大数据、人工智能等信息技术手段,建立实时交通安全监测系统与智慧路网云控平台,从而实现智慧高速公路安全管理中的可视、可测、可控、可服务等功能,使智慧高速公路具备对安全风险进行自动辨识、评价、控制和消除的能力及人、车、路

系统异常状态下的容错能力,最终达到智慧高速公路系统化、数字化、本质化的安全管控目标。

2 智慧高速公路本质安全评价指标体系构建

LDA 主题模型是由 BLEI 等^[11]提出的一种典型词袋模型,其本质是一个包含文档、主题和词语的 3 层贝叶斯概率模型。作为一种无监督学习方法, LDA 主题模型可有效分析文档集合中的词汇分布来学习隐藏的主题结构,并计算主题与主题词之间的关联程度。采用 LDA 主题模型分析智慧高速公路本质安全影响因素主题及关键词,构建本质安全评价指标体系,具体流程如图 1 所示。



注:词频(Term Frequency, TF)-逆文档频率(Inverse Document Frequency, IDF)。

图 1 基于 LDA 的本质安全评价指标识别框架
Fig. 1 Framework for identifying intrinsic safety evaluation indicators based on LDA

2.1 数据预处理

研究数据来自我国各省份官方发布的 16 份智慧高速公路建设指南,见表 1。为保证后续分析的有效性,对建设指南进行数据处理,删除“前言”“范围”“规范性引用文件”“术语和符号”等与智慧高速公路本质安全功能无关的内容。随后,采用 Python 软件中的 Jieba 库对文本作分词处理,由于建设指南中存在许多专有名词、固定缩写及业界常用术语,为避免这些词汇被错误切分,基于《智能运输系统通用术语》^[12]和各建设指南中的术语部分构建自定义词典,防止“数字孪生”“车路协同”等术语被错误分词。

表 1 我国不同省份智慧公路建设指南
Table 1 Guidelines for construction of smart highway in different provinces of China

序号	省份	指南名称
1	浙江	智慧高速公路建设指南(暂行)
2	江苏	江苏省智慧高速公路建设技术指南
3	宁夏	宁夏公路网智能感知设施建设指南(试行)
4	山东	智慧高速公路建设指南
5	北京	智慧高速公路建设指南(试行)
6	云南	云南省智慧高速公路建设指南(试行)
7	甘肃	甘肃省智慧高速公路建设技术指南
8	河南	河南省智慧高速公路建设指南(试行)
9	上海	上海市智慧高速公路建设技术导则
10	广东	广东省智慧高速公路建设指南(试行) 广东省智慧公路标准体系(2024 版)
11	吉林	智慧高速公路建设技术指南
12	贵州	贵州省智慧高速公路建设指南(试行)
13	河北	智慧高速公路建设指南
14	广西	智慧高速公路建设总体技术指南
15	安徽	智慧高速公路建设指南

停用词是指文本数据中出现频率高但表示的信息较少的词,其存在可能会加大文本特征的维数,影响文本处理的效率和精确性。为避免停用词对文本分析造成干扰,选用中文停用词表、哈尔滨工业大学停用词表以及百度停用词表过滤语料中的停用词,并在此基础上结合建设指南数据特点,在词表中增加“建设”“层面”“实现”等出现次数较多但不具备主题信息量的词,形成自定义停用词库。

2.2 主题和关键词提取

1) TF-IDF 算法。TF-IDF 算法是评估某词项在语料库或文档中重要程度的方法。主要含义是词项的重要性与其在文档出现的频次正相关,与其在语料库中出现的频率反相关,即词项在某文档中出现的次数多,但在其他文档中出现的频次很少,则认为该词具有优质的类别区分能力^[13]。TF 表示词项在文档中出现的频率, IDF 表示词项的普遍程度,计算公式如下:

$$W_i = \frac{N_{ij}}{\sum_m N_{mj}} \cdot \lg\left(\frac{M}{M_i + 1}\right) \quad (1)$$

