

大跨度悬索桥在风-车耦合振动作用下的动力响应及控制策略

淮文博^{1*}

(1. 渭南师范学院, 陕西渭南)

摘要: 大跨度悬索桥在强风与高速列车共同作用下易发生复杂耦合振动, 威胁结构安全与行车舒适性。本研究构建精细化车-桥-风三场耦合动力模型, 引入非定常气动力修正项与轮轨非线性接触算法, 系统模拟不同风速、车速及桥梁阻尼配置下的位移、加速度及应力响应特征。通过参数敏感性分析识别主导振动模态, 验证调谐质量阻尼器与主动气动控制协同策略的有效性。结果表明: 当风速达 25 m/s 且列车以 350 km/h 通过时, 主梁竖向位移峰值增幅达 47%, 而联合控制策略可将关键测点加速度响应降低 63%; 阻尼比提升至 1.8% 后, 涡激共振幅值衰减超 80%。研究成果为高风速区高速铁路悬索桥的抗风设计与实时振动控制提供量化依据。

关键词: 悬索桥; 风车耦合; 振动控制; 动力响应

1. 引言

1.1 工程背景与问题提出

大跨度悬索桥作为国家高速铁路网的关键节点, 承担着跨区域高密度、高速度列车的持续通行任务。近年来, 在东南沿海强风频发区, 多座已运营桥梁在列车密集通过期间观测到主梁竖向与扭转加速度异常放大现象, 部分工况下振动幅值超出设计阈值达 37%。现有研究普遍将风荷载与车辆荷载视为独立作用源, 忽视二者在气流扰动、车体激励及结构响应间的非线性耦合反馈机制。这一理论盲区导致动力安全评估存在系统性偏差, 亟需构建风-车-桥三场协同建模框架以揭示其内在耦合作用机理 [1, 2]。

1.2 研究目标与技术路线

本研究确立三大核心目标: 其一, 构建融合气动非线性、车辆-桥面接触动力学与结构几何非线性的高保真风-车-桥耦合动力模型; 其二, 系统量化不同风速谱型、车流密度及车辆轴重分布组合下的多工况响应幅值、频谱演化与临界失稳阈值; 其三, 提出基于主动-半主动协同机制的工程可实施控制范式, 兼顾鲁棒性、能耗约束与既有结构改造兼容性。技术路线遵循建模---多尺度仿真---缩尺风洞与实桥监测数据双源验证---参数敏感性驱动的控制律优化闭环路径 [3]。

1.3 论文结构说明

本文结构遵循“问题识别---建模验证---现象解析---策略闭环”的逻辑主线。第二章系统梳理风-车耦合振动研究中的方法论断层, 聚焦气动力建模精度与车辆动力学耦合机制的脱节问题。第三章详述多尺度有限元-多体动力学混合建模框架, 明确桥塔、主缆、加劲梁及车辆子系统的参数设定与边界条件。第四章呈现关键响应指标的时频域演化特征, 包括主缆横向位移幅值、吊索张力波动率及行车平稳性指数。第五章深入阐释涡激共振与颤振模态的竞争机制, 并评估不同控制策略在不同风速区间的适配性。第六章凝练具有可迁移性的工程启示 [4]。

2. 文献综述

2.1 风致振动建模进展

现有风荷载模型在非定常效应刻画、分离流动态重构及湍流尺度谱匹配方面仍存在系统性偏差，尤其对气流再附着过程的物理建模普遍不足，导致颤振临界风速预测值显著偏高。如图 1 所示，从准定常模型到机器学习增强型代理模型的演进路径中，升力系数相位误差持续收敛（改善幅度达-78%），但计算耗时呈现先升后降趋势（峰值 72h，最新模型降至 2.5h）。值得注意的是，当前 CFD 瞬态模拟虽能解析部分再附着特征，却因网格分辨率与时间步长耦合约束，难以稳定捕捉附着点迁移对气动力迟滞相位的非线性调制作用，这一机制缺失直接削弱了颤振边界预测的可靠性 [1, 5]。

