

某平推式桥梁展开工况下模态分析与试验研究*

时运来¹, 吴文博¹, 邵飞², 段应昌², 高磊², 申玫²

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

(2. 中国人民解放军陆军工程大学野战工程学院 南京, 210007)

摘要 为了研究桥梁架设中的振动问题,以平推式桥为研究对象,针对桥架设过程中最危险的展开桥工况,建立了展开桥的柔性多体动力学模型,并进行了模态计算和试验研究。结果表明:1阶振动的计算值为0.544 7 Hz,实测值为0.507 2 Hz,振型为横向弯曲,试验结果与模态计算值接近,最大误差为6.8%,验证了有限元模型的准确性;在展开桥工况下,结构自振频率梯度明显,识别度高。

关键词 架桥车;平推式;工况;模态分析

中图分类号 TH113.1

引言

桥梁是道路交通网络中必不可少的一部分,由于其通常建在河流或山谷上方,容易遭受极端恶劣的自然灾害使其损坏,导致道路交通瘫痪,使救援人员无法及时奔赴灾区进行抢险救灾。同时,由于桥梁具有道路交通网络的重要作用且具有难架设、易摧毁、难以替代等特点,在战争时也是敌方摧毁的首要目标。因此,快速修复被毁坏的桥梁路段对于民事和军事都有着重要意义^[1]。

目前,常用的桥梁抢通方法有以下几种^[2]:变道绕避、设置漕渡、搭设便桥、桥上架桥以及限行限载等。上述桥梁抢通方法虽然比传统的桥梁建设时间短,但架桥过程仍需花费过多时间,距离快速抢通道路的要求仍有很大差距,并需要大量的人力物力。因此,架桥车应运而生^[3]。架桥车最早出现在1918年,由英国制造,桥长近7.5 m,足以应付当时的阵地战,使其在战壕上来去自如^[4]。第二次世界大战之后,美国、德国、苏联等纷纷研制并装备了架桥坦克,主要是在主战坦克的底盘上变形,在去掉炮塔的部位上安装各种类型的桥和相应的架设机构^[5-8],此时桥的跨距已达到20 m,承载能力达到了60 t级。与国外相比,我国架桥车研究起步较晚,直至1963年才制造出第1辆架桥车样机^[9],之后针对多种类型的架桥车展开了深入的研究。冯占辉等^[10]对平推式架桥车架设过程的多种关键技术进行了总结与探讨。

Zhang等^[11]设计了一种由复合材料和铝合金为主体的桁架桥,该桥由复合材料桁架构件支撑铝合金桥面板组成,重量仅为1.2 t。姜雪^[12]设计了一种应急桥梁架设方法,将桥跨分为两个半桥跨分步架设,不仅降低了单次吊装架设的重量,减轻了吊机的设计负荷,还可以将后吊装的结构部分作为吊机的配重,避免了携带额外的配重,降低了运输重量。李润成^[13]设计了一种剪叉式应急桥梁,并通过试验验证了其可靠性。

上述方法多针对桥梁机构、架设过程、材料及轻量化等方面开展研究,然而桥梁架设中的振动问题对于整个架桥过程有着重要影响。早期进行桥梁振动分析计算时,通常将结构复杂的桥梁简化为简支梁,计算结果无法满足精准设计的要求。为此,笔者选择固定桥架设过程中最危险的展开桥工况,建立展开桥的柔性多体动力学模型并进行模态计算和试验研究,为架桥车及桥梁的设计提供参考。

1 柔性多体动力学模型的建立

平推式架桥车的整体结构示意图如图1所示,主要分为底盘车、桥梁、架设机构三部分。桥梁部分包括端节桥、中节桥和展桥机构。展桥机构为连杆机构,可实现中节桥和端节桥之间折叠到展开的姿态变化。

固定桥架设过程使用的作动器包括液压马达、展桥油缸、支撑油缸和托桥油缸,不仅有单个作动器

* 国家自然科学基金资助项目(51975282);“十三五”装备预研资助项目(30110010403)

收稿日期:2022-03-09;修回日期:2022-09-22

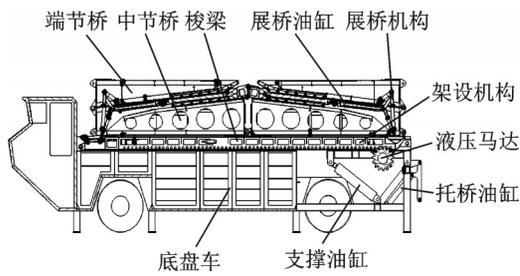


图 1 平推式架桥车整体结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the overall structure of the flat-pushed bridge erecting vehicle

