

# 列车时速变化对雨棚动力响应的影响研究

张航<sup>1</sup>, 周大兴<sup>2</sup>, 李进<sup>2</sup>, 郑雨<sup>3</sup>, 金振山<sup>3</sup>, 孙玉龙<sup>2</sup>, 宗蕊<sup>4</sup>, 许维炳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学城市建设学部, 北京

<sup>2</sup>中铁建设集团有限公司, 北京

<sup>3</sup>中国铁路北京局集团有限公司, 北京

<sup>4</sup>中国化学工程第六建设有限公司, 山东 烟台

收稿日期: 2024年4月27日; 录用日期: 2024年5月17日; 发布日期: 2024年5月28日

## 摘要

为探究列车通过铁路站房时在雨棚结构上引起的动力响应, 本文将模态综合法引入站房雨棚结构的车致动力响应分析中, 并基于实测结果对其进行验证。在此基础上, 重点探究了列车车速变化对雨棚的车致动力响应的影响。结果表明: 根据提出的理论分析方法计算所得的站房结构动力响应峰值与实测值的误差在15%以内; 雨棚各部位的冲击系数在车速为210 km/h和280 km/h时会出现两次峰值, 且当车速为280 km/h左右时, 冲击系数达到最大值; 雨棚边缘相比于雨棚中部受车速的影响更加显著, 且雨棚各跨端部冲击系数更大。

## 关键词

铁路站房, 模态综合法, 动力响应

# Study on the Influence of Train Speed Variation on the Dynamic Response of Canopy

Hang Zhang<sup>1</sup>, Daxing Zhou<sup>2</sup>, Jin Li<sup>2</sup>, Yu Zheng<sup>3</sup>, Zhenshan Jin<sup>3</sup>, Yulong Sun<sup>2</sup>, Rui Zong<sup>4</sup>, Weibing Xu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Architecture, City and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

<sup>2</sup>China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing

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

<sup>4</sup>China National Chemical Engineering Sixth Construction Co., Ltd., Yantai Shandong

Received: Apr. 27<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 17<sup>th</sup>, 2024; published: May 28<sup>th</sup>, 2024

文章引用: 张航, 周大兴, 李进, 郑雨, 金振山, 孙玉龙, 宗蕊, 许维炳. 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. DOI: 10.12677/hjce.2024.135071

## Abstract

In order to investigate the dynamic response caused by the train passing through the railway station building on canopy structure, this paper introduces the modal synthesis method into the analysis of the vehicle-induced dynamic response of the station building canopy structure, and verifies it based on the measured results. On this basis, the influence of the change of train speed on the dynamic response of the canopy car is studied. The results show that the error between the peak value of the dynamic response calculated by the theoretical analysis method and the measured value is less than 15%. The impact coefficient of each part of the canopy will peak twice when the speed is 210 km/h and 280 km/h, and the impact coefficient reaches the maximum value when the speed is about 280 km/h. The impact of vehicle speed on the canopy edge is more significant than that in the middle of the canopy, and the impact coefficient of each span end of the canopy is greater.

## Keywords

Railway Station Building, Modal Synthesis Method, Dynamic Response

Copyright © 2024 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

铁路站房作为铁路系统的关键组成部分，具有十分重要的价值。桥建合一结构作为一种新型结构体系，在新建车站中被逐渐广泛应用。同时，这种复合式结构设计也引入了新的挑战，如结构力学传导路径复杂、车致振动问题凸显等[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。Cui 等[3]以“桥建合一”型高架车站为工程背景，建立了考虑各组件和系统连接的三维动态分析模型，分析了列车过站时结构的振动特性。冉汶民等[4]采用频域分析方法计算了某桥建合一站房结构的振动响应，并探讨了轨道扣件刚度对站房振动的影响，得到了站台层的振动响应规律。Zhu 等[5]建立了车-线-站房耦合系统整体动力学模型，对列车过站时车站各楼层的随机振动特性展开了分析，探究了车致车站随机振动响应随车速变化的规律。

现阶段研究成果表明：现有研究主要集中在利用数值仿真技术分析车致振动，对于铁路站房结构列车诱发振动响应分析方法的研究欠缺，相应的参数影响规律研究明显不足。

鉴于此，本文结合车桥耦合分析过程与模态综合法，提出了一种适用于铁路站房结构的车致动力响应理论分析方法，并基于实测结果验证了该方法的有效性。在此基础上，重点探究了列车运行速度对站厅层雨棚结构的影响。

