

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.135



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 脉冲型近场地震作用下列车-简支梁桥的耦合振动

雷虎军, 刘伟

(福建工程学院 土木工程学院, 福州 350118)

**摘要:**相比中远场地震,近场地震含有高能速度脉冲,会激发结构显著的位移响应。为研究该速度脉冲对高速铁路简支梁桥车桥系统动力响应的影响,采用三角函数法模拟速度脉冲,并与无脉冲的远场地震叠加,合成不同脉冲类型、脉冲周期和脉冲幅值的脉冲型近场地震动,以跨径32 m的典型高速铁路简支梁桥为例,采用自编的车-轨-桥-地震分析程序TTBSAS进行仿真计算,详细探讨脉冲参数对车桥系统动力响应的影响。结果表明:近场地震速度脉冲会显著增大高速铁路简支梁桥车桥系统的动力响应,在近场区域的车桥耦合振动分析中,不能忽略速度脉冲的影响;脉冲类型、脉冲周期和脉冲幅值对简支梁桥位移的影响远大于桥梁加速度和桥上列车的行车安全性指标,在选取速度脉冲参数时可不考虑桥上列车的影响;在本文计算条件下,双半波脉冲和三半波脉冲近场地震作用下桥梁的动力响应幅值明显大于单半波脉冲,且当脉冲周期为2.0 s时车桥系统的动力响应最大。

**关键词:**车桥耦合振动;近场地震;速度脉冲;行车安全性;仿真计算

**中图分类号:** U441      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2022)03-0044-10

## Coupling vibration analysis of train-simply supported beam bridge under near-field earthquake with pulse

LEI Hujun, LIU Wei

(College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P. R. China)

**Abstract:** Compared with the medium-field and far-field earthquake, the near-field earthquake contained velocity pulse of high-energy, which would introduce significant displacement of the structure. To study the influence of the velocity pulse on Train-Bridge System (TBS) of high-speed railway Simply Supported Beam Bridge (SSBB), the trigonometric function method was used to simulate the velocity pulse and superimpose with the far-field earthquake without pulse to synthesize the pulse type near-site earthquake with different pulse types, pulse periods and pulse amplitude. Taking a typical high-speed railway SSBB with a span of 32 m as an example, the simulation was carried out by using the self-designed program of TTBSAS. The near-field seismic velocity pulse can significantly increase the dynamic response of the TBS of the high-speed railway SSBB, and the influence of the velocity pulse cannot be ignored in analysis of TBS

**收稿日期:** 2021-03-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(51878173, 51608120); 福建省自然科学基金(2020J01883)

**作者简介:** 雷虎军(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要从事铁路车桥耦合振动研究, E-mail: leihujun@yeah.net.

**Received:** 2021-03-11

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51878173, 51608120); Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2020J01883)

**Author brief:** LEI Hujun (1986-), PhD, associate professor, main research interest: train-bridge coupling vibration, E-mail: leihujun@yeah.net.

coupling vibration in the near field. The influence of pulse type, pulse period and pulse amplitude on the displacement of SSBB is much greater than that of bridge acceleration and train safety index, and the influence of train on bridge cannot be considered in selection of pulse parameters. The dynamic response amplitude of the bridge under the near-field earthquake action of double half-wave pulse and three-half-wave pulse is obviously larger than that of single half-wave pulse, and the dynamic response of TBS is the largest when the pulse period is 2.0 s.

**Keywords:** train-bridge coupling vibration; near-site earthquake; velocity pulse; running safety; simulation calculation

中国自北向南密集分布着 5 大地震区和 23 条地震带,地震发生频率高、强度大。随着高速铁路网的不断加密,高速铁路桥梁跨越断层或位于断层 20 km 范围内的情况不可避免,在该区域发生的地震称为“近场地震”。《铁路桥梁抗震设计规范(2009 版)》指出,当桥梁必须跨越断层时,宜采用小跨度、低墩高的简支梁桥。因此,简支梁桥在近场区域的高速铁路线路中得到了广泛应用,该类桥型在设计使用年限内遭遇近场地震作用的几率很大。

相比中远场地震,近场地震最显著的特征是含有高能速度脉冲<sup>[1]</sup>,会激发结构显著的位移响应。由于高速列车对桥上线路的平顺性和稳定性要求极高,近场地震速度脉冲产生的大位移对高速铁路桥梁十分不利。关于近场地震速度脉冲引起的铁路桥梁抗震问题已受到广泛关注。例如,王炎等<sup>[2]</sup>采用远场地震叠加速度脉冲的方法生成不同参数的近场地震,系统研究了铁路减震桥梁的弹塑性地震响应,结果表明,考虑速度脉冲后,铁路桥梁的减震效果会显著降低;陈令坤等<sup>[3-4]</sup>分别输入一组近场脉冲型地震和一组远断层地震,对比分析了高铁简支梁桥的弹塑性地震响应,结果表明,当脉冲周期与结构的弹塑性周期接近时,会加剧桥梁的非线性地震响应;他们还研究了轻轨交通桥梁在近场地震竖向和水平地震联合作用下的弹塑性地震反应,结果表明,竖向分量对轻轨车低频运行安全性的地震响应影响较大;刘正楠等<sup>[5]</sup>通过建立高铁连续梁线桥一体化模型,分别输入 3 条近场地震和 3 条远场地震进行仿真计算,研究了摩擦摆支座的隔震效果,结果表明,近场地震的脉冲效应会加剧隔震连续梁桥邻梁的碰撞;陈伟等<sup>[6]</sup>以台湾 Chi-Chi 地震记录作为输入,分析了高铁连续梁桥的地震易损性,结果表明,近场地震的破坏力更强。除此之外,众多研究表明<sup>[7-11]</sup>,地震在威胁桥梁本身安全的同时还会诱发显著的行车安全问题。然而,到目前为止,涉及近场地震速度脉冲对高速铁路简支梁桥及桥上列车动力响应影响的研

