

# 高铁站房雨棚车致动力响应仿真分析

江轶良<sup>1</sup>, 黄晓敏<sup>2</sup>, 周大兴<sup>3</sup>, 孙玉龙<sup>3</sup>, 岳强<sup>3</sup>, 张海潮<sup>3</sup>, 齐勇强<sup>4</sup>, 许维炳<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学建筑工程学院, 北京

<sup>2</sup>昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明

<sup>3</sup>中铁建设集团有限公司, 北京

<sup>4</sup>北京构力科技有限公司, 北京

收稿日期: 2026年4月11日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月12日

## 摘要

为探究列车车速对“桥建合一”高铁站房雨棚结构车致动力响应的影响, 本文以某典型高铁站房雨棚结构为对象, 结合车桥耦合动力学与模态综合法建立了其1:15缩尺仿真分析模型, 探究了30~60 km/h车速(原型车速170~250 km/h)下雨棚边缘、中部动力响应分析。结果表明: 雨棚各测点位移响应随车速持续增大, 跨中位移均大于端部且差值逐步增加; 边缘测点冲击系数随车速整体上升, 中部测点呈上升趋势, 二者冲击系数最大值均出现在端部且增幅显著大于跨中。

## 关键词

铁路站房, 模态综合法, 动力响应

# Simulation Analysis of Train-Induced Dynamic Response of High-Speed Railway Station Canopy

Yiliang Jiang<sup>1</sup>, Xiaomin Huang<sup>2</sup>, Daxing Zhou<sup>3</sup>, Yulong Sun<sup>3</sup>, Qiang Yue<sup>3</sup>, Haichao Zhang<sup>3</sup>, Yongqiang Qi<sup>4</sup>, Weibing Xu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

<sup>2</sup>College of Architecture and Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

<sup>3</sup>China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing

<sup>4</sup>Beijing Glory PKPM Technology Co., Ltd., Beijing

Received: April 11, 2026; accepted: May 2, 2026; published: May 12, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 江轶良, 黄晓敏, 周大兴, 孙玉龙, 岳强, 张海潮, 齐勇强, 许维炳. 高铁站房雨棚车致动力响应仿真分析[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 116-124. DOI: 10.12677/hjce.2026.155121

## Abstract

To investigate the influence of train speed on the train-induced dynamic response of the canopy structure in an integrated bridge-station high-speed railway station, this study takes a typical station canopy as the research object. A 1:15 scaled simulation model was established by combining vehicle-bridge coupled dynamics with the mode superposition method, and the dynamic responses at the edge and middle of the canopy were analyzed under train speeds of 30~60 km/h, corresponding to prototype speeds of 170~250 km/h. The results show that the displacement responses at all monitoring points of the canopy increase continuously with train speed. The mid-span displacement is consistently greater than that at the ends, and the difference gradually enlarges. The impact coefficient at the edge monitoring points generally increases with train speed, while that at the middle monitoring points also shows an increasing trend. For both regions, the maximum impact coefficient occurs at the ends, and its growth is significantly greater than that at mid-span.

## Keywords

Railway Station Building, Modal Synthesis Method, Dynamic Response

Copyright © 2026 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

高速铁路站房作为铁路系统的关键组成部分,在综合交通体系中具有十分重要的功能价值与工程意义。“桥建合一”结构作为一种高效集约的新型结构体系,近年来在新建高速铁路车站中得到日益广泛的应用。然而,该类复合结构受力传递路径复杂、动力特性敏感,列车运行引发的车致振动问题尤为突出,已成为影响结构安全、乘坐舒适性及使用性能的重要因素[1][2]。

