

大件运输安全-仿真融合机制与应用研究综述

林兰刚¹, 喻鹏^{1,*}, 曾传华², 袁可佳²

1. 四川省大件运输有限公司, 四川 成都, 610066

2. 西华大学, 汽车与交通学院, 四川 成都, 610039

摘要: 大件运输作为国家重大工程项目的核心支撑环节, 在工程建设中占据重要地位。其安全保障体系的完善程度, 对工程项目整体进度推进、人员与财产安全防护及区域交通网络运行稳定性, 均具有关键影响。本文基于现有研究文献, 系统梳理并归纳了大件运输安全管控与仿真技术领域的相关研究成果。从核心影响因素识别、安全等级评估方法、全流程保障措施三个核心维度, 对大件运输安全领域的研究现状进行了深入剖析; 同时从仿真技术应用、运输全流程动态仿真、复杂外部环境仿真三个关键层面, 全面总结了仿真技术在该领域的研究进展与应用成效。在此基础上, 深入剖析并阐释了大件运输安全研究与仿真技术之间的内在关联逻辑及其融合机制。研究成果预期可为大件运输安全管控与仿真技术融合领域的后续研究工作提供理论参考与实践指导。

关键词: 大件运输; 运输安全; 仿真技术; 安全评估; 智能运输

A Review of the Safety and Simulation Technology for Heavy Haul Transportation

Langang Lin¹, Peng Yu^{1,*}, Chuanhua Zeng², Kejia Yuan²

1. Sichuan Dajian Transport Company Limited, Chengdu, Sichuan, 610066, China

2. School of Automotive and Transportation, Xihua University, Chengdu, Sichuan, 610039, China

Abstract: Heavy haul transportation serves as a crucial foundation for major national engineering projects. Its safety assurance is directly related to project progress, the safety of personnel and property, and the stability of the transportation network. In this paper, the existing research on heavy haul transportation safety and simulation were systematically synthesized. The current state of safety research from three dimensions including safety-influencing factors, assessment methodologies, and safeguard measures was analyzed. Meanwhile, the advancements in simulation research from three perspectives including applications of simulation technologies, transportation process simulation, and environmental simulation were summarized. Furthermore, the integration mechanism between safety research and simulation technologies were investigated. The results can provide a reference for subsequent studies in the field of heavy haul transportation safety and simulation.

Keywords: Heavy haul transportation; Transportation safety; Simulation technology; Safety assessment; Intelligent transportation

随着我国现代工业转型升级、能源结构调整及“一带一路”基础设施建设的持续推进, 风电叶

片、核电设备、航运枢纽闸门、桥式梁等超大超重件的运输需求呈显著增长态势。大件运输作为连接生产制造与工程现场的关键物流环节，对国家重大工程项目的顺利实施提供了关键支撑，其运输规模与技术复杂难度亦同步提升^[1]。然而，大件运输具有货物尺寸超限、重量大、重心分布复杂等特点，对运输车辆、道路条件、环境适配性提出了极高要求^[2,3]，运输过程中易受转弯半径、路面坡度、气象条件等影响，一旦发生车辆侧翻、滑移、桥梁坍塌等安全事故，将造成重大人员伤亡、财产损失，甚至可能引发区域交通瘫痪与工程建设停滞^[4,5]。

鉴于大件运输所面临的诸多安全挑战，仿真技术凭借其可视化、低成本、可重复、风险预控等优势，已成为解决大件运输复杂安全问题的核心技术手段。通过构建高精度运输仿真模型，可精准模拟车辆行驶、货物动态响应及其与环境的交互作用，有效识别潜在风险并对运输方案进行优化^[6,7]。本文旨在系统梳理大件运输安全与仿真领域研究现状、核心成果及内在关联，对于完善运输安全理论体系、神话仿真技术应用、保障重大工程项目高效推进具有重要的理论价值与实践意义。