究很少,这对于近场区域高铁桥梁的运营安全十分不利。

关于近场脉冲型地震的研究大多受限于历史记录少、记录台站分散等因素,人工模拟近场脉冲型地震是突破该瓶颈的重要途径。关于近场脉冲型地震动的模拟,学者们提出了一些简化方法。其中,Alavi 等<sup>[12]</sup>首先根据近场地震动与脉冲型地震作用下结构动力响应具有相似性的特点,提出用简化脉冲表示近断层地震动,并在之后提出了等效脉冲的概念;Makris 等<sup>[13]</sup>采用三角函数模拟了 3 种典型的速度脉冲波形,并验证了该脉冲波形与实际近场地震记录具有较高的吻合度;王炎等<sup>[2]</sup>在远场地震动的基础上叠加三角函数脉冲,模拟了不同参数的近场地震动;杨庆山等<sup>[14]</sup>用简化函数表示等效速度脉冲,并将地震波的低频和低频成分叠加,合成了近场地震动。在上述方法中,文献<sup>[2]</sup>的方法最为实用,且模拟效率高,笔者参考该方法合成近场脉冲型地震动。

基于已有研究,首先采用底波叠加速度脉冲的方法生成不同参数的近场脉冲型地震动。在此基础上,以跨径 32 m 的典型高速铁路简支梁桥为例,将不同脉冲类型、脉冲周期和脉冲幅值的近场地震动输入自编的列车-轨道-桥梁-地震分析程序 TTBSAS 进行仿真计算,详细探讨脉冲参数对高速列车-简支梁桥系统动力响应的影响。

## 1 近场脉冲型地震动模拟

### 1.1 脉冲模型

采用 Makris 等<sup>[13]</sup>提出的 3 类典型脉冲模型与底波叠加,生成近场脉冲型地震动,如图 1 所示。

图 1 中,A 类、B 类和 C 类分别为单半波型、双半波型和三半波型脉冲,可采用三角函数法模拟,其数学表达式分别为:

A 类单半波脉冲模型

$$v(t) = \frac{V_p}{2} - \frac{V_p}{2} \cos(\omega_p t), 0 \leq t \leq T_p \quad (1)$$



图 1 Makris 脉冲模型

Fig. 1 The pulse model of Makris

B 类双半波脉冲模型

$$v(t) = V_p \sin(\omega_p t), 0 \leq t \leq T_p \quad (2)$$

C 类三半波脉冲模型

$$v(t) = V_p \sin(\omega_p t + \varphi) - V_p \sin \varphi, \quad (3)$$

$$0 \leq t \leq \left(n + \frac{1}{2} - \frac{\varphi}{\pi}\right) T_p$$

式中:  $V_p$ 、 $T_p$ 、 $\omega_p$  分别为速度脉冲的幅值、周期和圆频率。脉冲形状参数  $n$  与相位角  $\varphi$  有关, 两者之间的关系应满足式(4), 当  $n=1$  时,  $\varphi=0.0697\pi$ ; 当  $n=2$  时,  $\varphi=0.0410\pi$ 。取  $n=1$  进行研究。

$$\cos[(2n+1)\pi - \varphi] + [(2n+1)\pi - 2\varphi] \sin \varphi - \cos \varphi = 0 \quad (4)$$

在模拟等效速度脉冲的过程中, 根据 Somerville<sup>[15]</sup> 和 Mavroeidis<sup>[16]</sup> 提出的回归关系式式(5)、式(6), 通过震级  $M_w$  和震中距  $R$  即可确定脉冲周期  $T_p$  和脉冲幅值  $V_p$ 。

$$\ln(V_p) = -2.31 + 1.15M_w - 0.5 \ln(R) \quad (5)$$

$$\lg(T_p) = -2.9 + 0.5M_w \quad (6)$$

### 1.2 合成过程

采用 MATLAB 2018a 软件编写近场脉冲型地震动的模拟程序。其中, 在将底波和速度脉冲叠加时, 使底波的速度峰值与速度脉冲的首波峰值重合, 其基本流程如图 2 所示。

### 1.3 合成实例及验证

以 1940 年 El Centro 波为例, 叠加 A 类脉冲合成近场脉冲型地震动。其中, El Centro 波的记录台站为 El Centro Array #9, 分量为 I-ELC180。假设震级为 7.0, 震中距为 10 km, 将震级和震中距参数带入式(5)、式(6)即可解得脉冲周期和脉冲速度峰值分别为 4.0 s、0.98 m/s。近场脉冲型地震动的合成过程依次如图 3~图 5 所示。

通过对比合成波和典型历史近场脉冲型地震波 (Chi-Chi 地震, 1999 年, 震级为 7.6, 记录台站为 TCU068, 分量为 TCU068-E) 的加速度反应谱特征来验证合成波的可靠性。为便于比较, 将所有地震波的 PGA 调至 0.3g, 合成波的脉冲周期与历史记录波一致, 均为 5 s。历史记录波调幅后的加速度和