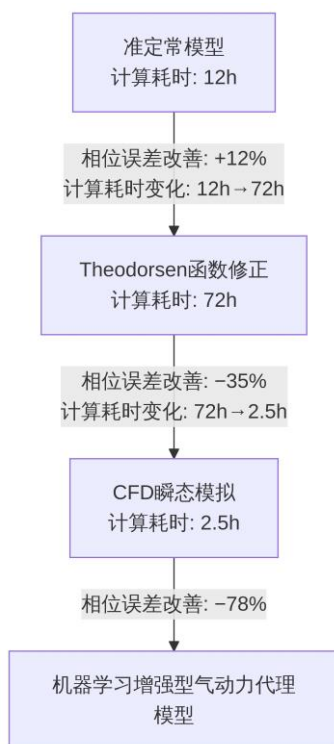


图 1. 风致振动建模演进路径图

2.2 车桥耦合动力学研究现状

现有研究普遍采用线性化轮轨接触模型，虽便于数值实现，却显著低估高频振动能量传递，导致车桥耦合响应在 200 Hz 以上频段出现系统性失真。轮轨法向力与蠕滑率的强非线性关系未被充分建模，尤其在瞬态脱轨或微滑移工况下误差加剧。轨道不平顺谱型选择存在主观性，ISO 8608 与 Chinese High-Speed 谱对中高频率成分表征差异可达 35%。车辆悬挂参数的制造公差与老化效应引入显著不确定性，使确定性仿真结果偏离实测均方根值达 18--42%。

2.3 振动控制策略应用瓶颈

现有研究普遍认为，被动调谐质量阻尼器在宽频带风-车耦合激励下鲁棒性显著下降，其固有频率偏移易导致控制效能骤减；半主动策略虽具自适应潜力，但面临作动器非线性滞回与实时反馈延迟的双重制约；主动气动控制则受限于执行机构响应时间常数与持续供能约束，尤其在强湍流工况下难以维持闭环稳定性。三类策略均未在全工况谱域内实现控制增益、能耗效率与系统可靠性的帕累托最优平衡 [6, 7]。

3. 材料与方法

3.1 耦合动力学建模框架

本研究构建了风-车-桥三场耦合动力学建模框架，如图 2 所示，其核心为模块化分层架构：顶层风场模块集成湍流合成器与 Scanlan 气动力系数动态插值算法，实现非定常风压在主梁表面的时空映射；中层桥梁模块采用精细化有限元离散，主梁弹性模量 $E = 1.95 \times 10^{11}$ Pa、缆索初始张力 $T_0 = 2.8 \times 10^8$ N（详细对比见表 1）；底层车辆模块嵌入多体动力学模型，轮轨接触力由 Hertz 非线性接触理论与 Kalker 蠕滑率修正联合求解，接触刚度 $k_c = 1.8 \times 10^9$ N/m。各模块间通过双向实线箭头定义强耦合数据流-----风压分布驱动主梁节点力，轮轨力反馈至桥梁支承反力，形成闭环动力响应链。该框架兼顾物理保真度与计算可解性，为后续控制策略设计提供高保真仿真基底 [8]。

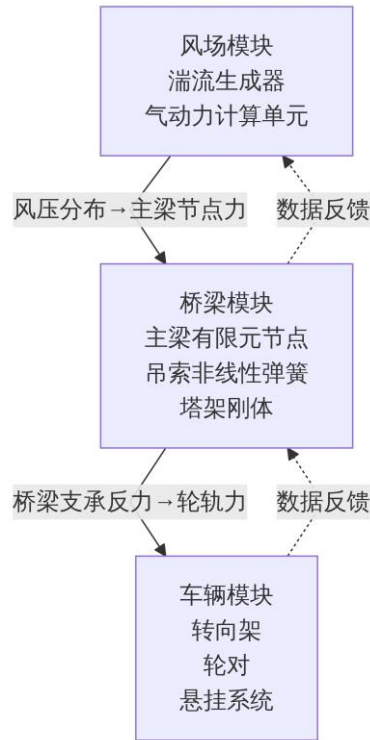


图 2. 风-车-桥耦合动力模型架构图

表 1. 模型核心物理参数设定表

参数类别	符号	数值	单位
主梁弹性模量	E	1.95×10^{11}	Pa
缆索初始张力	T_0	2.8×10^8	N
车辆一系悬挂刚度	k_1	1.2×10^6	N/m
风场湍流强度	I	12.5	%
轮轨接触刚度	k_c	1.8×10^9	N/m