1 大件运输概述

1.1 大件运输的定义与特点

大件运输通常指运输货物的外形尺寸、重量超出国家公路运输标准限值，需采用特殊运输车辆、设备及技术方案实现的特种运输形式^[1]。根据货物特性与运输需求，大件运输车辆可分为牵引车+长轴距挂车、牵引车+多轴多轮液压挂车、牵引车+特殊组合挂车三类，其运输货物多为风电叶片、核电设备、桥式梁、航运枢纽闸门等重大工程设备，具有单件重量大、外形尺寸长、重心位置复杂等特征^[8-10]。

1.2 大件运输安全的重要性

大件运输安全直接关乎重大工程项目的推进效率、人员生命财产安全及公共基础设施的完整性。从工程角度审视，大件设备多为重大工程的核心部件，其生产周期长、价值高，运输事故将直接导致工程停滞，造成巨额经济损失^[11-13]；从安全角度分析，大件运输车辆荷载远超常规车辆，运输事故极易引发连锁反应，导致严重人员伤亡及区域交通瘫痪^[4,5]；从基础设施角度考量，大件运输车辆频繁通行将对桥梁、道路等基础设施产生长期累积损伤，不仅缩短其使用寿命，甚至诱发桥梁坍塌等恶性事故^[4, 14, 15]。此外，从行业发展层面，安全是大件运输行业可持续发展的核心前提，其安全保障能力已成为衡量运输企业核心竞争力的关键指标。

1.3 大件运输的现状

当前，伴随重大工程项目持续推进，我国大件运输市场规模不断扩大，运输场景日益复杂，主要聚焦陆上风电场建设、核电工程、航运枢纽改造及跨区域基建等领域。从运输现状来看，亦形成公路运输为主、水路运输为辅、多式联运互补的综合格局，其中公路运输凭借其“点对点”直达优势，成为中短距离大件运输的首选，然而，其发展亦面临诸多挑战，如多山地貌，纵坡转弯、急弯路段等复杂路况制约^[3]；山区风电场运输则需应对场外道路改造、场内复杂地形展线等难题^[11]；城市道路运输则受限于净空高度和交通流量等因素^[16]。此外，大件运输行业仍存在运输方案制定依赖经验、安全监测手段不足及跨部门协同效率低下等突出问题^[1, 12]。

1.4 仿真研究在大件运输中的作用

仿真技术作为大件运输领域的核心支撑，其根本价值在于构建高保真度的虚拟运输系统，以实现运输过程的可视化模拟、风险精准预测以及方案优化。具体而言，仿真技术显著增强了风险预控

能力,能够提前识别并量化潜在安全隐患^[6,8]。同时,大幅提升了运输方案优化效率,可针对性调整运输路线、优化车辆组合配置、改进货物装载方式,并精确设定行驶参数^[7,13]。此外,仿真技术显著降低了研发与实施成本,相较于实际测试,可有效规避实测实验可能产生的巨大资源消耗与潜在风险损失,大幅缩短运输方案制定周期,并节约研发费用^[16]。最终,仿真技术为运输方案的工程验证提供了科学且量化的依据,仿真验证已成为决策的重要支撑。

2 大件运输安全研究现状

2.1 大件运输安全影响因素分析

大件运输安全是货物特性、运输设备、道路与环境等多因素综合作用的结果,各因素通过复杂的耦合机制影响运输系统稳定性。

2.1.1 货物因素对运输安全的影响

货物因素是影响运输安全的内在因素,主要涵盖货物形状、重心、包装质量及绑扎加固方式等^[8,17]。货物形状直接关联空气动力学特性与装载稳定性^[9];重心位置则是决定车辆行驶稳定性的关键参数,研究表明,装载重心横向偏移与弯道安全车速阈值呈线性关系,当重心向弯道外侧偏移时,安全车速显著降低,甚至诱发侧翻^[13,18];绑扎加固方式直接影响货物滑移风险,合理的绑扎方案可有效限制货物在运输过程中的位移,反之,则可能导致货物在颠簸路面或弯道行驶时发生滑移^[8,17]。