## 2. 铁路站房结构列车诱发动力响应分析方法

### 2.1. 列车模型

以我国铁路系统中广泛使用的 CRH2 型列车为例，单节列车由 1 个车体、2 个转向架、4 个轮对组成。假设每节列车均为独立的自由振动系统，单节列车包括列车车体和转向架横向、竖向两个方向的平动振动以及点头和侧滚两个方向的转动以及车轮横向、竖向两个方向的平动，单节列车可简化为 28 个自由度

[6] [7], 车体空间坐标如图 1 所示。

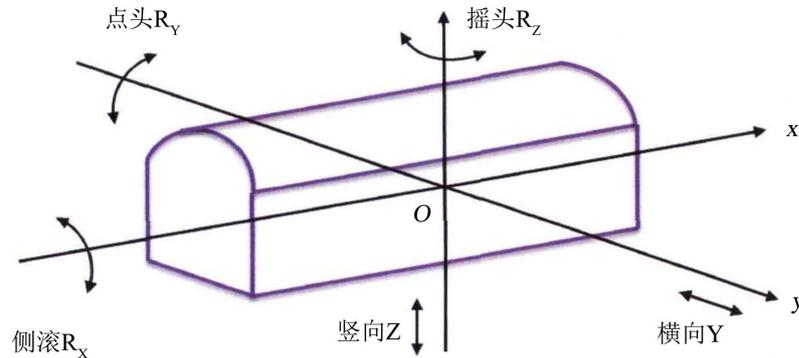


Figure 1. Coordinates of the car body in space  
图 1. 车体在空间的坐标

列车动力平衡方程如下式(1), 将其写成矩阵形式:

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

公式中,  $[M_v]$  为列车模型的质量矩阵;  $[K_v]$  为车辆的刚度矩阵;  $[C_v]$  为车辆的阻尼矩阵;  $\{F_v\}$  为车辆受到的等效作用力向量;  $\{X_v\}$  为列车自由度对应的位移向量。

采用 Lagrange 法推导列车的运动方程, 可以得到阻尼矩阵与刚度矩阵具有相同的形式, 只需要将  $c$  代替刚度阵中的  $k$  即可得到阻尼矩阵。

## 2.2. 站房雨棚模型

采用质量归一化矩阵, 建立站房雨棚在模态空间的动力平衡方程:

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

其中,  $\{q_i\}$  为站房雨棚的广义模态坐标;  $\{\Phi_i\}$  为站房雨棚的第  $i$  阶振型;  $[M_B] = [\Phi_B]^T [M_b] [\Phi_B] = [I]$  为站房雨棚的模态质量矩阵;  $[C_B] = [\Phi_B]^T [C_b] [\Phi_B] = [2\omega_i \xi_i I]$  为站房雨棚的模态阻尼矩阵;  $[K_B] = [\Phi_B]^T [K_b] [\Phi_B] = [\omega_i^2 I]$  为站房雨棚的模态刚度矩阵;  $\{F_B\} = [\Phi_B]^T \{F_b\}$  为列车与站房雨棚之间的作用力。

## 2.3. 列车 - 车站雨棚耦合振动方程的建立及求解

本文将列车 - 车站雨棚整体结构看作是一个耦合时变系统。考虑列车与车站的空间振动位移的相互关系, 建立任意  $t$  时刻的列车 - 车站雨棚系统的振动方程:

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

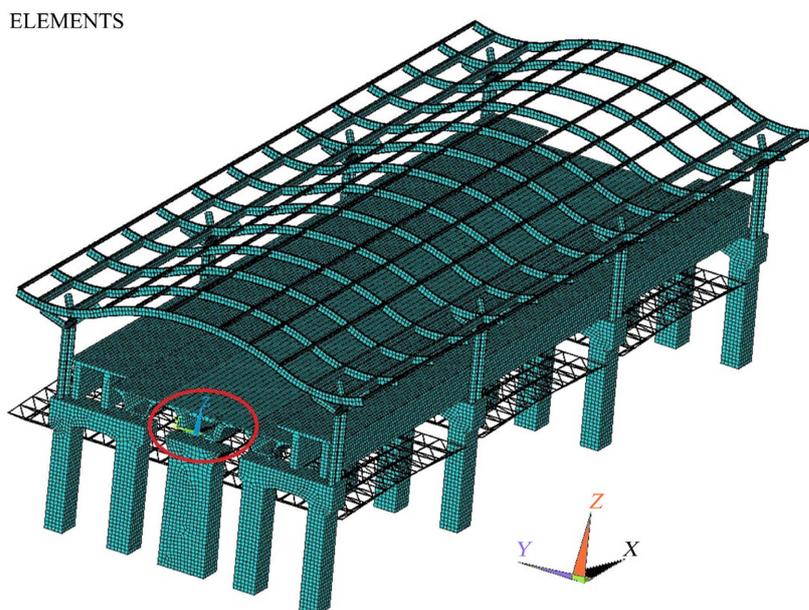
式中,  $[C_{vB}] = [C_{Bv}]^T$ ,  $[K_{vB}] = [K_{Bv}]^T$ , 下标  $v$  和  $B$  分别表示列车和雨棚结构, 下标  $Bv$ 、 $vB$  表示车站耦合项,  $r$ 、 $G$  分别表示由考虑路面不平整度和列车自重的荷载矩阵。采用 Newmark- $\beta$  法[8]求解该方程。