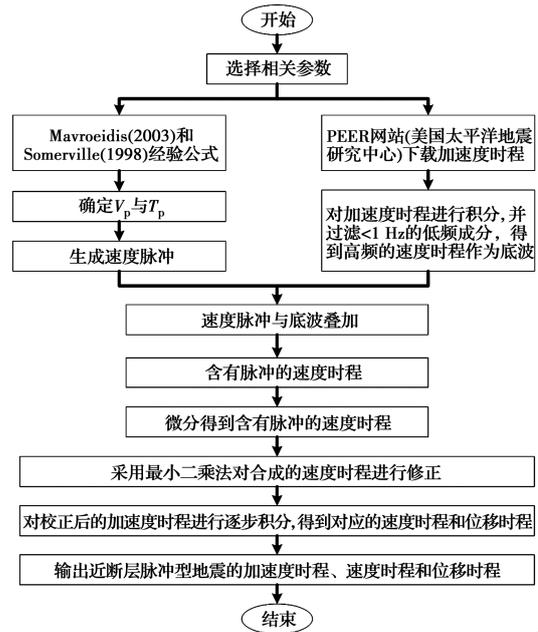


图 2 近场脉冲型地震动合成流程图

Fig. 2 Flow chart of near-fault pulse-type earthquake synthesis

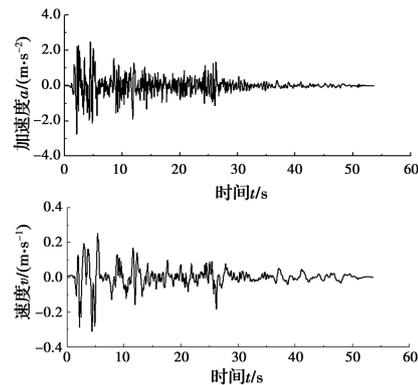


图 3 El Centro 底波

Fig. 3 El Centro as a base wave

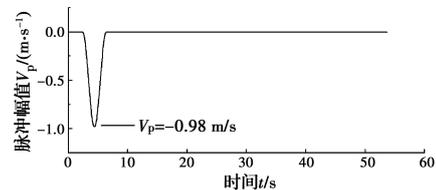


图 4 等效速度脉冲

Fig. 4 The equivalent velocity pulse

速度时程如图 6 所示, 加速度反应谱对比如图 7。

由图 7 可知, 合成波的加速度反应谱具备了底波和历史记录波的特征。在底波的卓越周期附近, 历史记录波、合成波与底波的加速度反应谱峰值接近; 随着脉冲类型从单半波变化至三半波, 合成波的加速度反应谱逐渐增大, 其中单半波型合成波与历

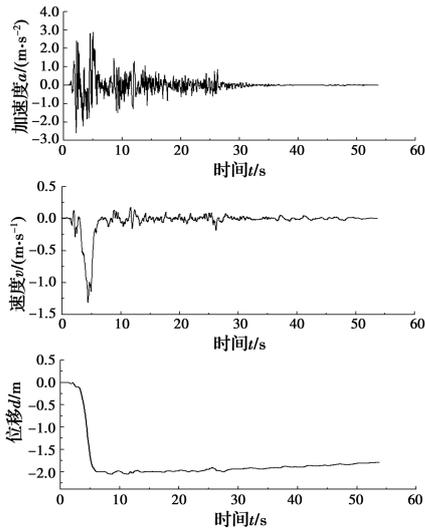


图 5 合成波

Fig. 5 Synthetic wave

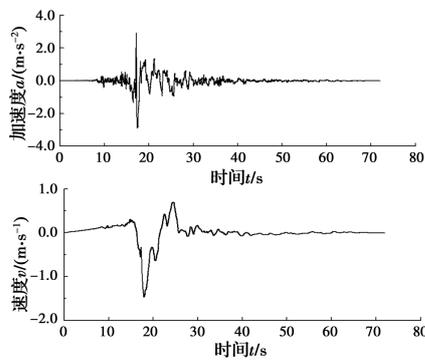


图 6 TCU068-E 地震波

Fig. 6 TCU068-E seismic wave

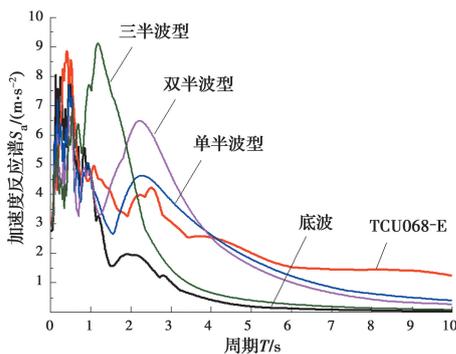


图 7 加速度反应谱对比

Fig. 7 Comparison of acceleration response spectra

历史记录波最为接近,原因是单半波型的合成波和历史记录波同属一种脉冲类型,因此按脉冲类型将模拟近场地震动分类可提高合成的准确性。此外,模拟的所有近场地震动的 PGV/PGA 均大于 0.2,满足近场地震动的基本判断标准,由此可验证合成方法及编制的近场脉冲型地震生成程序有效。

## 2 地震-列车-桥系统耦合振动模型

采用 TTBSAS 程序进行仿真计算。TTBSAS 程序是在 BDAP 程序<sup>[17]</sup>的基础上研发的,广泛应用于地震作用下的车桥耦合振动分析。地震-车-轨-桥动力模型是 TTBSAS 程序的基本模型,是在车-轨-桥耦合振动模型的基础上输入地震激励形成的,如图 8 所示。其动力方程可统一表达为

$$\begin{cases} M_v \ddot{u}_v + C_v \dot{u}_v + K_v u_v = P_{tv} \\ M_t \ddot{u}_t + C_t \dot{u}_t + K_t u_t = P_{vt} + P_{bt} + P_{gt} \\ M_b \ddot{u}_b + C_b \dot{u}_b + K_b u_b = P_{tb} + P_{gb} \end{cases} \quad (7)$$

