

支座刚度折减对雨棚车致加速度响应影响研究

李建祥¹, 陈作银², 刘少华², 彭光达², 张玉彬³, 周大兴⁴, 孙玉龙⁴, 江维洪⁵, 段文红⁵,
许维炳¹

¹北京工业大学建筑工程学院, 北京

²北京国道通公路设计研究院股份有限公司, 北京

³中国铁路北京局集团有限公司北京工务段, 北京

⁴中铁建设集团有限公司, 北京

⁵大理大南高速公路有限公司, 云南 大理

收稿日期: 2025年4月19日; 录用日期: 2025年5月11日; 发布日期: 2025年5月21日

摘 要

为探究支座刚度折减对铁路站房雨棚车致加速度响应的影响规律, 本文以某典型铁路站房为研究对象, 建立了考虑支座刚度折减的列车-铁路站房耦合动力响应分析方法, 并基于实测数据验证, 在此基础上探究了支座刚度折减对雨棚车致加速度响应的影响规律。研究表明: 本文提出的列车-铁路站房耦合动力响应分析方法可以有效模拟高速列车过站时引起的加速度响应, 分析结果与实测结果的最大误差仅为10.91%; 支座刚度折减导致雨棚各测点加速度响应增大, 其中跨中加速度响应大于端部, 且第1跨各测点的加速度响应大于第2跨。

关键词

支座刚度折减, 雨棚, 加速度响应

Study on the Effects of Bearing Stiffness Reduction on the Acceleration Response of Canopy

Jianxiang Li¹, Zuoyin Chen², Shaohua Liu², Guangda Peng², Yubin Zhang³, Daxing Zhou⁴,
Yulong Sun⁴, Weihong Jiang⁵, Wenhong Duan⁵, Weibing Xu¹

¹The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

²Beijing Guodaotong Highway Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing

³Beijing Engineering Section, China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing

⁴China Railway Construction Group Co, Ltd., Beijing

⁵Dali Dannan Expressway Co., Ltd., Dali Yunnan

文章引用: 李建祥, 陈作银, 刘少华, 彭光达, 张玉彬, 周大兴, 孙玉龙, 江维洪, 段文红, 许维炳. 支座刚度折减对雨棚车致加速度响应影响研究[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1056-1062. DOI: 10.12677/hjce.2025.145113

Received: Apr. 19th, 2025; accepted: May 11th, 2025; published: May 21st, 2025

Abstract

To investigate the influence of bearing stiffness reduction on the acceleration response of canopy, this thesis takes a typical railway station as the research object and establishes a coupled train-station dynamic response analysis method that considers bearing stiffness reduction. Field measurement data are used for validation, and on this basis, the influence and mechanism of bearing stiffness reduction on the acceleration responses of the canopy are further examined. The results indicate that the proposed coupled train-station dynamic response analysis method can effectively simulate the acceleration response induced by high-speed trains passing through the station, with a maximum error of only 10.91% compared with the measured results. Furthermore, the bearing stiffness reduction leads to an increased acceleration response at various measurement points on the canopy, with the mid-span acceleration response being greater than that at the ends, and the acceleration response at all measurement points in the first span exceeding those in the second span.

Keywords

Bearing Stiffness Reduction, Canopy, Acceleration Response

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国高速铁路网规模扩大和站房客流量大幅增长,大型铁路站房作为综合交通枢纽核心载体,其结构安全性与舒适性问题的日益受到重视。列车过站时,站房结构的振动特性直接影响着其使用性能及旅客体验。因此,铁路站房致动力响应研究已成为国内外学者关注的热点[1][2]。

Cui 等人[3]将高铁站房与轨道结构视为一个耦合系统,研究了在不同参数条件下动载荷作用时的轨道力学性能和车站动力响应规律;Xia 等人[4]通过理论分析和现场实验探究了高速列车与站房结构之间的动力相互作用,建立仿真模型计算了站房结构的动态挠度、横向振幅、横向和垂直加速度、横向桥墩振幅以及列车响应,并验证了所提出的分析模型和求解方法。Zhang 等人[5]提出了一种包含列车、轨道和高铁站房的频域模型来分析大型高铁站房结构的振动,以车体加速度、钢轨位移、道碴加速度为关键指标进行参数分析,研究了力传递、振动传递和高铁站房振动。张庆东等人[6]以武汉站为例,对站厅层开展了现场振动实测,得出了站厅层竖向和水平方向的振动响应规律以及振动频率的衰减规律。郭向荣等人[7]以某典型高架车站为原型建立列车-轨道-车站系统耦合振动模型,研究了在不同车速和结构参数下的动力响应,结果表明增加承轨层楼板厚度能显著减小车站结构的动力响应,而其他结构参数对动力响应的影响较小。许暮迪等人[8]采用 Matlab 和 Ansys 建立了某典型“桥建合一”型高架车站的列车-车站的耦合模型,进而基于该模型研究了车速、站房结构参数对站房振动舒适性的影响。

