

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.06.023

# 重型车辆作用下钢栈桥振动响应对比分析

殷新锋, 陈诚, 晏万里

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 大件运输车辆通过没有交通设施的河道时需建立钢栈桥作为临时通行设施, 钢栈桥在重车作用下的振动响应分析尤为重要。文中以一座钢栈桥为工程背景, 建立 105 t 大件运输车辆, 基于 ANSYS/LS-DYNA 程序建立显式车-桥耦合振动分析系统, 研究 105 t 重车作用下钢栈桥的振动响应; 将 LS-DYNA 计算结果与实测值对比, 对钢栈桥有限元模型的刚度进行验证, 使有限元模型与实桥更吻合。分析结果表明, 保持车速一致, 车辆质量增加一倍, 钢栈桥振动规律基本一致, 但跨中竖向振动位移变化显著; 保持车辆质量一致, 车速增加一倍, 钢栈桥跨中最大竖向振动位移增大, 且持续振动时间增长。

**关键词:** 桥梁; 钢栈桥; 重型车辆; 振动响应; 车桥耦合

**中图分类号:** U441.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2022)06-0099-05

车辆行驶通过桥梁时产生激励导致车辆和桥产生相互振动, 这种振动称为车桥耦合振动。钢栈桥作为一种运输物料、重型设备及人员而修建的临时结构, 在工程建设中起到很重要的作用。已有众多学者对钢栈桥力学性能进行了大量研究, 如谢晓鹏等采用通用有限元软件 ANSYS, 简化钢栈桥桩顶梁形式, 将复杂的工字钢截面简化为矩形截面, 对比分析发现 2 种截面形式下钢栈桥的力学性能差别不大, 在进行有限元建模时钢栈桥桩顶梁截面形式可以简化; 刘永锋采用 ANSYS 软件, 根据工程特点及荷载情况, 对一种皮带栈桥进行结构强度、稳定性验算, 通过对栈桥各组成结构的分析, 发现各类型杆件相互作用较小; 殷新锋等基于 LS-DYNA 程序, 将车辆子系统与桥梁子系统联立耦合形成显式车-桥耦合振动分析模型, 验证了该车桥耦合方法的正确性。以上研究多是分析静载作用下钢栈桥的力学性能。钢栈桥作为一种临时通行设施, 动载作用下性能特别是移动重载作用下力学性能尤为重要。本文以一座钢栈桥为工程背景, 采用 ANSYS 软件建立桥梁模型, 通过 LS-DYNA 程序建立显式车-桥耦合振动系统并结合实测值验证该系统的精确性, 最后进行 105 t 重车作用下钢栈桥振动响应分析。

## 1 车辆模型的建立

### 1.1 车辆概况

重型车辆采用大件运输车辆, 其由牵引车、叶片

升举板和叶片组成, 总质量 105 t, 车辆外形尺寸见图 1。牵引车前轴和中轴轴距  $L_1$  为 2.98 m, 中轴和后轴轴距  $L_2$  为 1.37 m, 后轴与挂车第一轴轴距  $L_3$  为 9.2 m, 挂车车轮之间的轴距  $L_4$ 、 $L_5$  均为 1.55 m, 总长度为 19.75 m; 牵引车横向轴距  $L_6$ 、 $L_7$  为 1.80 m, 挂车横向轴距  $L_8$ 、 $L_{10}$  为 0.74 m,  $L_9$  为 1.06 m。车辆轴重如下:  $P_1=11.0$  t;  $P_2=15.5$  t;  $P_3=15.5$  t;  $P_4=21.0$  t;  $P_5=21.0$  t;  $P_6=21.0$  t。

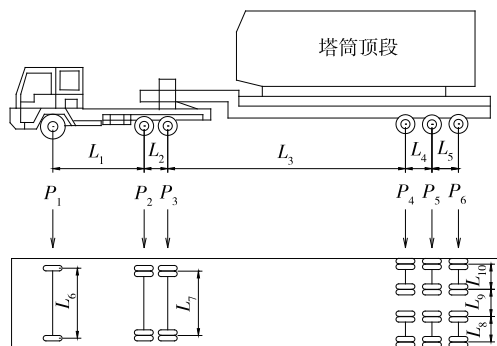


图 1 车辆外形尺寸示意图

### 1.2 车辆模型的建立

为了使有限元数值模拟分析趋近于现实中重型车辆通过钢栈桥的情形, 基于 LS-DYNA 程序建立 105 t 车辆模型。通过 CAD 软件中的 HyperWorks 建立 105 t 重车几何模型, 运用其内嵌的 HyperMesh 模块对重车模型进行网格划分, 最后保存 k 文件。通过 LS-DYNA 前处理软件 LS-PREPOST 对重车模型进行关键字修改, 包括车轮、悬架系统等汽车细部构造。