为揭示铁路站房结构的车致动力响应规律,众多学者从数值仿真角度进行了积极的尝试。许维炳等通过典型“桥建合一”高铁站房多部位同步实测与环境校正,揭示了170~250 km/h越行车速下站房关键部位的加速度响应规律,为该类结构减振设计与运营监测提供了实测依据[3]。郑雨基于“桥建合一”铁路站房开展列车与风荷载作用下的动力响应研究,系统分析了列车通行诱发的结构振动特性与响应规律,为同类站房、雨棚等近线结构的动力设计与安全评估提供直接参考[4]。张航基于铁路站房雨棚结构开展列车时速变化下的动力响应研究,系统分析了列车运行速度波动诱发的雨棚振动特性与响应规律,为同类高铁站房雨棚的动力设计与安全评估提供直接参考[5]。Zhai等人提出并系统总结了车辆-轨道耦合动力学的基本框架,使轮轨关系、轨道结构参数能够更真实地进入动力响应计算[6]。王宁波等对列车-桥梁耦合振动的模型建立、轮轨接触与数值算法等进行了综述,指出精细化耦合模型与工程应用之间需要兼顾精度与效率[7]。Zhu等构建车-线-站房耦合动力学整体模型,分析了列车过站时车站各楼层的随机振动特性,揭示了车致振动响应随列车运行速度的变化规律[8]。综合现有研究可见,当前成果针对铁路站房雨棚结构列车诱发振动的系统化分析方法仍有待完善,列车运行速度等关键参数对雨棚动力响应的影响规律研究尚不充分。

鉴于此,本文结合车桥耦合动力学理论与模态综合法建立了某典型“桥建合一”铁路站房雨棚结构数值仿真分析模型,进而探究列车运行速度对站厅层雨棚结构动力响应的影响规律。

## 2. 工程概况及相似关系确定

为实现“桥建合一”高铁站房车致动力响应的缩尺模型数值模拟，探究列车荷载作用下雨棚结构车致振动响应规律，本章以某车站为原型(图 1)，综合考虑后续进行试验室空间条件、模型承载能力及施工可行性，确定采用 1:15 的几何缩尺比例。在此基础上，通过量纲分析确定模型与原型之间各关键物理量的相似系数，详见表 1。

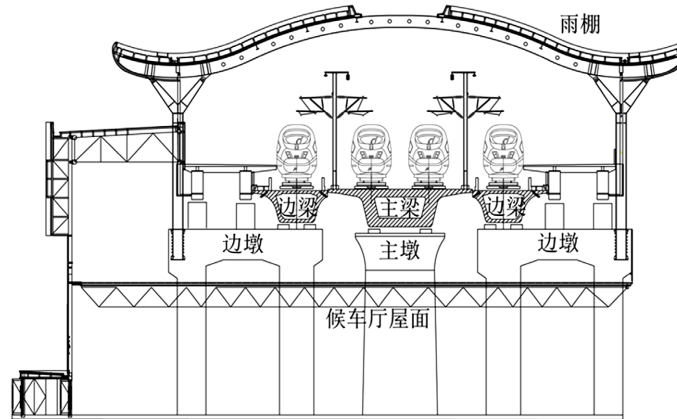


Figure 1. Station elevation drawing  
图 1. 车站立面图

Table 1. Similarity coefficient between model and prototype

表 1. 模型和原型的相似系数

类型	物理量	量纲	相似系数
几何尺寸	长度	[L]	1/15
	线位移	[L]	1/15
	角位移	—	1
材料特性	弹性模型	[FL <sup>-2</sup> ]	1
	密度	[FL <sup>-4</sup> T <sup>2</sup> ]	1
	泊松比	—	1
	应变	—	1
	应力	[FL <sup>-2</sup> ]	1
	等效质量密度	[FL <sup>-4</sup> T <sup>2</sup> ]	3
荷载	集中荷载	[F]	1/225
	弯矩	[FL]	1/3375
动力指标	时间	[T]	3/26
	速度	[LT <sup>-1</sup> ]	26/45
	位移	L	1/15
	自振频率	[T <sup>-1</sup> ]	26/3
	阻尼比	—	1
	加速度幅值	[LT <sup>-2</sup> ]	1.5
	加速度频率	[T <sup>-1</sup> ]	26/3
	结构刚度	[FL <sup>-1</sup> ]	1/15
	结构自重	[FL <sup>-1</sup> T <sup>2</sup> ]	1/1125

### 3. 铁路站房结构列车诱发动力响应分析方法

#### 3.1. 列车模型

结合本研究选定铁路站房的线路特征, 选用 CRH2 型动车组作为分析对象。单节列车由 1 个车体、2 个转向架及 2 组轮对构成, 研究中将其视作独立分析单元, 综合考虑列车横向与竖向振动、侧滚及点头回转振动, 将列车模型简化为 28 个自由度( $2 \times 8 + 4 \times 3$ )。其中, 车体与 2 个转向架均简化为 4 自由度刚体, 单个车轮则简化为 2 自由度刚体, 具体如图 2 所示。