2.1.2 运输设备因素对运输安全的影响

运输设备的性能与可靠性是保障运输安全的基石,主要涉及运输车辆、装卸设备及监测设备^[19-21]。运输车辆的承载能力、悬挂系统、液压回路配置直接影响货物受力与车辆稳定性,如挂车主纵梁的应力分布与变形特性决定了车辆的承载极限,合理的液压回路编点方式可优化主纵梁受力,提升承载能力^[21];此外,不同牵引车与载货气囊板的组合形式对减震效能影响显著,气囊牵引车搭配减震鹅颈气囊板可有效降低货物质心加速度,从而提升高精度货物运输安全性^[19];装卸设备的可靠性则直接影响货物装载、卸载过程的安全,其适配性需通过校核计算与有限元分析予以确保;监测设备的性能决定了运输过程中货物状态与车辆受力的实时感知,传感器故障或信号干扰可能导致风险误判^[20]。

2.1.3 道路与环境因素对运输安全的影响

道路与环境因素是影响运输安全的外部关键约束,其中道路因素包括弯道半径、坡度、路面状况、桥梁承载能力等。弯道半径与车辆通过性呈正相关,随弯道半径增大,大件运输车组安全行驶车速逐渐提升,呈指数函数关系^[13];纵坡与横坡会导致货物重心纵向或横向偏移,横坡对稳定性影响更为显著,需通过车组横向稳定性校核保障安全^[3];路面粗糙度直接影响车辆振动响应,进而影响货物绑扎加固的有效性^[17];桥梁承载能力是大件运输的核心约束,独柱墩曲线梁桥、小跨径石拱桥等特殊桥梁在大件车辆荷载下易出现抗倾覆稳定性不足、应力集中等问题^[15]。

环境因素主要涵盖气象条件与交通流量两大方面。其中,风速与风向对风电叶片等具有显著迎风面积的超长货物运输影响尤为显著,研究表明:横向风载荷的作用远超纵向风载荷,对运输稳定性构成更大挑战^[9]。国际学术界对极端天气条件下(例如强风、暴雨、冰雪等)大件运输安全性的研究日益重视。YAO等人通过精细化仿真模拟,深入分析了不同风速、风向及阵风工况下风载荷的分布特征,并据此评估了风电叶片运输车辆的侧翻与失稳风险^[22]。JANUÁRIO等学者的研究亦证实,在强风环境中,超长货物运输车辆的空气动力学特性会发生显著变化,这要求在运输方案设计中必

须进行更为精细的风载荷分析,并采取相应的安全设计措施^[23]。此外,暴雨和冰雪等恶劣天气严重影响车辆的制动效能和转向操控性,从而显著增加车辆打滑和失控的事故风险。针对此问题,国际研究通过构建能够准确反映湿滑和结冰路面特性的车辆动力学模型,实现了对极端天气下大件运输安全性的量化评估^[24]。

2.2 运输安全评估方法研究

当前大件运输安全评估方法多样,主要涵盖层次分析法(AHP)、模糊综合评价法、神经网络法、可靠度分析法、以及快速评定法等。AHP通过构建层级结构并采用专家打分确定权重,适用于多因素综合权重分析^[25]。模糊综合评价法则基于模糊数学理论,通过隶属度函数对运输安全状态进行模糊评判,尤其适用于评估指标模糊或难以量化的情境^[25]。神经网络法作为一种基于机器学习的智能评估手段,通过大量样本数据训练模型,实现对运输安全状态的非线性映射与预测^[1],适用于大数据背景下的动态安全评估;然而,其局限性在于对样本数据需求量大、模型训练复杂且解释性相对较差,难以明确各指标的具体影响机制。可靠度分析法以概率统计为基础,通过建立结构失效准则与功能函数,计算运输系统的可靠度指标与失效概率,常用于桥梁、车辆结构等安全评估^[14, 26, 27]。该方法优势在于风险概率的量化与评估结果的科学严谨性,但对数据质量要求高,需大量实测或仿真数据支撑。