式中:下标 v、t、b 分别代表车辆、轨道和桥梁子系统;  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为质量、阻尼和刚度矩阵;  $u$ 、 $\dot{u}$ 、 $\ddot{u}$  分别为位移、速度和加速度列向量;  $P_{tv}$  和  $P_{vt}$  为轨道与车辆间的相互作用力;  $P_{bt}$  和  $P_{tb}$  为桥梁与轨道间的相互作用力;  $P_{gt}$  和  $P_{gb}$  为地基作用于轨道和桥梁的地震力。式(7)的详细推导、求解及验证见文献[18]。

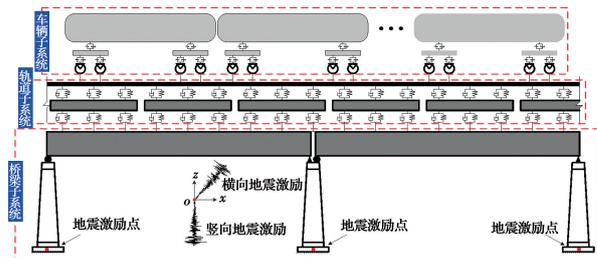


图 8 地震-车-轨-桥动力模型

Fig. 8 Train-track-bridge dynamic model under earthquake

## 3 算例研究

### 3.1 计算条件

以 10 孔跨径 32 m 的典型高速铁路简支梁桥为例进行仿真计算,设计时速为 350 km/h。主梁为单箱单室,箱梁长 32.6 m、高 3.5 m,顶板宽 12 m,底板宽 5 m;桥墩采用圆柱墩,墩高 10 m、直径 4 m。采用 Midas Civil 2020 建立桥梁分析模型后,将其导入 TTBSAS 程序即可得到仿真计算的桥梁模型,单跨简支梁桥模型如图 9 所示。轨道采用板式无砟轨道,车辆采用 8 节编组的高速列车,轨道和车辆的详细参数见文献[19]。

根据该桥的场地类别,以 El Centro 地震波为底波,合成不同参数的近场地震动作为输入。其中,合成波包含 3 种脉冲类型,每种脉冲类型考虑 7 种脉

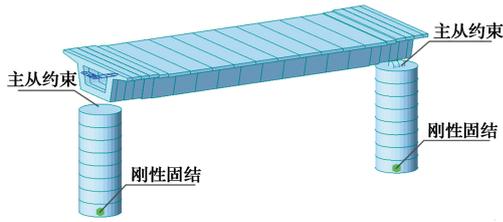


图 9 单跨简支梁桥模型

Fig. 9 Model of single-span simply supported beam bridge

冲周期, 每种脉冲周期分 11 种脉冲幅值, 合成了近场脉冲型地震动共 231 条, 如表 1 所示。地震波依次按脉冲类型、脉冲周期、脉冲幅值的顺序进行编号。不同参数的单半波脉冲近场地震动加速度反应谱对比见图 10 和图 11。

表 1 近场脉冲型地震动列表

Table 1 List of near-field pulse earthquakes

编号	脉冲类型	脉冲周期/s	脉冲幅值/(m · s <sup>-1</sup> )
1~77	单半波型		
78~154	双半波型	2、2.5、3、	0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、
155~231	三半波型	3.5、4、4.5、5	1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5

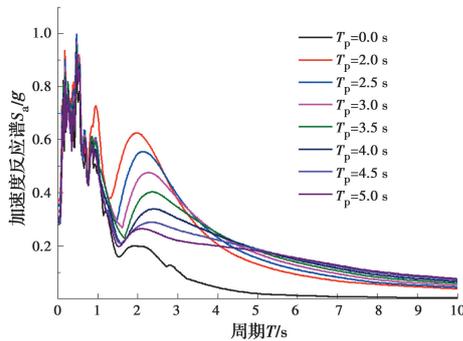


图 10 不同脉冲周期的单半波脉冲近场地震动反应谱对比  
Fig. 10 Comparison of near-field vibration response spectra of single half-wave pulses with different pulse periods

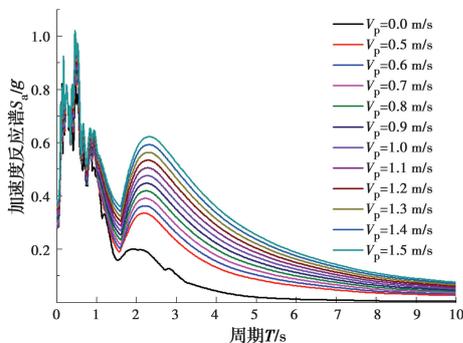


图 11 不同脉冲幅值的单半波脉冲近场地震动反应谱对比  
Fig. 11 Comparison of near-field vibration response spectra of single half-wave pulses with different pulse amplitudes

由图 10 和图 11 可见, 考虑速度脉冲后, 合成波的加速度反应谱均大于底波, 且随着脉冲周期的增大, 速度脉冲的影响逐渐减弱; 而脉冲幅值越大, 其地震加速度反应谱越大。将上述 231 条合成波和底波沿桥梁横向、竖向按 1:0.65 的比例同时输入 TTBSAS 程序进行仿真计算, 考虑列车过桥的 3 种车速: 250、300、350 km/h, 即可得到不同脉冲类型、脉冲周期和脉冲幅值近场地震动作用下车桥系统的动力响应。