的驱动,还有多个驱动器的配合驱动。梭梁在套筒中由液压马达带动齿轮驱动梭梁向前滑动,梭梁的前移带动桥跨平推出去,在不同位置由展桥油缸展开两端的端节桥。到达预定位置后,再通过梭梁的往复运动,把桥跨前推到最外端位置,最后通过支撑油缸调整架设机构,将桥跨远端放置在对岸。因此,固定桥架设过程较为复杂。选取固定桥架设过程驱动机构交替的时刻和桥梁姿态变化的时刻作为节点,可将固定桥架设过程分为 3 个典型工况,如图 2 所示,包括折叠桥工况、半展开桥工况和展开桥工况。其中:折叠桥工况为液压马达驱动梭梁带动折叠桥向左移动 5 m 的过程;半展开桥工况为在典型工况 1 的基础上,打开右端节桥后,液压马达驱动梭梁带动折叠桥向左移动 3 m 的过程;展开桥工况为梭梁带动展开桥移动到左侧最大悬臂位置,此时桥梁处于左侧最大悬臂处。此 3 个工况中,典型工况 3 为最危险工况,故本研究针对典型工况 3 进行建模分析。

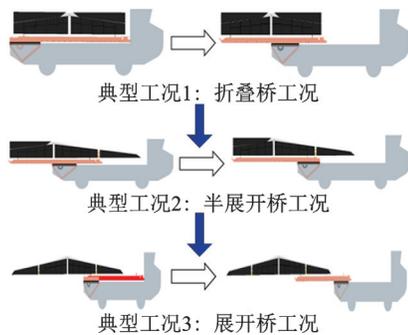


图 2 桥梁架设过程中的典型工况

Fig.2 Typical working conditions during bridge erection

柔性多体动力学模型主要用于计算桥梁结构的模态信息,因此在典型工况 3 情况下,柔性多体动力学模型仅包括桥梁和梭梁部分。该桥梁的整体为箱梁结构,主结构为四周的 T 型主梁和中间的工字型连梁组成的框架结构,副结构为覆盖主结构四周的

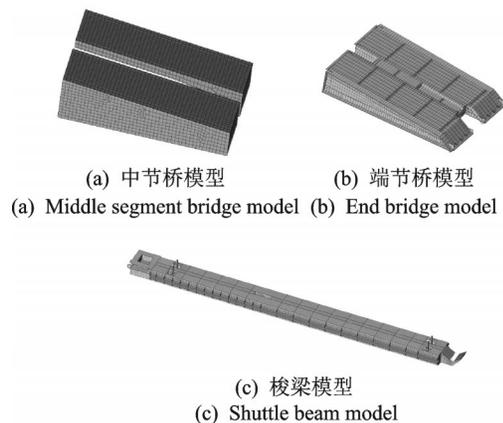
面板。

桥梁主结构可以选用梁单元和实体单元,但实体单元只有 x, y, z 这 3 个方向的平动自由度,要想获得准确的结果,需要网格划分的足够细,但细小的网格节点数量多,不仅会增加求解时间,而且过多的节点会造成误差累积,反而得不到准确的结果。因此,主结构选用基于铁木辛柯理论的 beam188 梁单元。在计算中,beam188 单元形函数为拉格朗日插值多项式,具有线性或二次的位移函数,横向剪应力沿厚度方向为常数(1 阶剪切变形梁单元),可以模拟自由或约束扭转效应,支持丰富的模型特性(塑性和蠕变)。

副结构作为次要受力部件,厚度小于 10 mm,可选用壳单元和实体单元。如果主结构选用梁单元,副结构选用实体单元,由于两种单元的节点自由度不一样,在连接处需要大量的节点自由度耦合,会导致结构局部刚度增加。如果主结构选用梁单元,副结构选用壳单元,由于壳单元的节点自由度与梁单元的自由度一样,可以直接共节点。综合考虑,对副结构选用 shell63 壳单元。Shell63 单元既具有弯曲能力又具有膜力,可承受平面内载荷和法向载荷,可以很好地模拟桥梁面板。

桥梁整体为装配体,其桥节与桥节之间、桥节与展桥机构之间采用插销连接,这种连接方式约束了 5 个自由度,只允许结构间绕 z 轴的转动。因此,可选用 mpc184 单元,定义 KEYOPT(1)=6,实现节点间的绕轴转动。