国际上,随着大数据和人工智能技术的快速发展,基于数据驱动的智能评估方法得到了广泛应用,并展现出更高的评估精度和适应性。例如,GRÜN等人提出了一种灵活的决策支持模型,该模型通过采用综合归一化技术混合聚合(MACONT)技术,有效解决了大件运输路线选择相关的复杂决策问题^[28]。

除上述主流方法外,研究者还提出了多种针对性评估方法:针对小跨径实腹式石拱桥的通行评估,提出基于正常使用极限承载和偏心距限值的快速评定法^[29];针对桥梁通行安全,采用静载试验与仿真计算相结合的评估方法,通过对比Midas/Civil软件计算结果与荷载试验数据,论证运输方案的可行性^[4];针对多主体参与的运输安全监管,基于演化博弈论构建评估模型,分析行业监管部门与运输企业的策略稳定性^[12, 30]。

2.3 运输安全保障措施研究

基于大件运输安全影响因素,现有研究提出了涵盖货物、设备、道路、管理等多维度的综合安全保障措施。在货物层面,优化货物装载方式与绑扎加固方案是核心策略^[8, 17],曾传华等^[17]基于ADAMS仿真得出货物振动加速度拟合公式,可实现绑扎加固方案的定量校核。在设备层面,提升运输车辆性能是关键。牟伟相^[21]通过优化液压回路编点方式,增强了挂车主纵梁承载能力与车辆稳定性;何京沛^[20]研发了液压平板轴线承载状态无线监测系统,实现车辆受力状态的实时监测与故障预警;林兰刚等^[9]采用多动力单元运输方式,提升了复杂路况下的牵引力与通过性。在道路层面,针对山区风电场、西部地区等复杂路况,李巧艺等^[31]开发了道路通过能力快速判别系统,通过RTK采集道路GPS数据与激光测距仪测量障碍物信息,为路线优化提供依据。在管理层面,研究并建立行业监管部门、承运企业、托运企业之间的三方演化博弈模型,引入智能监控平台与信用等级机制,可优化安全监管策略^[12, 30]。此外,深度融合实时监测与仿真技术,通过构建桥梁安全监测及评定系统,形成了“预防-监测-应急”的全流程安全保障体系^[5, 32]。

3 大件运输仿真研究现状

3.1 仿真技术在大件运输中的应用

大件运输仿真技术已形成以计算机模拟仿真为核心、虚拟现实仿真为补充的多元化技术体系,涵盖有限元分析、多体动力学仿真、路径规划仿真、环境仿真等多个分支,其应用贯穿于运输方案设计、风险评估、优化决策的全流程。

常见仿真工具包括:有限元分析软件(如 ANSYS、Midas/Civil),核心功能在于结构强度与应力分析^[4, 8, 33];多体动力学仿真软件(如 ADAMS、TruckSim、CarSim),则专注于车辆动力学特性与货物动态响应分析^[17, 19, 31];路径规划与可视化仿真工具(如 Unity3D、Auto TURN、Google SketchUp),多用于构建三维运输场景,实现路径规划与可视化模拟^[2, 34];此外,系统动力学与博弈仿真软件(如 Vensim、MATLAB),常用于监管机制与多主体协同仿真^[12, 30]。

仿真技术在大件运输研究中具有显著优势:一是突破物理实验局限性,可模拟极端路况、突发故障等难以复现或测试的场景^[9];二是实现量化分析,精准输出应力分布、振动加速度、轨迹偏差等关键参数^[6, 8];三是支持方案优化,通过多工况仿真对比,可快速筛选最优运输方案^[7, 13];四是可视化程度高,借助三维建模与动态仿真,可直观呈现运输过程中的关键细节,有效识别潜在风险^[34];五是降低研发成本,减少实际测试中资源消耗与潜在风险损失。

