

公路桥梁梁体荷载分布特性与结构受力响应关联性研究

陈 晶

云南航天工程物探检测股份有限公司 云南 昆明 650217

【摘要】：公路桥梁是交通网络的核心枢纽，梁体荷载分布特性直接决定结构受力响应规律，对桥梁安全服役意义重大。随着重载交通普及，车辆荷载随机性、桥面铺装变形等因素，使梁体荷载传递路径与应力分布愈发复杂。当前研究多聚焦单一荷载工况，对荷载时空分布与结构多维度受力的耦合机制剖析不足。基于此，本文将通过解析荷载分布特性与结构受力响应的关联规律，揭示荷载作用下梁体力学行为演化机制，希望可以为桥梁设计优化、养护决策提供理论支撑。

【关键词】：公路桥梁；梁体荷载分布特性；结构受力响应；关联性

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.032

引言

公路桥梁服役的安全性与耐久性，直接关乎路网畅通与公众生命财产安全。开展梁体荷载分布特性与结构受力响应关联性研究，可精准揭示荷载作用与结构力学行为的内在规律，对桥梁工程领域的设计优化、运维保障等具有多重关键意义。

1 公路桥梁梁体荷载分布特性分析

1.1 荷载类型主导的分布差异显著

公路桥梁梁体承受的荷载主要包括恒载与活载，两者分布特征差异明显。恒载如梁体自重、桥面铺装重量等，分布均匀且稳定，沿梁体纵向呈线性均布状态，横向分布则与梁体截面构造严格匹配，对梁体产生持续稳定的压力作用。活载以车辆荷载为主，具有显著的随机性与不确定性，重载车辆的轴重分布、多车并行的荷载叠加，会使梁体局部出现荷载集中现象，尤其在跨中、支座等关键截面，活载分布的不均匀性易引发局部应力突变。

1.2 荷载时空分布具有动态演化特征

从时间维度看，荷载分布随交通流量变化呈现周期性波动，高峰时段多车连续通行形成的累积荷载，与低峰时段零散荷载的分布密度差异较大。长期服役过程中，桥面铺装老化、伸缩缝损坏等因素，会导致荷载传递路径变化，使原本均匀的荷载分布逐渐出现偏差。从空间维度看，纵向分布上，荷载沿梁体长度方向的分布密度与车辆行驶轨迹相关，曲线桥、坡道桥的梁体荷载纵向分布还会受离心力、制动力影响。横向分布则与车辆轮迹位置密切相关，偏离车道中心线的车辆易使梁体横向荷载分布失衡，引发单侧受力过载。

1.3 结构形式与支撑条件制约分布规律

不同结构类型的梁体，荷载分布特性存在本质差异。简支梁桥的荷载主要通过支座传递，跨中区域荷载分布相对均匀，支座附近因支撑约束形成局部荷载集中。连续梁桥因多跨协同受力，荷载会在相邻跨间传递扩散，使荷载分布范围更广，跨中与支座截面的荷载分配比例随跨径比调整而变化。此外，梁体的横向联结刚度也会影响荷载分布，联结刚度不足时，易出

现单梁受力过载现象，加剧荷载分布的不均匀性。

1.4 服役环境加剧荷载分布的复杂性

自然环境与服役损耗会间接改变梁体荷载分布状态。高温、低温循环导致梁体材料热胀冷缩，会使荷载传递路径出现微小偏移。雨水渗透、冻融破坏引发的梁体局部破损，会降低结构承载面积，导致荷载向完好区域集中。长期重载作用下的梁体变形，会使桥面平整度下降，车辆行驶产生的冲击荷载进一步加剧荷载分布的不均匀性，形成“荷载分布失衡—结构损伤—分布更失衡”的恶性循环。