105 t 重车有限元模型见图 2。

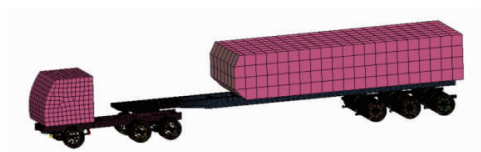


图 2 重车有限元模型

车轮由轮胎、轮毂、车盘组成。为真实地模拟轮胎与桥面的接触,轮胎采用线弹性橡胶材料,轮盘和轮毂采用线弹性刚性材料,整个车轮的各组成部分均为刚性连接。车轮压力在 LS-DYNA 中通过关键字 \* AIRBAG\_SIM\_PLE\_AIRBAG\_MODEL 来定义,定义轮胎中的气体压力为 0.8 MPa。车轮模型组成见图 3。

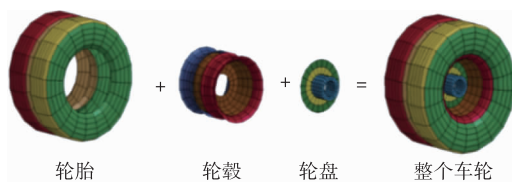


图 3 轮胎构造

采用壳单元、刚体、弹簧阻尼单元和多点约束模拟悬架系统,悬架系统的弹簧和阻尼器参数参考文献[10]确定。悬架系统见图 4。

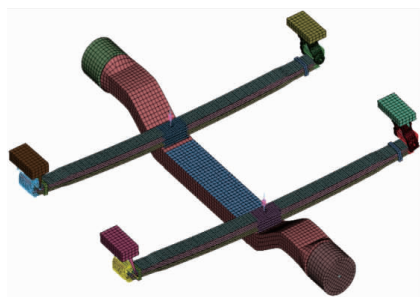


图 4 悬架系统

通过定义关键字 \* INITIAL\_VELOCITY\_CENERATION 来设置车轮的转动和平动速度、汽车运动状态及轨迹。

### 1.3 车辆模型的验证

车辆模型的正确性关系到车桥耦合试验结果的精确性。为验证车辆模型的正确性,对实车与有限元车辆模型各轴载值进行对比。

为得到车辆模型各轴轴重,通过定义关键字 \* DAMPING\_GLOBAL 对车辆模型施加全局阻尼,使车辆在移动过程中能快速趋于稳定,最后读取车辆各轴与桥面的接触反力(见图 5)。轴载计算值与实车轴重对比见表 1。

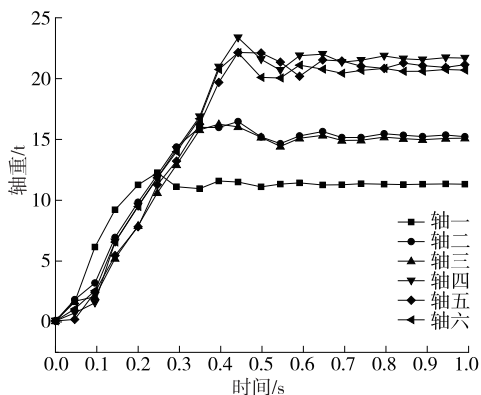


图 5 车辆各车轴轴载时程曲线

表 1 车辆模型轴载与实际轴载的比较

轴号	轴载模拟值/t	轴载实际值/t	偏差/%
轴一	11.2	11.0	1.82
轴二	15.7	15.5	1.29
轴三	15.6	15.5	0.65
轴四	21.6	21.0	2.86
轴五	21.1	21.0	0.48
轴六	20.5	21.0	-2.38
总质量	105.7	105.0	0.67

从表 1 可以看出:有限元重车模型模拟的轴载与实际轴载分布情况偏差较小,总质量偏差仅为 0.67%,有限元车辆模型能真实地模拟重车的轴重分布。

## 2 桥梁模型

### 2.1 桥梁概况

某钢栈桥总长 153 m,单跨跨径为 9 m,桥面板宽 6 m、厚 10 mm,分配梁横向长 6 m,每隔 35 cm 布置一根分配梁,分配梁采用 I20a;主梁桁架采用双排单层 3 组贝雷梁,跨径 9 m;桩顶承重梁采用 2I40b,横向焊接为一体;桩基采用  $\phi 529$  钢管桩,每墩 3 根桩基,纵桥向间距 9 m,横桥向间距 2.6 m;桩长根据地质情况确定,不满足入土 6 m 时引孔,引孔深度 4 m。图 6 为钢栈桥实景图,图 7 为钢栈桥立面图。