式中: W_i 为建设指南文本分词后的词语 i 的特征值权重; N_{ij} 为词语 i 在数据集 j 中出现的次数; $\sum_m N_{mj}$ 为数据集 j 中所有词语出现的次数; m 为词语个数; M 为数据集的总文档数; M_i 为含有词语 i 的文档数。

2) 困惑度与一致性计算。困惑度与一致性计算能够在一定程度上衡量主题质量并科学估计主题数目,困惑度趋于低值选择,一致性趋于高值选择。困惑度是评估语言模型优劣的重要指标,较小的困惑度意味着语言模型有较好的文本预测作用,计算公式如下:

$$P(D) = \exp \left\{ - \frac{\sum_{d=1}^D \ln p(w_d)}{\sum_{d=1}^D N_d} \right\} \quad (2)$$

式中: D 为智慧高速公路建设指南数据集的大小; N_d 为第 d 篇建设指南中包含的词语数量; w_d 为建设指南文本 d 中的词语; $p(w_d)$ 为文本中词语 w_d 的预测概率。

主题一致性是衡量主题与主题之间稳定性、差异性的指标,一致性越大,主题间差异越大,主题之间的区分性越好,主题结构越稳定。主题一致性计算是在 Jensen-Shannon 散度(JS 散度)的基础上,引入随机变量方差到潜在主题空间,即可衡量主题空间的整体差异性^[14],计算公式如下:

$$V(T) = \frac{\sum_{k=1}^K [D_{JS}(T_k, \bar{\theta})]^2}{K} \quad (3)$$

式中: T 为 LDA 模型提取的主题; K 为主题数目; D_{JS} 为 JS 散度; $\bar{\theta}$ 为主题-词概率分布 θ 的均值。

采用 TF-IDF 算法将经过分词处理后的文档词汇集表转化为文档词频矩阵,确定词频权重,并获得文本的向量化表示。随后应用 Python 软件将词向量输入 LDA 主题模型中训练,困惑度计算与一致性计算如图 2 和图 3 所示,当主题数为 15 时,困惑度最低、一致性最高,此时模型效果相对最优,因此,将主题数设为 15。

3) 模型可视化。利用 pyLDAvis 库对模型输出的主题提取结果进一步展开可视化分析,如图 4 所示,其中,圆圈面积代表主题在语料中出现的概率,圆圈之间的距离代表主题之间的差异度。由图 4 可知:主题数为 15 的运行结果中主题分布清晰均匀,不同主题间关键词重叠度较低,主题中的词语基本能够反映智慧高速公路本质安全的影响因素。

2.3 基于主题特征的本质安全评价指标筛选

结合文献[2-6,15-18]进行分析,智慧高速公路的安全功能架构可分为感知层、应用层、决策层和支撑层。感知层主要实现安全相关数据的实时获取,应用层强调依托技术手段,实现安全风险的主动