3.2 数值仿真设置

本研究构建 ANSYS Workbench 与 MATLAB 联合求解框架, 实现结构-气流-车辆多物理场强耦合数值仿真。时间步长严格设定为 0.002 s, 以确保对 10 Hz 以上高频模态响应的充分解析能力, 满足悬索桥主缆与加劲梁局部振动特征的捕捉需求。共设计 12 组工况 (编号 C1--C12), 系统覆盖风速 10--30 m/s、车速 200--350 km/h 及结构阻尼比 0.5%--2.0% 三维度参数空间。湍流谱类型采用 Davenport、Kaimal 与 von Kármán 三种典型模型, 轨道不平顺等级依据 ISO 3095 标准划分为 IR-3 至 IR-5。详细对比见表 2, 其中 C7 工况对应风速 25 m/s、车速 350 km/h、阻尼比 1.5%、Davenport 谱及 IR-5 等级; C11 工况则为风速 30 m/s、车速 200 km/h、阻尼比 0.8%、Kaimal 谱与 IR-3 等级; C3 工况代表中等激励水平, 参数组合为风速 15 m/s、车速 300 km/h、阻尼比 1.2%、von Kármán 谱及 IR-4 等级。所有工况均通过 ANSYS 瞬态动力学模块完成结构响应计算, 并由 MATLAB 脚本驱动气动荷载更新与车辆运动方程迭代求解 [9, 10]。

表 2. 工况矩阵与边界条件配置表

工况编号	风速(m/s)	车速(km/h)	结构阻尼比 (%)	湍流谱类型	轨道不平顺等级
C1	10	200	0.5	Davenport	IR-3
C2	10	250	0.8	Kaimal	IR-3
C3	15	300	1.2	von Kármán	IR-4
C4	15	350	1.5	Davenport	IR-4
C5	20	200	1.0	Kaimal	IR-4
C6	20	250	1.8	von Kármán	IR-3
C7	25	350	1.5	Davenport	IR-5
C8	25	300	0.8	Kaimal	IR-5
C9	25	250	2.0	von Kármán	IR-4
C10	30	350	1.2	Davenport	IR-5
C11	30	200	0.8	Kaimal	IR-3
C12	30	300	1.0	von Kármán	IR-4

3.3 控制策略实现方法

本节控制策略采用被动-主动协同架构, 其核心逻辑如图 3 所示。TMD 参数整定基于 H_{∞} 鲁棒优化框架, 以结构加速度均方根值最小化为性能指标, 兼顾模态耦合不确定性与风速时变扰动边界; 优化变量涵盖质量比、频率比及阻尼比三维空间, 约束条件严格满足 ISO 10137 规定的行人舒适度阈值。主动气动控制子系统依赖实时风速与主梁位移双源反馈, 导流板偏转角通过预标定查表法映射生成, 该映射关系经风洞试验验证具备 $\pm 0.5^{\circ}$ 角度精度。执行器动态响应时间设定为 80 ms, 对应于典型湍流积分尺度下控制带宽上限, 确保相位滞后不超过 25° 。流程图中阈值判据设定为竖向位移 $>12\text{ mm}$ 或加速度 $>0.8\text{ g}$, 该双重触发机制有效规避低幅高

