

# 复杂地层中地铁交叠车站列车荷载作用下 结构动力响应特性<sup>\*</sup>

陈志宁<sup>1</sup> 赵红光<sup>1</sup> 李逸涛<sup>2,3</sup> 胡博韬<sup>2</sup> 时乃琛<sup>2</sup>

(1. 南京地铁建设有限责任公司, 210008, 南京; 2. 同济大学交通学院, 201804, 上海;

3. 中铁上海设计院集团有限公司, 200070, 上海)

**摘 要** [目的] 交叠车站在列车荷载作用下的结构动力响应复杂, 会导致局部的动力响应放大, 以及结构不同位置处动力响应差异性较大的问题, 应探究列车荷载作用下交叠车站结构的动力响应规律。[方法] 以南京地铁 7 号线和 10 号线十字交叠换乘车站中胜站为研究对象, 建立了复杂地层条件中的三维精细化有限元模型, 并考虑列车进出站时的加减速作用, 以及交叠车站列车不同进出站顺序。探究了列车荷载作用下交叠车站结构的动力响应规律, 对车站结构变形、结构竖向动应力、既有车站竖向振动加速度进行了分析。选取了不同车站断面布置若干测点, 通过实测数据对不同工况、不同运营时段下各测点的振动加速度进行比较。[结果及结论] 无论是动位移、动加速度还是动应力, 交叠段的动力响应均大于非交叠段。与非交叠段相比, 交叠段中各测点的动位移放大系数最大值为 4.57, 动应力峰值增大了 2.94 倍, 加速度放大系数最大值为 4.00。

**关键词** 地铁; 交叠车站; 列车动载; 动力响应

**中图分类号** U231.4; TU311.3; TU93

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.20253094

## Structural Dynamics Response Characteristics of Metro Overlapping Stations under Train Loads in Complex Strata

CHEN Zhining<sup>1</sup>, ZHAO Hongguang<sup>1</sup>, LI Yitao<sup>2,3</sup>, HU Botao<sup>2</sup>, SHI Naichen<sup>2</sup>

(1. Nanjing Metro Construction Co., Ltd., 210008, Nanjing, China; 2. College of Transportation, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 3. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., 200070, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] The structural dynamics response of overlapping metro station under train loads is complex, often resulting in localized amplification of dynamics response and significant difference in dynamics behaviors across various structural locations. Therefore, it is essential to investigate the dynamics response law of overlapping station structures under

train loading. [Method] Taking Zhongsheng Station, the cross-shaped intersect-overlapping interchange station on Nanjing Metro Line 7 and Line 10 as the research subject, a three-dimensional refined finite element model under complex stratum conditions is established. Considering the acceleration and deceleration effects of train entering/leaving station, as well as various sequences of train arrival/departure in the overlapping station, the dynamics response law of overlapping station structures under train loading are explored, the station structural deformation, vertical dynamic stress, and acceleration of existing station vertical vibration are analyzed. Multiple measuring points on different station cross-sections are selected, and vibration acceleration data at each measuring point under different working conditions and operating periods are compared through field measurements. [Result & Conclusion] Whether in terms of dynamics displacement and acceleration, or dynamics stress, the dynamics responses in overlapping sections are greater than those in non-overlapping sections. Compared to non-overlapping segments, the maximum dynamics displacement amplification factor at overlapping section measuring points is 4.57, the peak dynamics stress increases by a factor of 2.94, and the maximum amplification factor of vibration acceleration reaches 4.00.

**Key words** metro; overlapping stations; train dynamics load; dynamics response

随着我国城市轨道交通网络发展, 地铁换乘站及轨道交通枢纽的数量在迅速增加。受既有建筑物或地质条件的限制, 以及地下空间综合利用的影响, 地下空间形式更加复杂, 产生了越来越多的交叠车站结构<sup>[1]</sup>。相较于单一车站, 交叠车站在列车荷载作用下结构动力响应更为复杂, 可能会产生局部的动力响应放大, 以及结构不同位置处动力响应差异性较大的问题。目前, 城市轨道交通车致

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51978523)

交叠结构振动响应问题已受到学者们的广泛关注。文献[2]基于混凝土疲劳本构模型计算了运行荷载下交叠隧道结构的疲劳寿命。文献[3]建立了交叠隧道-土体系统动力计算模型,结果表明交叠隧道具有动力放大效应。文献[4]通过三维有限元模型研究了交叠隧道的振动响应,结果表明交叠段车致动力响应受行车荷载影响更大。文献[5]研究了交叠隧道的列车振动响应,结果表明下部隧道对上部隧道的振动加速度、最大主应力增量具有放大效应。文献[6]也对交叠隧道的动力响应进行了研究,结果表明上部隧道列车运行会引起下部隧道的拱顶竖向加速度显著增加。此外,许多学者还通过数值模拟<sup>[7-13]</sup>、现场测试<sup>[14-22]</sup>等方法进行研究,结果表明隧道交叠段使列车振动响应明显加剧。