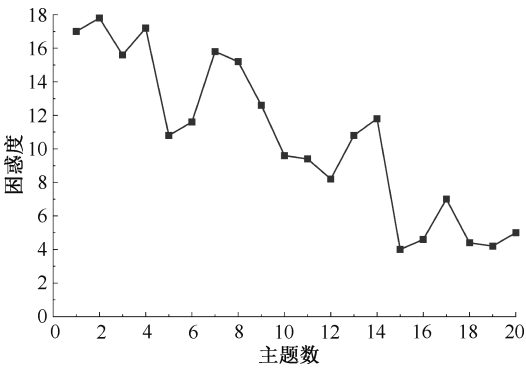


图 2 不同主题数下对应的困惑度
Fig.2 Perplexity corresponding to different number of topics

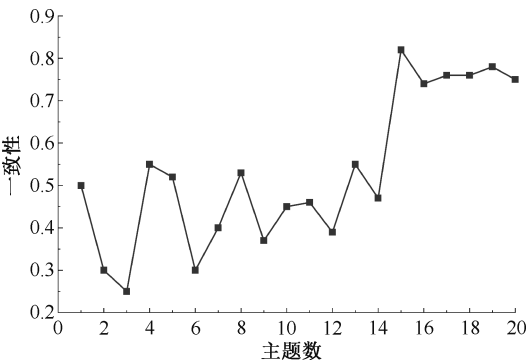


图 3 不同主题数下对应的一致性
Fig.3 Coherence corresponding to different number of topics

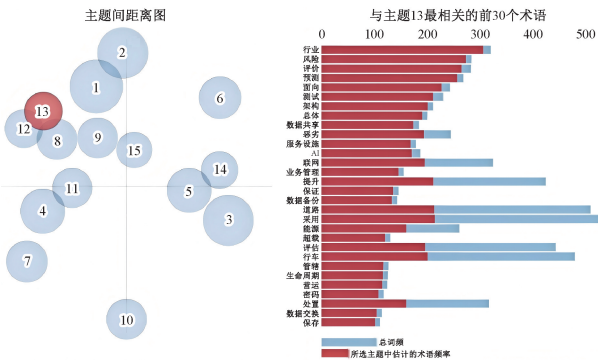


图 4 主题分布可视化
Fig.4 Topic distribution visualization

防控,决策层基于数据驱动分析,辅助生成安全管理的优化策略,支撑层为整个安全功能体系提供稳定运行的基础保障与韧性支持。因此,与 10 位设计单位、施工单位、业主单位及大学科研单位的专家(包括项目经理、设计人员、技术员、教授等)进行讨论后,确定安全感知与监测能力、交通运行安全保障能力、安全决策支持能力、系统与设备可靠性 4 个因素作为一级指标。

为确保二级指标筛选的合理性,根据主题特征词结果,提取与智慧高速公路本质安全高度相关的前 10 个主题词,在主题词性上保留名词、动词以及少量形容词。在此基础上,结合表 1 中的建设指南文本语料中的相关指标描述,与上述 10 位专家进行进一步讨论,充分考虑指标的科学性和全面性,提取

智慧高速公路本质安全评价指标,主题抽取结果见表 2。随后,将安全感知与监测能力、交通运行安全保障能力等 4 个因素作为一级指标,重点营运车辆安全监管能力、车路协同安全保障能力等 15 个因素作为二级指标,构建完整的智慧高速公路本质安全评价指标体系,见表 3。

表 2 基于 LDA 的智慧高速公路本质安全评价指标

Table 2 Intrinsic safety evaluation index of smart highway based on LDA

主题	主题词	指标名称
1	管理、车道、车辆、视频、准确率、监管、入口、货车、定位精度、路线	重点营运车辆安全监管能力
2	驾驶、调度、功能、用户、交流、联动、协同、访问控制、路段、提醒	车路协同安全保障能力
3	场景、能见度、事故、限速、特征、影响、气象、公路、检测器、风向	公路气象环境监测
4	出行、支撑、需求、位置、精度、北斗、路段、自由、路网、全方位	信息服务准确性与时效性
5	养护、管控、作业、保障、水平、数字化、巡检、布设、质量、性能	养护作业区安全保障能力
6	控制、自动、主线、预警、快速、车道、地形、全线、基准、智能化	安全预警能力
7	共享、全天候、配置、能力、查询、路况、地理信息、路网、状态、可靠性	全天候通行保障能力
8	采集、资源、传输、防护、同步、网络安全、接口、过程、控制系统、单元	网络与信息安全保障能力
9	诱导、应急、路面、速度、设施、智能、算法、超限、对策、指令	应急指挥决策支持能力
10	等级、供电、保护、标准、故障、发展、寿命、精准、新能源、负荷	机电设备运行可靠性
11	技术、运行、检测、事件、健康、数据中心、拥堵、感知、发生率、异常	交通事件感知监测
12	识别、边坡、路基、沿线、提示、程度、安装、治理、路径、裂缝、	基础设施状态监测
13	行业、风险、评价、预测、面向、架构、总体、提升、评估、业务管理	安全风险预测与评估能力
14	网络、接入、终端、频率、数据传输、变化、服务质量、核心、应对、授权	数据传输可靠性
15	引导、传感器、效率、指标、规划、管理系统、控制策略、机制、分级、边界	主动交通管控能力