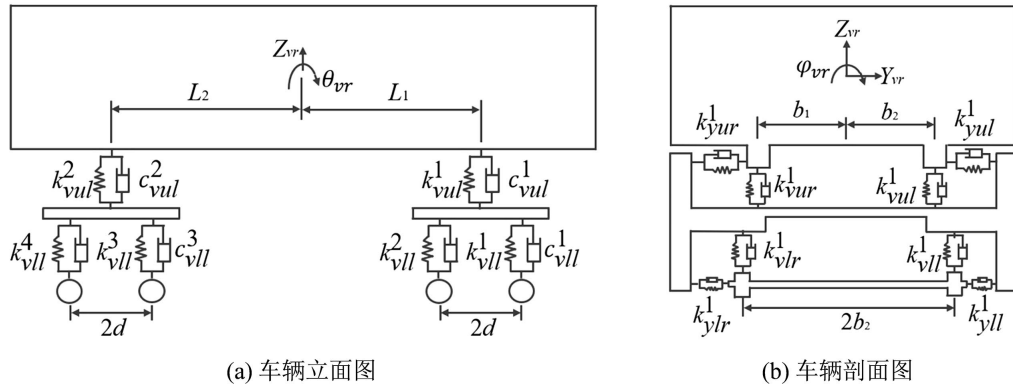


Figure 2. Calculation sketch of the train  
图 2. 列车计算简图

列车动力平衡方程如下式(1), 将其写成矩阵形式:

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

式中,  $[M_v]$ 、 $[K_v]$ 、 $[C_v]$  分别为列车车辆的质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵,  $\{F_v\}$  为列车模型作用于主梁的荷载向量,  $\{X_v\}$  为结构节点的位移向量。

基于 Lagrange 推导列车运动方程后发现, 阻尼矩阵与刚度矩阵在形式上保持一致, 仅需将刚度矩阵中的刚度系数  $k$  替换为阻尼系数  $c$ , 即可得到对应的阻尼矩阵。

#### 3.2. 站房结构模型

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 3 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。

$$[M_B] \{\ddot{q}_B\} + [C_B] \{\dot{q}_B\} + [K_B] \{q_B\} = \{F_B\} \quad (2)$$

其中,  $[M_B]$ 、 $[C_B]$ 、 $[K_B]$  分别为铁路站房结构的质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵,  $\{X_v\}$  为结构节点的位移向量;  $\{F_B\}$  为列车作用于主梁的荷载向量。

#### 3.3. 列车 - 车站结构耦合振动方程的建立及求解

动力学振动方程如式(3)所示:

$$\begin{bmatrix} M_v & 0 \\ 0 & M_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_v \\ \ddot{q}_B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_v & C_{vB} \\ C_{Bv} & C_B + C_B^v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_v \\ \dot{q}_B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_v & K_{vB} \\ K_{Bv} & K_B + K_B^v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_v \\ q_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_v^r \\ F_B^G \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中, 其中  $[C_{vB}] = [C_{Bv}]^T$ ,  $[K_{vB}] = [K_{Bv}]^T$ , 下标  $v$  和  $b$  依次代表列车结构与站房结构, 下标  $Bv$ 、 $vB$  则用于表征车站体系的耦合作用项; 荷载矩阵中,  $r$ 、 $G$  分别对应考虑路面不平整度激励与列车自重所形成的荷载矩阵。

### 3.4. 站房结构车致动力响应分析方法

依托已构建的 ANSYS 精细有限元模型获取站房结构的模态参数, 采用模态综合技术构建列车与站房的耦合动力分析模型, 并在此基础上研究不同车速条件下高铁车站结构在列车激励下的动力响应规律。