### 3.2 脉冲类型的影响分析

首先考察脉冲类型对车桥系统动力响应的影响。保持脉冲周期 3.0 s、速度脉冲峰值 1.0 m/s 不变, 假设地震发生时刻与列车上桥时刻相同。图 12 给出了列车以车速 300 km/h 过桥时不同脉冲类型近场地震动作用下桥梁跨中的横向位移时程对比。

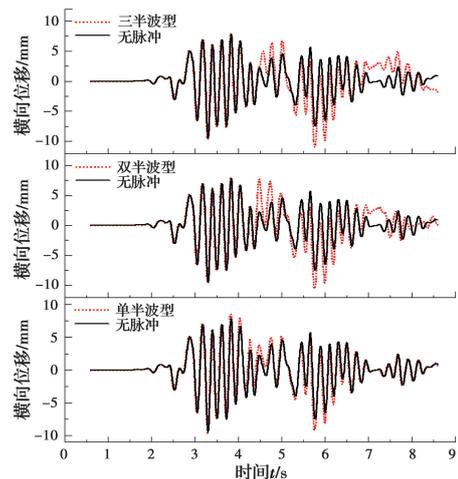


图 12 横向位移时程对比

Fig. 12 Time-history comparison of lateral displacement

由图 12 可见, 考虑速度脉冲后, 桥梁跨中的横向位移时程波形与无脉冲时相似, 但位移峰值有增大的趋势。相比单半波型, 双半波型和三半波型近场地震动作用下桥梁位移的幅值增大更明显。不同脉冲类型近场地震动作用下列车以不同车速过桥时桥梁跨中的动力响应幅值统计见表 2。

由表 2 可得: 1) 不同车速下, 考虑近场地震动速度脉冲后, 桥梁的横(竖)向位移幅值和横(竖)向加速度幅值均比无脉冲时大, 且桥梁位移响应的增幅大于桥梁加速度。例如, 当车速为 250 km/h 时, 桥梁横、竖向位移的最大增幅分别为 11.5% 和 24.1%, 而桥梁横、竖向加速度的最大增幅仅 2.1% 和 1.4%;

表2 不同脉冲类型地震作用下桥梁跨中动力响应幅值对比

Table 2 Comparison of dynamic response amplitudes of bridges under different pulse types of earthquakes

指标	车速/(km·h <sup>-1</sup> )	方向	无脉冲	单半波型	双半波型	三半波型	相对值 I	相对值 II	相对值 III
位移/ mm	250	横	9.524	9.714	10.216	10.622	2.0%	7.3%	11.5%
		竖	5.665	6.176	7.030	7.027	9.0%	24.1%	24.0%
	300	横	9.420	9.602	10.497	10.897	1.9%	11.4%	15.7%
		竖	6.013	6.114	6.473	6.349	1.7%	7.7%	5.6%
	350	横	9.365	9.544	10.642	11.144	1.9%	13.6%	19.0%
		竖	5.648	5.766	6.471	6.302	2.1%	14.6%	11.6%
加速 度/g	250	横	0.755	0.770	0.770	0.771	2.0%	2.0%	2.1%
		竖	0.494	0.500	0.500	0.501	1.2%	1.2%	1.4%
	300	横	0.753	0.765	0.765	0.766	1.6%	1.6%	1.7%
		竖	0.495	0.519	0.519	0.520	4.8%	4.8%	5.1%
	350	横	0.750	0.766	0.765	0.767	2.1%	2.0%	2.3%
		竖	0.496	0.513	0.513	0.514	3.4%	3.4%	3.6%

注:相对值 I、相对值 II、相对值 III 分别为单半波型、双半波型和三半波型相对于无脉冲的相对差值。

2)随着脉冲类型从单半波型变化至三半波型,其动力响应有逐渐增大的趋势,且单半波型近场地震作用下的桥梁动力响应明显小于双半波型和三半波型。进一步考察脉冲类型对列车行车安全性指标<sup>[20]</sup>(指标 1:脱轨系数;指标 2:轮重减载率;指标 3:轮对横向力)的影响,如图 13~图 15 所示。

