

多线地铁列车-高架桥耦合系统动力分析*

武 隽¹, 司慧龙¹, 董 凯¹, 苗 通², 边一纯¹

(1. 长安大学公路学院 西安, 710064) (2. 广州地铁设计研究院股份有限公司 广州, 510010)

摘要 为了对多线地铁高架桥的车桥耦合作用进行分析, 基于 ANSYS 的参数设计语言 (parametric design language, 简称 APDL) 建立了能够考虑列车单双线行驶的地铁列车-桥耦合动力分析模型。以一座三跨四线地铁高架连续梁桥为研究对象, 采用四动二拖 6 辆编组 B 型地铁列车模型, 分析了地铁列车分别沿不同单双线运行时桥梁结构的动力响应。结果表明: 地铁列车对桥梁的横向位移和加速度影响较小; 双线对向运行时桥梁竖向位移和加速度响应峰值大于沿单线运行的情况; 双线对向运行时桥梁关键截面内力响应峰值约为沿单线运行时内力代数叠加的 67%~99%。所提出的数值模型和计算结果可以为多线地铁高架桥车桥耦合振动研究提供理论方法和评估依据。

关键词 地铁列车-桥耦合系统; 数值模拟; 多线地铁高架桥; 对向行车; 动力响应

中图分类号 TH17

引 言

近年来, 随着中国城市化进程的加快, 城市规模不断扩大, 城市轨道交通因其快捷、稳定和安全等优点进入大规模建设期^[1-2]。地铁高架桥具有减少对地面交通的影响、保证线路的平顺性等经济实用的优点, 成为城市轨道交通建设的重要组成部分^[3]。地铁列车通过桥梁时引起桥梁结构的振动, 对列车运行的安全性和平稳性产生影响^[4]。上述现象在多线地铁列车运行时更加明显, 因此有必要对多线地铁高架桥进行车桥耦合动力分析。

目前, 对于地铁高架桥车桥耦合的研究主要是单线列车过桥时列车与桥梁动力响应的分析, 对于多线地铁高架桥对向运行时列车与桥梁的相互作用与动力分析研究较少^[5]。在单线铁路方面, 文献[6]建立了 27 自由度的车辆模型, 通过理论计算和现场试验研究高速列车与桥梁的相互作用。Wang 等^[7]研究了桥梁变形对轻轨列车运行安全性和稳定性的影响, 建立了轻轨列车-轨道-桥梁相互作用的三维动力非线性有限元模型。Zhu 等^[8]提出一种列车-轨道-桥梁动力相互作用的高效混合方法, 通过与传统方法进行比较证明了所提方法的准确性。

在多线铁路方面, 史龙龙^[4]利用有限元软件建立了城际高速铁路高架线路双向会车动力分析模型, 对单、双向列车行驶于城际高架线上时所引起的

车、桥动力响应进行了计算分析。刘桂满^[5]利用有限元软件对多线铁路斜拉桥车桥耦合振动进行仿真研究。文献[9]利用自主开发的桥梁结构分析软件 BANSYS 建立有限元模型, 研究风荷载下多线铁路桥双车交会的动力响应, 并讨论双车横向间距和风速等对车辆和桥梁动力响应的影响。Wang 等^[10]对双线对开轻轨列车通过多跨简支梁桥时的动力性能进行分析, 结果表明, 随着车速增加, 轻轨列车的运行安全性降低, 平稳性变差。Xu 等^[11]对多线铁路桥双车交会时的风-车-桥耦合振动进行研究, 分析了各种工况对车、桥动力响应的影响。相比于一般的铁路桥梁(包含高铁), 地铁高架桥梁结构刚度较低, 地铁列车双线交会运行的频率高、运量大、轴重轻、行车密度大及线路平顺性较差, 且桥梁跨度受城市规划限制而大小不一^[12]。不同于高速铁路系统, 地铁由于受城市环境限制, 具有低速、高效的特点。较长的在线运行时间会使列车与桥梁之间的动态相互作用更加显著, 而车桥之间的动态相互作用在列车双向运行时表现的更加明显^[4], 因此需要对多线地铁高架桥的车桥耦合动力响应进行专门分析, 以减小桥梁结构振动。

笔者基于有限元软件 ANSYS 的二次开发平台 APDL, 建立了多线地铁高架桥的列车-桥耦合分析模型。利用“承台底等效刚度”法考虑桩-土相互作用, 以一座三跨四线的地铁高架连续梁桥为例, 分析

* 陕西省自然科学基金面上资助项目(2020JM-230, 2021JM-183); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(CHD300102219220); 国家自然科学基金青年基金资助项目(52208415)

收稿日期: 2021-05-21; 修回日期: 2021-11-01

地铁列车单、双线运行对高架桥的振动影响。

1 系统模型

1.1 地铁列车模型

地铁列车通常由6节车厢组成,各节车厢包括1个车体、2个转向架和4个轮对共7个刚体构件,一般情况下假定各节车厢之间相互独立。地铁列车动力学模型如图1所示,其中: M, J 为车体质量、惯性矩,下标 c, t 和 w 表示车体、转向架和轮对; k, c 为车辆的刚度和阻尼,上标 x, y 和 v 表示纵向、横向和竖向,下标 1, 2 表示一系、二系悬挂装置; $2a, 2b, 2d$ 和 $2s$ 为列车各部分构件的长度; h_1, h_2, h_3 分别为车体重心至二系弹簧、二系弹簧至转向架重心、转向架重心至轮对重心的距离。轮对与转向架、车体与转向架之间分别通过一系、二系悬挂系统相连接,并考虑一系、二系悬挂系统的弹簧刚度及阻尼系数。本研究主要关注列车-桥竖向的耦合,因此仅考虑车体、转向架的沉浮(Z_c, Z_t)、点头(φ_c, φ_t),以及轮对的沉浮(Z_w)自由度。

