

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022021020240480

文章编号:1674-599X(2024)02-0079-09

引用格式:殷新锋,岳晓沛,林伟,等.大件运输车作用下宽幅斜拉桥动力响应分析[J].交通科学与工程,2024,40(2):79-87.

Citation: YIN Xinfeng, YUE Xiaopei, LIN Wei, et al. Dynamic response analysis of wide cable-stayed bridge under customized transportation vehicle[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 79-87.

# 大件运输车作用下宽幅斜拉桥动力响应分析

殷新锋<sup>1</sup>,岳晓沛<sup>1</sup>,林伟<sup>2</sup>,苟勇<sup>2</sup>,晏万里<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.四川公路桥梁建设集团有限公司,四川 成都 610041)

**摘 要:**为研究大件运输车辆作用下桥梁的动力响应,建立了以实际工程为背景的宽幅斜拉桥有限元模型和精细化的车辆有限元模型,并利用LS-DYNA程序的接触算法实现了相较于传统方法更为真实的车-桥耦合振动模拟,以车辆类型、行驶车道、行驶速度等为参数,对比不同工况下桥梁的振动响应。结果表明:在大件运输车辆通过宽幅斜拉桥时,相较于标准车辆会引起桥梁更大的竖向下挠和拉索索力;边车道工况下桥梁的竖向位移变幅和索力变幅大于中间车道工况下的变幅;大件运输车辆行驶速度的提升会使桥梁竖向下挠和拉索索力增加,且相较于中间车道工况,边车道工况下桥梁响应对车速的敏感度更高。

**关键词:**车-桥耦合振动;动力响应;LS-DYNA;大件运输车辆;宽幅斜拉桥

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

## Dynamic response analysis of wide cable-stayed bridge under customized transportation vehicle

YIN Xinfeng<sup>1</sup>, YUE Xiaopei<sup>1</sup>, LIN Wei<sup>2</sup>, GOU Yong<sup>2</sup>, YAN Wanli<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Sichuan Highway and Bridge Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** An finite element model of wide cable-stayed bridge and refined finite element model of vehicle are established for the purpose of studying the dynamic responses under customized transportation vehicle (CTV), based on a practical engineering background. Compared with traditional methods, a more realistic simulation for vehicle-bridge coupled vibration is realized by using the contact algorithm within LS-DYNA. According to the parameters of vehicle type, lane and speed, the obtained conclusion from contrastive analysis of bridge's vibration response in different working conditions are as follows. When CTV passes wide cable-stayed bridge, it brings greater vertical deflection and cable force to bridge compared with standard vehicles. Amplitude of bridge's vertical displacement and cable force in side lane working condition is larger than that in middle lane working condition. The increase of CTV's passing speed brings greater vertical displacement and cable force, and the sensitivity of bridge dynamic responses to vehicle speed is higher in side lane working condition compared with the middle lane working condition.

**Key words:** vehicle-bridge coupled vibration; dynamic response; LS-DYNA; customized transportation vehicle; wide cable-stayed bridge

收稿日期:2022-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52078057);长沙理工大学研究生实践创新项目(SJCX202023)

通信作者:殷新锋(1980—),男,教授,主要从事桥梁结构施工监控、桥梁结构风-车-桥耦合振动方面的研究工作。

E-mail:yinxinfeng@163.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

现阶段我国公路交通事业蓬勃发展,在车流密度不断提高的同时,以大件运输车为代表的大型、重载车辆也逐步增多,此类车辆的总质量往往超过 60 t,有的甚至达到了数百吨。在此类重载车辆的通行下,桥梁的荷载效应与普通车辆作用下的有所不同<sup>[1-3]</sup>。移动车辆作为桥梁运营期内最主要的动力荷载形式,对桥梁的使用性能和运营安全有着重要的影响,在车辆经过桥梁的动态过程中不仅对桥梁施加汽车本身的静力作用,还有车-桥间耦合振动带来的惯性作用,这大大加剧了桥梁的损伤,缩短了桥梁的使用寿命。其中,大件运输车等特重车是桥梁结构开裂、破坏和耐久性下降的关键荷载因素<sup>[4-6]</sup>。宽幅桥梁由于宽跨比较大,其受力特点不同于一般的桥梁,其空间效应明显<sup>[7]</sup>。基于以上原因,对大件运输车作用下宽幅桥梁的动力响应进行研究具有十分重要的意义。

以往对于车-桥耦合振动理论的研究常采用简化的计算模型,如用一些移动荷载的组合近似表示移动车辆,未能充分考虑车辆动力特性和柔性轮胎等对车-桥耦合振动的影响,具有较大的局限性<sup>[8-10]</sup>。近年来,商业有限元软件的快速迭代发展以及计算机算力的大幅增加,使得研究人员能够在分析中采用更为真实且精细的车-桥有限元模型计算车-桥系统的耦合振动效应,很好地解决了古典理论难以全面、合理地模拟车-桥耦合振动的问题。