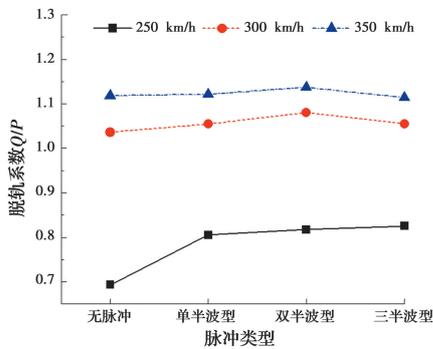


图 13 脱轨系数随脉冲类型的变化

Fig. 13 Variation of derailment coefficient with pulse types

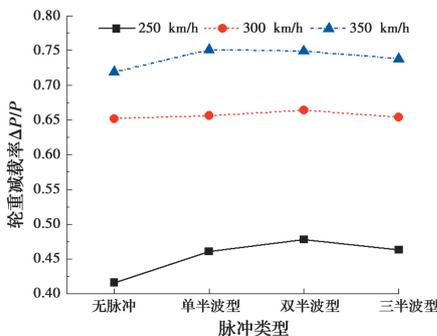


图 14 轮重减载率随脉冲类型的变化

Fig. 14 Variation of wheel load reduction rate with pulse types

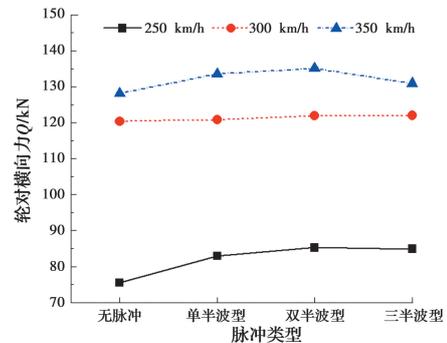


图 15 轮对横向力随脉冲类型的变化

Fig. 15 Variation of lateral force of wheelset with pulse types

由图 13~图 15 可得:1)考虑速度脉冲后,列车的行车安全性指标均比无脉冲时大,且在行车速度为 250 km/h 时增幅最为显著,其中,指标 1~3 的最大增幅分别为 16.2%、10.8%、9.8%;2)随着脉冲类型的变化,不同车速下列车的行车安全性指标有先增大后减小的趋势,但变化幅度不大;3)列车的行车安全性指标均随车速的增大而急剧增大,且增幅大于脉冲类型。由此可见,脉冲类型对列车行车安全性指标有影响,但影响小于桥梁位移。

### 3.3 脉冲周期的影响分析

考察脉冲周期对车桥系统动力响应的影响。脉冲周期分别取 0.0、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 s,其中,0.0 s 表示远场地震动。为便于对比,计算时保持速度脉冲峰值 1.0 m/s 不变,脉冲类型假设为双半波型。不同脉冲周期近场地震动作用下桥梁系统的动力响应幅值对比如图 16~图 18 所示,列车的行车安全性指标对比如图 19~图 21 所示。

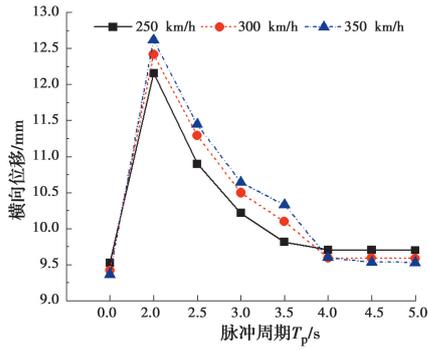


图 16 桥梁跨中横向位移随脉冲周期的变化

Fig. 16 Variation of mid-span transverse displacement with pulse period

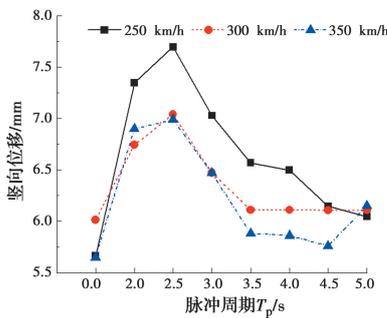


图 17 桥梁跨中竖向位移随脉冲周期的变化

Fig. 17 Variation of mid-span vertical displacement with pulse period

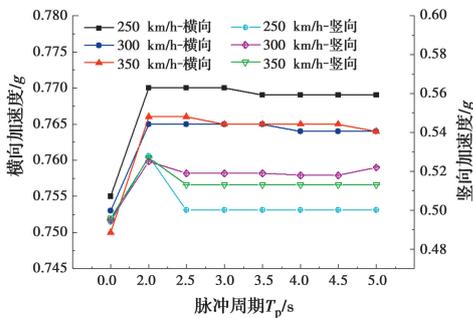


图 18 桥梁跨中加速度随脉冲周期的变化

Fig. 18 Variation of mid-span acceleration with pulse period

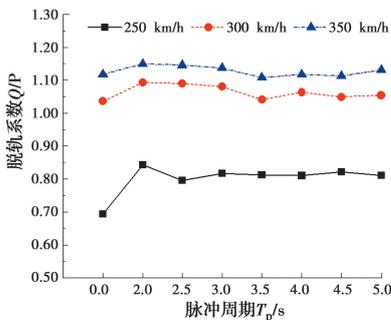


图 19 脱轨系数随脉冲周期的变化

Fig. 19 Variation of derailment coefficient with pulse period

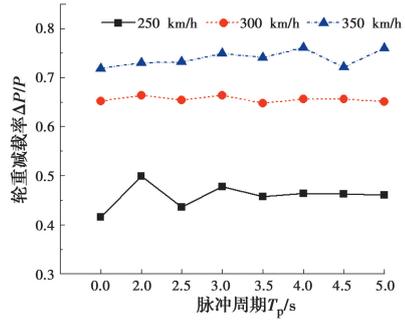


图 20 轮重减载率随脉冲周期的变化

Fig. 20 Variation of wheel load reduction rate with pulse period

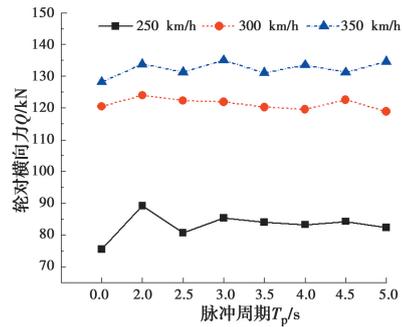


图 21 轮对横向力随脉冲周期的变化

Fig. 21 Variation of lateral force of wheelset with pulse period

由图 16~图 18 可得:1)脉冲周期对桥梁的位移响应影响显著。当脉冲周期由 2.0 s 变化至 5.0 s 时,桥梁的横向和竖向位移均急剧减小,但均大于远场地震动时的响应;2)相比桥梁位移,桥梁的加速度响应随脉冲周期的变化不明显,但同样均比远场地震动时大。由此说明,脉冲周期是近场地震作用下影响桥梁动力响应的重要参数,且对桥梁位移响应的影响大于桥梁加速度。