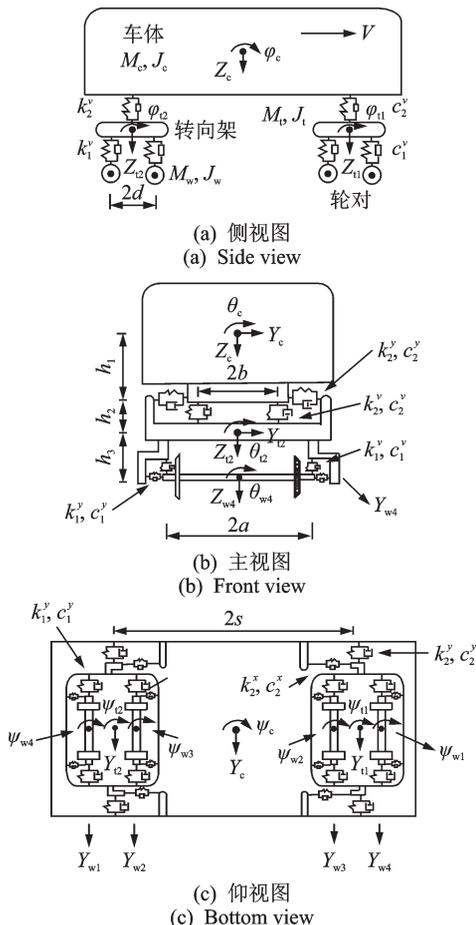


图1 地铁列车动力学模型

Fig.1 Metro Train's dynamics mode

对于图1所示的二系悬挂系统四轴地铁列车动力学分析模型,根据达朗贝尔原理,推导得到列车运动平衡微分方程^[3]为

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

其中: M, C, K 分别为质量、阻尼及刚度矩阵; z, \dot{z}, \ddot{z} 分别为位移、速度及加速度向量; F 为列车运行过程中所承受的外荷载向量;下标 v 表示车辆。

1.2 地铁列车-桥耦合系统模型

地铁列车-桥耦合振动方程^[13]为

$$\begin{bmatrix} M_v & 0 \\ 0 & M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_v \\ \ddot{z}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_v & C_{vb} \\ C_{bv} & C_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_v \\ \dot{z}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_v & K_{vb} \\ K_{bv} & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_v \\ z_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_v \\ P_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

其中: M, C, K, P 分别为质量、阻尼、刚度矩阵及作用力向量; $C_{vb}, C_{bv}, K_{vb}, K_{bv}$ 分别为车辆与桥梁相互作用的阻尼和刚度矩阵;下标 v 和 b 分别表示车辆和桥梁。

进行地铁列车-桥耦合系统模型求解时,车辆与桥梁模型之间通过位移协调关系相联系。列车和桥的接触通过轮轨密贴模型实现。第 i 个列车轮对与桥梁接触点处的竖向位移 $z_{wi}(x, t)$, 等于列车轮对对应位置处桥梁竖向位移 $z_{bi}(x, t)$ 和路面不平顺度 $r_i(x)$ 两部分之和。式(2)中,车轮作用于车辆子系统的力 $P_{vi}(i=1, 2, 3, 4)$ ^[14]为

$$P_{vi} = c_i [\dot{z}_{bi}(x, t) + \dot{r}_i(x)] + k_i [z_{bi}(x, t) + r_i(x)] \Big|_{x=x_i} \quad (3)$$

其中: P_{vi} 为车辆系统在第 i 个轮对处的荷载; c_i, k_i 分别为第 i 个轮对和车体间的阻尼和刚度矩阵。

任意时刻第 i 个车轮对桥梁的作用力 P_{bi} 为

$$P_{bi} = M_{ig} - M_{wi} \ddot{z}_{wi} - k_i(z_{wi} - z_c) - c_i(\dot{z}_{wi} - \dot{z}_c) \quad (4)$$

其中: M_{wi} 为第 i 个轮对的质量; P_{bi} 为桥梁受到来自车辆的作用力; M_{ig} 为列车轮对对桥梁的竖向静力作用; z_c 为车体的竖向位移; z_{wi} 为列车轮对与桥梁接触点处的竖向位移。

列车轮对所在点处桥梁的位移 $z_b(x, t)$ 、速度 $\dot{z}_b(x, t)$ 和加速度 $\ddot{z}_b(x, t)$ 需要进行插值运算。通过形函数^[15]将列车轮对处桥梁位移与桥梁单元节点处的位移转换,地铁列车-桥系统的位移如图2所示,得到梁单元内任意节点处的竖向位移 $z_b(x, t)$ 为

$$z_b(x, t) = N(x) \delta^e = \begin{bmatrix} (N_{z_b})_1 & (N_\theta)_1 & (N_{z_b})_2 & (N_\theta)_2 \end{bmatrix} \delta^e \quad (5)$$

$$\begin{cases} (N_{z_b})_1 = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 \\ (N_\theta)_1 = \xi - 2\xi^2 + \xi^3 \\ (N_{z_b})_2 = 3\xi^2 - 2\xi^3 \\ (N_\theta)_2 = l(\xi^3 - \xi^2) \end{cases} \quad (6)$$