图 6 钢栈桥实景图

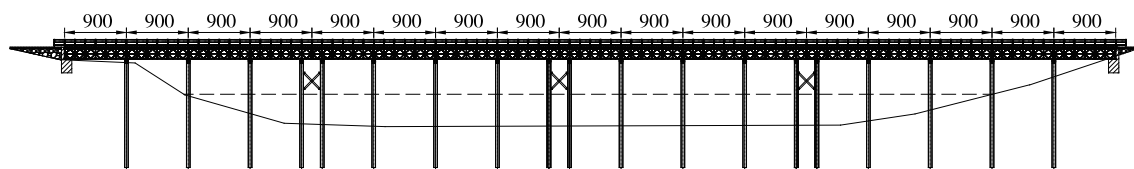


图 7 钢栈桥立面图(单位:cm)

## 2.2 桥梁三维有限元模型的建立

考虑到钢栈桥节点数量繁多且重复,钢栈桥各跨之间连接方式采用铰接,各跨之间的影响不大,建立四跨桥模型能反映 105 t 重车通过钢栈桥时钢栈桥的振动响应。此外,鉴于模型过于累赘会使计算时长成倍增加,在保证计算结果准确性的前提下合理简化桥梁模型。

利用有限元分析软件 ANSYS 建立初始单跨钢栈桥模型,再将 ANSYS 模型转为 k 文件导入 LS-PREPOST,在 LS-PREPOST 中对模型进行一些关键字的定义,得到四跨钢栈桥模型(见图 8)。



图 8 四跨钢栈桥模型

## 2.3 有限元桥梁模型验证

为检验有限元桥梁模型的精确性,对模型进行静载试验,并将试验结果与现场实测值进行对比。限于篇幅,只给出一种工况下的对比结果,且仅对单跨下弦杆跨中节点进行分析。同时,在保证对比结果严谨性的同时,简化加载级数,仅加载一级,即对钢栈桥只作用一辆载重卡车,以减少数值模拟耗时。

正式试验之前,先进行预加载,消除非弹性变形,以得到更真实的试验数据。测点布置见图 9,静载试验现场见图 10,静载试验结果与有限元计算结果对比见表 2。



图 9 测点布置

从表 2 可以看出:静载试验下单跨跨中下弦杆节点位移实测值为  $-4.06$  mm,数值模拟值为  $-3.57$  mm,相同加载时间内,模拟值为实测值的



图 10 静载试验现场

表 2 跨中下弦杆节点位移

加载时间/min	位移/mm		加载时间/min	位移/mm	
	实测值	模拟值		实测值	模拟值
3	-1.30	-1.14	12	-3.86	-3.40
6	-2.43	-2.14	15	-4.06	-3.57
9	-3.38	-2.97			

88%左右。根据结构力学,结构变形与施加的体外力、结构截面面积和弹性模量有关。这次静载试验和数值模拟的体外力相同,由试验车提供,下弦杆截面面积相同,两者变形存在差异的原因可能是钢栈桥经过长年使用其弹性模量降低。

为验证上述猜测,将有限元模型的弹性模量降低 12%,通过 LS-DYNA 模拟动载试验,将模拟值与现场动载实测值进行对比。动载试验用车辆为一辆 35 t 自卸车,其前轴重为 7 t,后轴重为 28 t。试验车慢速(10 km/h)行驶通过钢栈桥,记录跨中下弦杆节点位移。图 11 为动载试验现场。



图 11 现场动载试验

通过 LS-DYNA 程序中关键字 \* CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_SUAFACE 实现车桥耦合,考虑到计算时间及试验车长度,将桥梁模型进