由图 19~图 21 可得:1)不同车速下,列车的行车安全性指标随脉冲周期的增大呈减小的趋势,但变化幅度不大;2)在脉冲周期为 2.0 s 且车速为 250 km/h 时,行车安全性指标 1~3 相比无脉冲时的增幅最大,分别达 21.6%、20.0%和 18.2%。由此可见,对于高速铁路简支梁桥,列车的行车安全性指标随近场地震速度脉冲周期的变化不敏感,对于本文的计算条件,在脉冲周期为 2.0 s 时列车的行车安全性指标最大。

### 3.4 脉冲幅值的影响分析

进一步考察脉冲幅值对车桥系统动力响应的影响。保持脉冲周期为 3.0 s 不变,脉冲幅值依次取 0.0、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5 m/s,其中,脉冲幅值为 0.0 表示无脉冲。不同

脉冲幅值的近场地震作用下桥梁跨中的位移和加速度响应对比分别如图 22 和图 23 所示,列车的行车安全性指标对比分别见图 24~图 26。

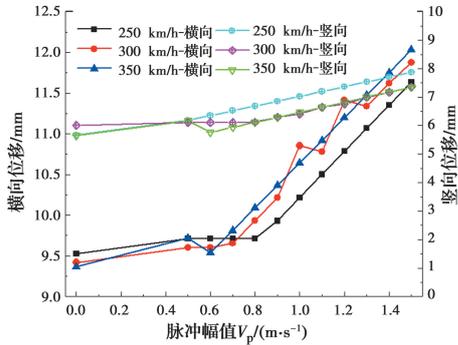


图 22 桥梁跨中位移随脉冲幅值的变化  
Fig. 22 Variation of mid-span displacement with pulse amplitude

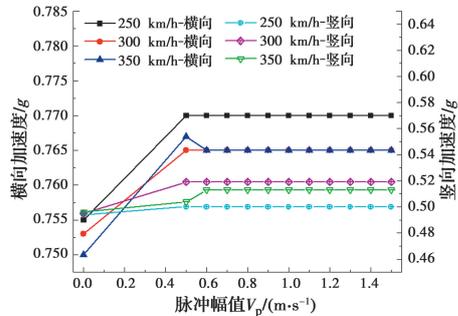


图 23 桥梁跨中加速度随脉冲幅值的变化  
Fig. 23 Variation of mid-span acceleration with pulse amplitude

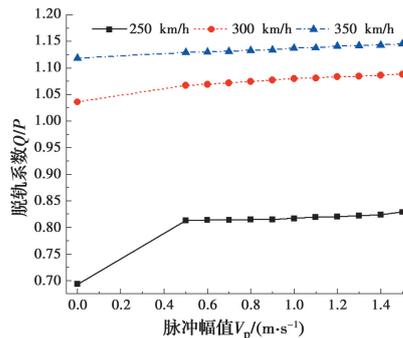


图 24 脱轨系数随脉冲幅值的变化  
Fig. 24 Variation of derailment coefficient with pulse amplitude

由图 22 和图 23 可得:1)不同车速下,桥梁的横向位移和竖向位移均随脉冲幅值的增大而线性增大,且横向位移的增幅大于竖向位移;2)桥梁的加速度响应在不同脉冲幅值下相差不大。由此说明,近场地震脉冲幅值与桥梁的位移响应呈线性正相关,且对桥梁加速度的影响不明显。

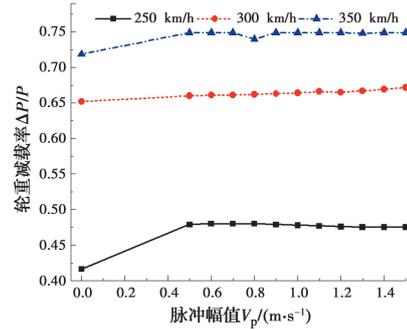


图 25 轮重减载率随脉冲幅值的变化  
Fig. 25 Variation of wheel load reduction rate with pulse amplitude

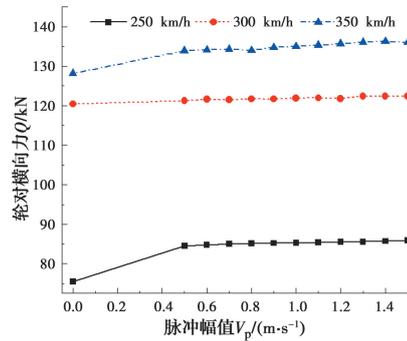


图 26 轮对横向力随脉冲幅值的变化  
Fig. 26 Variation of lateral force of wheelset with pulse amplitude

由图 24~图 26 可得:1)不同车速下,列车的 3 项行车安全性指标均随速度脉冲幅值的增加而增大,但增速小于桥梁位移;2)当车速为 250 km/h、脉冲幅值由无脉冲变化至 0.5 m/s 时,指标 1~3 的增幅最大,分别为 17.3%、15.1%和 12.0%。由此可见,脉冲幅值对列车的行车安全性指标有影响,但其影响小于桥梁位移,在实际计算中可根据震级和震中距进行计算。

### 4 结论

基于车桥耦合振动理论,以 TTBSAS 程序为计算工具,通过人工合成不同参数的脉冲型近场地震动,详细探讨了脉冲类型、脉冲周期和脉冲幅值对典型高速铁路简支梁桥车桥系统动力响应的影响,得到以下主要结论:

1)近场地震速度脉冲会显著增大高速铁路简支梁桥车桥系统的动力响应,在近场区域的车桥耦合振动分析中不能忽略该速度脉冲的影响。对于本文的计算条件,当车速为 250 km/h 时,考虑近场地震

