

# 基于车桥耦合的大跨度钢桁拱桥冲击系数研究

马晓骏 侯毓山

新疆北新路桥集团股份有限公司，新疆乌鲁木齐，830002；

**摘要：**本文以某大桥为研究对象，对大跨度钢桁拱桥在移动列车荷载作用下的冲击系数进行了研究。分别采用有限元软件 ABAQUS 2022 建立了车桥耦合振动模型，以及多体动力学软件 SIMPACK 2022 对 CRH2 型列车进行了动力学仿真，并将两种模型进行集成，对不同速度和单线/双线运行条件下的车桥动力相互作用进行了仿真模拟。结果表明 SIMPACK 和 ABAQUS 联合仿真是研究车辆-桥梁动力相互作用的有效方法。本文主要研究结论为：挠度和应力冲击系数随列车速度的增加而增大，其中主跨挠度系数大于边跨，应力冲击系数在不同桥梁构件间存在显著差异，其中边跨的下弦杆和主跨的系杆分别达到最高值。除此之外，尽管桥梁的挠度影响系数符合设计规范，但应力影响系数超过了规定值，建议在类似桥梁的设计中应仔细考虑应力放大，以确保其运营安全。

**关键词：**桥梁工程；耦合振动；现场实测；冲击系数

**DOI：**10.69979/3029-2727.25.07.047

## 引言

钢桁拱桥以其强度高、重量轻、跨度大、美观等优点在桥梁建设中得到广泛应用，随着桥梁跨度的不断增大和列车速度的不断提高，大跨度桥梁与高速列车的相互作用问题日益受到关注。高速列车运行产生的动力荷载对桥梁具有重要影响，影响结构的安全性和经济性。冲击系数是一个动力放大系数，在设计标准中将其定义为结构动力响应与静力响应的比值，反映了冲击效应的大小。

以往对冲击系数的研究主要集中在简支梁桥、斜拉桥、悬索桥和其他类型的桥梁上，对大跨度钢桁拱桥的研究相对有限。此外，现有的研究大多集中在桥梁整体的整体冲击系数上，而对桥梁的局部冲击系数关注度不足。由于钢桁拱桥由许多单独的构件组成，其中一些构件上的冲击效应与桥梁的局部动力特性密切相关。因此，深入研究大跨度钢桁拱桥的整体和局部冲击性能是十分必要的。

本文以某大桥为研究对象，基于多体动力学软件 SIMPACK 和有限元软件 ABAQUS 2022，建立了一个车桥耦合动力学模型。该模拟旨在创建一个可靠的模型，通过对模拟结果与现场实测数据，验证了模型的可靠性及预测精度。

## 1 工程概况

某大桥为下承式双线桥，轨距 4.6 米，设计列车速

度 250km/h，是南钦上的重点控制性工程，主桥结构为跨越某江的三跨连续钢桁拱桥，跨径布置为 132 + 276 + 132 米，如图 1 所示，桥梁横向布置两个主桁，每个主桁由一个 N 形桁架组成，桁架宽度为 15 m，除靠近中心支座的两个节段长 15 m 外，其余节段长均为 12 m，边跨平均桁架高度为 16 m，中跨高比为 1/4.759，拱顶桁架高度为 9 m，主桁架采用全焊接节点，上下弦杆、中跨系杆、腹杆采用箱形截面，吊杆焊接成六边形截面。

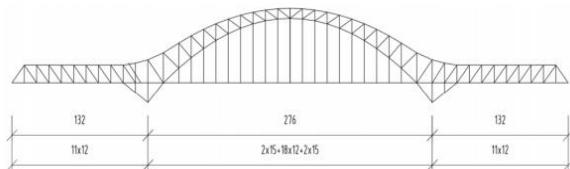


图 1 某大桥布置图

## 2 现场测试

### 2.1 模态测试

桥梁的固有频率和振型是分析动态响应的基础。测试采用 JM3872G 型速度传感器（扬州晶明生产）与 941 型拾振器组合方案，两类设备分别负责超低频振动（0.072Hz~100Hz）与常频段（1Hz~80Hz）的数据采集。测点布置为沿主拱肋每 6 米布置 1 个速度传感器，桥面则按横向对称分布 48 个测点（图 2a）。

数据采集系统采用 4G 无线传输与 GPS 同步技术，确保 48 个通道的相位一致性。每次采样持续 20 分钟，共完成 3 组独立测试。原始速度信号经傅里叶变换和峰