## 2.4. 站房结构车致动力响应分析方法

基于建立的 ANSYS 精细化模型提取站房结构的模态信息, 利用模态综合法[9]建立列车 - 站房雨棚耦合动力分析模型, 进而开展考虑车速参数影响的高铁站房结构列车诱发动力响应分析。

## 2.5. 方法验证

以某典型桥建合一式站房结构为例，建立了包括支座等局部构件在内的结构整体 ANSYS 模型。由于原结构为对称结构，因此在不会对结构造成较大影响的前提下，对原结构进行简化，建立三跨结构模型，以实现在有限的计算资源下较快地获得计算结果。其中，主梁和桥墩采用 Solid65 单元，雨棚结构采用 beam188 单元，屋盖网架采用 link8 单元，桥梁支座简化成具有可变刚度的 Combin14 弹簧 - 阻尼器单元弹簧模型，如图 2 所示。



**Figure 2.** A typical “bridge construction in one” station building structure  
**图 2.** 某典型“桥建合一”站房结构

对上述建立的站房结构 ANSYS 模型进行模态分析，并根据上述提出的站房结构列车诱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，将其与现场实测数据进行对比，以此来验证该有限元模型的有效性。表 1 为车速在 280 km/h 时屋盖测点实测值与理论计算值的对比结果。

**Table 1.** Peak error of acceleration response between measured value and calculated value of measuring point in the middle of waiting hall roof

**表 1.** 候车厅屋盖中部测点实测值与计算值的加速度响应峰值误差

	单位	测点	实测值	计算值	误差
加速度	m/s <sup>2</sup>	第一跨 1/4 跨截面	0.0061	0.0066	7.39%
		第一跨 1/2 跨截面	0.0079	0.0086	9.95%
位移	mm	第一跨端部截面	0.143	0.162	13.48%
		第一跨 1/2 跨截面	1.038	0.190	14.69%

由表 1 可知，车站结构测点的动力响应实测值与计算值的误差在 15% 以内，相对误差较小。结果表明，根据本文提出的理论分析方法计算得到的车站结构动力响应峰值与实测动力响应误差在合理范围内，相应的站房结构列车诱动力响应分析方法具有较好的准确性，可用于后续考虑车速影响的车致站房动

力响应分析。

### 3. 站房结构雨棚车致动力响应分析

CRH2 型动车组一般运行时速为 200 km/h，试验时速为 250 km/h，设计最快时速为 300 km/h。为探究车速变化对雨棚动力响应的影响，本节选用 200 km/h 至 300 km/h，按 10 km/h 递增。为研究雨棚不同位置的动态响应，分别选取雨棚边缘与中部为雨棚测点，具体位置如图 3 所示。