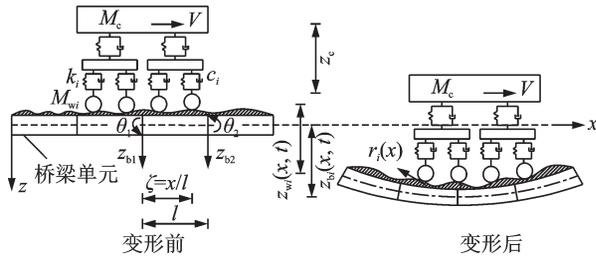


图 2 地铁列车-桥系统的位移示意图

Fig.2 Displacement of metro train-bridge system

其中: $N(x)$ 为平面梁单元形函数; δ^e 为节点位移向量, $\delta^e = \{z_{b1} \ \theta_1 \ z_{b2} \ \theta_2\}^T$; ξ 为列车轮对作用在梁单元的位置与单元长度的比值, $\xi = x/l$; l 为梁单元长度; $z_{b,i}$, θ_i ($i = 1, 2$)分别为梁单元两端节点的位移和转角。

t 时刻桥梁的竖向速度 $\dot{z}_b(x, t)$ 和竖向加速度 $\ddot{z}_b(x, t)$ 可由竖向位移 $z_b(x, t)$ 求导得到,利用Newmark- β 法可求解得到桥梁在 $t + \Delta t$ 时刻的位移、速度及加速度。以此类推,即可求得任意时刻桥梁结构的位移、速度及加速度。

笔者基于有限元软件ANSYS的参数设计语言APDL,建立了地铁列车-桥耦合振动分析模型,并通过动力分析求解得到桥梁的动力响应,地铁列车-桥耦合系统计算流程如图3所示。

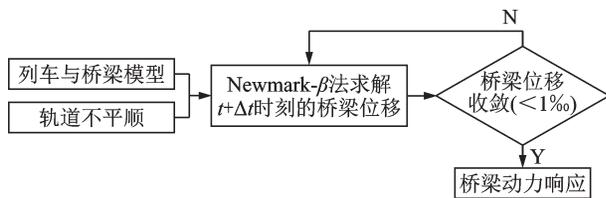


图 3 地铁列车-桥耦合系统计算流程图

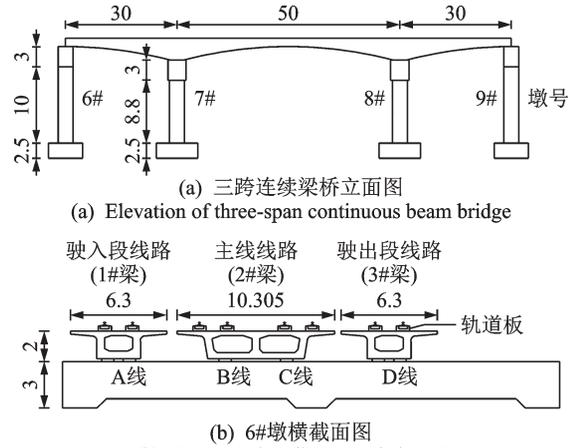
Fig.3 Calculation flowchart of metro train-bridge coupling system

2 地铁列车单双线运行分析

2.1 工程概况

以一座三跨四线地铁连续高架桥(30 m+50 m+30 m)为工程背景,如图4所示。桥梁线路布置为双线线路和2条单线线路,双线线路(主线)和单线线路的桥梁截面形式分别为单箱双室和单箱单室的箱型截面。桥梁梁高从支座到跨中由3.2 m减小到1.8 m,梁体混凝土强度等级为C50。桥梁墩高为8.8~10.0 m,采用C40混凝土,桥墩编号从左到右依次为6#~9#。

我国地铁列车主要有A型、B型、C型和L型,其中B型车是应用最广的地铁车型,因此笔者采用



(b) 6#墩横截面图

(b) Cross section diagram of pier 6#

图 4 地铁高架桥示意图(单位:m)

Fig.4 Schematic diagram of viaduct for metro train (unit: m)

四动二拖B型(拖车A+动车B+动车C+动车C+动车B+拖车A)地铁列车,1/2地铁列车编组如图5所示,地铁列车计算参数见表1^[16]。列车全长为119.08 m,拖车质量为48.34 t,长为20.50 m;动车质量为51.44 t,长为19.52 m。在进行建模分析时,单节车长简化为转向架定距为12.6 m,简化后列车模型为 $12.6 \times 6 + 1 \times 5 = 80.6$ m,完整列车正常过桥时间为 $(110 + 80.6) \times 3.6 / 80 + 0.1 = 8.677$ s^[17]。考虑桥梁结构的对称性,笔者选取以下3类工况进行对比分析:①A, B单线及AB对向运行;②B, C单线及BC对向运行;③AB对向运行和BC对向运行。多线地铁线路标记如图4(b)所示。