首先,本文基于 LS-DYNA 程序分别建立了依托规范的标准车辆模型和依托真实运输工况的大件运输车辆模型,建立了基于工程背景的双向八车道宽幅非对称斜拉桥有限元模型,并通过程序的显式分析 Lagrange 算法将车辆子系统和桥梁子系统进行耦合,更为真实地反映桥梁在车载作用下的动力响应;其次,选取主跨跨中某桥面节点和斜拉索单元作为数据分析测点,对比得到标准车辆和大件运输车辆作用下的桥梁响应特点;最后,以大件运输车辆的行驶车道和车辆速度为参数,分工况对比分析得到桥梁动力响应变化规律。

## 1 LS-DYNA 动力分析理论

LS-DYNA 程序以 Lagrange 算法为主,兼有 ALE 和 Euler 算法,以显式求解为主,又可进行隐式分析,是功能齐全的几何非线性、材料非线性和接触非线

性程序。用 LS-DYNA 的显式算法能快速求解多重非线性准静态问题以及复杂的动态接触或碰撞问题<sup>[11-12]</sup>。LS-DYNA 程序中的接触算法、多点约束和特殊关键字<sup>[13]</sup>,如 \*AIRBAG 等,可为模拟车-桥之间的相互作用提供巨大的帮助,利用该程序建立的车-桥精细化三维模型能够很好地模拟车-桥动态耦合振动,从而为研究桥梁在车辆荷载作用下的动态响应提供支持<sup>[14-15]</sup>。

LS-DYNA 程序的显式算法有以下特点<sup>[16-17]</sup>:

- 1) 每个非线性增量步的刚度矩阵都不同,内力包含弹性项,所以不用生成总体刚度矩阵,也不用进行矩阵求逆。
- 2) 在以质量矩阵为对角矩阵的情况下,可以运用矩阵的乘法得到右端的等效荷载向量,且不需对该矩阵进行求逆运算。
- 3) 在用显式算法求解时,其最大时间步长受 Courant 稳定性条件的限制,故利用 Courant 稳定性条件得出的解便是无条件稳定的。
- 4) 对于中心差分法,可以通过设置小的时间步,使计算保持稳定。

## 2 车-桥耦合有限元模型

### 2.1 标准车辆模型的建立

参照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中定义的标准车辆荷载参数,本文标准车辆模型全长 15.0 m,总质量 55.0 t,其轴载、轴距示意图及统计结果分别见图 1 和表 1。

该标准车辆有限元模型共由 248 199 个节点和 106 564 个单元组成,其三维有限元模型如图 2 所示。整个车辆模型分为上部 and 下部结构,对车辆的上部结构采用刚性质量块简化建模,对车辆的下部结构(包括悬架系统、阻尼减震系统、完整的车轮和车轴等)采用精细化建模,以充分反映车辆的动力特性。其中,悬架系统采用壳单元、质量单元、弹簧阻尼单元等进行模拟,不同悬架单元间的连接多采用多点约束的方式;车轮由轮胎、轮盘和轮毂组成,轮胎使用橡胶材料,轮毂和轮盘使用线弹性钢材,并用 LS-DYNA 特有的关键字 \*AIRBAG 定义轮胎的胎压,用 \*INITIAL\_VELOCITY 和 \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION 分别定义车体的平动线速度和车轮的转动角速度。标准车辆模型的部件、材

料、节点、单元等数量统计见表2,标准车辆的中悬架及车轮有限元模型如图3所示。

在建模过程中充分考虑了接触类型、多点约束和实际的边界条件等多种关键因素,从而使车辆有限元模型能够较真实地反映车-桥耦合振动。

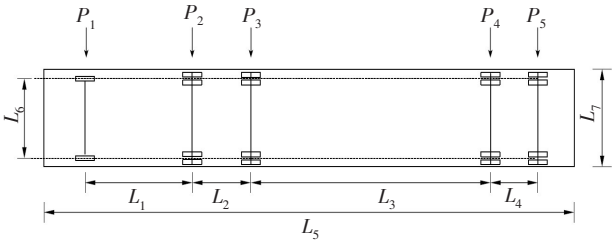


图1 标准车辆轴载、轴距示意图

Fig. 1 Schematic diagram of standard vehicle's axle weight and wheel base

表1 标准车辆轴载、轴距统计表

Table 1 Statistics table of standard vehicle's axle weight and wheel base

轴载/kN					轴距/m							
$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$	
30	120	120	140	140	3.0	1.4	7.0	1.4	15.0	1.8	2.5	

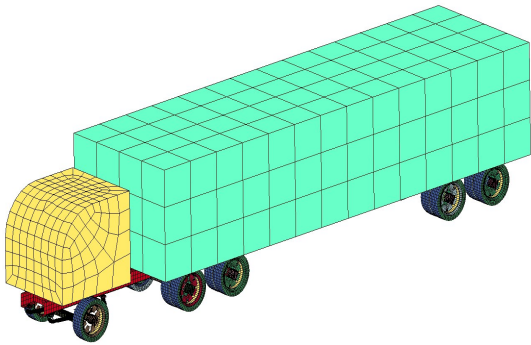


图2 标准车辆三维有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element model of standard vehicle