综上所述,既有城市轨道交通交叠结构振动响应分析主要集中于交叠隧道,而对列车动载作用下交叠车站的动力响应研究相对较少。鉴于此,本文以南京地铁7号线、10号线(以下简称“7号线”“10号线”)的换乘车站中胜站为研究对象,通过建立三维精细化有限元模型及现场实测数据分析,探究了交叠车站车致结构动力响应的规律及特点,为结构安全及服役性能评价提供了依据。

## 1 工程概况

中胜站为7号线与10号线的十字换乘车站。既有10号线中胜站为地下二层(交叠处为一层)的侧式车站,车站长度为201.00 m,大部分区域的宽度为27.20 m,与新建7号线交叠处宽度为17.00 m,高度为9.95 m。车站主体结构除中柱外均采用C30混凝土,地下二层处中柱采用C40混凝土,地下一层处中柱采用C50混凝土。新建7号线中胜站为地下二层(交叠处位于地下三层)岛式车站,采用双柱三跨矩形框架结构,柱距为9.00 m,车站长度为270.00 m,宽度为21.90 m,高度为10.91 m,主体结构采用C30混凝土。中胜站交叠处纵剖面图如图1所示,由图1可知两车站交叠处的相对位置关系及车站结构尺寸。

中胜站所处场地属于长江河漫滩地貌,地势较为平坦。中胜站地质剖面图如图2所示。既有10号线中胜站车站底板位于②-2淤泥质粉质黏土地层中,新建7号线中胜站车站底板位于②-5粉细砂地层中,上下两车站净距为0.6 m,由淤泥质粉质黏土填充。

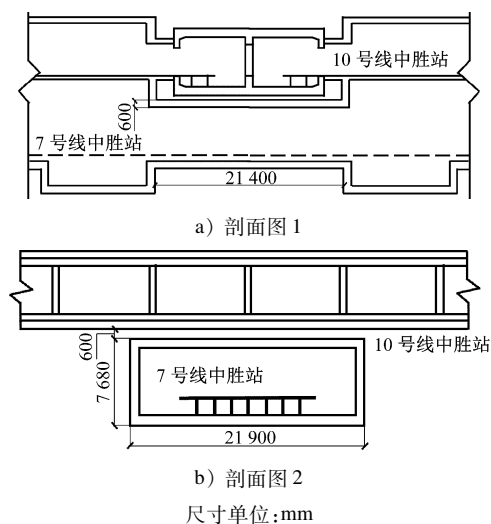


图1 中胜站交叠处纵剖面图

Fig. 1 Longitudinal profile of the overlapping section at Zhongsheng Station

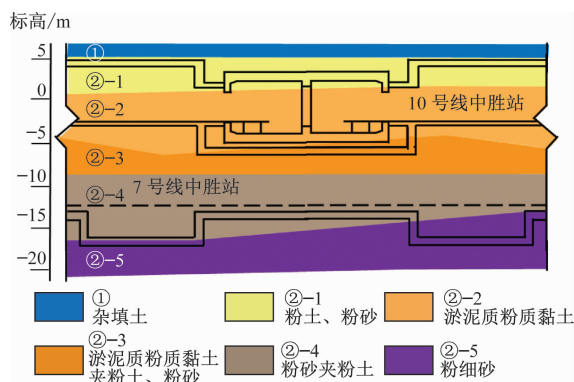


图2 中胜站地质剖面图

Fig. 2 Stratigraphical profile of Zhongsheng Station

## 2 数值模拟

### 2.1 数值建模及计算参数

基于PLAXIS 3D软件进行数值建模和动力计算分析。交叠车站数值模型如图3所示,考虑到车站尺寸及边界效应影响,数值模型尺寸设定为

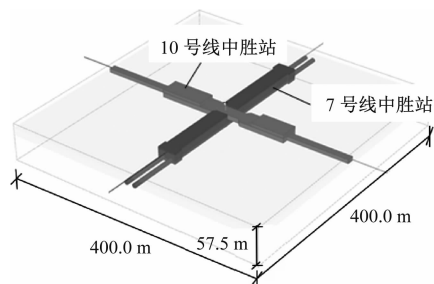


图3 交叠车站数值模型

Fig. 3 Numerical modeling of overlapping stations

400.0 m(长)×400.0 m(宽)×57.5 m(高)。按照实际尺寸模拟车站结构,建立板、梁、柱的实体单元结构。7号线中胜站两端的盾构区间隧道结构采用板单元,混凝土整体道床、轨道板,以及10号线中胜站两端的矩形框架区间隧道结构、周围土体等均采用实体单元模拟,车站结构与土体之间设置界面单元。