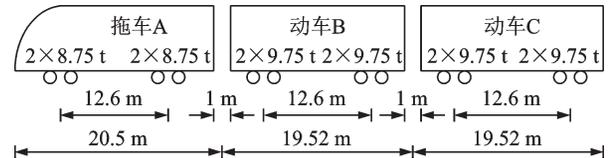


图 5 1/2地铁列车编组

Fig.5 Car composition of 1/2 metro train

表 1 地铁列车计算参数

Tab.1 Parameters of metro train

参数	拖车 A	动车 B, C
相邻车钩距离/m	20.50	19.52
转向架定距/m	12.6	12.6
车轴距离/m	2.5	2.5
车体质量/kg	39 900	39 500
转向架质量/kg	1 820	2 970
轮对质量/kg	1 200	1 500
一系阻尼/(N·s·m ⁻¹)	2×10^4	2×10^4
一系刚度/(N·m ⁻¹)	1.203×10^6	1.203×10^6
二系阻尼/(N·s·m ⁻¹)	1.6×10^5	1.6×10^5
二系刚度/(N·m ⁻¹)	4.35×10^5	4.35×10^5
车体转动惯量/(kg·m ²)	2.3×10^6	2.5×10^6

列车沿 AB 线对向运行时的有限元模型如图 6 所示,桥梁结构采用三维弹性梁单元 BEAM188 模拟,该单元建模简单,模型单元数量少,同时支持大转动和大应变等非线性行为^[18]。主梁单元长度为 4 m,主梁梁高为抛物线变化,在每一单元内为等截面,相邻单元为变截面,2#梁通过建立辅梁考虑偏心荷载的作用。桥梁支座采用可以考虑阻尼和刚度的 COMBIN14 单元模拟,全桥模型共有 587 个节点,1 503 个单元。墩底通过 6 个方向的弹簧刚度代替桩土模型,即采用“承台底等效刚度”法模拟桩土相互作用。桥梁支座单元及各桥墩下承台底等效刚度参数见表 2 和表 3。动力分析时,混凝土桥梁结构阻尼比取 0.05,桥梁模型第 1 阶频率为 0.952 Hz,第 2 阶频率为 1.055 Hz。

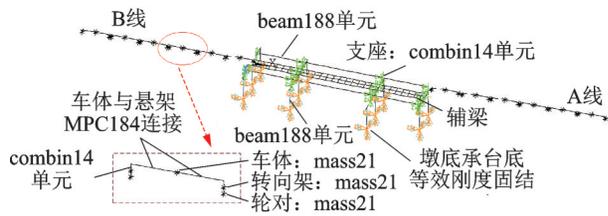


图 6 列车 AB 线对向运行有限元模型

Fig.6 Finite element model of train running in opposite direction along lines A and B

表 2 桥梁支座单元主要参数

Tab.2 Main parameters of bridge bearing element
kN/m

支座单元	顺桥向刚度	竖向刚度	横桥向刚度
固定支座	0.1×10^{20}	0.1×10^{20}	0.1×10^{20}
活动支座	0.1×10^2	0.1×10^2	0.1×10^2

表 3 各承台底等效刚度

Tab.3 Table of equivalent stiffness of cap bottom

等效刚度	6#墩	7#墩	8#墩	9#墩
$K_x/(kN \cdot m^{-1})$	3.58×10^5	3.58×10^5	3.58×10^5	3.58×10^5
$K_y/(kN \cdot m^{-1})$	3.47×10^5	3.47×10^5	3.47×10^5	3.47×10^5
$K_z/(kN \cdot m^{-1})$	2.60×10^6	2.60×10^6	2.60×10^6	2.60×10^6
$R_x/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$	1.34×10^7	1.34×10^7	1.34×10^7	1.34×10^7
$R_y/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$	1.16×10^7	1.16×10^7	1.16×10^7	1.16×10^7
$R_z/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$	1.00×10^8	1.00×10^8	1.00×10^8	1.00×10^8

地铁列车模型的建模采用弹簧-质量模型将列车模型简化^[19],车体和车轮各简化为一个质量单元 mass21,两者之间通过弹簧-阻尼单元 combin14 连接,前后车轮间通过刚性梁 MPC184 单元连接。假设各节车厢之间相互独立,不考虑各车厢间动力相互作用。列车车组过桥通过施加强迫位移命令、约束方程命令以及判断车轮位置等命令实现。为保证能够求解出对结构整体响应有贡献的最高阶模态,

积分时间步长取 0.005 s。本研究的地铁列车-桥耦合系统暂未考虑轨道结构的影响。

2.2 轨道不平顺

轨道不平顺是引起车辆系统振动的主要原因^[20],本研究主要关注轨道的竖向不平顺对车桥振动响应的影响。桥梁和地铁列车全长分别为 110 m 和 119.08 m,考虑列车在上、下桥过程中轨道竖向不平顺也会对桥梁产生影响,因此模拟了 300 m 的轨道不平顺,测点间距设为 0.1 m,高低不平顺的变化幅值为 3.81 mm,采用平顺性较好的德国低干扰谱转换的时域不平顺样本,如图 7 所示。

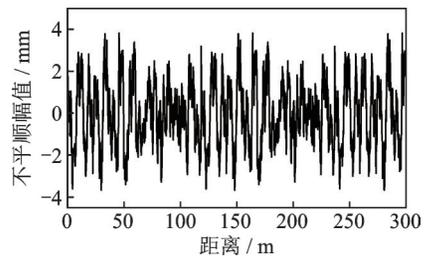


图 7 高低时域不平顺样本

Fig.7 Vertical irregularity samples

2.3 A, B 单双线列车-桥耦合振动分析

地铁列车运行速度一般为 80 km/h,笔者以此速度为基准对比地铁列车沿 A 单线(1#梁)、B 单线(2#梁)和 AB 双线 3 种工况下运行时桥梁的响应特征。首先分析了桥梁位移和加速度的响应,然后对桥梁内力进行对比研究。在下面的分析中,单线运行时假设 0 时刻列车头位于桥梁最左端,对向运行时一列车位于 2#梁 B 线最左端,另外一列车在 0 时刻位于 1#梁 A 线最右端。