2 公路桥梁梁体荷载分布特性与结构受力响应关联性研究的意义

2.1 赋能桥梁设计优化，提升结构承载效能

传统桥梁设计多基于简化的荷载分布假设，易导致结构受力与实际工况脱节，出现过度设计或局部承载不足等问题。通过明确荷载分布特性与结构受力响应的关联规律，可使设计阶段的荷载取值更贴合实际服役场景，指导工程师优化梁体截面形式、配筋布局及支座选型。例如，针对重载交通下梁体局部应力集中的问题，可通过调整荷载传递路径设计，实现应力均匀分布，在降低建造成本的同时，显著提升桥梁结构的承载效率与使用寿命。

2.2 支撑桥梁安全运维，规避结构服役风险

公路桥梁在长期服役过程中，荷载分布状态会随交通条件、结构老化等因素动态变化，进而引发受力响应异常，若未能及时预判易诱发结构损伤甚至坍塌事故。该研究可建立荷载分布异常与结构受力病害的对应关系，为桥梁健康监测提供核心理论支撑。通过实时监测梁体荷载分布数据，结合关联性规律可精准预判结构受力状态，提前识别潜在病害隐患，指导养护人员制定针对性的加固维修方案。这不仅能降低运维成本，更能有效规避安全风险，保障桥梁全天候安全通行。

2.3 推动行业技术升级，完善桥梁工程理论体系

当前桥梁工程领域对荷载与受力关联性的研究多局限于单一工况，难以覆盖复杂多变的实际服役环境。开展本研究可

突破传统研究的局限性，深入剖析多因素耦合下荷载分布与结构受力的协同演化机制，丰富桥梁结构力学的理论内涵。同时，研究过程中形成的荷载-受力关联模型、测试分析方法等，可为桥梁工程相关技术标准的修订提供科学依据，推动桥梁设计、监测、养护等领域的技术革新，助力行业向精细化、智能化发展转型。

3 荷载分布特性与结构受力响应的关联规律

3.1 荷载类型与结构受力响应的匹配性及实施

不同类型的荷载具有差异化的力学特性，其与结构受力响应的匹配逻辑存在本质差异，实施分析时需先明确荷载类型的归类标准，再通过力学建模建立与受力响应的量化关联。从荷载的作用性质划分，可分为静力荷载与动力荷载，静力荷载具有加载缓慢、荷载大小与方向恒定的特性，其引发的结构受力响应以静态内力与弹性变形为主，不存在惯性力与振动效应的影响；动力荷载则具有加载速度快、荷载大小或方向随时间周期性变化的特点，会诱发结构产生振动响应，除静内力外，还会产生附加动内力与动位移。实施过程中，需先通过荷载识别技术明确荷载类型参数，再基于对应力学理论建立计算模型，例如对于静力荷载，采用静力平衡方程与材料本构关系构建受力响应计算体系，核心公式为静力平衡方程 $\sum F=0$ 、 $\sum M=0$ ，结合胡克定律 $\sigma=E\varepsilon$ ，通过内力分析确定结构各截面的应力分布与位移大小；对于动力荷载，则需引入动力学方程，考虑结构的质量、刚度与阻尼特性，核心公式为 $M\ddot{u}+C\dot{u}+Ku=F(t)$ （其中 M 为质量矩阵、 C 为阻尼矩阵、 K 为刚度矩阵、 u 为位移向量、 \ddot{u} 、 \dot{u} 分别为节点加速度向量与速度向量、 $F(t)$ 为动力荷载向量），通过求解方程获得结构的固有频率、振型等动态特性参数，进而确定动内力放大系数与最大动响应值。这种基于荷载类型分类的分析实施，可以精准匹配结构的受力响应机制，为后续的结构承载能力评估提供基础依据。