## 2.2 本构模型及模型参数

为更好地模拟弹塑性特性,土体实体单元采用10节点四面体,本构采用小应变土体硬化模型,混凝土结构均视为弹性体。计算模型的四周及底部采用黏性边界,施加的正应力和剪应力根据土体纵波、横波速度及松弛系数等确定<sup>[15]</sup>,数值模型的主要力学性能参数如表1所示。

表1 数值模型主要力学性能参数

Tab.1 Main mechanical property parameters of numerical calculation model

项目	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
①杂填土	18.5	30.0	0.36	15	22
②-2 淤泥质粉质黏土	18.0	25.0	0.43	13	20
②-5 粉细砂	18.9	80.0	0.32	9	31
10号线中胜站底板	25.0	32.5	0.20		
10号线中胜站中柱	25.0	34.5	0.20		
10号线中胜站其他组件	25.0	30.0	0.20		
7号线中胜站全部结构	25.0	31.5	0.20		

## 2.3 列车移动荷载

既有10号线列车为6节编组A型车,新建7号线列车为6节编组B型车。考虑到新建7号线列车参数未知,因此所建模型中车辆参数统一参考南京地铁10号线A型车荷载参数,车厢长度为22.8 m,满载时单边车轮静载 $P_0=84.75$  kN,各车轮轴距为2.5 m,前后转向架间距为15.7 m。数值模拟时,考虑将车轮静载设为移动点荷载,并考虑动力冲击影响。

## 2.4 计算工况及测试点位置

计算时假设列车为双向运行,列车初始速度为16 m/s,制动及起动车加速度均为1 m/s<sup>2</sup>,计算时间为32 s。数值计算模型结果的采样频率为20 Hz,共考虑3种计算工况:①工况1,仅既有车站存在时,既有车站双线运行;②工况2,交叠车站存在时,既有车站双线运行;③工况3,交叠车站存在时,两车站四个方向同时运行。

选取既有10号线中胜站S1、S2断面进行分析,S1断面位于两个车站交叠处,S2断面位于非交叠处,两个断面间距为60 m。各断面选取3个不同位置测点进行分析,数值计算的断面及测点布置如图4所示,其中A1、A2、A3为交叠段测点,B1、B2、B3为非交叠段测点;A1、B1位于车站结构中心线,A2、B2位于钢轨中心线,A3、B3位于车站两侧站台。

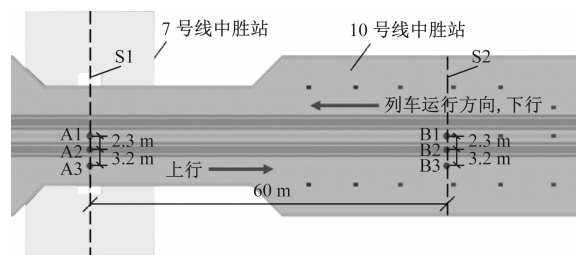


图4 数值计算的断面及测点布置图

Fig.4 Layout diagram of numerical calculation cross-section and measuring points

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 结构变形分析

既有10号线中胜站结构中心线位置处(A1、B1测点)3个计算工况下的结构竖向位移时程曲线如图5所示。由图5可知:交叠段工况3的动位移最大值及幅值最大,工况2次之,工况1最小,这说明多列车荷载引起向下的竖向位移增大;而非交叠段向下的竖向位移最大值仅为0.13 mm,明显小于交叠段。

进一步对比分析发现,同一断面上,车站中心线位置处的动位移最大,轨道中心线处次之,站台位置处最小,站台处动位移约为车站中心线处的59%~65%。将交叠段与非交叠段测点最大动位移的比值定义为动位移放大系数,可得工况3下车站

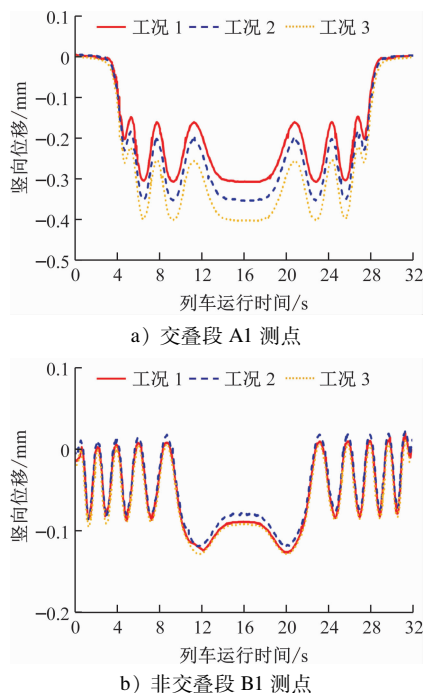


图5 A1、B1 测点3个计算工况下的结构竖向位移时程曲线

Fig. 5 Vertical displacement time-history curve of the structure at measuring points A1 and B1 under three calculation conditions