当地铁列车沿 A, B 线单独运行及对向运行时桥梁 2#梁(见图 4)中跨跨中的竖向和横桥向位移时程曲线如图 8, 9 所示。由图可以看出,3 种工况下桥梁 2#梁中跨跨中的横桥向位移响应均较小,说明该桥梁具有足够的横向刚度。桥梁竖向位移主要由 B 单线贡献,列车沿 A 线单独运行时,由于远离 2#梁,所以 2#梁中跨跨中的竖向位移较小;当列车沿 B 线及 AB 线对向运行时,2#梁中跨跨中的竖向位移响应较大,且对向运行时由于列车数量增加,竖向荷载显著增大,位移响应大于沿 A, B 线单独运行时的结果,约为 B 线单独运行时的 1.05 倍。根据《城市轨道交通桥梁设计规范》(GB/T 51234—2017)的规定,梁式桥跨结构有列车竖向静活载引起的竖向挠度时,当跨径 $30 < L \leq 60$,则竖向挠度容许值为 $L/1 500$,该桥对应的容许值为 33.333 mm,而本桥

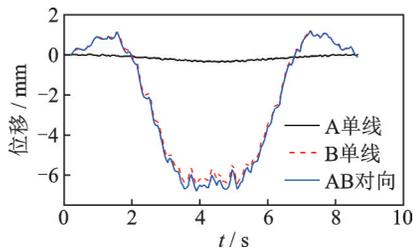


图 8 A,B线2#梁中跨跨中竖向位移时程对比

Fig.8 Comparison of vertical displacement at the midpoint of 2# beam for lines A and B

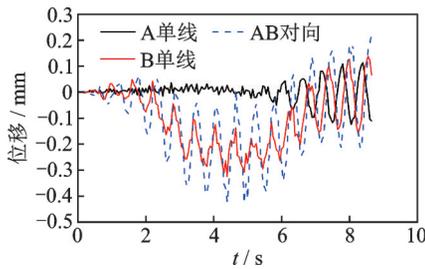


图 9 A,B线2#梁中跨跨中横桥向位移时程对比

Fig.9 Comparison of transverse displacement at the midpoint of 2# beam for lines A and B

中的最大竖向位移为 6.799 mm,满足限值要求。

桥梁2#梁中跨跨中的竖向和横向加速度结果如图 10,11所示。由图 10可知:桥梁竖向加速度响应主要由B单线贡献;列车沿A线单独运行时,对2#梁中跨跨中的竖向加速度影响较小;列车沿B线及AB线对向运行时,2#梁中跨跨中的竖向加速度响应均较大,两者的加速度幅值在同一水平下,相差在1%以内。图 11表明,横桥向加速度响应同竖向

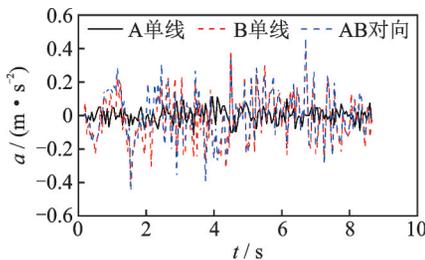


图 10 A,B线2#梁中跨跨中竖向加速度时程对比

Fig.10 Time history comparison of vertical acceleration in mid-span of 2# beam for lines A and B

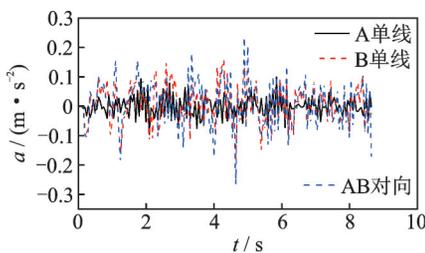


图 11 A,B线2#梁中跨跨中横桥向加速度时程对比

Fig.11 Time history comparison of lateral acceleration in mid-span of 2# beam for lines A and B

加速度相比均较小,列车沿AB线对向运行时,2#梁的横向加速度幅值为B线运行时加速度幅值的1.28倍。

根据《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)的规定,该桥的竖向振动加速度限值为 5.0 m/s²,根据《铁路桥梁检定规范》(铁运函[2004]120)的规定,桥跨横向振动加速度 $a_y \leq 1.4 \text{ m/s}^2$,本桥跨中竖向加速度峰值为 0.451 m/s²,横桥向加速度峰值为 0.265 m/s²,均满足规范限值要求。

基于以上时程分析结果,进一步对以下关键截面的位移和加速度进行统计分析:1#梁边跨跨中、1#梁中跨跨中、2#梁边跨跨中、2#梁中跨跨中、边墩墩顶(6#墩)以及中墩墩顶(7#墩)。

为了方便研究列车单双线运行时桥梁的振动响应,引入影响系数 $\beta^{[21]}$ 表示列车对向运行相比于单线运行的放大效应

$$\beta = \delta_{ij} / (\delta_i + \delta_j) \quad (7)$$

其中: β 为影响系数; δ_{ij} 为列车沿*i*和*j*线对向运行时的桥梁绝对值峰值响应; δ_i, δ_j 分别为列车沿*i*和*j*线单独运行时的桥梁绝对值峰值响应。