3.2 荷载分布形态对结构内力分布的调控作用及实施方法

荷载分布形态是决定结构内力分布模式的关键变量，不同的分布形态会使结构内部产生差异化的内力峰值与分布梯度，实施分析需通过分布形态的量化表征，建立其与内力分布的对应关系，进而实现对结构受力状态的调控。常见的荷载分布形态包括均布荷载、集中荷载、线性分布荷载及非线性分布荷载等，均布荷载会使结构内力呈均匀变化趋势，内力峰值相对平缓；集中荷载则会在作用点附近产生显著的内力集中现象，易导致局部截面应力超标；线性分布荷载的内力分布呈线性梯度变化，其梯度斜率与荷载分布系数直接相关。实施过程中，首先需通过现场监测或数值模拟手段，获取荷载分布形态的量化参数，如均布荷载的集度 q 、集中荷载的大小 P 、线性分布荷载的起始集度 q_1 与终止集度 q_2 等；随后基于结构力学中的截面法与叠加原理，建立荷载分布形态与内力分布的计算模型，例如对于简支梁结构，均布荷载作用下的跨中弯矩公式为

$M_{max}=qL^2/8$ ，支座反力为 $R=qL/2$ ，内力沿梁长呈二次抛物线分布；集中荷载作用下的跨中弯矩公式为 $M_{max}=PL/4$ （荷载作用于跨中），内力在荷载作用点处出现突变，两侧呈线性分布。通过这类量化分析，可明确不同荷载分布形态下的内力薄弱区域，进而通过调整结构截面尺寸、增设加强构件等方式调控内力分布，提升结构承载合理性。

3.3 荷载传递路径与结构受力传导的协同性及实施

荷载传递路径的合理性直接决定结构受力传导的协同性，两者的匹配程度是影响结构整体承载效率的核心因素，实施分析需以荷载传递路径的追踪为核心，建立与结构受力传导体系的协同验证机制。荷载传递路径是指荷载从作用点开始，通过结构构件的连接节点逐步传递至基础的路径，其形成与结构的拓扑形态、构件连接方式密切相关；结构受力传导则是指内力在结构体系内的传递与分配过程，其协同性体现为内力能够沿合理路径均匀传递，避免局部构件承担过量内力。实施时，首先需通过拓扑分析明确结构的构件连接关系与荷载可能的传递路径，采用荷载追踪法标记荷载从作用点到基础的传递链路；随后建立结构的力学传导模型，引入节点平衡条件与构件内力传递方程，分析各传递路径上的内力分配比例，核心公式为节点内力平衡方程 $\sum F_x=0$ 、 $\sum F_y=0$ 、 $\sum M=0$ ，结合构件的刚度比确定内力分配系数 α （ $\alpha=K_i/\sum K_i$ ，其中 K_i 为单个构件的刚度， $\sum K_i$ 为同一节点处所有构件的刚度之和）。通过该方程可量化不同传递路径的内力承载占比，判断是否存在受力传导失衡的情况。若发现某一传递路径内力占比过高，可通过优化构件刚度配比、调整节点连接形式、增设辅助传递构件等方式优化荷载传递路径，使结构受力传导达到协同状态，提升整体承载效率。

3.4 荷载时空分布与结构动态响应的耦合性及实施

荷载的时空分布特性与结构动态响应之间存在显著的耦合效应，时间维度上的荷载变化频率与空间维度上的荷载分布范围，共同决定结构动态响应的幅值与特性，实施分析需建立时空耦合分析模型，量化两者的耦合关系。从时间维度看，荷载的变化频率若接近结构的固有频率，会引发共振现象，导致结构动态响应急剧放大；从空间维度看，荷载的分布范围与作用位置会改变结构的质量分布与刚度分布，进而影响结构的动态特性。实施路径主要分为三个步骤：一是通过长期监测获取荷载的时空分布参数，时间维度上提取荷载变化周期 T 、频率 f ，空间维度上确定荷载作用区域 A 、分布密度 $\rho(x,y,t)$ ；二是建立结构的时空耦合动力学模型，将荷载的时空分布函数 $\rho(x,y,t)$ 代入动力平衡方程，得到耦合动力学方程 $M\ddot{u}(x,y,t)+C\dot{u}(x,y,t)+Ku(x,y,t)=F(x,y,t)$ （其中 $F(x,y,t)$ 为时空分布荷载向量）；三是采用数值解法（如有限元法、Newmark- β 法）求解耦合方程，获取结构在不同时空荷载作用下的动态响应参数，如位移响应 $u(x,y,t)$ 、速度响应 $\dot{u}(x,y,t)$ 、加速度响应 $\ddot{u}(x,y,t)$