速度脉冲时桥梁的横向、竖向位移最大增幅分别为11.5%、24.1%，列车的脱轨系数、轮重减载率和轮对横向力指标最大增幅分别为16.2%、10.8%和9.8%。

2)对于高速铁路简支梁桥，脉冲类型、脉冲周期和脉冲幅值对桥梁位移的影响远大于桥梁加速度和桥上列车的行车安全性指标，在选取近场区域的速度脉冲参数时可不考虑桥上列车的影响。

3)对于本文的计算条件，双半波脉冲和三半波脉冲近场地震作用下桥梁的动力响应幅值明显大于单半波脉冲，且当脉冲周期为2.0 s时车桥系统的动力响应最大，同时，脉冲幅值与简支梁桥的位移响应呈线性正相关。

本文仅针对近场区域高速铁路线路中应用最广泛的简支梁桥车桥系统进行了研究，近场地震速度脉冲对其他桥型的影响还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 贾俊峰, 杜修力, 韩强. 近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 1-12.  
JIA J F, DU X L, HAN Q. A state-of-the-art review of near-fault earthquake ground motion characteristics and effects on engineering structures [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 1-12. (in Chinese)
- [2] 王炎, 谢旭, 申永刚. 近场地震作用下铁路减震桥梁地震响应研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(12): 102-109.  
WANG Y, XIE X, SHEN Y G. Seismic response of isolated railway bridge subjected to near-fault ground motion [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(12): 102-109. (in Chinese)
- [3] 陈令坤, 张楠, 夏禾. 方向脉冲及竖向效应对高铁桥梁地震响应影响[J]. 振动工程学报, 2016, 29(4): 704-713.  
CHEN L K, ZHANG N, XIA H. Effects of directivity pulse and vertical earthquake on seismic response of high-speed railway bridge [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(4): 704-713. (in Chinese)
- [4] CHEN L K, QIN H X, JIANG L Z, et al. A near-fault vertical scenario earthquakes-based generic simulation framework for elastoplastic seismic analysis of light rail vehicle-viaduct system [J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(6): 949-973.
- [5] 刘正楠, 陈兴冲, 张永亮, 等. 近远场地震作用下基于摩擦摆支座的高速铁路连续梁桥减隔震研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(1): 47-54.  
LIU Z N, CHEN X C, ZHANG Y L, et al. Research on seismic mitigation and isolation of continuous beam bridge for high speed railway based on friction pendulum bearing under near-and-far field ground motions [J]. China Railway Science, 2019, 40(1): 47-54. (in Chinese)
- [6] 陈伟, 王冠, 杜彦良, 等. 高速铁路连续梁桥近断层地震易损性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 212-218.  
CHEN W, WANG G, DU Y L, et al. Vulnerability analysis of the continuous high-speed railway bridge under near-fault earthquake [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(2): 212-218. (in Chinese)
- [7] 蒋丽忠, 周旺保, 魏标, 等. 地震作用下高速铁路车-轨-桥系统安全研究进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(9): 1-13.  
JIANG L Z, ZHOU W B, WEI B, et al. Research progress of train-track-bridge system safety of high-speed railway under earthquake action [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(9): 1-13. (in Chinese)
- [8] JIN Z B, PEI S L, LI X Z, et al. Effect of vertical ground motion on earthquake-induced derailment of railway vehicles over simply-supported bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 383: 277-294.
- [9] 朱志辉, 杨乐, 王力东, 等. 地震作用下铁路斜拉桥动力响应及行车安全性研究[J]. 工程力学, 2017, 34(4): 78-87, 100.  
ZHU Z H, YANG L, WANG L D, et al. Dynamic responses and train running safety of railway cable-stayed bridge under earthquakes [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(4): 78-87, 100. (in Chinese)
- [10] 李小珍, 辛莉峰, 王铭, 等. 车-桥耦合振动2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 126-138.  
LI X Z, XIN L F, WANG M, et al. State-of-the-art review of vehicle-bridge interactions in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 126-138. (in Chinese)
- [11] 常志旺, 潘毅, 江赛雄, 等. 脉冲型地震动作用下大跨输煤栈桥的动力响应[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 95-103.

- CHANG Z W, PAN Y, JIANG S X, et al. Dynamic response analysis of long-span coal-conveyer gallery subjected to pulse-like ground motions [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 95-103. (in Chinese)
- [12] ALAVI B, KRAWINKLER H. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004, 33(6): 687-706.
- [13] MAKRIS N, CHANG S P. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2000, 29(1): 85-107.
- [14] 杨庆山, 田玉基. 地震地面运动及其人工合成[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
YANG Q S, TIAN Y J. Earthquake ground motions & artificial generation [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [15] SOMERVILLE P G. Development of an improved representation of near fault ground motions [C]// SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data, 1998.
- [16] MAVROEIDIS G P. A mathematical representation of near-fault ground motions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(3): 1099-1131.
- [17] 李小珍. 高速铁路列车~桥梁系统耦合振动理论及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2000.  
LI X Z. Studies on theory and application of train-bridge system coupling vibration in high-speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2000. (in Chinese)
- [18] 雷虎军. 非一致地震激励下列车-轨道-桥梁耦合振动及行车安全性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
LEI H J. Coupling vibration and running safety of train-track-bridge system under non-uniform seismic excitations [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [19] LI X Z, ZHANG Z J, ZHANG X. Using elastic bridge bearings to reduce train-induced ground vibrations: An experimental and numerical study [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 85: 78-90.
- [20] 铁路桥涵地基和基础设计规范: TB 10093—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.  
Code for design on subsoil and foundation of railway bridge and culvert: TB 10093-2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd. 2017. (in Chinese)

(编辑 黄廷)