桥梁位移及加速度影响系数对比如表 4 所示。由表可以看出:桥梁横向位移及加速度影响系数 β 分别为 0.758~1.278 和 0.619~1.020,3种工况下桥梁的横向位移及加速度相比于竖向均较小;列车沿AB线对向运行时,桥梁横向位移和加速度的绝对值均比沿单线运行时的绝对值大,并有可能大于单线叠加的结果,最大相差 27.8%。这是由于列车沿AB线运行时其荷载均为偏心荷载,说明列车对向运行时对桥梁横向振动影响较大。由于列车对向运行时竖向荷载显著增大,桥梁竖向位移及加速度影响系数为 0.887~1.044 和 0.512~0.811,即列车沿AB线对向运行时桥梁竖向位移和加速度响应大于沿单线运行的情况,且其值有可能大于A,B单线运行代数叠加的结果。列车沿A,B单双线运行时,桥梁内力影响系数为 0.716~0.990。

表 4 A,B线桥梁位移及加速度影响系数对比

Tab.4 Comparison of influence coefficient of bridge displacement and acceleration for lines A and B

位置	位移影响系数		加速度影响系数	
	竖向	横桥向	竖向	横桥向
1#边跨	0.907	1.118	0.623	0.709
1#中跨	0.964	0.758	0.512	0.817
2#边跨	0.895	0.994	0.811	1.020
2#中跨	0.993	0.951	0.782	0.866
边墩墩顶	1.044	1.278	0.684	0.694
中墩墩顶	0.887	1.210	0.768	0.619

2.4 B, C 单双线列车-桥耦合振动分析

本节对比地铁列车沿 B 单线(2#梁)、C 单线(2#梁)和 BC 双线对向行驶时 3 种工况下桥梁的响应特征。当列车以 80 km/h 的速度沿 B, C 线单独运行及对向运行, 3 种工况下桥梁 2#梁中跨跨中的竖向和横桥向位移时程曲线如图 12, 13 所示。由图可以看出: 3 种工况下桥梁 2#梁中跨跨中的横桥向位移响应均较小; 列车沿 B, C 线单独运行时, 由于列车荷载对称作用于 2#梁上, 因此其中跨跨中的竖向位移响应基本一致; BC 线对向运行时, 由于列车数量增加, 竖向荷载显著增大, 桥梁位移响应大于沿单线运行时的结果。

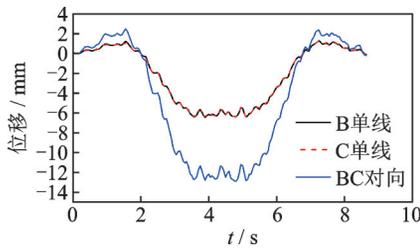


图 12 B, C 线 2#梁中跨跨中竖向位移时程对比
Fig.12 Comparison of vertical displacement at the midpoint of 2# beam for lines B and C

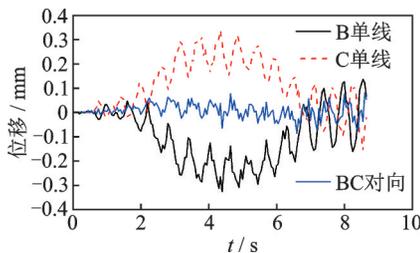


图 13 B, C 线 2#梁中跨跨中横桥向位移时程对比
Fig.13 Comparison of transverse displacement at the midpoint of 2# beam for lines B and C

桥梁 2#梁中跨跨中的竖向和横向加速度结果如图 14, 15 所示。由图 15 可知: 3 种工况下 2#梁中跨跨中的横桥向加速度响应均较小; 地铁列车沿 B, C 线单独运行时, 桥梁 2#梁中跨跨中的竖向加速度响应基本一致; BC 线对向运行时大于沿单线运行时的桥梁加速度响应, 对向运行时的竖向加速度幅值约为仅单向运行时的 1.5 倍。

根据 2.3 节中的规范规定, 3 种工况下, 桥梁跨中竖向加速度峰值为 0.355 m/s^2 , 横桥向加速度峰值为 0.270 m/s^2 , 最大竖向位移为 12.915 mm , 均满足规范限值要求。

B, C 线运行时桥梁位移、加速度的影响系数如表 5 所示。结果表明, 桥梁横向位移及加速度影响系数分别为 $0.797 \sim 0.995$ 和 $0.597 \sim 0.670$, 列车沿

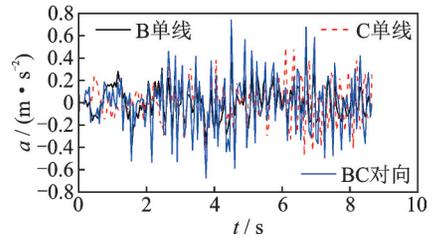


图 14 B, C 线 2#梁中跨跨中竖向加速度时程对比
Fig.14 Time history comparison of vertical acceleration in mid-span of 2# beam for lines B and C

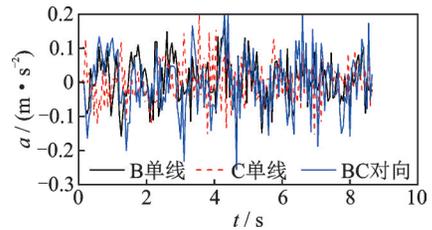


图 15 B, C 线 2#梁中跨跨中横桥向加速度时程对比
Fig.15 Time history comparison of lateral acceleration in mid-span of 2# beam for lines B and C