及动应力 $\sigma_d(x,y,t)$ 。同时,可引入动态响应放大系数 $B = \sigma_d / \sigma_{st}$ (其中 σ_{st} 为静态应力),量化时空荷载对结构动态响应的放大效应。通过这类耦合分析,可以精准预测结构在复杂时空荷载作用下的动态受力状态,为结构的抗振设计与动态安全评估提供技术支持。

3.5 荷载分布不确定性与结构受力安全储备的适配性及实施

荷载分布的不确定性是工程结构设计中无法回避的客观因素,其与结构受力安全储备的适配性直接决定结构的服役安全性,实施分析需通过量化荷载分布的不确定性程度,建立与安全储备的适配验证体系。荷载分布的不确定性主要源于荷载自身的随机性(如自然荷载的随机波动)、荷载识别的误差、环境因素的干扰等,这些因素会导致实际荷载分布与设计预设分布存在偏差,进而引发结构实际受力响应与设计计算值的差异。实施方法需遵循“不确定性量化—受力响应概率分析—安全储备适配验证”的逻辑,先采用概率统计方法量化荷载分布的不确定性,通过大量实测数据建立荷载分布的概率模型,如正态分布、极值分布等,计算荷载的均值 μ 、标准差 σ 及变异

系数 $\delta = \sigma / \mu$;其次基于概率极限状态设计理论,建立结构受力响应的概率分析模型,引入荷载分项系数 γ_F 与材料强度分项系数 γ_M ,核心公式为 $\gamma_{FS}(\mu_F, \sigma_F) \leq R(\mu_R, \sigma_R) / \gamma_M$ (其中 S 为荷载效应、 R 为结构抗力),通过该公式量化不确定性荷载作用下的结构受力安全裕度。最后,根据结构的重要性等级与服役环境,确定合理的安全储备系数,验证安全储备与荷载分布不确定性的适配性。若适配性不足,可通过增大结构截面尺寸、采用高强度材料、增设冗余构件等方式提升安全储备,或通过优化荷载监测方案、减小荷载识别误差等方式降低不确定性影响,确保结构在不确定性荷载作用下仍能满足安全服役要求。

总而言之,公路桥梁梁体荷载分布特性与结构受力响应的关联规律,是保障桥梁安全服役与优化设计的核心支撑。通过围绕相关关联维度的研究,明晰了荷载分布参数对梁体内力、变形及安全性能的调控机制。未来,还可依托智能监测与精准模拟技术,深化复杂交通荷载下的动态关联研究,从而为桥梁结构的全生命周期运维、病害预警及升级改造提供更具针对性的科学依据,助力提升公路桥梁工程的建设质量与耐久性。

参考文献:

- [1] 凌天洋.自动化卡车队列对公路桥梁的动静力荷载效应研究[D].湖南大学,2023.
- [2] 夏精平.公路桥梁上部结构加固施工技术[J].云南水力发电,2021,37(12):66-70.
- [3] 杨超,肖城.公路桥梁上部结构病害成因及养护对策分析[J].运输经理世界,2021,(07):91-92.
- [4] 魏威.公路桥梁工程上部结构施工技术研究[J].建筑技术开发,2020,47(10):125-126.
- [5] 张运亮.复杂地质构造条件下高速公路压煤采动影响区桥梁结构适应性研究[D].重庆交通大学,2020.