本研究选用 hypermesh 前处理软件进行有限元模型的建立,选用 ANSYS 求解器,分别建立了中节桥、端节桥及梭梁等桥梁主要结构的有限元模型,如图 3 所示。



(c) 梭梁模型

(c) Shuttle beam model

图 3 桥梁主要结构的有限元模型

Fig.3 The finite element model of the main structure of bridge

将各个部件的有限元模型进行装配并进行约束,使其与典型工况 3 相符合。首先,旋转调整右端节桥姿态到指定位置,并在右端节桥和右中节桥之间创建 4 个插销单元;其次,旋转调整左端节桥姿态到指定位置,并在左端节桥和左中节桥之间创建 4 个插销单元;最后,将右侧展桥机构镜像得到左侧展桥机构,并与左端节桥和左中节桥连接,将桥梁右中节桥和右端节桥与梭梁左侧固定连接,根据实际工况对梭梁前端部位进行固定约束。典型工况 3 的柔性多体动力学模型如图 4 所示。

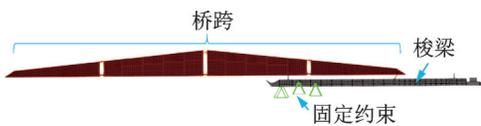


图 4 典型工况 3 柔性多体动力学模型

Fig.4 The flexible multi-body dynamics model of the working condition 3

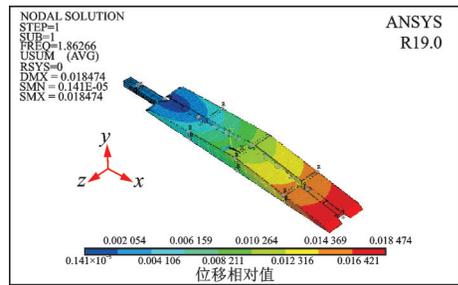
2 模态分析

对建立的典型工况 3 的柔性多体动力学模型进行模态分析。为了更好地研究展开过程中桥梁结构模态参数的变化情况,选取运动过程中多个时刻的结构姿态,对结构进行模态分析。

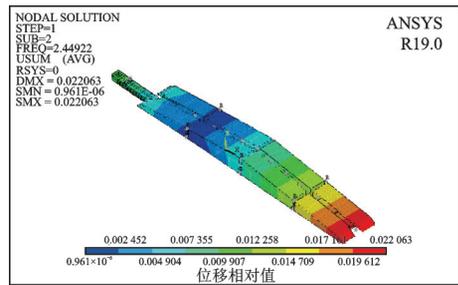
典型工况 3 是梭梁和桥梁系统相对梭梁套筒向左运动 8.25 m 的过程。因此,以梭梁和桥梁系统的位移为参考,取初始位置为一个姿态,然后每移动 1 m 所处的位置作为一个姿态,得到 7 个姿态,最后 2 个姿态分别移动了 0.5 m 和 0.75 m,共 10 个姿态,选取此 10 个结构姿态进行模态分析。对柔性多体动力学模型而言,各个结构姿态之间表现为边界条件的改变。针对各个时刻的模型结构姿态,分别施加这 10 个时刻的边界条件后进行模态分析。典型工况 3 初始位置模态分析结果如图 5 所示。由图可得,典型工况 3 的初始位置 1 阶振型表现为横弯,2 阶振型为扭转,3 阶振型为竖弯,4 阶振型为局部竖弯,5 阶振型为局部横弯+扭转。后续不同移动位置下的模态振型均表现为上述振型。

对典型工况 3 在其他 9 个位置的姿态进行模态分析,不同位移下的模态频率如表 1 所示。将各姿态频率按振型分类,得到典型工况 3 模态频率曲线如图 6 所示。

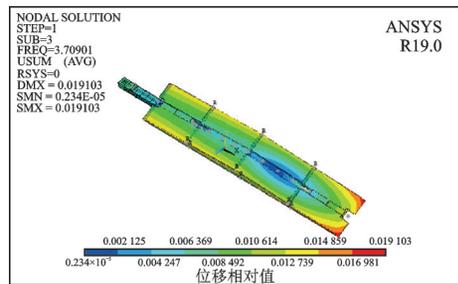
图 6 中 1 阶振型为扭转,2 阶振型为竖弯,3 阶振型为横弯+扭转。由表 1 和图 6 可得,典型工况 3 的前 3 阶模态频率均随桥梁位移的增加表现出先