结构中心线、钢轨中心线及站台位置处的动位移放大系数分别为4.57、3.49、3.36,说明重叠车站的动力响应具有明显的放大效应。

### 3.2 结构竖向动应力分析

既有10号线中胜站结构中心线位置处(A1、B1测点)3个计算工况下的结构竖向动应力时程曲线如图6所示。由图6可知:重叠段动应力值明显大于非重叠段,工况3下重叠段的竖向动应力峰值约为非重叠段的2.94倍。

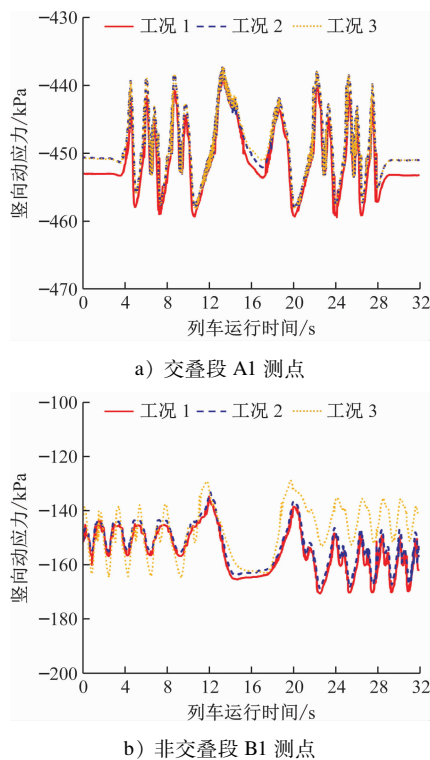


图6 A1、B1 测点3个计算工况下的结构竖向动应力时程曲线

Fig. 6 Vertical dynamic stress time-history curve of the structure at measuring points A1 and B1 under three calculation conditions

### 3.3 既有车站加速度分析

既有10号线中胜站结构中心线位置处(A1测点)3个计算工况下的结构竖向振动加速度时程曲线如图7所示。

由图7可知:0~12s及20~32s时的竖向振动加速度较大,而12~20s时竖向振动加速度显著减小,峰值加速度为 $0.138 \text{ m/s}^2$ 。

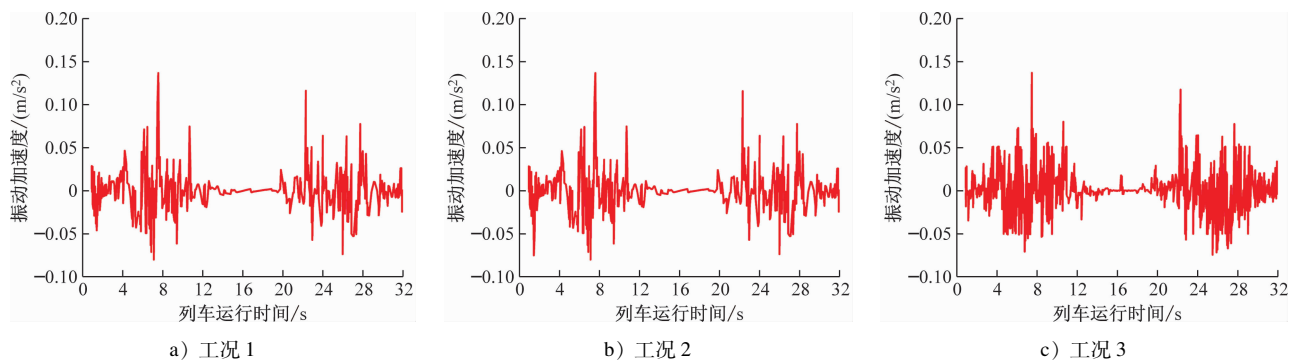


图7 A1 测点3个计算工况下的结构竖向振动加速度时程曲线

Fig. 7 Vertical vibration acceleration time-history curve of the structure at measuring points A1 under three calculation conditions



## 4 现场测试

### 4.1 测试工况及测点位置

新建 7 号线中胜站开通运营后,对交叠车站结构的振动加速度进行现场测试(文中提到的振动加速度均为竖向振动加速度)。现场测试监测断面平面图如图 8 所示。每个断面各布置 2 个测点,每个测点均布置有底板和侧墙传感器,现场测试断面测点布置如图 9 所示。其中,C1 测点反映 10 号线中胜站非交叠段的结构振动,D1 测点反映 10 号线中胜站交叠段的结构振动;C2 测点反映 7 号线中胜站非交叠段的结构振动,D2 测点反映 7 号线中胜站交叠段的结构振动。测试时共考虑 3 种运行工况:① 工况 4,仅 7 号线车站双线运行;② 工况 5,仅 10 号线车站双线运行;③ 工况 6,两车站四个方向同时运行。