### 3.5. 方法验证

以某典型“桥建合一”高铁站房为研究对象, 建立 1:15 的 ANSYS 有限元分析缩尺模型(如图 3 所示)。在该模型中, 主梁和桥墩使用 Solid65 单元, 而桥梁支座则简化为具有可变刚度的 Combin14 弹簧-阻尼器单元。模型的约束条件设置如下: 桥墩底部固定所有自由度; 支座与主梁在  $x$ 、 $y$ 、 $rotx$ 、 $rotz$  方向上相互约束; 雨棚柱与桥墩以及人行站台与桥墩固定所有自由度; 雨棚顶与雨棚柱之间及候车室钢桁架与桥墩在  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $roty$ 、 $rotz$  方向上相互约束。

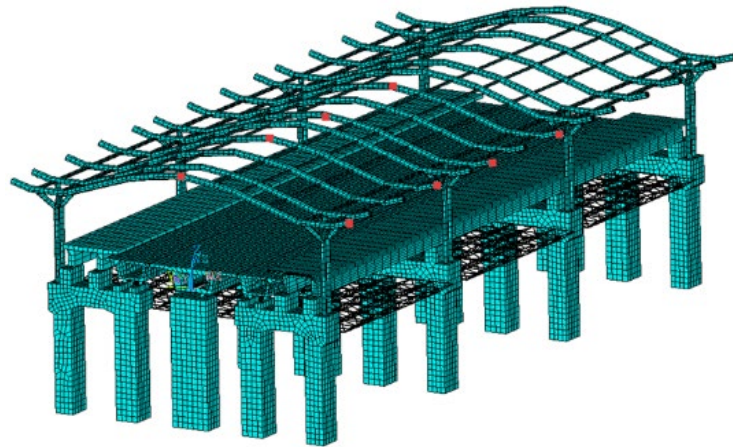


Figure 3. High-speed railway station of “integrated bridge-building structure” and measuring point layout

图 3. “桥建合一”高铁站房及测点位置

对上述建立的站房结构缩尺模型进行模态分析, 并根据上述提出的站房结构列车诱发动力响应分析方法进行理论计算, 得到车站的动力响应计算值。为与实测数据[3]进行对比, 将缩尺模型计算值根据相似关系反推至原型结构尺度, 形成原型反推计算值。通过对现场测试结果与反推计算结果进行对照, 评价所提分析方法的适用性与可靠程度。表 2 为车速在 45 km/h 时(原型车速 180 km/h)雨棚中部测点实测值与理论计算值的对比结果。

Table 2. Comparison of measured and calculated peak displacement responses at the middle points of the canopy

表 2. 雨棚中部测点位移峰值实测结果与计算结果的误差对比

测点	缩尺模型计算值 (mm)	原型反推值 (mm)	实测值 (mm)	相对误差 %
第二跨端部	0.050	0.750	0.840	12.03
第二跨跨中	0.057	0.856	0.946	11.21

由表 2 可知,雨棚中部各测点位移峰值误差约为 11%~12%,总体一致性较好。这表明本文所建立的“桥建合一”高铁站房有限元模型能够较为准确地反映实际结构的动力特性,同时验证了所提出的车致动力响应分析方法具有较高的可靠性。因此,可在此基础上进一步开展车速、车重及轨道状态等参数作用下雨棚结构车致动力响应的研究。

#### 4. 站房结构雨棚车致动力响应分析

选取 30 km/h~60 km/h 进行车速参数影响分析,车速按 5 km/h 递增,以此来探究雨棚边缘与雨棚中部两个关键部位在不同车速条件下的车致动力响应规律,分析雨棚在不同车速条件下的车致动力响应规律,分别选取雨棚边缘与中部为雨棚测点,具体位置如图 3、图 4 所示。部分车速下雨棚边缘测点动力响应、冲击系数分别如表 3、图 5 所示。