值拾取法处理，提取前四阶固有频率。

## 2.2 动态位移测试

为捕捉列车过桥时的瞬时变形，采用 BJQN-L 激光挠度测量系统（北京雷图）。该系统基于激光干涉原理，通过安装在桥墩上的发射器与桥面反射靶标构成测量网络，分辨率达 0.01mm，最大量程 500m。测试前对设备进行双轴校准：首先在静态条件下以水准仪为基准调整光路，随后通过施加 5kN 标准砝码验证线性度，误差控制在 ±0.05mm 内。现场实测示意图如图 2 所示。



图 2 现场实测示意图

## 3 车桥耦合数值模拟

### 3.1 列车动力学建模

本研究以 CRH2 型高速动车组为原型，在 SIMPACK 2022 中构建了如图 3 所示的精细化多体动力学模型。该模型总长度 49.2 米，动车轴重 14.2 吨，拖车轴重 11.8 吨。车体采用刚性梁单元模拟，质量参数基于实际称重数据设定：动车车体质量 42.6 吨，拖车 38.4 吨，转向架质量分别为 3.8 吨（动力转向架）与 3.2 吨（非动力转向架）。

模型共设 31 个自由度，包括车体垂向、横向、纵向位移及俯仰、摇头、侧滚运动（6 自由度），每台转向架对应 6 自由度，轮对则考虑横向与垂向自由度（图 4）。轮轨接触采用 Hertz 非线性弹性接触理论，计算轮轨接触斑面积时，设定钢轨曲率半径 300mm，车轮踏面锥度 1:40，接触刚度系数  $1.1 \times 10^9 \text{ N/m}$ 。轨道不平顺通过德国低干扰谱模拟，空间频率范围 0.01–2.0 cycles/m，垂向幅值标准差 0.8mm，横向 1.2mm，以反映实际线路的随机激励特性。

为验证模型准确性，在仿真中复现了 CRH2 型动车组空载与满载工况下的轮轨力实测数据，最大接触力误差小于 7%。该模型能够精确反映列车在高速运行时的动

态响应，为车桥耦合分析提供可靠输入。

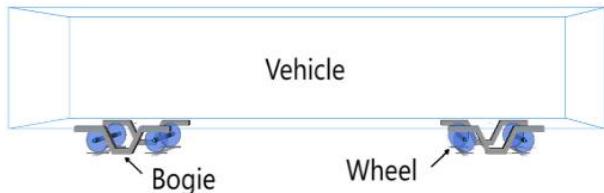


图 3 列车动力学模型

### 3.2 桥梁有限元模型

基于桥梁设计图纸，采用 ABAQUS 2022 建立三维精细化有限元模型（图 5）。模型共包含 49,851 个节点和 43,999 个单元，主桁杆件采用 B31 梁单元模拟，吊杆选用 T3D2 桁架单元，桥面正交异性板则通过 S4R 壳单元建模。材料参数严格参照 Q345 钢材特性设定：密度 7850 kg/m<sup>3</sup>，弹性模量 206 GPa，泊松比 0.3，并引入 Rayleigh 阻尼（比例系数 α = 0.05, β = 0.005）以模拟结构能量耗散。

边界条件方面，桥墩底部采用固结约束，主拱脚部设置弹性支座，刚度参数根据实测反力值调整为纵向  $3 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 、横向  $2 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 。网格划分采用自适应尺寸控制，主桁杆件网格尺寸为 0.5 米，桥面局部加密至 0.2 米以捕捉应力梯度。特别地，焊接节点区域通过 MPC 多点约束模拟焊缝传力特性，避免应力失真。

模型验证阶段，利用 Lanczos 法提取前四阶模态频率，与实测结果误差小于 4.2%。第三阶扭转频率（0.709Hz）的仿真值略低于实测值（0.726Hz），推测因未完全模拟桥面铺装层的附加刚度。通过对称主拱跨中位移云图（图 5b），发现最大应力集中于下弦杆与系杆连接处，与现场裂纹观测位置一致，进一步验证了模型的工程适用性。

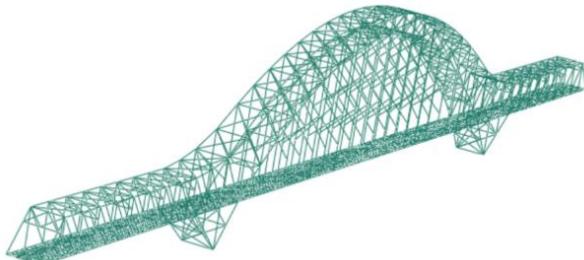


图 4 桥梁分子力学模型

### 3.3 车桥耦合模型

车桥耦合模型的集成是实现动态相互作用分析的关键步骤，其核心在于桥梁柔性体与车辆多体模型的精确对接。本研究通过 ABAQUS 与 SIMPACK 的联合仿真平

台，构建了双向数据交互的耦合系统（图 5），具体流程如下：

### 3.3.1 柔性体数据转换

首先在 ABAQUS 中对桥梁进行子结构分析，导出包含质量矩阵、刚度矩阵及节点坐标的.inp 文件。通过 SIMPACK 内置的 FMI (Functional Mock-up Interface) 接口，将.inp 文件转换为柔性体信息文件(.fbi)，保留前 20 阶模态参与因子以平衡计算效率与精度。转换过程中，对主桁节点进行重编号优化，确保与轨道坐标系的匹配。