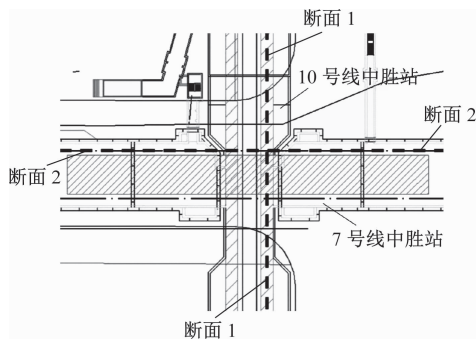


图 8 现场测试监测断面平面图

Fig. 8 Planar view of field test monitoring cross-section

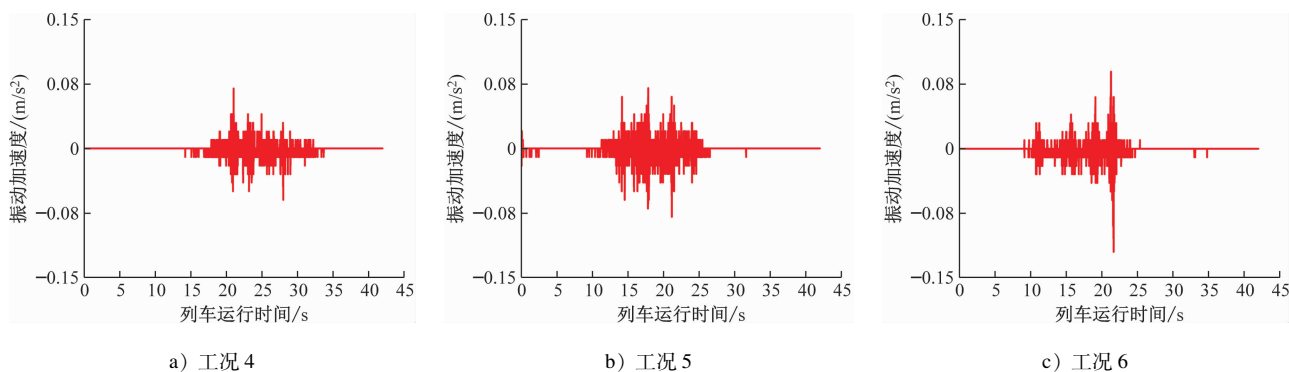


图 10 C1 测点 3 种运行工况下振动加速度时程曲线

Fig. 10 Vibration acceleration time-history curve at measuring point C1 under three operating conditions

### 4.2.2 早高峰前运营时段车站非交叠段与交叠段振动加速度对比

早高峰前运营时段内,列车经过 C2、D2 测点时的振动加速度时程曲线如图 12 所示。由图 12 可

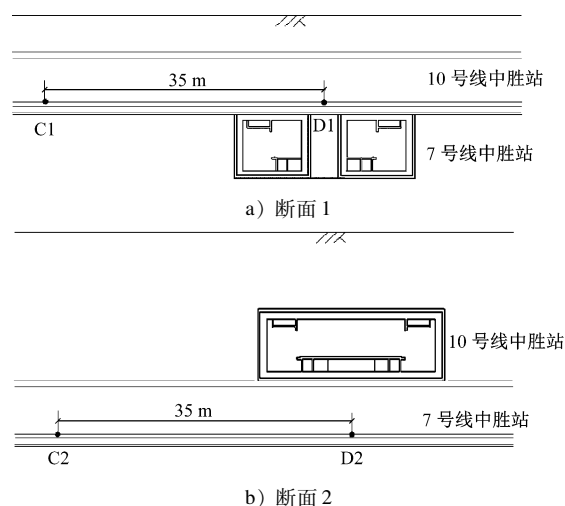


图 9 现场测试断面测点布置

Fig. 9 Layout of field test monitoring points on cross-section

### 4.2 现场测试结果分析

#### 4.2.1 不同工况下车站振动加速度

C1、D1 测点在 3 种运行工况下的振动加速度时程曲线如图 10、图 11 所示。由图 10、图 11 可知:① 交叠段的加速度峰值高于非交叠段,定义交叠段与非交叠段测点最大振动加速度的比值为加速度放大系数。在工况 6 下,加速度放大系数达到最大值 1.58。② 在幅值方面,交叠段振动加速度增幅值(1.0%~58.3%)相比非交叠段明显增大。与数值模拟结果对比可知,现场测试的结构振动加速度幅值略大,且现场测试的振动加速度峰值比数值模拟振动加速度峰值增大 38.7%。