一步简化,得到双跨车—桥耦合系统。除简化桥模型外,其余各条件均与现场动载试验相同。跨中下弦杆节点振动位移实测值与修改弹性模量后数值模拟值的比较见图12。

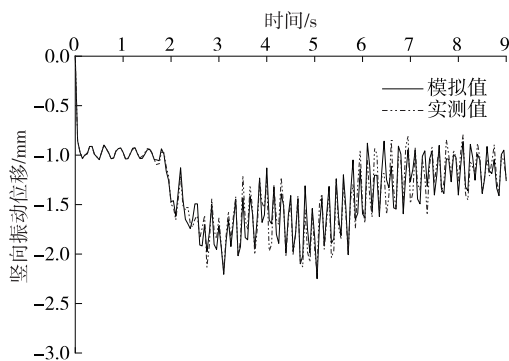


图12 动载作用下跨中竖向位移对比

从图12可以看出:修正弹性模量后的数值模拟结果与实测值的振动轨迹几乎一致,说明钢栈桥经过长年使用刚度出现下降,降低12%弹性模量后建立的LS-DYNA桥梁模型与实桥吻合。

### 3 重车作用下钢栈桥振动响应分析

#### 3.1 荷载工况

通过LS-DYNA程序中关键字\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE将105t重车与钢栈桥耦合,形成四跨显式车—桥耦合振动分析系统(见图13)。



图13 车桥耦合系统

设置2种工况分析车辆质量和车速对钢栈桥振动响应的影响。工况一:一辆54t重车以15km/h的速度匀速驶过钢栈桥,一辆105t重车以15km/h的速度匀速驶过钢栈桥。通过关键字\*MAT\_RIGID改变材料密度实现重车质量的改变(通过这种方式改变质量不会改变车辆的轴重比)。

工况二:一辆105t重车以30km/h的速度匀速驶过钢栈桥,一辆105t重车以15km/h的速度匀速驶过钢栈桥。通过LS-DYNA程序中的关键字

\*INITIAL\_VELOCITY以及\*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID实现车辆行驶速度的变化。

#### 3.2 钢栈桥振动响应分析

##### 3.2.1 动位移对比

2种工况下钢栈桥下弦杆跨中节点竖向振动位移对比见图14、图15。

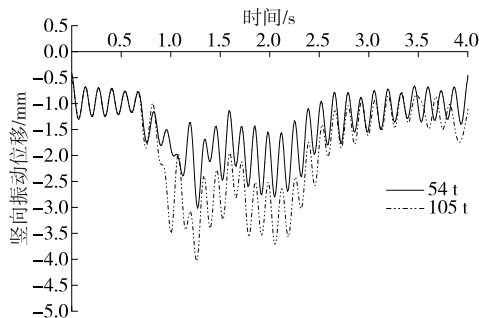


图14 车辆质量对钢栈桥下弦杆跨中节点竖向振动位移的影响

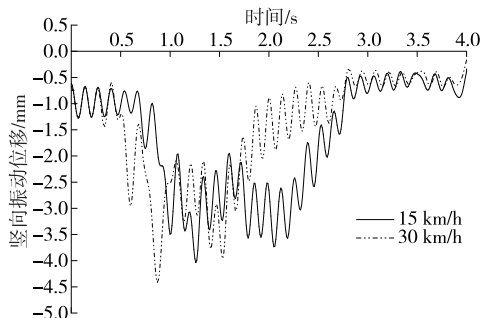


图15 车速对钢栈桥下弦杆跨中节点竖向振动位移的影响

从图14可以看出:车辆行驶速度相同时,车辆质量增大一倍,钢栈桥下弦杆跨中节点竖向最大振动位移增大55.57%,增幅明显。当钢栈桥产生较大变形时,需考虑行车荷载引起钢栈桥疲劳的问题。车辆超载对桥梁结构疲劳损伤的影响更显著。

从图15可以看出:车辆质量相同的情况下,速度增大一倍,钢栈桥下弦杆跨中节点竖向最大振动位移增大4.39%,单从增大幅度来看速度影响较小;短时间内车速越快,钢栈桥振动幅度越大,短时间内振动幅度突然增大会对钢结构桥梁的稳定性产生影响。