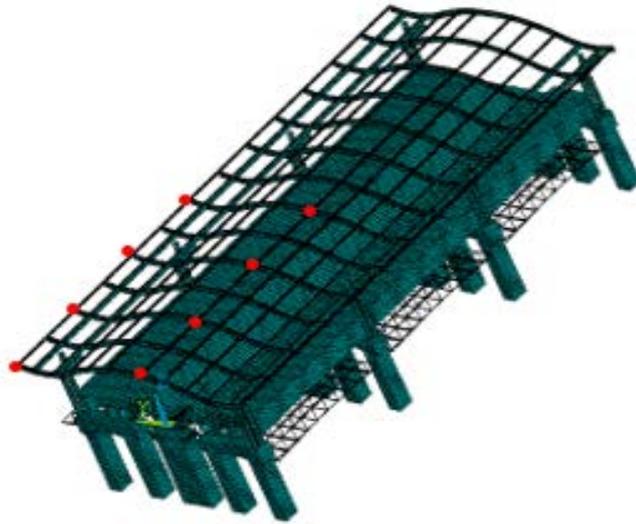
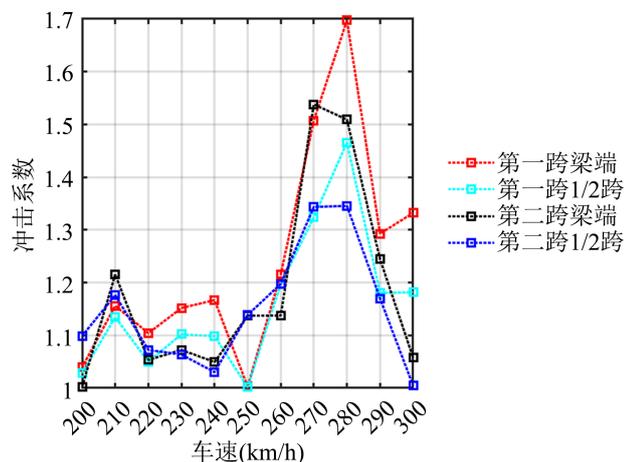


Figure 3. Station floor canopy measuring point location diagram  
图 3. 站厅层雨棚测点位置示意图

部分车速下雨棚边缘测点动力响应、冲击系数分别如表 2、图 4 所示。

Table 2. Dynamic response of measuring points on the edge of canopy at different speeds  
表 2. 不同车速下雨棚边缘各测点动力响应

车速(km/h)		230	240	250	260	270	280	290	300
第一跨端部	动力 u-pk	0.079	0.085	0.086	0.097	0.134	0.115	0.110	0.107
	静力 u-pk	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068
	$\mu$	1.162	1.248	1.261	1.414	1.962	1.689	1.611	1.572
第一跨 1/2 跨	动力 u-pk	1.143	1.207	1.265	1.478	1.781	1.411	1.430	1.414
	静力 u-pk	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	$\mu$	1.019	1.076	1.128	1.318	1.588	1.258	1.275	1.260
第二跨端部	动力 u-pk	0.017	0.023	0.021	0.023	0.031	0.038	0.026	0.025
	静力 u-pk	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
	$\mu$	1.767	2.473	2.288	2.495	3.261	4.036	2.792	2.616
第二跨 1/2 跨	动力 u-pk	0.853	0.900	0.976	1.116	1.248	1.038	0.989	0.972
	静力 u-pk	0.803	0.803	0.803	0.803	0.803	0.803	0.803	0.803
	$\mu$	1.062	1.121	1.215	1.389	1.554	1.293	1.231	1.210



**Figure 4.** Impact coefficient of measuring point at the edge of canopy at different speeds  
**图 4.** 不同车速下雨棚边缘测点冲击系数

由表 2 可知, 雨棚边缘测点位移响应随车速的增加在车速为 210 km/h 与 270 km/h~280 km/h 时出现极值, 雨棚边缘第一跨端部、第一跨 1/2 跨、第二跨端部、第二跨 1/2 跨测点位移响应最大值分别为 0.134 mm、1.781 mm、0.038 mm、1.248 mm。同一车速下, 雨棚边缘各跨 1/2 跨的位移响应远大于各跨端部的位移响应。

如图 4 所示, 雨棚边缘各测点的冲击系数随车速的增加同样在车速为 210 km/h 与 270 km/h~280 km/h 时出现两个峰值。雨棚边缘第一跨端部、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 1.962、1.588、4.036、1.293。同一车速下, 雨棚边缘各跨端部的冲击系数大于各跨中部。以车速为 280 km/h 为例, 此时第二跨端部的冲击系数最大值为 4.036, 相比于第二跨中部的冲击系数最大值为 1.293, 增幅可达 212.14%。

部分车速下雨棚中部各测点动力响应、冲击系数分别如表 3、图 5 所示。

**Table 3.** Dynamic response of each measuring point in the middle of canopy at different speeds  
**表 3.** 不同车速下雨棚中部各测点动力响应