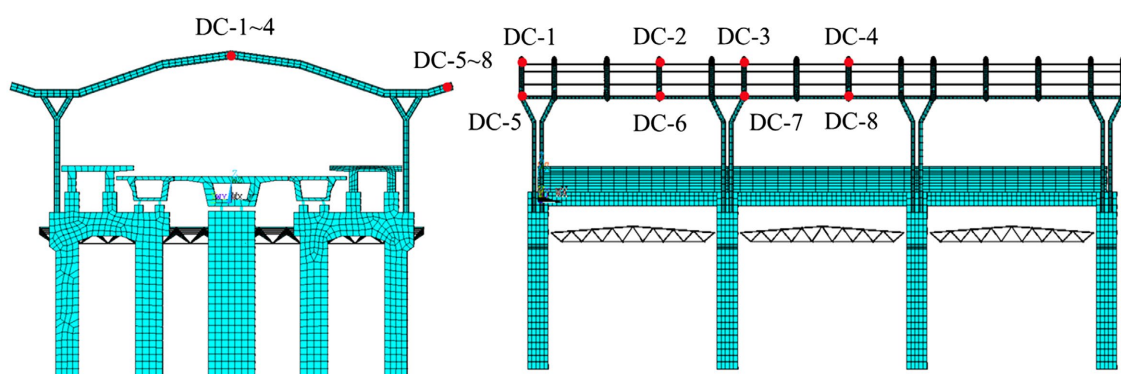


Figure 4. Station floor awning measuring point location diagram

图 4. 站厅层雨棚测点位置示意图

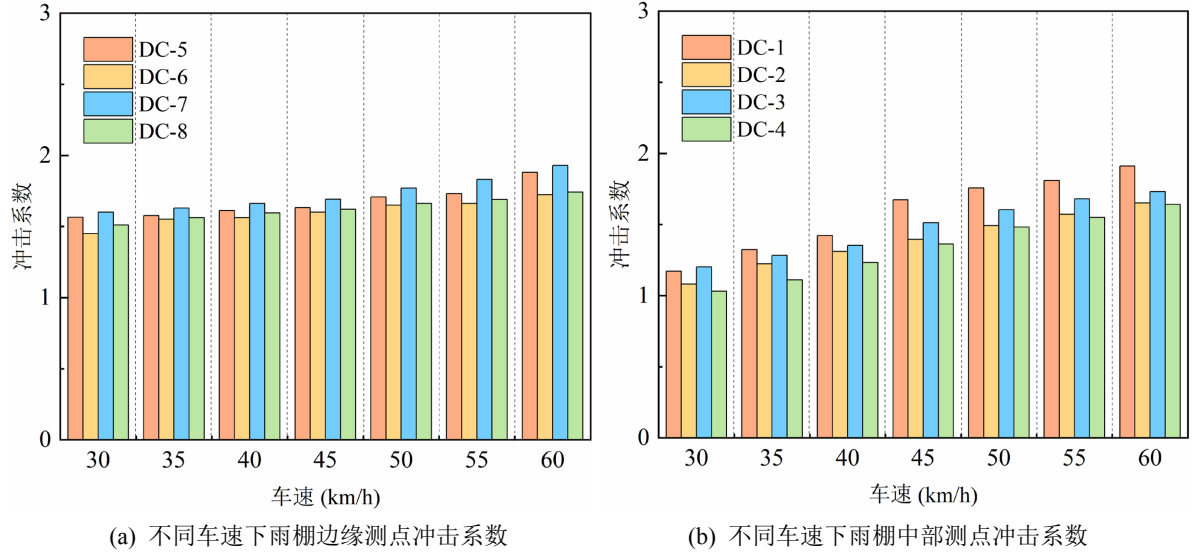
Table 3. Dynamic response of measuring points on the edge of canopy at different speed

表 3. 不同车速下雨棚边缘各测点动力响应

车速(km/h)		30	35	40	45	50	55	60
第一跨端部	动力 u-pk	0.086	0.086	0.088	0.090	0.091	0.093	0.096
	静力 u-pk	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055
	$\mu$	1.565	1.576	1.612	1.632	1.708	1.731	1.880
第一跨 1/2 跨	动力 u-pk	0.091	0.096	0.100	0.102	0.106	0.110	0.116
	静力 u-pk	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060
	$\mu$	1.450	1.551	1.561	1.601	1.650	1.661	1.722
第二跨端部	动力 u-pk	0.084	0.085	0.086	0.088	0.091	0.092	0.095
	静力 u-pk	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055
	$\mu$	1.600	1.630	1.661	1.692	1.770	1.831	1.930
第二跨 1/2 跨	动力 u-pk	0.095	0.098	0.104	0.106	0.108	0.113	0.122
	静力 u-pk	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
	$\mu$	1.510	1.561	1.595	1.621	1.662	1.690	1.742