表2 标准车辆模型统计表

Table 2 Statistics table of standard vehicle model

项目	数量	项目	数量
部件	84	壳单元	106 454
材料	38	离散单元	22
节点	248 199	质量单元	88

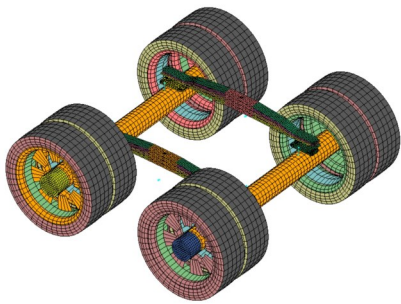


图3 标准车辆中悬架及车轮有限元模型

Fig. 3 Finite element model of standard vehicle's mid suspension and wheels

2.2 大件运输车辆模型的建立

参照某装载有大型压力容器的国产六轴重载货车建立大件运输车辆模型,重载货车的实物如图4所示。该车总长20.0 m,总质量为108.0 t,其轴载、轴距示意图及参数统计分别见图5和表3。

该大件运输车辆有限元模型共由495 818个节点和212 546个单元组成,其三维有限元模型如图6所示,其部件、材料、节点、单元等数量统计见表4,各部件的模拟方法与2.1节中标准车辆的相同。



图4 大件运输车辆实物图

Fig. 4 Physical picture of customized transportation vehicle

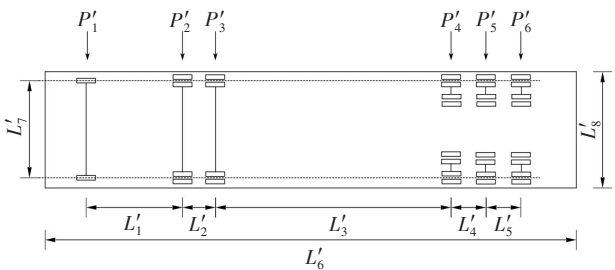


图5 大件运输车辆轴载、轴距示意图

Fig. 5 Schematic diagram of customized transportation vehicle's axle weight and wheel base

表3 大件运输车辆轴载、轴距统计表

Table 3 Statistics table of customized transportation vehicle's axle weight and wheel base

轴载/kN						轴距/m							
$P'_1$	$P'_2$	$P'_3$	$P'_4$	$P'_5$	$P'_6$	$L'_1$	$L'_2$	$L'_3$	$L'_4$	$L'_5$	$L'_6$	$L'_7$	$L'_8$
110	196	285	325	103	61	3.00	1.35	9.20	1.65	1.65	20.00	1.80	2.50

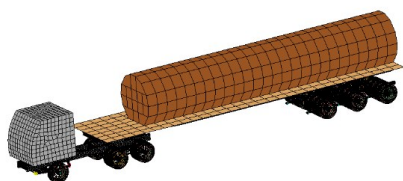


图6 大件运输车辆三维有限元模型

Fig. 6 Three-dimensional finite element model of customized transportation vehicle

表4 大件运输车辆模型统计表

Table 4 Statistics table of customized transportation vehicle model

项目	数量	项目	数量
部件	148	壳单元	212 338
材料	38	离散单元	42
节点	495 818	质量单元	166

### 2.3 桥梁模型的建立

参照某半漂浮体系独塔双索面斜拉桥,将桥梁模型的桥跨布置为(33+102+183) m,全梁由纵长50.4 m的C55混凝土箱梁和267.6 m的Q345钢箱梁组成。桥面宽42.5 m,采用双向八车道布置,设计速度为60 km/h。主梁标准断面中线处的梁高4.0 m,桥墩、桥塔分别采用C40、C50混凝土浇筑。斜拉索采用抗拉强度为1 860 MPa的钢绞线,共52根。桥梁立面布置如图7所示,主梁标准断面如图8所示。

本文采用有限元软件ANSYS进行桥梁前处理建模。其中,用显式动力单元BEAM161模拟桥墩和桥塔,用壳单元SHELL163模拟主梁,用杆单元LINK167模拟斜拉索。该桥梁的LS-DYNA模型共由4 530个节点、6 699个单元组成,使用了7种模型

材料,并用材料关键字\***MAT\_CABLE\_DISCRETE\_BEAM**定义斜拉索的初始索力,使用控制关键字\***CONTROL\_DYNAMIC\_RELAXATION**使斜拉桥快速实现平衡态。