3.2 运输过程仿真研究

运输过程仿真是大件运输仿真研究的核心内容,聚焦车辆行驶动力学、货物动态响应及路径规划^[10, 14, 35]。在车辆行驶动力学仿真方面,刘万勇等建立了公路大件运输车组模型,分析不同牵引车与载货气囊板组合对货物质心加速度的影响,确定了最优车组组合形式^[9];赵彩霞构建了车组直交弯道转弯路径规划模型,实现了路径的精准规划^[2];王岩设计了基于模型预测控制的轨迹跟踪控制器,通过仿真提升了多轴全转向平板车的轨迹跟踪精度^[10]。

在车辆行驶动力学仿真方面,李巧艺等构建了车货系统模型与三维路面模型,仿真提出通过优化装载方式规避安全隐患^[31];成艳等仿真建立了货物振动加速度随车辆行驶速度和货物重量变化的曲面拟合公式,实现了绑扎加固方案的定量校核^[17]。

在路径规划仿真方面,赵彩霞采用 Hybrid A Star 算法,以轮廓碰撞检测为约束条件,规划了关键点可行轨迹^[2];柴李等建立了圆弧弯道大件运输车组轮廓通过优化模型,通过遗传算法求解最优轨迹^[7];张梦鸽、田振鼎等基于 Auto TURN 创建了 56 种十字交叉与 30 种环形交叉模型,进行车辆路径仿真,分析了交叉口通过性^[1, 36]。

3.3 运输环境仿真研究

运输环境仿真通过真实运输场景构建虚拟环境,为运输过程仿真提供真实边界条件,主要包括道路地形仿真、气象条件仿真与交通环境仿真^[9, 16]。在道路地形仿真方面,赵婉如等采用山区风电场道路 GPS 数据,结合道路两侧障碍物信息,构建了道路三维模型,模拟了车辆运行轨迹,判断其通过性^[31];赵彩霞基于 Unity3D 搭建直交弯道行驶场景,设置不同弯道半径、宽度及障碍高度,仿真了车组轮廓通过性^[2];成艳等则通过构建脉冲路面模型与随机路面模型,模拟了不同路面等级对货物振动响应的影响^[17]。气象条件仿真方面,林兰刚等建立了山地风电叶片车组模型,分析并得出不同风载荷对车组的作用规律,仿真结果表明,横向风对风电叶片运输的影响远大于纵向风^[9]。交通环境仿真方面,张诗波等整合构建了车辆、道路、货物三维模型,实现了城市道路行驶、收费站通行、高速公路跨越等场景的协同仿真^[16]。此外,运输环境仿真还涉及交通流量仿真、障碍物碰撞

仿真等内容,通过模拟交通流状态与车组碰撞风险,优化运输时段选择与避让策略^[12]。各类环境仿真技术的融合应用,能够构建全面的虚拟运输环境,为运输安全评估提供全方位支撑,并为应急预案制定提供支持。

4 大件运输安全与仿真研究的关联与融合

4.1 安全研究为仿真提供基础

大件运输安全研究成果为仿真模型的构建、参数设置与结果验证提供了理论基础,从而确保仿真的科学性与准确性^[8, 26]。在仿真模型构建方面,安全影响因素明确了仿真重点关注的核心参数,如货物重心位置、车辆液压回路配置、弯道半径与坡度、风速与风向等^[8, 9, 13],这些参数直接决定了仿真模型的准确性。在仿真参数设置方面,安全评估为仿真结果的有效性提供了标准。如可靠度分析法确定的桥梁抗倾覆安全系数、货物滑移稳定性系数,可用于校验车桥耦合仿真、货物动态响应仿真^[15, 26];层次分析法确定的安全影响因素权重,可用于明确关键影响因素的仿真精度要求^[25]。此外,安全保障措施提出的货物加固方案、车辆优化配置等,可为仿真场景设计提供实际工程依据,确保仿真模型与工程实践的一致性^[17, 21]。