由表 3 可知,随着列车车速的增加,雨棚边缘各测点位移响应均呈现连续增长趋势,增幅范围在 12.6%~28.4%之间。第一跨端部、第一跨 1/2 跨、第二跨端部、第二跨 1/2 跨位移峰值和增幅分别为 0.096

mm、11.7%；0.116 mm、27.6%；0.095 mm、12.5%；0.122 mm、28.4%。雨棚边缘各跨端部与跨中的位移响应差值随车速的增加而增大，60 km/h 时，第一跨 1/2 跨与端部差值达 0.020 mm，第二跨 1/2 跨与端部差值达 0.027 mm。同一车速下，雨棚边缘各跨 1/2 跨的位移响应大于各跨端部的位移响应。



**Figure 5.** Impact coefficients of measuring points for different structures of canopies at different vehicle speeds  
**图 5.** 不同车速下雨棚不同结构各测点冲击系数

如图 5(a)所示，随着车速上升，各测点的冲击系数整体呈增长趋势，并在 60 km/h 时达到最大值。对应车速下，第 1 跨端部、第 1 跨 1/2 跨、第 2 跨端部、第 2 跨 1/2 跨的冲击系数分别为 1.880、1.930、1.930、1.742。其中，第 1 跨 1/2 跨响应最强，而第 2 跨端部冲击系数最小，仅为其同跨 1/2 跨的约 89%。特别是在车速从 45 km/h 提升至 60 km/h 阶段，各测点冲击系数增长速率加快，其中以第 2 跨 1/2 跨增幅最为明显，达到了约 7.5%。部分车速下雨棚中部各测点动力响应、冲击系数分别如表 4、图 5(b)所示。

**Table 4.** Dynamic response of each measuring point in the middle of canopy under different speed  
**表 4.** 不同车速下雨棚中部各测点动力响应

车速(km/h)		30	35	40	45	50	55	60
第一跨端部	动力 u-pk	0.034	0.037	0.041	0.045	0.049	0.051	0.054
	静力 u-pk	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033
	$\mu$	1.171	1.324	1.423	1.674	1.756	1.810	1.911
第一跨 1/2 跨	动力 u-pk	0.041	0.046	0.049	0.058	0.061	0.063	0.064
	静力 u-pk	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
	$\mu$	1.082	1.223	1.311	1.395	1.492	1.571	1.652
第二跨端部	动力 u-pk	0.039	0.044	0.047	0.050	0.054	0.057	0.060
	静力 u-pk	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
	$\mu$	1.202	1.283	1.352	1.512	1.604	1.681	1.732
第二跨 1/2 跨	动力 u-pk	0.045	0.048	0.051	0.057	0.060	0.063	0.068
	静力 u-pk	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038
	$\mu$	1.030	1.111	1.232	1.363	1.481	1.550	1.641

如表 4 所示, 随着列车车速的增加, 雨棚中部各测点位移响应均呈现连续增长趋势, 增幅范围在 23.1%~63.0%之间。第一跨端部、第一跨跨中、第二跨端部、第二跨跨中位移峰值和增幅分别为 0.054 mm、58.8%; 0.066 mm、63.0%; 0.060 mm、52.6%; 0.065 mm、44.4%, 雨棚中部各跨端部与跨中的位移响应差值随车速的增加而增大, 60 km/h 时, 二者差值最大有 0.012 mm。同一车速下, 雨棚中部各跨 1/2 跨测点的位移响应远大于各跨端部的位移响应。

如图 5(b)所示, 雨棚中部各跨测点冲击系数随着车速的增大同样呈现出先减小而后增大再减小的趋势。雨棚中部第一跨端部、第一跨 1/2 跨、第二跨端部、第二跨 1/2 跨测点冲击系数最大值分别为 1.911、1.652、1.732、1.641。同一车速下, 雨棚中部各测点冲击系数呈现明显的空间分布差异, 冲击响应从大到小依次为: 第一跨跨中、第二跨端部、第一跨端部、第二跨跨中。60 km/h 时, 第一跨跨中冲击系数为 1.652, 是同跨端部的 86.5%; 第二跨跨中冲击系数为 1.641, 是同跨端部的 94.7%。这表明雨棚中部结构第一跨跨中和第二跨跨中区域对车速变化最为敏感, 是结构抗冲击设计的重点控制部位。