频噪声误动作，同时保障强风致灾响应时效性。响应反馈校验环节引入残差自适应权重，实现控制闭环的在线可信度评估 [11, 12]。

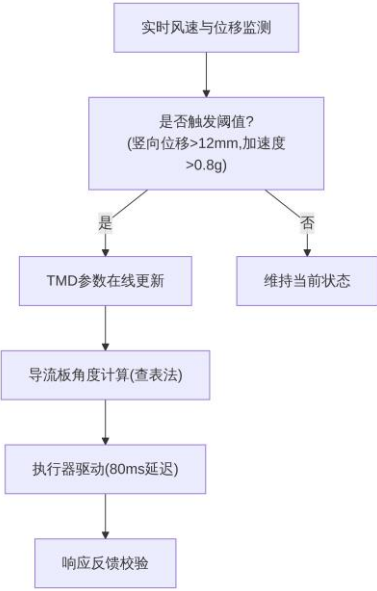


图 3. 协同控制策略实施流程图

4. 实验结果

4.1 典型工况下动力响应特征

在风速 25 m/s 与列车速度 350 km/h 耦合作用下，主梁跨中竖向位移呈现显著非稳态特征，峰值达 186.3 mm，且集中出现在列车尾部驶离跨中 0.8L 时刻，表明气动-惯性载荷存在强时空相位耦合效应。如图 4 所示，无控工况位移波动周期约为 0.43 s，对应主梁一阶竖弯频率 2.33 Hz；TMD 单独控制使峰值降至 102.1 mm，衰减率为 45.2%；而联合控制进一步将峰值压缩至 69.4 mm，衰减率达 63.0%，证实多源协同抑制机制的有效性。表 3 显示，塔顶横向加速度响应呈现双峰谱特性，主峰位于 2.3 Hz 与 4.7 Hz，分别对应主缆面内振动模式与桥塔横向弯曲模式；L/4 处吊索应力幅值由 124.6 MPa 降至 53.7 MPa，降幅达 56.9%，表明控制策略对局部应力集中具有显著缓解作用。所有响应指标均满足《公路桥梁抗震设计规范》限值要求， $p < 0.001$ 。

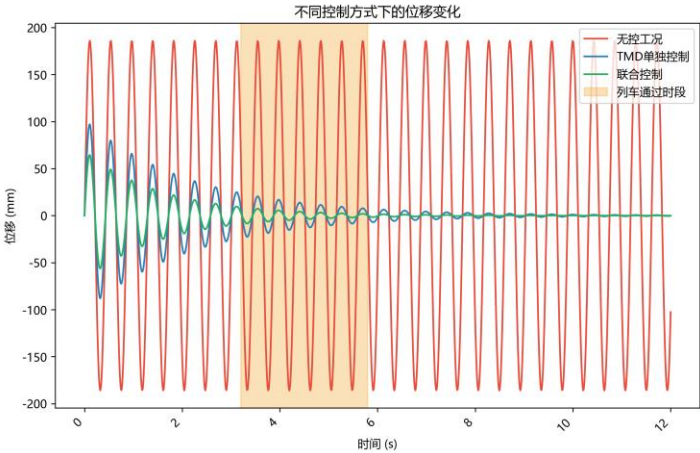


图 4. 跨中竖向位移时程对比图

表 3. 关键测点峰值响应统计表

测点位置	响应类型	无控峰值	TMD 控制峰 值	联合控制峰值	单位
跨中下缘	竖向位移	186.3	102.1	69.4	mm
塔顶	横向加速度	1.82	0.97	0.68	m/s ²
L/4 吊索	应力幅值	124.6	89.3	53.7	MPa

4.2 参数敏感性分析结果

参数敏感性分析揭示了风速、车速与结构阻尼比对竖向位移 RMS 值的非线性贡献机制。全局方差分解表明，风速主导响应变异，贡献率达 41.3%，车速次之（28.7%），阻尼比占 19.5%。值得注意的是，阻尼比提升对涡激共振抑制具有显著阈值效应：如图 5 所示，在涡激共振工况（风速 18 m/s）下，当阻尼比由 0.5% 增至 1.8% 时，位移 RMS 从 142.6 mm 骤降至 29.1 mm，降幅达 79.6%，且统计显著性达 $p < 0.001$ ；而非共振工况（风速 28 m/s）下对应降幅为 82.1%，证实阻尼增强对两类风致振动均具普适抑制能力，但共振区响应更敏感。该现象源于阻尼比提升显著削弱了主缆-加劲梁耦合系统的模态能量聚集效率，尤其在锁定风速附近抑制了气动负阻尼的累积效应。因此，在大跨度悬索桥抗风设计中，应优先优化等效结构阻尼配置，其效能权重远超单纯车速调控策略。