表 3 智慧高速公路本质安全评价指标体系

Table 3 Evaluation system for intrinsic safety of smart highway

一级指标	二级指标	指标解释
安全感知与监测能力 C_1	基础设施状态监测 C_{11}	对桥梁、隧道、边坡等结构物和护栏、标志、标线等安全设施的倾斜变形、裂缝、荷载、位移等数据进行实时采集与监测 ^[6]
	公路气象环境监测 C_{12}	对高速公路能见度、路面温度、路面状况(干燥、潮湿、积水、结冰、积雪)、风速、风向等实现气象全要素、全路程的实时监测 ^[6]
	交通事件感知监测 C_{13}	实现交通拥堵、异常停车、违法变道、路面污染、抛洒物等突发事件的自动识别 ^[5]
交通运行安全保障能力 C_2	重点营运车辆安全监管能力 C_{21}	对“两客一危”等重点营运车辆的运行轨迹与车辆信息进行实时分析,并对重点营运车辆异常行驶状态进行警告 ^[15]
	主动交通管控能力 C_{22}	通过车道交通控制、路径诱导等技术对交通流进行实时优化控制 ^[6]
	全天候通行保障能力 C_{23}	通过雾天行车诱导、智能消冰除雪等方式,保障车辆在恶劣天气、不良光线下以及复杂路段中的安全行驶 ^[5]
	车路协同安全保障能力 C_{24}	在全时空动态交通信息采集与融合的基础上,全方位实现车-车、车-路动态实时数据交互及车辆主动安全控制和道路协同管理 ^[4]
	养护作业区安全保障能力 C_{25}	通过应用智能化养护机械、装备及安全防护设施,降低安全管理风险,保障作业区人员安全 ^[2,5]
安全决策支持能力 C_3	安全风险预测与评估能力 C_{31}	基于交通运行状态、气象环境状态等影响因素,通过算法模型实时判别安全风险的等级,并对其影响程度进行预测评估 ^[16]
	安全预警能力 C_{32}	基于安全风险分析结果和实时监测数据,通过情报板、移动终端及云平台等向交通参与者和管理部门分级发布安全预警信息的能力 ^[4]
	应急指挥决策支持能力 C_{33}	为应急事件处置提供全流程决策支持的能力,包括应急事件核实、应急事件分级、应急预案制定、应急路径规划、应急物资及人员优化配置、应急处置评价 ^[6]

续表 3

一级指标	二级指标	指标解释
系统与设备可靠性 C_4	信息服务准确性与时效性 C_{41}	通过情报板、导航、广播等渠道向用户发布交通运行状态、气象环境、突发事件等信息的准确性与及时性 ^[4]
	数据传输可靠性 C_{42}	通信网络在复杂环境下维持数据完整传输,不出现丢失、损坏或重复 ^[15-18]
	网络与信息安全保障能力 C_{43}	通过数据加密、入侵检测、访问控制等措施保障信息系统免受攻击和数据泄露 ^[6]
	机电设备运行可靠性 C_{44}	照明、监控等机电设备在规定时间内和条件下无故障运行的能力 ^[4-6]

3 基于 ANP 法求取本质安全评价指标权重

ANP 是一种处理复杂决策问题的方法,可以展示系统内部要素的交互关系,得到更精确的指标权重结果^[19],其科学性已在多个领域得到验证^[19-20]。智慧高速公路本质安全评价指标间存在复杂的交互关系,采用 ANP 计算智慧公路本质安全评价指标权重,能够有效处理本质安全评价指标之间的相互作用和依赖性,使分析结果更加合理、科学、可信,计算步骤如图 5 所示。