既有成果多聚焦于车速、轨道等参数对铁路站房致动力响应规律的影响,对支座这一关键传力构件的影响机理尚未形成系统性结论。鉴于此,本文以某铁路站房为研究对象,建立 CRH2 型高速列车模型与铁路站房精细化模型,提出了列车-铁路站房耦合动力响应分析方法,并基于实测数据进行验证,

在此基础上重点探究支座刚度折减对铁路站房雨棚结构车致加速度响应的影响。

2. 分析方法

采用 Matlab 编写 28 个自由度的列车模型, 并利用 Ansys 软件建立某典型铁路站房数值仿真三维模型, 通过 Newmark- β 法实现列车与铁路站房之间的耦合作用, 以此建立列车-铁路站房耦合动力响应分析方法, 并基于实测数据验证。

2.1. 列车模型

根据本次研究选取铁路站房的线路特点, 选取 CRH2 型列车进行分析。每节列车包含 1 个车体, 2 个转向架, 2 组轮对组成。将单节列车视为独立单元, 对列车的横向和竖向振动、侧滚和点头转动振动进行考虑, 将列车简化为 28 个自由度($2 \times 8 + 4 \times 3$), 其中列车车体以及 2 个转向架简化为由 4 个自由度组成的刚体, 单个车轮由 2 个自由度刚体组成, 如图 1 所示。

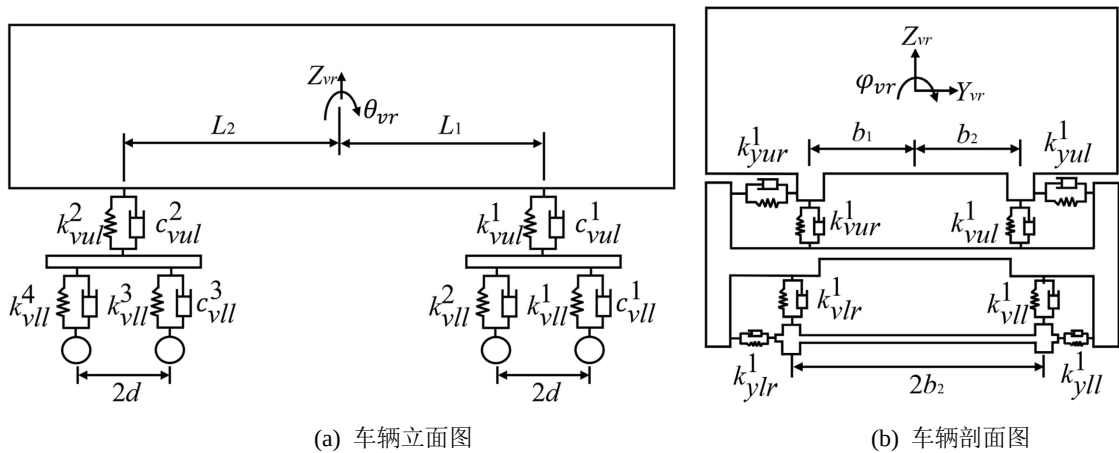


Figure 1. Calculation sketch of the train

图 1. 列车计算简图

列车运动方程如式(1)所示, 程序提供了列车的整体质量矩阵、整体阻尼矩阵和整体刚度矩阵, 并采用 Lagrange 法进行推导。

$$M_v \ddot{X}_v + C_v \dot{X}_v + K_v X_v = F_v \quad (1)$$

式中, M_v 、 C_v 、 K_v 分别为 CRH2 型列车的质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵, $\ddot{X}_v$ 、 $\dot{X}_v$ 、 X_v 分别为列车自由度对应的加速度、速度和位移向量, F_v 为列车所受外力矩阵。