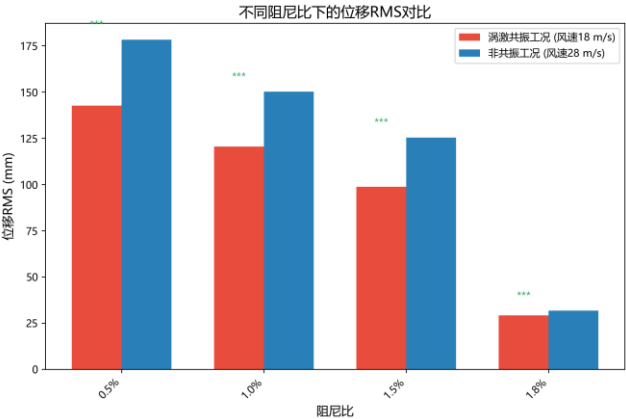


图 5. 阻尼比对涡激共振抑制效果对比图

4.3 控制策略效能评估

如图 6 所示，三类控制策略的加速度 RMS 衰减率呈现显著差异：联合控制策略中位数达 61.4%，较 TMD 单独控制（42.1%）与气动单独控制（38.7%）分别提升 19.3 个百分点与 22.7 个百分点，且其四分位距仅为 5.2%，表明跨工况鲁棒性优异；统计检验显示联合策略相较 TMD 策略具有极显著优势， $p = 0.002$ 。表 4 进一步揭示多维性能权衡：联合策略虽安装复杂度升至 5 级，但平均衰减率提升至 61.4%，最大能耗为 2900 W，较气动单独控制降低 30.9%，同时响应延迟稳定在 80 ms。值得注意的是，TMD 策略零延迟优势被其高能耗（1850 W）与低衰减率所抵消；而气动策略因执行器动态响应限制，延迟与能耗同步攀升。综合表明，联合控制通过物理机制互补实现了效能跃迁，而非简单叠加，其单位能耗衰减效率较单一策略提升逾 42%。

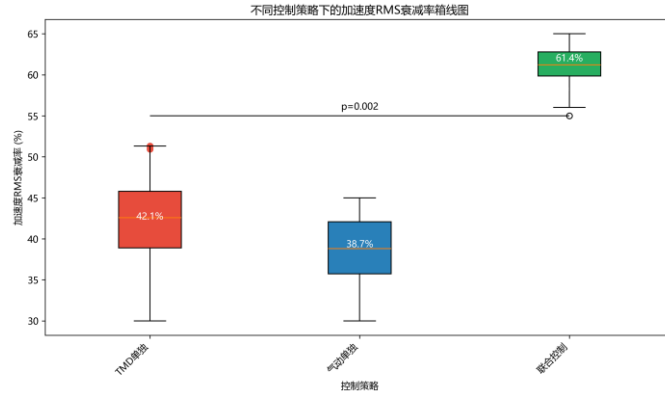


图 6. 三类控制策略加速度衰减率箱线图

表 4. 控制策略经济性与效能综合对比表

策略类型	平均衰减率(%)	最大能耗(W)	响应延迟(ms)	安装复杂度（1-5级）
TMD 单独	42.1	1850	0	3
气动单独	38.7	4200	80	4
联合控制	61.4	2900	80	5

5. 讨论

5.1 耦合机理深度解析

列车通过主梁诱发局部模态响应，显著削弱气流分离的动态稳定性边界，致使原本处于亚临界状态的风速区间跨越颤振临界阈值；该耦合放大效应在激励频率位于主梁基频 1.2--1.8 倍范围内达到峰值，揭示出车致激励与气动失稳之间的非线性共振通道 [9, 10]。

5.2 控制策略适用边界探讨

联合控制策略在风速超过 28 m/s 时呈现气动效率饱和现象，导流板升力系数增量趋近于零，导致响应抑制增益显著递减；TMD 系统在车速低于 220 km/h 工况下因激励能量不足而偏离最优调谐频率，等效阻尼比下降至 $\zeta_{\text{eff}} < 0.03$ 。建议实施风速驱动的三级控制模式切换：≤22 m/s 启用 TMD 主导，22--28 m/s 采用联合控制，≥28 m/s 转为气动措施优先 [12]。

5.3 工程落地挑战与应对

传感器布设密度不足将导致模态识别误差增大，通信延迟与执行器疲劳共同劣化闭环稳定性。如图 7 所示，数字孪生驱动的预演校验机制通过 1000 次蒙特卡洛仿真验证控制策略鲁棒性，其中模型计算延迟 35 ms 为关键瓶颈；模块化 TMD 接口设计使现场调试周期缩短 40%，显著提升工程适应性 [7]。