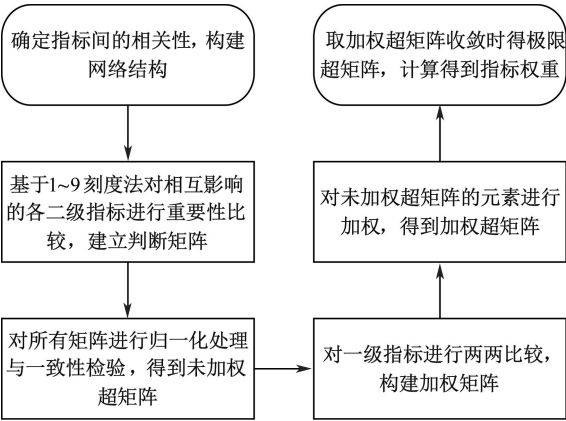


图 5 ANP 算法步骤
Fig. 5 ANP computational procedure

3.1 指标间相互影响关系确定

为确定智慧高速公路本质安全评价指标间的相互影响关系,构建指标间相互影响程度的调查问卷,邀请 10 位在智慧高速公路本质安全方面有丰富理论知识和实践经验的专家参与调查,共回收有效问卷 10 份,得到各指标相互作用关系,基于此构建出智慧高速公路本质安全 ANP 网络结构,如图 6 所示。该模型中不存在控制准则,决策目标为“智慧高速公路本质安全”。

3.2 指标权重确定

采用 Saaty 的 1~9 标度法予以赋值,并构建判断矩阵,各标度的含义见表 4。由于上述 10 位专家

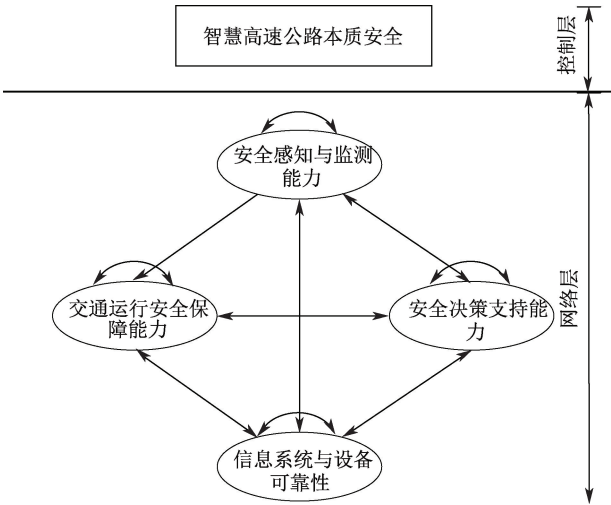


图 6 智慧高速公路本质安全 ANP 网络结构
Fig. 6 ANP model of intrinsic safety of smart highway

深度参与了构建指标体系并分析了指标间的影响关系,可能导致存在先验偏见,影响后续对各指标相对重要性的客观评估。为了提升评价指标体系的适用性及指标权重分配的准确性,另邀请 18 位公路工程建设单位、工程设计研究院、交通科学研究院公路安全领域的专家对各指标的相对重要性打分,共回收有效问卷 15 份。

表 4 1~9 标度的含义

Table 4 Meanings of 1~9 scale

标度	含义
1	对比二元素,元素 a 与元素 b 同等重要
3	对比二元素,元素 a 比元素 b 稍微重要
5	对比二元素,元素 a 比元素 b 明显重要
7	对比二元素,元素 a 比元素 b 强烈重要
9	对比二元素,元素 a 与元素 b 极端重要
2, 4, 6, 8	为上述相邻判断的中值
1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9	指标重要度为上述对应的相反表达