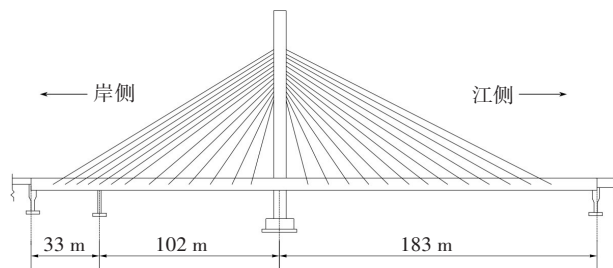


图7 桥梁立面示意图

Fig. 7 Front diagram of the bridge

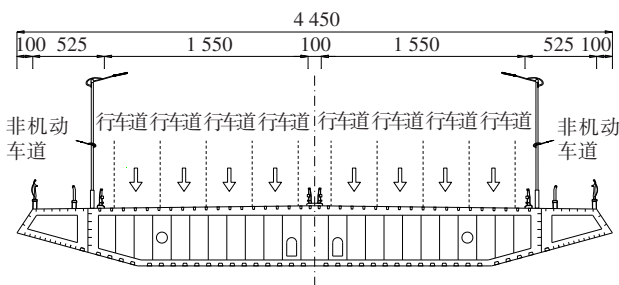


图8 桥梁标准断面示意图(单位:cm)

Fig. 8 Schematic diagram of bridge's standard section (unit: cm)

桥梁约束系统的布置如图9所示。桥梁约束系统通过约束节点自由度的方式模拟所有的竖向支座,即通过关键字\***CONSTRAINED\_NODE\_SET**对主梁一侧的梁-墩、梁-塔承接处的横向和竖向平动自由度进行约束,在另一侧仅对竖向平动自由度进行约束;用弹簧阻尼单元模拟梁-塔之间的纵向约束弹性束,墩底节点则完全固结。桥梁有限元模型如图10所示。

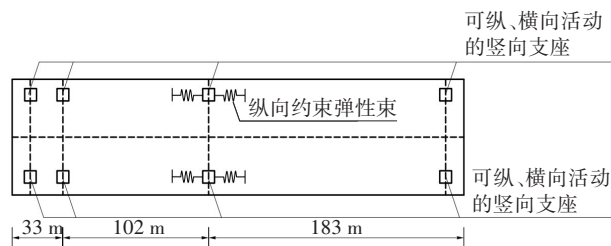


图9 桥梁约束系统布置

Fig. 9 Layout of bridge constrained system



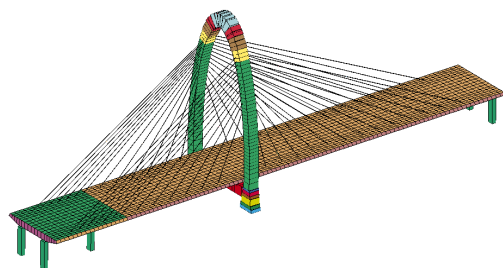


图10 桥梁有限元模型

Fig. 10 Finite element model of the bridge

2.4 车-桥耦合模型的建立

在 LS-DYNA 中利用关键字 \*RIGIDWALL\_PLANAR\_FINITE 在桥头和桥尾分别建立长 40 m 且与桥面齐平的刚性板,使汽车在  $t=0$  s 时在刚性板处开始启动并完成重力释放,然后相对平稳地驶入桥梁,从而得到比较贴合实际的分析结果。将车辆轮胎节点集设置成主面,将桥梁顶板及两端刚性板节点集设置成从面。在车辆启动时在主、从面之间留 8 mm 的间隙以保证接触面之间不存在初始穿透。通过关键字 \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE 设置车辆模型和桥梁模型之间的面-面接触,并设置接触算法为对称罚函数算法,从而实现车、桥之间的相互作用。本文将车辆轮胎与桥面之间的静摩擦系数设为 0.64,动摩擦系数设为 0.45<sup>[18]</sup>。通过速度约束关键字 \*PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID 定义车轮转动速度和车辆平动速度,通过荷载施加关键字 \*LOAD\_BODY\_Z 定义竖直向下的全局重力场。车-桥耦合模型如图 11 所示。

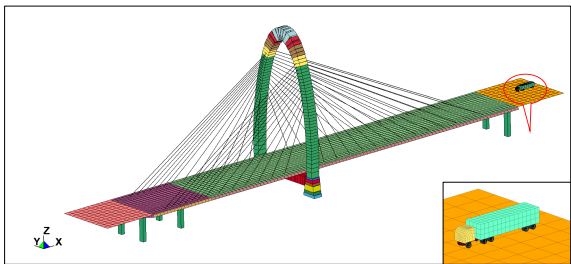


图11 车-桥耦合模型( $t=0$  s)

Fig. 11 Vehicle-bridge coupling model ( $t=0$  s)