知,早高峰前的运营时段内,交叠段的振动加速度峰值明显增大。对于底板测点,交叠段的振动加速度峰值为  $0.21 \text{ m/s}^2$ ,非交叠段的振动加速度峰值为  $0.07 \text{ m/s}^2$ ;对于侧墙测点,交叠段的振动加速度

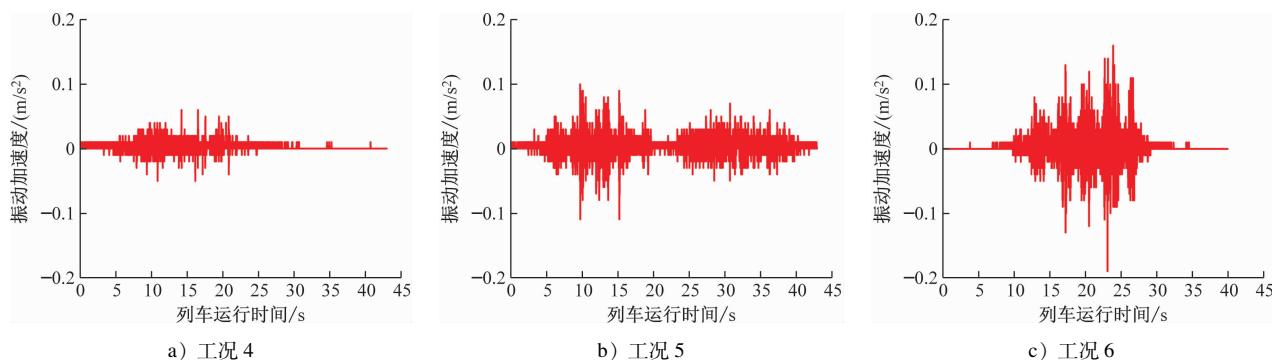


图 11 D1 测点 3 种运行工况下振动加速度时程曲线

Fig. 11 Vibration acceleration time-history curve at measuring point D1 under three operating conditions

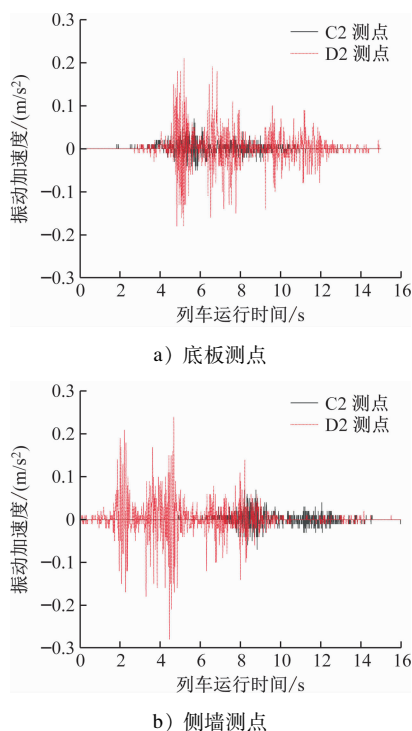


图 12 早高峰前运营时段 C2、D2 测点振动加速度时程曲线

Fig. 12 Vibration acceleration time-history curve at measuring points C2 and D2 during operation hours before morning peaks

峰值为  $0.28 \text{ m/s}^2$ , 非交叠段的振动加速度峰值为  $0.07 \text{ m/s}^2$ 。交叠段的加速度放大系数在底板测点和侧墙测点分别为 3.00、4.00。

#### 4.2.3 晚高峰时段车站非交叠段与交叠段振动加速度对比

晚高峰运营时段内, C1、D1 测点的振动加速度时程曲线与早高峰前运营时段变化规律相似, 但加速度峰值增大。底板测点交叠段 D1 的振动加速度峰值为  $0.37 \text{ m/s}^2$ , 侧墙测点交叠段 D1 的振动加速度峰值为  $0.39 \text{ m/s}^2$ , 而车站非交叠段 C1 的振动加

速度最大值为  $0.16 \text{ m/s}^2$ , 交叠段加速度放大系数在底板测点和侧墙测点分别为 2.31、2.44。

## 5 结语

1) 当两站四个方向同时运行时, 车站结构中心线、钢轨中心线及站台位置处的动位移放大系数分别为 4.57、3.49、3.36, 交叠车站的动力响应显著增大。

2) 不同工况下车致动应力的变化规律基本一致, 但交叠段的动应力峰值约为非交叠段的 2.94 倍。

3) 交叠段的结构振动加速度大于非交叠段, 加速度放大系数最大为 1.58, 加速度增幅为 1.0% ~ 58.3%, 实测振动加速度略大于数值模型计算结果。

4) 对于交叠段, 在不同运营时段内, 振动加速度放大系数稍有差异, 早高峰前运营时段下, 底板、侧墙加速度放大系数分别为 3.00、4.00, 高峰时段下, 底板、侧墙加速度放大系数分别为 2.31、2.44。