个体一致性比率 (Consistency Ratio, CR) 表示专家判断矩阵的逻辑一致性程度,当 CR 值小于 0.1 时,认为专家的判断矩阵符合一致性要求,经计算上

述专家的打分结果均满足条件。随后,采用几何平均法对判断矩阵进行数据集结,将相互影响情况下的各二级指标和一级指标两两比较优势度,加权矩阵见表 5。由于篇幅限制,未加权超矩阵和极限矩阵不在此赘述。将专家打分的结果输入 Super Decisions 软件中,分析计算得到各指标权重结果见表 6。

表 5 加权矩阵

Table 5 Weighted matrix

指标	C_1	C_2	C_3	C_4
C_1	0.341 4	0.228 1	0.227 7	0.277 7
C_2	0.000 0	0.235 2	0.250 8	0.240 9
C_3	0.409 2	0.320 1	0.316 6	0.289 9
C_4	0.249 4	0.216 6	0.204 9	0.191 5

表 6 智慧高速公路本质安全评价指标权重

Table 6 Weights of intrinsic safety evaluation indicators for smart highway

一级指标	一级指标权重	二级指标	组内权重	全局权重
安全感知与监测能力	0.160 5	基础设施状态监测	0.360 8	0.057 9
		公路气象环境监测	0.312 2	0.050 1
		交通事件感知监测	0.327 0	0.052 5
交通运行安全保障能力	0.103 9	重点营运车辆安全监管能力	0.149 3	0.015 5
		主动交通管控能力	0.133 2	0.013 8
		全天候通行保障能力	0.208 8	0.021 7
		车路协同安全保障能力	0.284 1	0.029 5
		养护作业区安全保障能力	0.224 6	0.023 4
安全决策支持能力	0.345 1	安全风险预测与评估能力	0.370 1	0.127 7
		安全预警能力	0.263 3	0.090 9
		应急指挥决策支持能力	0.366 6	0.126 5

续表 6

一级指标	一级指标权重	二级指标	组内权重	全局权重
系统与设备可靠性	0.390 5	信息服务准确性与时效性	0.022 6	0.008 8
		数据传输可靠性	0.507 9	0.198 3
		网络与信息安全保障能力	0.117 4	0.045 9
		机电设备运行可靠性	0.352 1	0.137 5

由表 6 可知:智慧高速公路本质安全评价体系中,一级指标的权重由大到小分别为系统与设备可靠性、安全决策支持能力、安全感知与监测能力、交通运行安全保障能力。二级指标中,数据传输可靠性、机电设备运行可靠性、安全风险预测与评估能力等指标的重要性最显著,因此,这些指标在智慧高速公路本质安全评价中起关键作用,在实践中应当优先改善这些指标,制定相应的管理措施和提升策略,从而提升智慧高速公路的本质安全水平。

4 结 论

1) 采用 LDA 主题模型挖掘全国 15 个省市的智慧高速公路建设指南,结合相关文献及专家访谈构建智慧高速公路本质安全评价指标体系,该方法能够克服传统安全评价指标主观性较强的问题,为全面、客观地评估智慧高速公路的本质安全水平提供依据。

2) 数据传输可靠性、机电设备运行可靠性、安全风险预测与评估能力是影响智慧高速公路本质安全水平的关键因素。文中提出的智慧高速公路本质安全理论可为智慧高速公路安全管理提供新的研究视角。在后续研究中将对构建的智慧高速公路本质安全评价指标体系进行实践论证,以此检验评价指标体系和方法的实用性。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2025-02-28). https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202502/t20250228_1958817.html.

[2] GDJT 001-07-2022, 广东省智慧高速公路建设指南(试行)[S].
GDJT 001-07-2022, Guildlines for smart expressway construction in Guangdong province[S].

[3] DB37/T 4541-2022, 智慧高速公路建设指南[S].
DB37/T 4541-2022, Construction guides for smart expressway[S].