2.2. 铁路站房有限元模型

利用 ANSYS 有限元分析软件建立了某典型铁路站房的三维仿真分析模型(如图 2 所示), 包含精细化的局部构件, 使用子空间迭代法进行模态分析, 确定桥梁主体结构在特定频段内的主要振型, 以便后续耦合使用。建立站房结构在模态空间的动力平衡方程, 如式(2)所示。

$$M_b \ddot{X}_b + C_b \dot{X}_b + K_b X_b = F_b \quad (2)$$

式中, M_b 、 C_b 、 K_b 分别为铁路站房结构的质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵, $\ddot{X}_b$ 、 $\dot{X}_b$ 、 X_b 分别为结构节点的加速度、速度和位移向量, F_b 为列车作用于主梁的荷载向量。

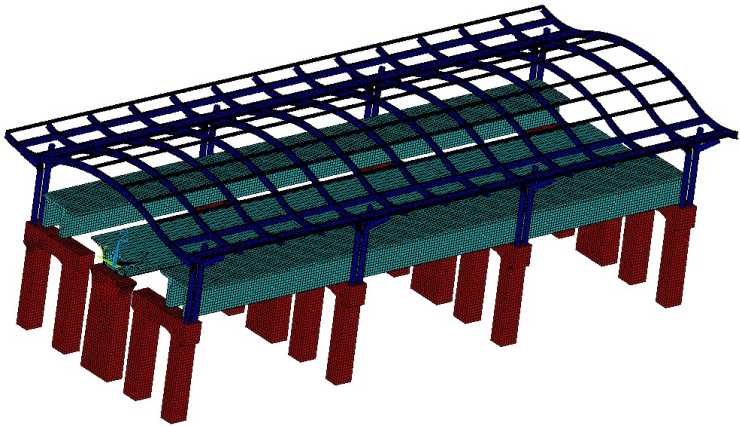


Figure 2. Calculation sketch of the train
图 2. 铁路站房有限元模型

2.3. 列车 - 铁路站房耦合动力响应分析方法

将列车运动方程和铁路站房动力平衡方程联立，考虑列车与铁路站房之间的相互作用，同时考虑轨道平顺度，采用 Newmark- β 法求解，满足微分方程无条件收敛条件，如式(3)所示。

$$\begin{cases} M_v \ddot{X}_v + C_v \dot{X}_v + K_v X_v = F_v \\ M_b \ddot{X}_b + C_b \dot{X}_b + K_b X_b = F_b \end{cases} \quad (3)$$

通过对 CRH2 型列车进行等效模拟以及对高铁站房进行 ANSYS 精细化建模和模态信息提取，基于 Matlab 编制列车 - 铁路站房耦合动力响应分析程序及其数值求解方法，进而提出了列车 - 铁路站房耦合动力响应分析方法。

2.4. 方法准确性验证

将数值模拟数据与实测数据进行对比，以此来验证列车 - 铁路站房耦合动力响应分析方法的有效性。在验证过程中，选取铁路站房雨棚第 1 跨端部和第 2 跨端部的模拟加速度响应和实测加速度响应进行对比，然后将其绘制为加速度时程曲线(图 3)，并将其加速度振幅统计至表 1。

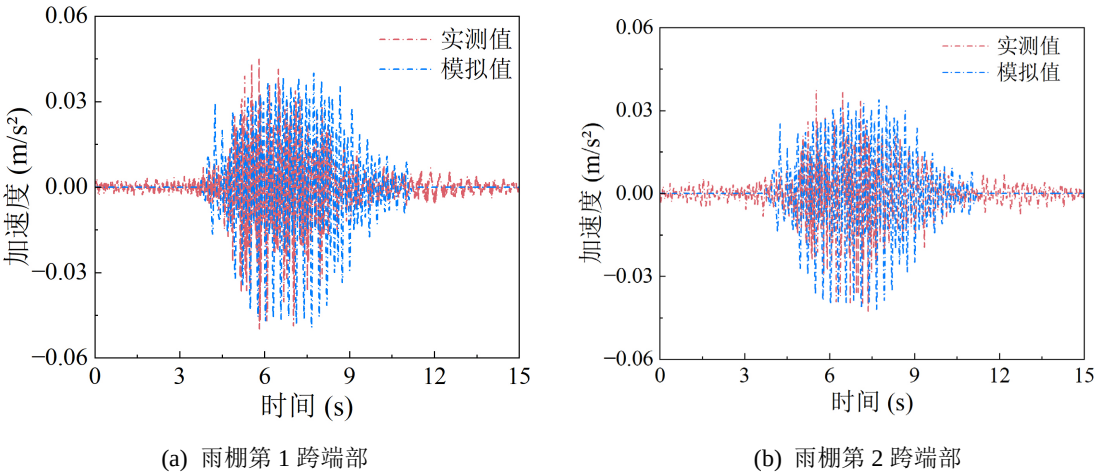


Figure 3. Time-range curve of acceleration at the canopy
图 3. 雨棚加速度时程曲线

Table 1. Vibration amplitudes of the canopy
表 1. 雨棚加速度振幅

测点	实测值(m/s ²)	模拟值(m/s ²)	误差(%)
主梁第 1 跨端部	0.0449	0.0400	10.91
主梁第 2 跨端部	0.0374	0.0340	9.09