##### 3.2.2 振动应变对比

2种工况下钢栈桥下弦杆跨中振动应变对比见图16、图17。

从图16可以看出:车辆行驶速度相同时,车辆质量增大一倍,钢栈桥的振动规律大体一致,跨中最



大振动应变增大 17.89%。

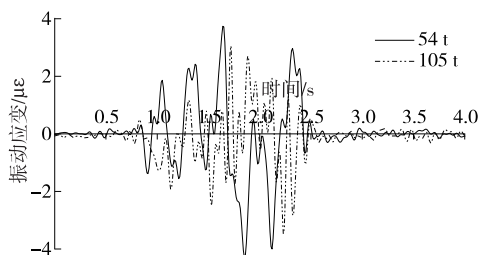


图 16 车辆质量对钢栈桥下弦杆跨中动应变的影响

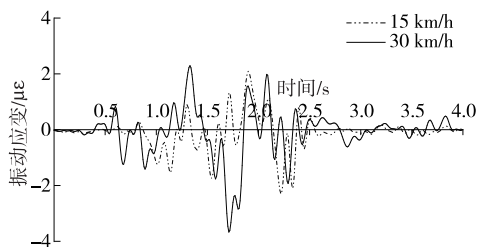


图 17 车速对钢栈桥下弦杆跨中动应变的影响

从图 17 可以看出:车辆质量相同的情况下,车速增大一倍,钢栈桥的振动规律有明显差别,主要体现在最大振动应变及整车完全驶过跨中后对跨中持续影响的能力。车速增大一倍,最大振动应变增大 17.01%,在 2.5 s 后,整车驶过跨中,车速为 30 km/h 时振动应变仍在小幅变化,说明车速增大会对钢栈桥产生持续的振动影响。

#### 4 结论

本文通过 ANSYS 建立单跨钢栈桥有限元模型,基于 LS-DYNA 程序建立显式车-桥耦合振动分析系统,以车辆质量、车辆速度为参数,对比分析各工况下钢栈桥的振动响应,得出以下结论:1) 通过现场静载试验和动载试验结果与有限元数值模拟结果的对比,调整钢栈桥模型弹性模量为设计值的 88%使其与实桥更吻合。2) 车辆质量增大一倍,钢栈桥跨中竖向振动位移增大 55.57%,竖向动应变增大 17.89%。3) 车速增大一倍,钢栈桥跨中最大振动位移增大 4.39%,车速越快,振动幅度增大,且对钢栈桥的振动影响时间增长。

本文尚未研究桥面平整度改变时钢栈桥的振动响应,这种情况可作为后续研究方向。

#### 参考文献:

- [1] 殷新锋.汽车荷载作用下梁式桥与斜拉桥的动态响应分析[D].长沙:湖南大学,2010.
- [2] 甄相国,李明.重载作用下的临时施工钢栈桥有限元分析[J].山东工业技术,2017(4):127.
- [3] 甄相国.某桥梁施工钢栈桥及钻孔平台稳定性有限元分析[D].衡阳:南华大学,2017.
- [4] 袁舫.杭州市九堡大桥施工栈桥设计计算研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
- [5] 尹栋佳,陈梦,李琳琳,等.基于有限元模型的钢栈桥上部结构设计[J].福建交通科技,2016(5):67-70.
- [6] 郭晓松.某施工钢栈桥的结构设计分析[J].低温建筑技术,2017,39(11):86-89.
- [7] 谢晓鹏,王娟,窦国涛,等.钢栈桥桩顶梁截面 ANSYS 简化对其力学性能的影响[J].河南理工大学学报(自然科学版),2020,39(4):140-146.
- [8] 刘永峰.大跨度钢桁架栈桥结构性能分析与跨度提升研究[D].郑州:郑州大学,2018.
- [9] 殷新锋,晏万里,任厚乾,等.车载作用下公路桥梁耦合振动精细化建模及验证分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(9):129-137.
- [10] 朱志辉,王力东,龚威,等.多种垂向轮轨关系的对比及改进的车-线-桥系统迭代模型的建立[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(6):1585-1593.
- [11] KWASNIEWSKI Leslaw, LI Hongyi, WEKEZER Jerry, et al. Finite element analysis of vehicle-bridge interaction [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42 (11):950-959.
- [12] 李廉锯.结构力学[M].北京:高等教育出版社,2017.
- [13] 宗雪梅,胡大琳,高军.桥梁超重荷载与限载标准的确定[J].长安大学学报(自然科学版),2008,28(1):60-65.
- [14] 刘扬,张海萍,邓扬,等.考虑车辆超载的公路简支梁桥疲劳性能[J].浙江大学学报(工学版),2015,49 (11):2172-2178.

收稿日期:2021-11-26

(上接第 98 页)

学版),2015,45(2):354-359.

- [16] 刘彦辉,谭平,金建敏,等.地震作用下全浮漂大跨斜拉桥耗能减震控制研究[J].振动与冲击,2015,34 (8):1-6.
- [17] 孙才志,赵雷,贾少敏.考虑场地效应的大跨度多塔斜

拉桥随机地震响应分析[J].公路交通科技,2014,31 (8):71-76.

- [18] 刘思涵.盖梁的设计与计算[J].交通标准化,2010 (19):134-137.

收稿日期:2021-12-09