3 斜拉桥动力响应分析

根据车辆类型、行驶车道以及车辆速度的不同设置动载工况,结果见表5。各工况下车、桥的相对

位置如图 12 所示。

表5 动载工况

Table 5 Working conditions of dynamic load

工况	车辆类型	行驶车道	行驶速度/( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )
一	标准车辆	4	5
二	大件运输车辆	4	5
三	大件运输车辆	3	5
四	大件运输车辆	2	5
五	大件运输车辆	4	10
六	大件运输车辆	3	10
七	大件运输车辆	2	10

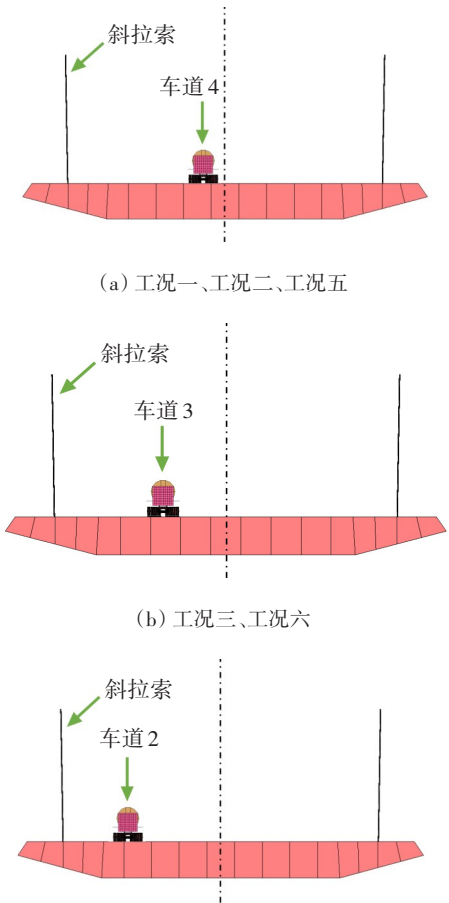


图12 车辆横向布置图

Fig. 12 Transversal arrangement of vehicle

在各工况下,车辆均从江侧向岸侧行驶。当  $t=0$  s 时,在江侧桥头的刚性板处,车辆前轮距离江侧桥头 21.0 m,距离主跨跨中 112.5 m,距离次跨跨中 255.0 m,距离岸侧桥尾 339.0 m。

### 3.1 大件运输车辆与标准车辆通行下的桥梁响应对比

本文分别选取桥梁主跨跨中截面处顶板近车侧节点(Node: 7198#)和该处近车侧斜拉索单元(Element: 4620#)作为竖向位移测点和拉索索力测试单元(图13),然后通过对相应数据的对比分析,研究不同动载工况下桥梁的动态响应特点和规律。

在工况一和工况二下,所选节点的竖向位移和所选单元的拉索索力如图14~15所示。

从图14~15可以看出:1)在初始状态下,桥梁受自重和初始索力的作用尚处于不稳定状态,曲线均出现较大波动,但随着车辆行驶位置的改变,曲线快速趋于稳定,测点数据开始呈现规律性。

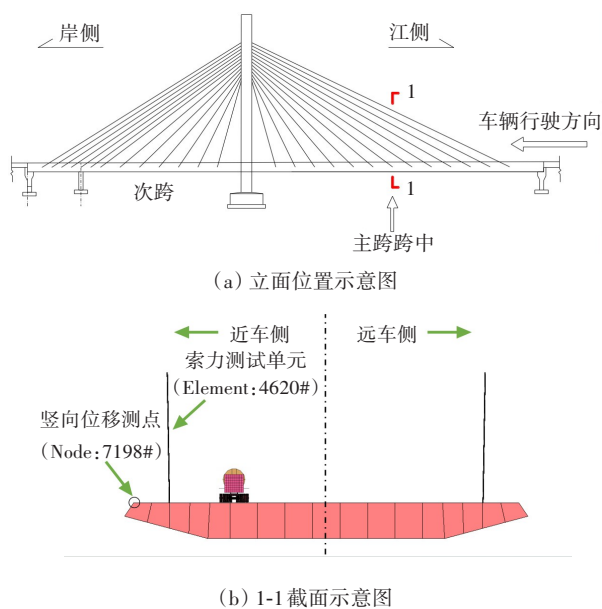


图13 测点布置示意图

Fig. 13 Diagram of data points layout

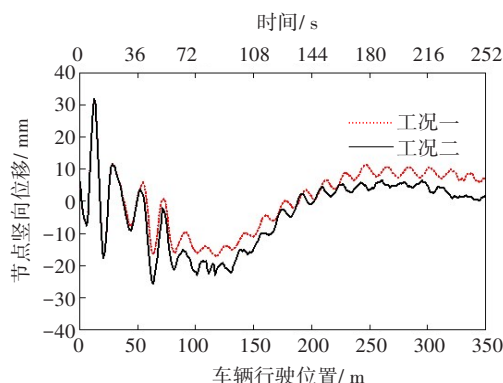


图14 工况一、工况二节点竖向位移曲线

Fig. 14 Curve of nodal vertical displacement under case 1 and case 2

2)当标准车辆和大件运输车辆行驶至110 m,即桥梁主跨跨中附近时,主跨跨中节点竖向位移出现了极小值,分别为-14.27、-21.24 mm,后者相较于前者增幅48.8%(指位移极值绝对值的增幅);主跨跨中斜拉索索力出现极大值,分别为3 316.31、3 364.91 kN,后者相较于前者增幅1.5%。