[4] ZJ/ZN 2020-01, 智慧高速公路建设指南(暂行)[S].

[5] JSITS/T 0001-2020, 江苏省智慧高速公路建设技术指南[S].
JSITS/T 0001-2020, Technical guildlines for smart expressway construction in Jiangsu province[S].

[6] BJJT/ 0060-2021, 智慧高速公路建设指南(试行)[S].
BJJT/ 0060-2021, Technical guildlines for smart expressway construction[S].

[7] 蔡逸伦, 阳富强, 朱伟方, 等. 化工工艺本质安全评价的云模型及应用[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(6): 116-121.

CAI Yilun, YANG Fuqiang, ZHU Weifang, et al. Cloud model for assessing intrinsic safety assessment of chemical process and its application[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(6):116-121.

[8] 李华, 张旭旭, 高红, 等. 智慧工地本质安全度评价方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(1): 139-145.

LI Hua, ZHANG Xuxu, GAO Hong, et al. Research on evaluation method for intrinsic safety degree of smart construction site[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(1):139-145.

[9] 张任栋, 张礼敬, 陶刚. 模糊推理-组合赋权的化工工艺本质安全度研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(8): 149-155.

ZHANG Rendong, ZHANG Lijing, TAO Gang. Research on intrinsic safety of chemical process based on fuzzy reasoning combination weighting[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8):149-155.

[10] GB/T 15236—2008, 职业安全卫生术语[S].

GB/T 15236-2008, Occupational safety and health glossary[S].

[11] BLEI D M, NG A Y, JORDAN M I. Latent dirichlet allocation[J]. Journal of Machine Learning Research, 2003, 3(4/5): 993-1 022.

[12] GB/T 20839—2007, 智能运输系统通用术语[S].

GB/T 20839-2007, Intelligent transport systems:general terminology[S].

[13] 陈述, 孙孟文, 陈云, 等. 基于无监督 LDA 的水电工程施工安全事故致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(10):79-85.

CHEN Shu, SUN Mengwen, CHEN Yun, et al. Causal analysis of construction safety accidents in hydropower projects based on unsupervised LDA[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(10):79-85.

[14] 刘勤明, 董宏霖, 孔得朝. 语义识别驱动的化工泄漏事故事前预防研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(12): 4 734-4 742.

LIU Qinming, DONG Honglin, KONG Dechao. Research on the prevention of chemical leakage accidents driven by semantic recognition[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(12):4 734-4 742.

[15] JTT52/01—2022, 贵州省智慧高速公路建设指南(试行)[S].

[16] DB13/T 5677—2023, 智慧高速公路建设指南[S].

DB13/T 5677-2023, Construction guidelines for smart expressway[S].

[17] DB22/T 3428—2023, 智慧高速公路建设技术指南[S].

DB22/T 3428-2023, Technical guidelines for construction of smart expressway[S].

[18] DB34/T 4649—2023, 智慧高速公路建设指南[S].

DB34/T 4649-2023, Technical guidelines for smart expressway construction[S].

[19] 李鹏程, 许倩, 王烨. 核电厂运行阶段安全文化评价指标体系研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 60-66.

LI Pengcheng, XU Qian, WANG Ye. Study on evaluation index system of safety culture in operation phase of nuclear power plant[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2):60-66.

[20] 黄亚江, 李书全, 李益铎, 等. 基于 DEMATEL-ISM-ANP 的地铁运营安全韧性综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6):171-177.

HUANG Yajiang, LI Shuquan, LI Yixin, et al. Comprehensive evaluation on subway operation safety resilience based on DEMATEL-ISM-ANP[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6):171-177.

作者简介: ZOU Patrick X W (1965—),男,广东紫金人,博士,特聘教授,博士生导师,主要从事复杂工程安全、风险和节能管理方面的研究与教学工作。E-mail: Patrick_Zou@chd.edu.cn。