4.2 基于仿真结果的运输方案优化

仿真技术通过模拟与量化运输过程中的安全风险,为运输方案的优化提供了精准技术支撑,实现了安全保障措施的针对性改进。

在路线优化方面,通过弯道通过性仿真,可有效优化车组的行驶轨迹,进而降低轮廓碰撞风险^[2, 37]。田振鼎等通过仿真分析不同弯道半径的通过性,优化运输路线,避开了高风险路段^[36];张世伟等基于仿真建立弯道安全车速预估模型,确定了不同装载工况与弯道参数下的安全车速阈值,为驾驶员提供操作指导^[18]。在车辆配置方面,刘万勇等通过对不同车组组合仿真对比,确定了最优配置方案^[19];牟伟相通过优化液压回路编点方式,有效降低了挂车主纵梁应力与变形^[21]。在货物装载方面,成艳、张一寒等基于货物动态响应仿真,实现了精准调整货物重心位置与绑扎加固方案^[17, 37]。此外,仿真结果还为道路改造与应急预案制定提供了支持^[4, 9]。综上,基于仿真的方案优化具有针对性强、成本低、效果显著的特点,已成为提升大件运输安全水平的核心手段。

5 研究结论与展望

本文系统梳理了大件运输安全与仿真领域的研究成果,明确了大件运输的定义、特点、安全重要性及发展趋势,剖析了货物、设备、道路与环境三大安全影响因素,总结了层次分析法、模糊综合评价法、可靠度分析法等安全评估方法及多维度安全保障措施;同时,阐述了计算机模拟仿真、虚拟现实仿真的核心技术与工具,梳理了运输过程、环境模拟中的仿真研究成果,剖析了安全研究与仿真技术的融合路径。

展望未来,大件运输安全与仿真研究将聚焦于多因素耦合、仿真精细化、安全评估动态化、智能化与多学科融合、工程应用落地等方向。通过深化理论创新、加速技术升级及加强工程实践对接等,将进一步提升大件运输的安全保障与运输效率,为国家重大工程项目的高效推进提供坚实支撑,并大力推动大件运输行业向智能化、安全化、高效化方向转型。

参考文献

- [1] 张梦鸽. 公路大件运输通行安全性评价技术研究[D]. 长安大学, 2021.