## 5. 结论及研究局限性

本文以某“桥建合一”高铁站房结构为研究对象, 确定 1:15 缩尺相似关系, 建立可考虑车速影响的列车-站房耦合动力响应分析方法, 并通过缩尺模型与现场实测数据[3]对比完成验证; 进而开展 30~60 km/h (原型车速 170~250 km/h)车速变化条件下雨棚结构动力响应分析, 结合本次研究范围与分析结果, 主要结论如下:

1) 本文利用列车-站房耦合动力响应分析方法建立了可用于考虑车速等参数影响的“桥建合一”站房结构车致动力响应分析, 经实测验证在本研究的工程案例与车速范围内具有较高可靠性, 可为同类“桥建合一”站房结构的车致动力响应分析提供一定的参考思路。

2) 在位移响应方面, 本研究对象的雨棚边缘与中部表现出显著差异。在雨棚边缘部位, 第一跨的位移明显更大, 60 km/h 时第一跨跨中位移达到 0.116 mm, 为第二跨端部 0.095 mm 的 122%。但在雨棚中部部位, 情况相反, 第二跨的位移更大, 60 km/h 时第二跨跨中位移为 0.068 mm, 是第一跨跨中 0.064 mm 的 106%。雨棚边缘最大位移 0.122 mm 是雨棚中部最大位移 0.068 mm 的 179%, 说明在本次研究的车速范围内, 该高铁站房结构雨棚边缘对列车车速变化更为敏感, 而雨棚中部则表现出相较雨棚边缘的刚度特性。

3) 在冲击响应方面, 在本次研究的车速区间内, 雨棚边缘部位表现出比中部更显著的敏感性。雨棚边缘第一跨跨中在 60 km/h 时冲击系数达到 1.931, 是雨棚中部对应位置的 112%, 且边缘部位各测点的冲击系数增幅更为显著。雨棚边缘第 1 跨跨中的冲击系数从 30 km/h 到 60 km/h 增幅高达 63.2%, 远超过中部最大增幅(16.0%)。这种差异在高速区(50~60 km/h)尤为突出, 边缘部位的冲击系数增速(14.2%)比中部更快。

本研究结论均基于特定“桥建合一”高铁站房工程案例、30~60 km/h 缩尺模型车速区间(原型 170~250 km/h)及 CRH2 型动车组展开, 研究对象的结构形式、车速范围与列车类型均具有局限性, 所得结论的普适性有待进一步验证。对于不同跨度、结构体系的“桥建合一”高铁站房雨棚, 更低或更高车速区间的动力响应特征, 以及不同车型、编组形式列车的差异化影响, 尚未开展研究, 相关规律与作用机制仍需后续通过多维度、多参数的系统性分析进行补充探究, 以进一步提升研究成果的工程指导价值。

## 基金项目

国家自然科学基金(51908015)。

## 参考文献

- [1] 李小珍, 刘全民, 张迅, 等. 铁路高架车站车致振动实测与理论分析[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 612-618.
- [2] 唐俊峰, 郭向荣, 邓子铭, 等. 列车运行引起建筑结构振动分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(3): 7-12.
- [3] 许维炳, 李建祥, 钱增志, 等. “桥建合一”高铁站房越行列车诱发加速度响应规律实测[J/OL]. 铁道标准设计, 2025: 1-10. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202503030002>, 2026-04-27.
- [4] 郑雨. “桥建合一”铁路站房车致动力响应研究[J]. 铁道建筑, 2023, 63(8): 45-50.
- [5] 张航, 周大兴, 李进, 等. 列车时速变化对雨棚动力响应的影响研究[J]. 土木工程, 2024, 13(5): 656-663.
- [6] Zhai, W., Wang, K. and Cai, C. (2009) Fundamentals of Vehicle-Track Coupled Dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 47, 1349-1376. <https://doi.org/10.1080/00423110802621561>
- [7] 王宁波, 任伟新, 肖祥. 列车-桥梁耦合振动研究综述[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 634-643.
- [8] Zhu, Z., Davidson, M.T., Harik, I.E. and Zhi-wu, Y. (2017) Train-Induced Vibration Characteristics of an Integrated High-Speed Railway Station. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31, Article ID: 04017010. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001003](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001003)