### 3.3.2 轨道系统建模

轨道模型采用 60 kg/m UIC60 钢轨，轨距 4.6 m，基于 SIMPACK 的 Flextrack 模块构建柔性轨道。钢轨离散为每 0.25 m 一个节点，扣件系统简化为线性弹簧-阻尼单元，垂向刚度 60 MN/m，横向刚度 25 MN/m。轨道不平顺采用德国低干扰谱模拟，通过逆傅里叶变换生成时域激励信号，空间波长覆盖 0.5~50 m，垂向幅值标准差控制在 0.5 mm 以内。

### 3.3.3 耦合接口实现

桥梁与轨道通过扣件力元动态连接，每个扣件节点设置 6 自由度力传感器，实时采集轮轨力并映射至桥梁对应节点。数据交换采用显式-隐式混合步长策略：车辆系统采用 0.005 s 显式步长，桥梁系统采用 0.01 s 隐式 Newmark- $\beta$  法，通过 TCP/IP 协议实现跨软件时钟同步。为降低计算量，对非关键区域（如桥面附属设施）进行 Guyan 缩聚，自由度缩减率达 67%。

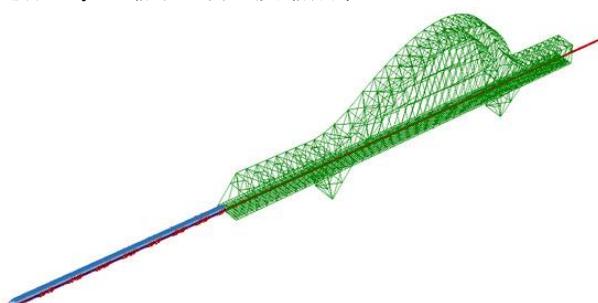


图 5 车桥耦合模型

## 4 桥梁冲击系数分析

### 4.1 位移冲击系数

通过对比 180 km/h 单线行车工况下的仿真与实测数据（图 8），主跨中动态位移峰值模拟值和实测值分别为 9.175 mm 与 8.717 mm，偏差为 5.25%；边跨跨中位移模拟值和实测值分别为 5.971 mm 与 6.180 mm，

偏差为 9.46%。尽管存在局部差异，但位移时程曲线的整体趋势一致，例如振动衰减速率与峰值出现时间均高度吻合，验证了模型的可靠性。主跨位移显著高于边跨，主要因其跨度较大（276 m）且竖向刚度较低，而边跨因靠近桥墩约束，刚度贡献更为明显。主跨与边跨的挠跨比分别为 1/31,662 和 1/25,483，均远低于规范限值 1/1500，表明桥梁竖向刚度满足设计要求。

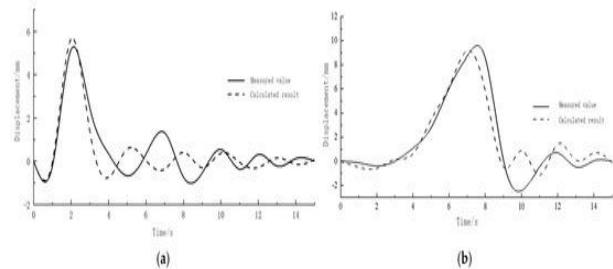


图 6 主跨与边跨跨中位移时程曲线（180 km/h）：(a) 边跨跨中位移；(b) 主跨跨中位移

根据欧洲规范 EN 1991-2，位移冲击系数定义为动态位移与静态位移的比值。本研究中采用保守参数（三倍横梁间距 9 m）计算规范限值为 1.334。表 2 列出了不同车速下单双线行车的位移冲击系数。结果显示，主跨跨中系数从 140 km/h 的 1.035 线性增长至 240 km/h 的 1.059，增幅约 2.3%；边跨跨中系数从 1.030 增至 1.052。车速提升导致轮轨激励频率接近桥梁固有频率，例如 200 km/h 时激励频率 0.6 Hz 与桥梁第二阶竖向频率 0.601 Hz 接近，引发轻微共振效应，使得系数增长率突增至 0.8%。