车速(km/h)		230	240	250	260	270	280	290	300
第一跨端部	动力 u-pk	0.029	0.030	0.032	0.038	0.041	0.035	0.031	0.026
	静力 u-pk	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
	$\mu$	1.229	1.250	1.350	1.597	1.716	1.461	1.278	1.098
第一跨 1/2 跨	动力 u-pk	0.157	0.154	0.167	0.182	0.189	0.185	0.184	0.162
	静力 u-pk	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149
	$\mu$	1.056	1.035	1.121	1.221	1.270	1.241	1.235	1.084
第二跨端部	动力 u-pk	0.047	0.049	0.052	0.058	0.064	0.051	0.049	0.045
	静力 u-pk	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041
	$\mu$	1.143	1.203	1.276	1.407	1.562	1.241	1.187	1.088
第二跨 1/2 跨	动力 u-pk	0.101	0.108	0.113	0.129	0.115	0.113	0.109	0.104
	静力 u-pk	0.101	0.101	0.101	0.101	0.101	0.101	0.101	0.101
	$\mu$	1.001	1.071	1.123	1.282	1.139	1.115	1.078	1.033

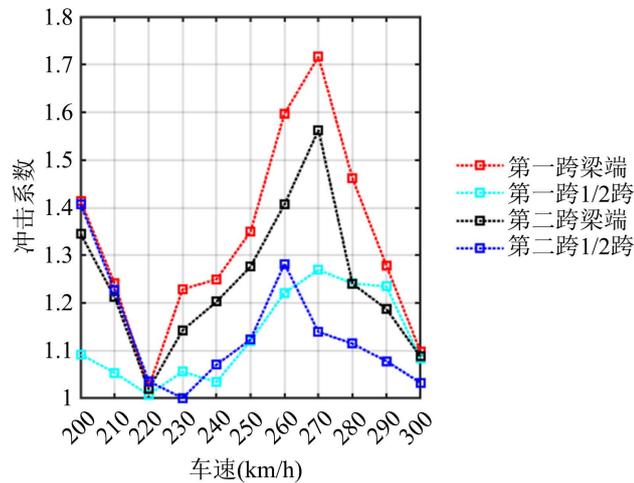


Figure 5. Impact coefficient of measuring point in middle of canopy at different speeds  
图 5. 不同车速下雨棚中部测点冲击系数

如表 3 所示, 雨棚中部测点的位移变化规律与边缘测点的变化规律差异显著, 雨棚中部测点位移响应随车速增加的变化规律呈现出先减小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 跨测点位移响应最大值分别为 0.041 mm、0.189 mm、0.064 mm、0.129 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 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 1.716、1.270、1.562、1.282。同一车速下, 雨棚中部各跨端部测点受到的冲击作用较各跨 1/2 跨测点更大。以车速为 270 km/h 为例, 雨棚中部第一跨端部测点的冲击系数(1.716)比第一跨 1/2 跨测点的冲击系数(1.270)大 35.11%, 雨棚中部第二跨端部测点的冲击系数(1.562)比第二跨 1/2 跨测点的冲击系数(1.115)大 40.09%。

#### 4. 结论

本文以某典型铁路站房结构为研究对象, 建立了可以考虑车速影响的站房结构车致动力响应分析方法, 并基于实测对其进行验证, 进而开展了车速变化条件下雨棚结构的动力响应分析。主要结论如下:

- 1) 本文提出的站房结构列车诱发动力响应分析方法可用于考虑车速等参数影响的站房结构车致动力响应分析。
- 2) 雨棚边缘测点的位移响应大于雨棚中部测点的位移响应, 且雨棚测点位移响应最大值出现在雨棚边缘各跨中部。同一车速下, 相比于端部, 跨中位移响应增幅最大可达 1300% 以上。
- 3) 雨棚中部测点的冲击系数变化规律与边缘测点的变化规律相似, 均在 210 km/h、280 km/h 附近出现极值, 且最大值均出现在各跨端部。同一车速下, 相比于跨中, 端部冲击系数增幅最大可达 200% 以上。

#### 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] 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] 冉汶民, 李青良, 李小珍, 等. 列车荷载激励下站房结构振动响应频域分析方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(17): 218-224.
- [5] Zhu, Z., Davidson, M.T., Harik, I.E., *et al.* (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)
- [6] 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.
- [7] 王玉晶. 考虑风屏障遮风作用和列车风效应的车桥系统振动分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [8] Li, X., Ma, W. and Qiang, S. (2002) Coupling Vibration Analysis of Vehicle-Bridge System by Iterative Solution Method. *Journal of Vibration and Shock*, **21**, 21-25.
- [9] Li, Y., Cai, C., Liu, Y., *et al.* (2016) Dynamic Analysis of a Large Span Specially Shaped Hybrid Girder Bridge with Concrete-Filled Steel Tube Arches. *Engineering Structures*, **106**, 243-260. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.026>