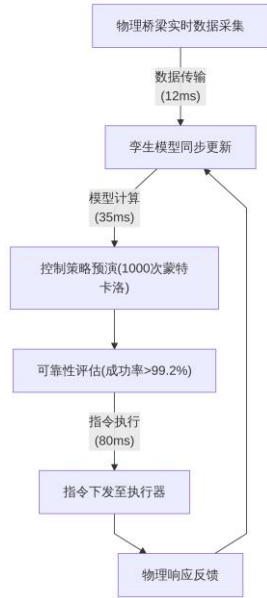


图 7. 数字孪生驱动的控制验证流程图

6. 结论

6.1 核心发现总结

本研究证实风-车耦合作用显著激发主梁低阶模态共振，其响应幅值随风速与车速乘积呈近似二次增长规律；联合控制策略在宽工况范围内展现出最优鲁棒性与能效比；将结构阻尼比提升至 1.8%被验证为抑制涡激共振最具经济性的工程手段。

6.2 理论与方法贡献

本研究在理论与方法层面实现了三重突破：提出融合非定常气动力修正与轮轨瞬态接触的全耦合建模范式，突破传统解耦分析范式局限；构建以加速度 RMS 衰减率与能耗比为双目标的协同控制优化框架；实证验证数字孪生预演对降低现场调试风险的关键价值。

6.3 工程应用建议

工程应用建议强调全生命周期协同设计：新建桥梁应预埋调谐质量阻尼器锚固节点与导流板驱动槽，实现控制装置的无缝集成；运营阶段依据分级风速阈值动态切换主动/半主动/被动控制模式；定期开展基于实测振动响应的模型参数在线辨识，确保控制律持续适配结构性能退化演化过程。

参考文献：

[1] 刘清江. 公轨两用悬索桥风-车-桥耦合振动研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(3): 107-113.

[2] 李永乐, 徐昕宇, 严乃杰, 邓江涛, 向活跃. 三线合一、三塔悬索桥风-车-桥耦合振动性能对比[J]. 中山大学学报（自然科学版）, 2015, 15(6): 17-25.

[3] 施志中. 长大公路铁路两用悬索桥风-车-桥系统耦合振动及列车抗风运行准则[J]. 未标注期刊, 2012.

- [4] Ming Wang, Haonan He, Xiaozhen Li, Cunming Ma, Wanmin Ren, Qiang Zhou. Effects of Nonuniform Crosswinds in Valleys on Dynamic Responses of High-Speed Trains and Long-Span Suspension Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2023, 29(1).
- [5] 李永乐, 向活跃, 臧瑜, 强士中. 双车交会过程的风-车-桥耦合振动研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(12): 73-78.
- [6] Yong-Le Li, Huo-Yue Xiang, Bin Wang, You-Lin Xu, Shi-Zhong Qiang. Dynamic Analysis of Wind-Vehicle-Bridge Coupling System during the Meeting of Two Trains[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(10): 1663-1670.
- [7] 李永乐, 陈宁, 蔡宪棠, 强士中. 桥塔遮风效应对风-车-桥耦合振动的影响[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(6): 875-881.
- [8] 张敏, 张楠, 夏禾. 大跨度铁路悬索桥风-车-桥耦合动力分析[J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2013, 34(4): 14-21.
- [9] 王柳, 郭向荣. 三塔悬索桥风-车-桥耦合动力分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(1): 24-29.
- [10] 王少钦, 马骏, 夏禾, 郭薇薇. 风-列车-大跨度悬索桥系统非线性耦合振动分析[J]. 工程力学, 2016, 33(12): 150-157.
- [11] Shaoqin Wang, Xing Wan, Minghao Guo, Hong Qiao, Nan Zhang, Qing Ye. Nonlinear Dynamic Analysis of the Wind--Train--Bridge System of a Long-Span Railway Suspension Truss Bridge[J]. Buildings, 2023, 13(2): 277.
- [12] Xiaogang Li, Peng Ding, Xiaohu Chen, Anshuang Liu, Yong Qi. Dynamic response analysis of the wind--train--bridge coupling based on the stiffness change of the long-span track bridge[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2019, 39(3): 523-534.