## 参考文献

- [1] 贺维国, 李若舟, 袁勇, 等. 地铁车站交叠式群洞结构施工过程动态安全变化对比研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 75.  
HE Weiguo, LI Ruozhou, YUAN Yong, et al. Comparative study on dynamic safety changes during construction process of metro station overlapping tunnel-group structure[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(12): 75.
- [2] 黄希. 交叉盾构隧道列车振动响应及其累积损伤研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
HUANG Xi. Study on the dynamic response and fatigue cumulative damage of cross shield tunnel under vibration load[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [3] 陈长江, 李琪睿, 田志尧. 列车循环荷载下交叠隧道结构疲劳寿命预测分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12):

- 96.
- CHEN Changjiang, LI Qirui, TIAN Zhiyao. Prediction and analysis of fatigue life of overlapped tunnel structure under cyclic train load[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12): 96.
- [4] 由广明, 刘维宁. 交叠车站与区间隧道列车振动对环境的影响[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(4): 40.
- YOU Guangming, LIU Weining. Environmental vibrations induced by trains' passages through overlapping station and tunnels [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2005, 29(4): 40.
- [5] 晏启祥, 陈文字, 陈行, 等. 近距离垂直交叠盾构隧道的列车振动响应特性及损伤规律[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(4): 78.
- YAN Qixiang, CHEN Wenyue, CHEN Hang, et al. Train vibration response characteristics and damage rule of vertically overlapping shield tunnels in close distance space[J]. China Railway Science, 2018, 39(4): 78.
- [6] 徐平, 李西峰, 张文跃. 近距离垂直交叠地铁盾构隧道的动力响应分析[J]. 地震工程学报, 2023, 45(5): 1008.
- XU Ping, LI Xifeng, ZHANG Wenyue. Dynamic response analysis of short-distance vertical overlapping subway shield tunnels [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(5): 1008.
- [7] 章慧健, 牛晓宇, 刘功宁, 等. 既有地铁列车振动荷载下密贴下穿通道的动力响应特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1273.
- ZHANG Huijian, NIU Xiaoyu, LIU Gongning, et al. Research on the dynamic response of the closely-attached underpass induced by the trains' vibrating load of metro[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1273.
- [8] DENG F H, MO H H, ZENG Q J, et al. Analysis of the dynamic response of a shield tunnel in soft soil under a metro-train vibrating load[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 16(4): 509.
- [9] 杨林, 房斌, 牛晓莉, 等. 轨道减振措施对高架列车致环境振动影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(12): 81.
- YANG Lin, FANG Bin, NIU Xiaoli, et al. Effect analysis of track vibration reduction measures on viaduct environmental vibration induced by vehicle operation[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(12): 81.
- [10] 陈扬勋. 上海市域铁路机场联络线大盾构隧道结构在列车荷载下的动力响应分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(6): 121.
- CHEN Yangxun. Dynamic response analysis of large shield tunnel structure of Shanghai urban railway airport link under train load [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(6): 121.
- [11] 彭红霞, 王怀东, 袁云辉, 等. 列车循环动荷载下地铁四孔交叠隧道长期沉降及控制分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 31.
- PENG Hongxia, WANG Huaidong, YUAN Yunhui, et al. Long-term settlement and control analysis of four-hole overlapping metro tunnel under train cyclic load[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 31.
- [12] 加武荣. 地铁列车振动荷载对下叠并行新建城际铁路盾构隧道的动力响应分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 96.
- JIA Wurong. Dynamic response analysis of train vibration load to the stacked parallel railway shield tunnel of the new intercity railway[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 96.
- [13] 李祥. 多孔交叠隧道下地铁运行对周边环境振动响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- LI Xiang. Study on the response of environmental vibration under overlapping multi-tunnels by subway train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [14] 姚志雄, 刘耀星, 张忠星, 等. 上覆地表车载作用下群洞隧道动力响应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(4): 1363.
- YAO Zhixiong, LIU Yaoxing, ZHANG Zhongxing, et al. Dynamic response of group tunnel under overlaying surface vehicle load [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(4): 1363.
- [15] 高伟, 耿传智, 贾坚. 地铁交叠式车站楼板振动响应三维动力有限元仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(2): 61.
- GAO Wei, GENG Chuanzhi, JIA Jian. 3D dynamic finite element simulation of floor vibration response of overlapping metro station[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(2): 61.
- [16] 崔豪, 刘晶, 张志华, 等. 武汉地铁7号线行车荷载下越江公铁两用隧道结构动力响应分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 19.
- CUI Hao, LIU Jing, ZHANG Zhihua, et al. Structural dynamics response analysis of Wuhan Metro Line 7 rail-cum-road cross-river tunnel under metro traffic load[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 19.
- [17] 顾章川. 基于Midas GTS有限元软件的下穿既有轨道交通结构安全保护研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(3): 181.
- GU Zhangchuan. Safety protection of under-passing existing rail transit structures based on Midas GTS finite element software[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(3): 181.
- [18] 邱宇. 基于损伤理论的倾斜液化场地地铁车站结构动力响应研究[D]. 济南: 济南大学, 2023.
- QIU Yu. Research on dynamic response of subway station structure in inclined liquefaction field based on damage theory[D]. Jinan: University of Jinan, 2023.
- [19] 彭子健. 复杂断面地铁车站结构动力响应规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- PENG Zijian. Study on dynamic response law of subway station structure with complex section[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [20] 边家靓. 地铁车站在地震荷载作用下的动力响应分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- BIAN Jialing. Dynamic response analysis of subway station under