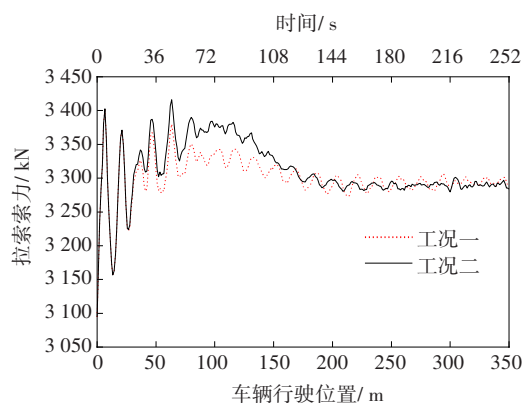


图15 工况一、工况二拉索索力曲线

Fig. 15 Curve of cable force under case 1 and case 2

### 3.2 大件运输车辆不同行驶车道下的桥梁响应对比

在工况二至工况四下,所选节点的竖向位移和所选单元的拉索索力如图16~17所示。

从图16~17可以看出:1)随着行驶车道越来越偏离桥面中线,主跨跨中节点的竖向位移越来越小;当车辆行驶至次跨跨中至桥尾区段时,主跨跨中节点的竖向位移越来越大。在通行全过程中,工况四下该节点竖向位移的变幅最大,为38.63 mm,

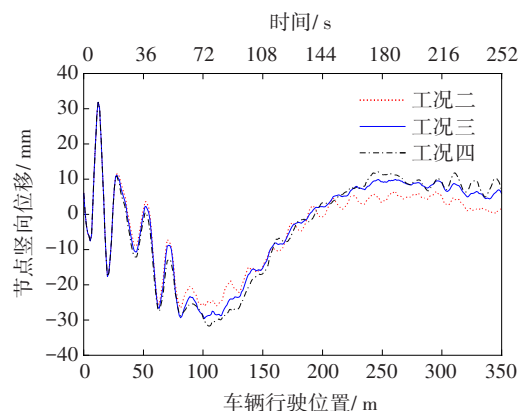


图16 工况二至工况四节点竖向位移曲线

Fig. 16 Curve of nodal vertical displacement under case 2 to case 4

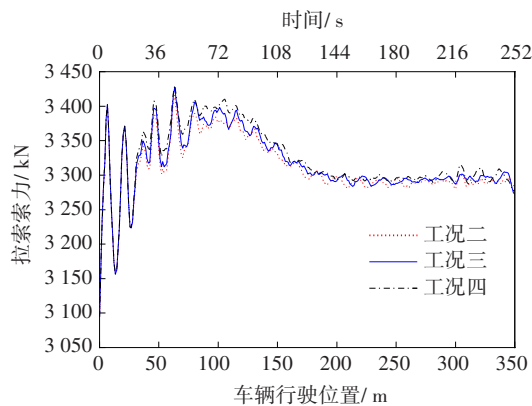


图17 工况二至工况四拉索索力曲线

Fig. 17 Curve of cable force under case 2 to case 4

相较于工况三和工况二分别增加了5.42、11.31 mm,增幅分别为16.3%和41.4%。2)随着行驶车道越来越偏离桥面中线,主跨跨中拉索索力越来越大。在通行全过程中,工况四下该拉索索力的变幅最大,为105.37 kN,相较于工况三和工况二分别增加了12.00、24.00 kN,增幅分别为12.9%和29.5%。

**3.3 大件运输车辆不同行驶车道下的车速效应分析**  
在工况二至工况七下,所选节点的竖向位移和所选单元的拉索索力如图18~19所示,各工况相应的竖向位移极值和拉索索力极值的统计结果见表6~7。

从图18~19和表6~7可以看出:1)在任一车道内,主跨跨中节点的竖向位移极值和拉索索力极值均随着大件运输车辆行驶速度的提升而在一定程度上有所增大。当车速由5 km/h变为10 km/h时,车道4、车道3、车道2的节点竖向位移极值绝对