BC 线对向运行时的桥梁横向位移及加速度响应大于沿单线运行的结果, 均小于单线代数叠加的结果, 这是由于单线行车时线路偏载引起桥梁结构产生扭转变形, 而双线行车时大部分桥梁横向位移互相抵消^[21]。对于桥梁竖向响应, 由于车桥耦合的存在以及竖向荷载显著增大, 列车沿 BC 线对向运行时桥梁竖向位移和加速度响应均大于沿单线运行的情况, 其竖向位移及加速度影响系数分别为 $0.592 \sim 0.993$ 和 $0.532 \sim 0.839$, 对向运行时 2#梁跨中和边墩墩顶竖向位移约为单线运行时的 2 倍, 竖向加速度约为单线运行时的 1.69 倍, 即列车沿 BC 对向运行时对桥梁响应有放大效应, 但总体小于两个单线的叠加。列车沿 B, C 单双线运行时, 桥梁内力影响系数为 $0.671 \sim 0.932$ 。

表 5 B, C 线桥梁位移及加速度影响系数对比

Tab.5 Comparison of influence coefficient of bridge displacement and acceleration for lines B and C

位置	位移影响系数		加速度影响系数	
	竖向	横桥向	竖向	横桥向
2#边跨	0.592	0.797	0.534	0.662
2#中跨	0.993	0.857	0.776	0.612
边墩墩顶	0.816	0.995	0.839	0.670
中墩墩顶	0.869	0.873	0.532	0.597

2.5 AB 双线和 BC 双线对比分析

列车沿 AB 双线比沿 BC 双线的车载对桥的偏心要大, 此时桥梁动力响应对比如表 6 所示。由表可以看出: 列车沿 BC 双线运行的同时作用在 2#梁

上,导致列车沿BC双线运行时,2#梁中跨跨中竖向位移、加速度以及弯矩响应约为列车沿AB双线运行时的2倍;列车沿AB和BC双线运行时,横桥向位移、加速度响应均较小,由于列车沿AB线运行时的偏载作用以及BC双线行车时桥梁横向位移互相抵消,导致2#梁中跨跨中横桥向位移AB双线远远大于BC双线运行时的结果;加速度以及墩底剪力响应也略大于沿BC双线运行时的结果。

AB和BC双线的桥梁位移和加速度影响系数

的对比结果如表7所示。结果表明,列车沿双线对向运行时桥梁位移和加速度响应均大于沿单线运行的情况,而列车沿AB双线对向运行时桥梁位移和加速度响应中存在影响系数大于1的情况,即位移和加速度响应有可能大于AB单线运行代数叠加的结果,最大相差27.8%。列车沿BC双线对向运行时的桥梁位移及加速度响应影响系数均不大于1,即小于单线代数叠加的结果,这与列车荷载的偏载程度有关。

表6 列车AB和BC双线运行时桥梁动力响应对比

Tab.6 Response comparison between cases of AB and BC double-lines

线路	2#梁中跨跨中					中墩墩底 剪力/kN
	竖向 位移/mm	横桥向 位移/mm	竖向加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	横桥向加速度/ ($cm \cdot s^{-2}$)	弯矩/ ($10^3 kN \cdot m$)	
AB双线	6.799	0.428	0.451	0.265	4.047	113.313
BC双线	12.915	0.086	0.780	0.257	7.445	108.086
相差百分比/%	47.360	-397.670	42.180	-3.110	45.640	-4.840

相差百分比=(BC双线-AB双线)/BC双线

表7 列车AB和BC双线运行时桥梁位移及加速度影响系数对比

Tab.7 Comparison of influence coefficient of bridge displacement and acceleration of AB and BC double-lines

线路	位移影响系数				加速度影响系数			
	2#边跨	2#主跨	边墩墩顶	中墩墩顶	2#边跨	2#主跨	边墩墩顶	中墩墩顶
AB线竖向	0.895	0.993	1.044	0.887	0.811	0.782	0.684	0.768
AB线横桥向	0.994	0.951	1.278	1.210	1.020	0.866	0.694	0.619
BC线竖向	0.592	0.993	0.816	0.869	0.534	0.818	0.839	0.532
BC线横桥向	0.797	0.857	0.995	0.873	0.662	0.612	0.670	0.597

经过分析可知:列车沿A,B单双线运行时对于本桥来说均为偏载作用,对横桥向响应更不利;沿B,C单双线运行时,2条线路均作用在2#主梁上,会造成桥梁产生更大的竖向响应,代表列车运行时桥梁的最不利状态;列车沿三线和四线运行的工况不常见,在分析中暂未考虑。因此,笔者仅选取列车分别沿A,B单双线以及B,C单双线运行2种工况进行分析。

3 结 论

1) 列车沿双线运行时,桥梁中跨跨中的竖向位移和加速度响应大于沿单线运行的情况,且其值在部分时刻大于沿单线运行时代数叠加的结果。列车沿BC双向运行时,2#梁中跨跨中的竖向位移约为单向运行时的2倍,竖向加速度约为单向运行时的1.6倍,桥梁关键截面的内力约为沿单线运行时的内力之和的67%~93%。

2) 列车单、双线运行时,桥梁中跨跨中的横桥

向位移及加速度响应均较小。由于单线列车引起的偏载效应较大,会使桥梁产生扭转变形,列车沿AB线对向运行时,桥梁横向位移和加速度的绝对值比单线叠加的结果最大增大27.8%,说明列车沿AB线对向运行时对主梁的横向振动是有害的。