- earthquake load [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [21] 陈轩. 地裂缝场地地铁车站结构地震破坏机理及灾变控制对策研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- CHEN Xuan. Study on mechanism of seismic failure characteristics and countermeasures of disaster control for subway station in ground fissure areas[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [22] 陶连金, 王文沛, 张波, 等. 近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对典型地铁车站结构动力响应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(6): 38.
- TAO Lianjin, WANG Wenpei, ZHANG Bo, et al. Effects of rupture forward directivity and fling step of near-fault ground motions on dynamic responses of representative subway station structure [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(6): 38.
- [23] 边金, 陶连金, 王文沛, 等. 强震下地铁车站结构动力响应特性[J]. 世界地震工程, 2010, 26(2): 114.
- BIAN Jin, TAO Lianjin, WANG Wenpei, et al. Dynamic response characteristics of underground subway station during the strong earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(2): 114.
- [24] 韩学川, 陶连金, 刘春晓, 等. 连体并行地铁车站结构地震响应分析[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(8): 929.
- HAN Xuechuan, TAO Lianjin, LIU Chunxiao, et al. Analysis of influencing factors of seismic response of connected parallel subway stations [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(8): 929.
- [25] 钟紫蓝, 申铁尧, 甄立斌, 等. 地震动强度参数与地铁车站结构动力响应指标分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 486.
- ZHONG Zilan, SHEN Yiyao, ZHEN Libin, et al. Ground motion intensity measures and dynamic response indexes of metro station structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 486.
- [26] 窦远明, 郑姝妍, 王建宁, 等. 远场地震动作用下地铁车站结构动力响应分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 321.
- DOU Yuanming, ZHENG Shuyan, WANG Jianning, et al. Dynamic response analysis of subway station structure under far field ground motion[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(4): 321.
- [27] 姜京伟, 李静波, 崔春义, 等. 基于双参数模型的地铁车站地震易损性分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2021, 38(5): 496.
- JIANG Jingwei, LI Jingbo, CUI Chunyi, et al. Seismic vulnerability analysis of subway station based on two-parameter model [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2021, 38(5): 496.
- 收稿日期:2025-03-12 修回日期:2025-04-20 出版日期:2025-07-10  
Received:2025-03-12 Revised:2025-04-20 Published:2025-07-10
- 通信作者:陈志宁,高级工程师,2410828@tongji.edu.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第71页)

- LI Dong, PENG Cheng. Design difficulties and temperature stress analysis of concrete construction alternative construction [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2019, 51(4): 471.
- [19] 李诗尧. 城市轨道交通大跨度钢管混凝土柱车站地震易损性仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 33.
- LI Shiyao. Seismic vulnerability simulation analysis of urban rail transit large-span concrete-filled steel tube column station [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 33.
- [20] 杨秀敏, 张顶立, 房倩. 北京地铁车站浅埋暗挖法建造技术发展综述[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(4): 1.
- YANG Xiumin, ZHANG Dingli, FANG Qian. Overview of the development of shallow burial and underground excavation construction technology for Beijing Subway stations [J]. Railway Standard Design, 2022, 66(4): 1.
- 收稿日期:2023-06-30 修回日期:2023-07-13 出版日期:2025-07-10  
Received:2023-06-30 Revised:2023-07-13 Published:2025-07-10
- 第一作者:王祥,正高级工程师,601498431@qq.com  
通信作者:王春凯,高级工程师,378138689@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license