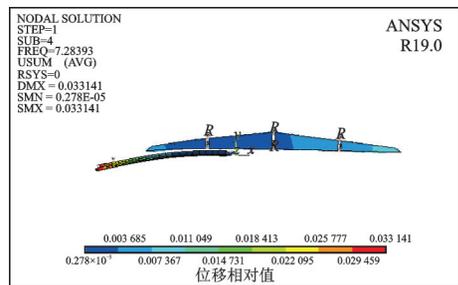
(a) 模态 1 (1.862 7 Hz)
(a) Mode 1 (1.862 7 Hz)



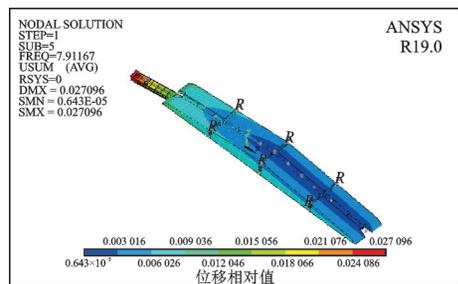
(b) 模态 2 (2.449 2 Hz)
(b) Mode 2 (2.449 2 Hz)



(c) 模态 3 (3.709 0 Hz)
(c) Mode 3 (3.709 0 Hz)



(d) 模态 4 (7.289 4 Hz)
(d) Mode 4 (7.289 4 Hz)



(e) 模态 5 (7.911 7 Hz)
(e) Mode 5 (7.911 7 Hz)

图 5 典型工况 3 初始位置模态分析结果

Fig.5 The initial position modal analysis results of the typical working condition 3

表1 典型工况3桥梁不同位移下的模态频率

Tab.1 Modal frequencies of Bridges under different displacements in typical working conditions 3 Hz

模态阶次	位移/m									
	0	1	2	3	4	5	6	7	7.5	8.25
1	1.86	2.03	2.05	2.02	1.93	1.75	1.38	1.14	1.08	0.544 7
2	2.45	2.88	3.38	3.06	2.32	1.81	1.67	1.55	1.47	0.738 5
3	3.71	4.14	4.19	4.13	3.96	3.84	3.68	3.57	3.49	1.615 9
4	7.29	7.66	8.52	10.04	9.93	9.77	9.60	9.33	9.12	3.643 8
5	7.91	10.21	10.23	11.19	13.44	12.70	12.16	11.52	11.25	4.568 5

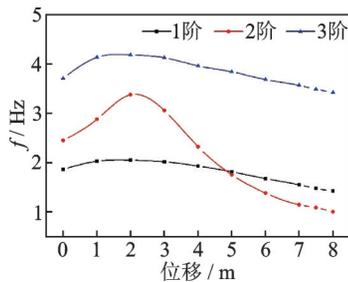


图6 典型工况3模态频率曲线

Fig.6 The mode frequency curve of the typical working condition 3

增加后减小的趋势,这是由于随着梭梁的移动,其中心与支撑点的距离表现为先减小后增大的变化。1阶模态频率变化平缓,差值为0.58 Hz;2阶模态频率变化较大,差值为2.3 Hz。最小频率所对应的振型由绕x轴的扭转变为y方向的弯曲,这表明随着位移增加,桥梁与梭梁系统更容易发生y向的弯曲振动。

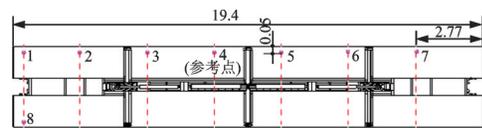
综上所述,在典型工况3中,对于某一具体的时刻,结构的频率梯度明显,模态频率均随位移的增加先增加后减小,同时2阶和5阶振型均伴有结构的扭转。随着运动位移的增加,悬臂长度变得越来越长,结构越来越不稳定,抗扭能力弱。因此,在梭梁的推送过程中,应尽量避免桥梁侧面的非对称激励,防止引起扭转振动。

3 模态试验

测试仪器包括DH5907N单通道采集器8台、DH5907N通讯控制器1台及动态应变测试仪1台。DH5907N单通道采集器采样频率设为100 Hz,分析频率自动确定为39.063 Hz,平均方式为线性平均,平均次数为4次,时域点数取为1 024点,频域线数为400条,激励方式为环境激励。本研究针对架桥车的典型工况进行了模态试验,在此仅针对最危险的典型工况3的模态试验结果进行讨论。由于该