由图 3 和表 1 可知,雨棚加速度模拟值与实测值最大误差仅为 10.91%,表明本文提出的列车-铁路站房耦合动力响应分析方法能有效模拟高速列车过站时引起的加速度响应,该方法可用于支座刚度折减对雨棚车致加速度响应的影响研究。

3. 支座刚度折减对雨棚加速度响应影响

基于第 2 部分提出的列车-铁路站房动力响应分析方法,进一步探究了支座刚度折减对铁路站房雨棚车致加速度响应规律的影响。

3.1. 分析测点

在雨棚的关键部位选取了典型加速度测点(共 4 个)进行响应,如图 4 和表 2 所示。

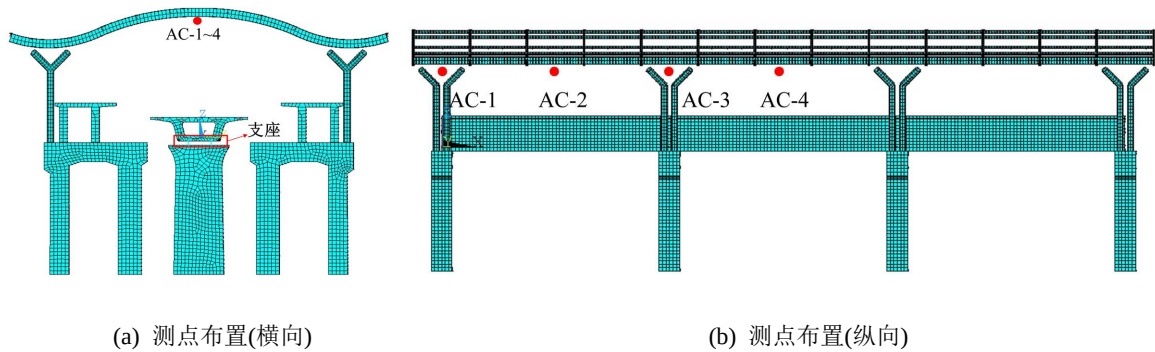


Figure 4. Layout of acceleration points
图 4. 加速度测点布置

Table 2. Measurement points number and location each measurement point
表 2. 各测点编号及位置

测点编号	测点类型	测点位置
AC-1~4	加速度	雨棚: 第 1 跨端部和跨中、第 2 跨端部和跨中

3.2. 支座刚度折减

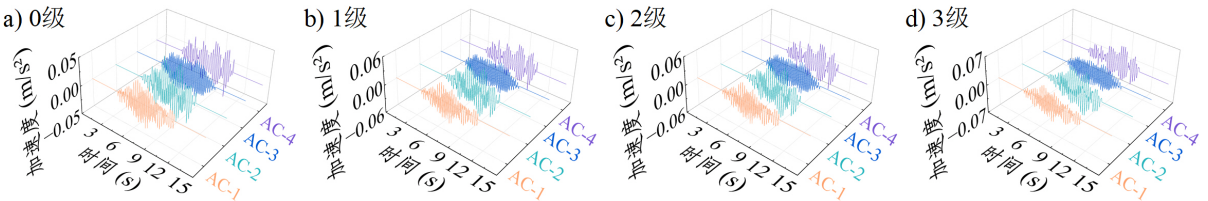


Figure 5. Time-range curve of acceleration at the canopy
图 5. 雨棚加速度时程曲线

将支座初始竖向支撑刚度 k (0 级) 作为基准工况, 依次设定 $0.8k$ (1 级)、 $0.6k$ (2 级)、 $0.4k$ (3 级) 共 4 个支座刚度折减等级, 覆盖了从完好到轻微劣化再到严重损伤的全过程。系统研究支座刚度折减对铁路站房雨棚车致加速度响应的影响。图 5 和图 3 所示给出了雨棚各测点的加速度时程曲线与加速度振幅。