- [2] 赵彩霞. 公路大件运输半挂车组直交弯道通过路径研究[D]. 西华大学, 2024.
- [3] 熊苏. 公路大件运输纵坡转弯安全研究[D]. 西华大学, 2021.
- [4] 余涛. 公路桥梁通行大件仿真计算与静载试验评估[J]. 中国公路, 2024, (17): 102-105.
- [5] 王静, 申磊, 唐现梓. 某桥通行大件运输仿真计算和实时监测研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(S1): 745-748.
- [6] 钟亮, 路洲洲, 潘剑, 等. 航运枢纽闸门运输稳定性仿真分析[J]. 中国农村水利水电, 2025, (06): 114-120.
- [7] 柴李, 曾传华, 邓子杰, 等. 公路大件运输车组弯道轮廓通过性分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(02): 20-27.
- [8] 叶斌, 江前攀, 曾传华. 公路大件运输中桥式梁的安全性研究[J]. 重型汽车, 2025, (03): 10-11.
- [9] 林兰刚, 丛鲁兹, 何太碧, 等. 山地风电叶片运输稳定性补偿研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(05): 143-151.
- [10] 王岩. 面向大件货物运输的无人平板双车协同控制策略研究[D]. 南京理工大学, 2023.
- [11] 万军, 方伟定, 何卫星, 等. 陆上风电场大件运输创新方法思考——从场外大件运输角度[J]. 新能源科技, 2023, 4(01): 57-60.
- [12] 赵璐铭. 公路大件运输安全三方博弈演化研究[D]. 西华大学, 2024.
- [13] 张世伟. 公路大件运输车组弯道通过性研究[D]. 西华大学, 2021.
- [14] 李鹏程. 大件运输车载下系杆拱桥仿真分析及评估方法研究[D]. 长安大学, 2023.
- [15] 张利鹏. 大件运输车辆荷载下独柱墩曲线梁桥抗倾覆稳定性研究[D]. 长安大学, 2020.
- [16] 张诗波, 曾传华, 暴秀超. 大件运输三维仿真建模方法研究[J]. 公路与汽运, 2015, (01): 77-81.
- [17] 成艳, 曾传华, 张一寒. 基于 ADAMS 的公路大件货物运输仿真及绑扎加固分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2021, 40(04): 56-60.
- [18] 张世伟, 曾传华, 潘婷婷, 等. 装载工况对大件运输车组弯道行驶安全车速阈值影响[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2020, 39(04): 416-421.
- [19] 刘万勇, 刘龙洋, 曾传华, 等. 公路大件运输车组不同组合对减震效能影响[J]. 重型汽车, 2024, (04): 26-7+9.
- [20] 何京沛. 公路大件液压平板车轴线承载状态无线监测[D]. 西华大学, 2021.
- [21] 牟伟相. 公路大件运输车辆安全性能优化与主动控制研究[D]. 长安大学, 2019.
- [22] Yao S, Zhang X, Ceccarelli M. Simulation and Analysis of Stability of Large Vane Transport Vehicle Based on Aerodynamic Characteristics of Wind Turbine Blades [J]. Springer, Cham, 2024.
- [23] Januário J R, Júnior J L, Maia C B. Stability Evaluation of a Simplified Reclaimer Using Fluid-Structure Interaction [J]. Applied Sciences-Basel, 2024, 14(7): 19.
- [24] Cai M, Gu L. Heavy-Duty Car Multi-Body Dynamics Simulation and Optimization Research [J]. Advanced Materials Research, 2014, 950: 275-280.
- [25] 宗成强. 道路运输超限货物在途安全评估方法研究[D]. 武汉理工大学, 2011.
- [26] 朱乐乐. 大件运输车载下曲线梁桥仿真分析与性能评估[D]. 长安大学, 2022.
- [27] 邓路路. 大件运输车辆荷载下斜梁桥性能仿真、响应特征分析与安全评价[D]. 长安大学, 2020.
- [28] Grün M F, Kundu P, Küüknder H, et al. An integrated decision-making framework to evaluate the route alternatives in overweight/oversize transportation [J]. Expert Systems with Applications, 2025, 298(PartA).
- [29] 巩文龙, 倪效虎, 刘恩广. 小跨径实腹式石拱桥通行大件运输的快速评定[J]. 山东交通科技, 2024, (03): 35-37.
- [30] 赵婉如, 赵璐铭, 刘芳, 等. 公路大件运输安全监管的演化博弈与仿真分析[J]. 物流工程与管理, 2024, 46(04): 120-4+64.
- [31] 李巧艺, 单奇, 叶运广. 公路大件运输货物安全仿真分析[J]. 公路, 2017, 62(03): 183-188.
- [32] 向宇. 四川省大件公路桥梁安全监测及评定系统[D]. 西南交通大学, 2015.
- [33] 郝增甫, 冯超, 柏虎, 等. 大件运输车辆前牵引装置开发及应用分析[J]. 重型汽车, 2022, (02): 29-30.
- [34] 刘宇航, 曾传华, 邓子杰. 大件运输虚拟仿真实验教学系统设计与实现[J]. 交通企业管理, 2025, 40(01): 103-106.
- [35] 周彭滔, 单奇, 叶运广. 大件运输车-桥耦合动力学分析[J]. 中国测试, 2017, 43(01): 127-131.
- [36] 田振鼎, 吕路, 王玉莹, 等. 公路大件运输空间可通行性评价方法[J]. 公路交通科技, 2024, 41(03): 179-189.
- [37] 张一寒. 基于 ADAMS 仿真的公路大件货物绑扎加固分析[D]. 西华大学, 2019.

基金项目: 多模态感知增强的大件运输车组运行仿真及安全评价技术 (ZH20250356)。

¹ 第1作者简介：林兰刚（1982-），男，硕士，西华大学，研究方向：大件运输，邮箱：linlangang@scdj-trans.com。

*通讯作者简介：喻鹏，男，本科，中级工程师，西华大学，yupeng@scdj-trans.com。