3) 2种不同双线对向运行的结果比较表明,列车沿BC双线(车载对桥梁截面的偏心小)对向运行时,桥梁2#梁中跨跨中竖向位移、加速度以及弯矩响应峰值约为列车沿AB双线对向运行时的2倍。由于列车沿AB线运行时的偏载作用,导致2#梁中跨跨中横桥向位移远远大于沿BC双线运行时的结果,同时加速度以及墩底剪力响应略大于沿BC双线运行时的结果。在进行桥梁结构分析时,应更关注列车沿AB双线运行时对桥梁横桥向的影响以及沿BC双线运行时对桥梁竖向响应的影响。

4) 双线列车对向运行时桥梁关键截面的竖向位移、加速度和内力响应均大于列车单向运行时的响应,对地铁列车运行的安全性及乘车舒适性造成不利影响。

参 考 文 献

- [1] 杨沛敏. 我国城市轨道交通规划建设现状分析及发展方向思考[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(12): 13-17.
YANG Peimin. Reflections on the development direction and analysis of current urban rail transit planning and construction in China [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(12):13-17. (in Chinese)
- [2] 王传福, 刘连连. 中国城市轨道交通的发展趋势分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(10):22-24.
WANG Cuanfu, LIU Lianlian. Analysis on the future development trend of urban rail transit in China[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(10):22-24. (in Chinese)
- [3] 金曼. 高架轨道交通引起的车桥振动及控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [4] 史龙龙. 城际高速铁路高架线路双向会车动力响应与舒适性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [5] 刘桂满. 多线铁路斜拉桥车桥耦合振动仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [6] 张楠, 夏禾. 铁路桥梁在高速列车作用下的动力响应分析[J]. 工程力学, 2005(3):144-151.
ZHANG Nan, XIA He. Dynamic analysis of railway bridge under high speed train [J]. Engineering Mechanics, 2005(3):144-151. (in Chinese)
- [7] WANG S J, XU Z D, LI S, et al. Safety and stability of light-rail train running on multispan bridges with deformation [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(9):1-7.
- [8] ZHU Z H, ZHANG L, GONG W, et al. An efficient hybrid method for dynamic interaction of train-track-bridge coupled system [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2020, 47(9):1084-1093.
- [9] 徐昕宇, 李永乐, 陈科宇, 等. 多线铁路桥双车会车的风-车-桥耦合振动研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1): 41-46.
XU Xinyu, LI Yongle, CHEN Keyu, et al. Study of wind-train-bridge coupling vibration of multitrack railway bridge under meeting of two trains[J]. Bridge Construction, 2017, 47(1):41-46. (in Chinese)
- [10] WANG S J, XU Z D, LIU F S, et al. Effect of girder vertical deformation of simply supported beam bridges on the running properties of double lane light rail train [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(3):359-366.
- [11] XU X Y, LI Y L, CHEN K Y, et al. Study of wind-train-bridge coupling vibration of multi track railway bridge under meeting of two trains[J]. Bridge Construction, 2017, 47(1):41-46.
- [12] 欧阳冲. 城市高架轨道交通箱梁车桥耦合动力响应分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [13] 邓露, 何维, 王芳. 不同截面类型简支梁桥动力冲击系数研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(14):70-75.
DENG Lu, HE Wei, WANG Fang. Dynamic impact factors for simply supported bridges with different cross-section types [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(14):70-75. (in Chinese)
- [14] 谢秉敏. 基于 ANSYS 的车桥耦合振动分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [15] 崔圣爱, 刘品, 曹艺缤, 等. 多线铁路车桥耦合振动仿真研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(5):835-843.
CUI Shengai, LIU Pin, CAO Yibin, et al. Simulation study on multiline vehicle-bridge coupled vibration [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(5):835-843. (in Chinese)
- [16] 马龙祥, 赵瑞桐, 甘雨航, 等. 车型及编组对地铁运营诱发环境振动的影响研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11):24-30.
MA Longxiang, ZHAO Ruitong, GAN Yuhang, et al. Effects of train type and formation on metro operation induced environmental vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(11):24-30. (in Chinese)
- [17] 刘耀. 考虑列车-桥梁耦合振动影响的结构地震反应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [18] 张铭哲. 地震与移动荷载共同作用下连续梁桥的振动问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [19] 张海平. 大跨径轻轨桥梁车桥耦合振动分析[J]. 特种结构, 2016, 33(5):28-32.
ZHANG Haiping. Vehicle-bridge coupling vibration of long-span light railway bridge [J]. Special Structures, 2016, 33(5):28-32. (in Chinese)
- [20] 王贵春, 潘家英. 轨道不平顺导致的车桥耦合振动分析[J]. 铁道工程学报, 2006(8):30-33.
WANG Guichun, PAN Jiaying. Analysis of vehicle-bridge coupled vibration due to track irregularities [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(8):30-33. (in Chinese)
- [21] 葛延龙. 跨座式单轨交通车辆-轨道梁耦合振动分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.



第一作者简介:武隽,女,1982年11月生,博士、副教授。主要研究方向为车桥耦合及桥梁可靠度评估等。曾发表《大跨桥梁台风风场全过程动态数值模拟》(《振动工程学报》2019年第38卷第14期)等论文。

E-mail:jun.wu@chd.edu.cn