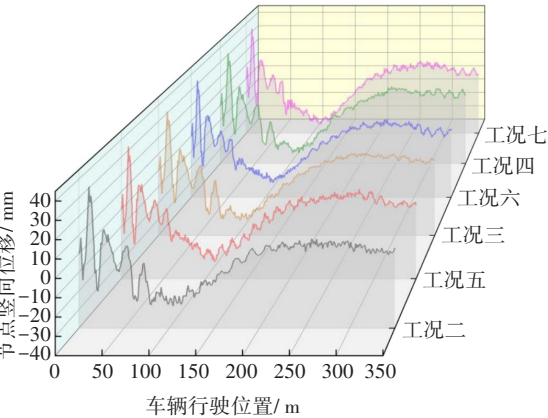


图18 工况二至工况七节点竖向位移曲线

Fig. 18 Curve of nodal vertical displacement under case 2 to case 7

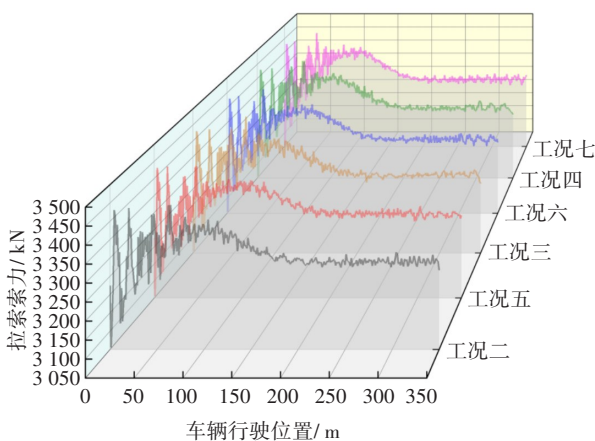


图19 工况二至工况七拉索索力曲线

Fig. 19 Curve of cable force under case 2 to case 7

表6 工况二至工况七节点竖向位移极值统计表

Table 6 Statistics table of extreme value of nodal vertical displacement under case 2 to case 7

工况	车道	车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	位移极 值/mm	差值/mm	增幅(位移极 值绝对值)/%
二	4	5	-21.24	-1.37	6.5
五	4	10	-22.61		
三	3	5	-23.64	-1.92	8.1
六	3	10	-25.56		
四	2	5	-26.79	-2.49	9.3
七	2	10	-29.28		

表7 工况二至工况七拉索索力极值统计表

Table 7 Statistics table of extreme value of cable force under case 2 to case 7

工况	车道	车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	索力极值/kN	差值/kN	增幅/%
二	4	5	3 364.91	7.06	2.1
五	4	10	3 371.97		
三	3	5	3 376.80	8.10	2.4
六	3	10	3 384.90		
四	2	5	3 390.33	8.81	2.6
七	2	10	3 399.14		

值的增幅分别为6.5%、8.1%和9.3%;拉索索力极值增幅分别为2.1‰、2.4‰和2.6‰。2)大件运输车辆的横向位置越偏离桥面中线,桥梁动力响应对车速的敏感度越高。当车速由5 km/h变为10 km/h时,

车道 2 对应的节点竖向位移极值的绝对值的增量、增幅最大,分别为 2.49 mm 和 9.3%,拉索索力极值的增量、增幅也最大,分别为 8.81 kN 和 2.6‰;车道 4 对应的节点竖向位移极值的绝对值的增量、增幅最小,分别为 1.37 mm 和 6.5%,拉索索力极值的增量、增幅也最小,分别为 7.06 kN 和 2.1‰。

## 4 结 论

本文分别建立了标准车辆模型、大件运输车辆模型以及宽幅斜拉桥模型,基于 LS-DYNA 程序实现了车-桥耦合振动的有限元仿真,以车辆类型、行驶车道、行驶速度等为参数,经多种工况的对比分析,得到如下结论:

1) 大件运输车辆载重大,在同等条件下相较于标准车辆会给桥梁带来更大的竖向下挠和拉索索力。在本研究中,一辆总质量为 108 t 的大件运输车辆在通行全过程中,在工况二下桥梁主跨跨中节点的最大位移极值为 -21.24 mm,主跨跨中斜拉索最大索力极值为 3 364.91 kN,相较于工况一总质量为 55 t 的标准车辆,增幅分别为 48.8% (指位移极值绝对值的增幅) 和 1.5%。

2) 大件运输车辆在通过宽幅斜拉桥的过程中,其越偏离桥面中线,所带来的桥梁竖向位移变幅和索力变幅就越大。工况四下产生主跨跨中节点竖向位移变幅为 38.63 mm,主跨跨中斜拉索索力变幅为 105.37 kN,相较于工况二增幅分别为 41.4% 和 29.5%。因此,对于大件运输车辆而言,应优先选择中间车道通过桥梁,以充分降低桥梁的动力响应。

3) 在同一车道内,大件运输车辆行驶速度的提升在一定程度上使桥梁竖向位移、拉索索力有所增大。在车道 4 下,当车速由 5 km/h 变为 10 km/h 时,主跨跨中节点竖向位移极值的绝对值增加了 6.5%,主跨跨中索力极值增加了 2.1‰。因此,大件运输车辆应该保持低速通过桥梁,以充分降低桥梁的动力响应。大件运输车辆的横向位置越偏离桥面中线,桥梁的动力响应对车速的敏感度就越高,当车速由 5 km/h 变为 10 km/h 时,车道 2 下节点竖向位移极值的绝对值和拉索索力极值的增幅分别为 9.3% 和 2.6‰,而车道 3 下节点的竖向位移极值的绝对值和拉索索力极值的增幅分别为 8.1% 和 2.4‰。