单双线行车的整体差异较小（主跨跨中系数差异不足 0.1%），但边跨 1/4 截面在双线工况下系数增幅达 0.8%，表明横向荷载分布会加剧局部扭矩效应。所有工况下位移冲击系数均低于规范限值 1.334，验证了桥梁设计的保守性与安全性。

### 4.2 应力冲击系数分析

桥梁构件的应力冲击系数反映了动态荷载对局部结构的放大效应。本研究采用移动荷载法与车桥耦合仿真法进行对比分析，验证了联合仿真技术的优势。结果显示，吊杆的动态应力幅值最高，例如吊杆 C13E13 达到 82 MPa，其次是下弦杆 E4E5 (63 MPa)，而腹杆 E5A4 的应力最小 (28 MPa)。耦合仿真结果与实测数据的差异小于 12%，而传统移动荷载法的偏差高达 30%。这表明，传统方法因忽略车桥相互作用和轨道不平顺的影响，精度明显不足。

随着车速提升，不同构件的应力冲击系数呈现显著变化。边跨下弦杆（E4E5）的系数从 140 km/h 的 1.312 增至 240 km/h 的 1.444，增幅约 10%。主跨系杆（C12C13）则从 1.267 增至 1.314，增幅 3.7%。吊杆的表现较为特殊：短吊杆（长度 5 m）的系数为 1.314，而长吊杆（12 m）降至 1.207，降幅达 8.1%。这一现象说明，杆件长度增加会通过动态能量耗散削弱应力放大效应。值得注意的是，边跨下弦杆的系数远超规范值 1.334，需在设计阶段重点关注其强度验算。

双线行车对局部构件的应力分布影响显著。边跨下弦杆 E4E5 的系数从单线工况的 1.412 增至双线工况的 1.444，系杆 C13E13 则从 1.298 增至 1.314。这表明横向荷载分布会加剧这些区域的应力集中。相反，主跨上弦杆 A21A22 的系数在双线工况下从 1.092 降至 1.076，可能因荷载对称性降低了局部振动。此外，短吊杆对行车模式更为敏感，其系数波动幅度达 4.5%，而长吊杆仅变化 1.2%，进一步验证了杆件长度对动态响应的调节作用。

## 5 结论

(1) 随着列车速度的提升，桥梁的位移冲击系数呈现明显增长趋势。主跨跨中位移冲击系数始终高于边跨，例如在 240 km/h 车速下，主跨系数达到 1.063，而边跨仅为 1.050。这种差异主要由主跨跨度更大、竖向刚度较低的特性导致。单双线行车对整体位移系数的影响较小（差异不足 0.1%），但在边跨 1/4 截面等局部区域，双线荷载会引发额外扭矩效应，导致系数增幅达 0.8%。因此，设计中应以主跨跨中位移系数为控制标准，

并适当加强边跨抗扭构造。

(2) 与传统移动荷载法相比，本研究的车桥耦合仿真方法能够更精确地反映桥梁动态响应。例如，吊杆 C13E13 的应力仿真结果与实测数据偏差仅为 8%，而移动荷载法的误差高达 30%。这种精度提升源于模型充分考虑了车桥相互作用、轨道不平顺及轮轨接触非线性等复杂因素。研究证实，耦合仿真技术适用于大跨度桥梁的精细化分析，可为设计优化提供可靠依据。

(3) 不同构件的应力冲击系数差异显著，且随车速增加而上升。边跨下弦杆（E4E5）的系数高达 1.444，远超规范限值 1.334；主跨系杆（C12C13）系数为 1.314，表明局部构件存在显著动态放大效应。双线行车会进一步加剧边跨下弦杆和短吊杆的应力集中，例如边跨下弦杆系数从单线的 1.412 增至双线的 1.444。

## 参考文献

- [1] 于鹏, 余存, 任兆永, 等. 车辆参数对大跨钢管混凝土拱桥车桥耦合振动响应的影响规律研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(01): 118–131.
- [2] 卢波, 王祺顺, 刘红兵. 车桥耦合振动作用下桥面沥青混凝土铺装层力学响应特征研究[J]. 世界桥梁, 2025, 53(02): 73–80.
- [3] 王鹏. 主跨 136m 空间钢桁拱与预应力混凝土梁组合桥受力性能分析[J]. 城市道桥与防洪, 2023, (08): 88–92+12.
- [4] 陆鸿萍. 大跨度钢桁拱桥关键节点及吊杆疲劳性能分析[D]. 沈阳工业大学, 2023.