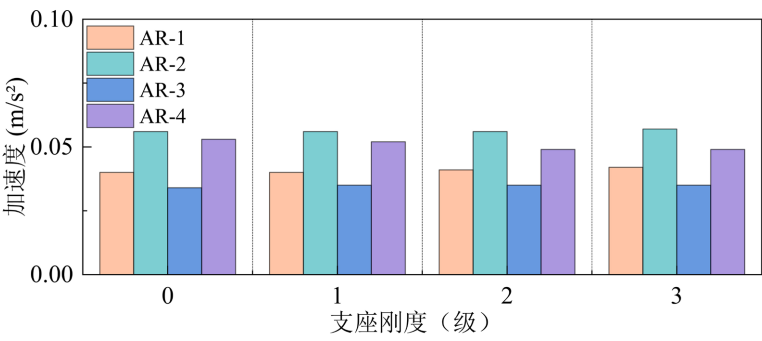


Figure 6. Acceleration amplitude at each measurement point on the canopy
图 6. 雨棚各测点加速度振幅

Table 3. Vibration amplitudes of the canopy
表 3. 雨棚加速度振幅

测点	支座刚度			
	0 级	1 级	2 级	3 级
AC-1 (第 1 跨端部)	0.040	0.041	0.042	0.043
AC-2 (第 1 跨跨中)	0.056	0.057	0.057	0.058
AC-3 (第 2 跨端部)	0.034	0.035	0.035	0.036
AC-4 (第 2 跨跨中)	0.053	0.053	0.054	0.054

由图 5、图 6 和表 3 可知, 在相同支座刚度下, 雨棚各跨跨中加速度响应大于端部, 第 1 跨的加速度响应略高于第 2 跨(以 3 级支座刚度为例, AC-1~4 的雨棚加速度振幅分别是 0.043 m/s^2 、 0.058 m/s^2 、 0.036 m/s^2 、 0.054 m/s^2)。随着支座刚度的折减, 雨棚各测点加速度相应略有增幅, 以第 1 跨跨中为例, 支座刚度 0~3 级的加速度响应分别为(0.056 m/s^2 , 0.057 m/s^2 , 0.057 m/s^2 , 0.058 m/s^2), 表明雨棚受支座刚度折减的影响较小。

4. 结论

本文以某铁路站房为研究对象, 建立了考虑支座刚度折减的列车 - 铁路站房耦合动力响应分析方法, 并基于实测数据验证, 在此基础上重点探究了支座刚度折减对雨棚车致加速度响应的影响规律, 主要研究结论如下:

- (1) 本文提出的列车 - 铁路站房耦合动力响应分析方法能有效模拟高速列车过站时引起的加速度响应, 基于该方法分析得到雨棚加速度模拟值与实测值最大误差仅为 10.91%。
- (2) 支座刚度折减导致雨棚各测点加速度响应略有增幅, 其中跨中加速度响应大于端部, 且第 1 跨的加速度响应大于第 2 跨。

基金项目

北京建工集团有限责任公司科技计划项目(RZCA500620220001)、云教科教便[2021] 91 号。

参考文献

- [1] 曾敏. “桥建合一”高架车站桥梁结构合理型式及设计技术[J]. 工程与建设, 2016, 30(6): 762-765.
- [2] 崔聪聪, 雷晓燕, 张凌. 综合交通枢纽车致振动响应特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(6): 144-150, 172.
- [3] Cui, K. and Su, L. (2019) Dynamic Finite Element Analysis of an Elevated Station-Track Structure Coupled System under Resonance. *Tehnicki Vjesnik*, **26**, 449-456.
- [4] Xia, H., Cao, Y.M. and De Roeck, G. (2010) Theoretical Modeling and Characteristic Analysis of Moving-Train Induced Ground Vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, **329**, 819-832. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.10.007>
- [5] Zhang, X., Ruan, L., Zhao, Y., Zhou, X. and Li, X. (2019) A Frequency Domain Model for Analysing Vibrations in Large-Scale Integrated Building-Bridge Structures Induced by Running Trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **234**, 226-241. <https://doi.org/10.1177/0954409719841793>
- [6] 张庆东, 吴巧云, 荆国强, 等. 多振源激励下武汉站振动实测与舒适度研究[J]. 振动测试与诊断, 2024, 44(4): 808-813, 834.
- [7] 郭向荣, 刘江浩, 吴业飞, 等. “站桥合一”高架车站动力响应影响参数研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 671-681.
- [8] 许暮迪, 韦妙鸾, 叶建能, 等. “桥建合一”型地铁高架车站振动舒适度研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 230-238.