## 参考文献 (References):

- [1] 袁阳光, 周广利, 高文博, 等. 考虑安全性与正常使用性能的大件车辆过桥评估方法[J]. 工程力学, 2021, 38(7): 147-158. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0490.  
YUAN Yangguang, ZHOU Guangli, GAO Wenbo, et al. Assessment method for bridges under customized trucks by incorporating safety and serviceability [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(7): 147-158. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0490.
- [2] 韩万水, 闫君媛, 武隽, 等. 基于长期监测的特重车交通荷载特性及动态过桥分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 54-61. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2014.02.007.  
HAN Wanshui, YAN Junyuan, WU Jun, et al. Extra-heavy truck load features and bridge dynamic response based on long-term traffic monitoring record [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 54-61. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2014.02.007.
- [3] 余浩然, 鲁乃唯, 刘扬. 交通量持续增长下既有拱桥车载效应极值概率[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 50-55. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.009.  
YU Haoran, LU Naiwei, LIU Yang. The probability of vehicle-effect extreme value of existing arch bridges with continuous increase of traffic volume [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 50-55. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.009.
- [4] 夏禾. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
XIA He. Dynamic interaction between vehicle and structure [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [5] 宋一凡. 公路桥梁动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.  
SONG Yifan. Highway bridge dynamics [M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [6] 肖勇刚, 刘楚南. 考虑轮迹横向分布的钢箱梁桥面板 U 肋处受力与疲劳分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(1): 41-46. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.007.  
XIAO Yonggang, LIU Chu'nan. Stress and fatigue analysis of U-ribs of steel box girder bridge deck considering wheel track lateral distribution [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural



- Science), 2020, 17(1): 41-46. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.007.
- [7] 汤柯平. 宽幅预应力混凝土T梁桥荷载横向分布研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- TANG Keping. Research on load transverse distribution for wide prestressed concrete T-beam bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [8] 林梅, 肖盛燮. 桥梁车辆振动分析理论评述[J]. 重庆交通大学学报, 1998, 17(3): 1-9.
- LIN Mei, XIAO Shengxue. A discussion on vibration analysis theories of highway bridges and vehicles [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1998, 17(3): 1-9.
- [9] 吴铭汉, 桂水荣, 陈水生. 4种车辆模型作用下T形刚构桥冲击系数对比研究[J]. 中外公路, 2008, 28(6): 130-133.
- WU Minghan, GUI Shuirong, CHEN Shuisheng. Comparative study on impact coefficient of T-shaped rigid frame bridge under the action of four vehicle models [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(6): 130-133.
- [10] 王元丰, 许士杰. 桥梁在车辆作用下空间动力响应的研究[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 37-41. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2000.04.009.
- WANG Yuanfeng, XU Shijie. Study of dynamic response of highway-bridge with vehicles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 37-41. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2000.04.009.
- [11] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- WANG Xinmin. Numerical analysis of ANSYS engineering structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [12] 何涛, 杨竞, 金鑫, 等. ANSYS 10.0/LS-DYNA非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- HE Tao, YANG Jing, JIN Xin, et al. ANSYS 10.0/LS-DYNA nonlinear finite element analysis example guidance course [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [13] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [14] 陈水生, 赵辉, 桂水荣, 等. 基于LS-DYNA公路桥车桥耦合的车辆模型研究[J]. 计算力学学报, 2019, 36(6): 747-756. DOI: 10.7511/jslx20181014001.
- CHEN Shuisheng, ZHAO Hui, GUI Shuirong, et al. Vehicle model research on vehicle bridge coupling of highway bridge based on LS-DYNA [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(6): 747-756. DOI: 10.7511/jslx20181014001.
- [15] 赵辉. 基于LS-DYNA公路桥梁车桥耦合振动响应研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2012.
- ZHAO Hui. Dynamic response of highway bridges subjected to heavy vehicles based on the LS-DYNA [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2012.
- [16] 辛春亮, 涂建, 王俊林, 等. 由浅入深精通LS-DYNA [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- XIN Chunliang, TU Jian, WANG Junlin, et al. Master LS-DYNA from shallow to deep [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019.
- [17] 尚晓江, 苏建宇, 王化锋, 等. ANSYS/LS-DYNA动力分析方法与工程实例[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- SHANG Xiaojiang, SU Jianyu, WANG Huafeng, et al. Dynamic analysis method and engineering example of ANSYS/LS-DYNA [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [18] 李宗揆. 基于LS-DYNA车桥耦合振动数值分析的拱桥提高限速研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- LI Zongkui. The study on raising speed limit for the arch bridge by vibration numerical analysis based on LS-DYNA [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:冯硕)