工况推送距离较长,操作比较困难,故仅对末位置状态下的结构进行了模态试验。

为准确获得典型工况3下结构的竖向振动、扭转振动和横向振动的动力特性,并考虑测试方案操作的难易程度,测量中将采集器布置在桥节两侧的主梁上,固定参考点应避开主要低阶振型的节点位置。典型工况3测点布置如图7所示。测点在桥梁上均布,间距为2.77 m。左端节桥、左中节桥和右中节桥上放置2个测点,由于右端节桥距离支撑点较近,仅放置1个测点,共14个测点,分2组进行测试。其中,根据前文中的模态仿真结果,将测点4设置为固定参考点。



(a) 测点布置位置(单位: m)
(a) Location of measuring points (unit:m)



(b) 测点布置实拍图
(b) Picture of the test points arrangement

图7 典型工况3测点布置

Fig.7 Measuring point layout of the typical working conditions 3

4 结果与讨论

在环境激励测试方案下,可得到各测点竖向和横向振动速度的时域数据和频谱数据。图8为第1组测试时测点7的振动速度时程曲线。由于典型工况3下的结构属于小阻尼系统,当结构的固有频率与环境激励频率接近时将会出现“拍”的现象,说明

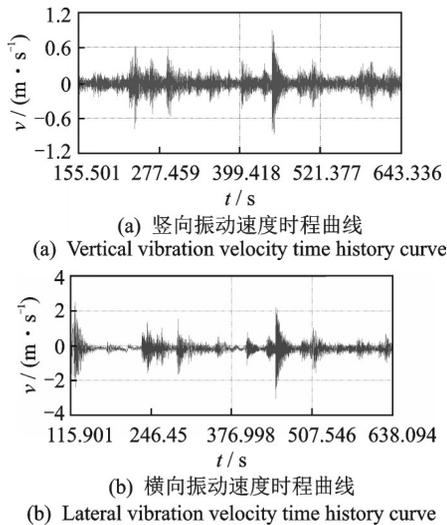


图8 第1组测试测点7振动速度时程曲线

Fig.8 The vibration velocity time history curve of the measuring point 7 in the first group test

本次试验采用的测试方法能得到进行结构动态分析所需的良好测试信号。

图9为第1组测试时测点1~测点7的振动频谱图。由图9可知,试验测试的结构在低频段频谱图中有明显的峰值,测试结果能够较好地反应出结构低频段的自振特性。将试验测得的所有数据导入东华测试公司的DHMA模态分析软件,由峰值法可识别出结构的振动频率、振型和阻尼比。

通过对典型工况3竖向和横向的模态频率和模态振型进行比较,可得其前5阶模态参数。结构模态计算与试验结果对比如表2所示。模态试验振型

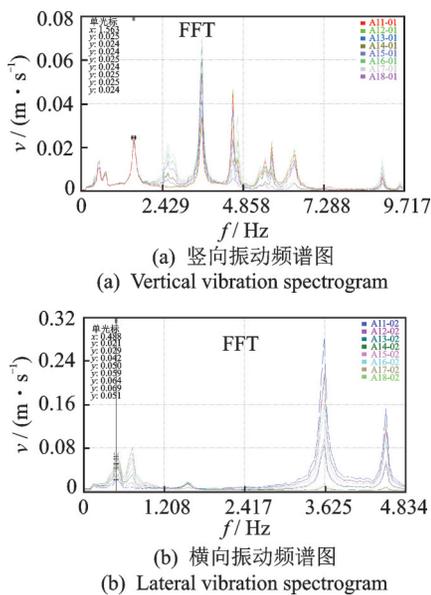


图9 第1组测试测点1~7振动频谱图

Fig.9 Vibration spectrum of the test point 1 to 7 in the first group test

表2 结构模态计算与试验结果对比

Tab.2 Comparison of structural modal calculation and experimental results

模态阶次	计算值/ Hz	实测值/ Hz	误差/ %	阻尼比/ %	振型
1	0.544 7	0.507 2	6.8	11.176	横弯
2	0.738 5	0.785 4	-6.3	8.957	竖弯
3	1.615 9	1.596 0	3.8	3.218	扭转
4	3.643 8	3.693 0	-4.9	0.901	局部横弯
5	4.568 5	4.614 0	-1.0	0.559	局部横弯+扭转

如图10所示。结果表明,试验测得的结构振动频率值与计算值比较接近,最大误差的绝对值为6.8%,最小误差的绝对值为1%,处于桥梁模态试验允许和工程可控范围,说明有限元模型与实际结构的动态受力基本一致。同时,典型工况3下,结构自振频率梯度明显,识别度高;1阶振动的实测值为0.507 2 Hz,振型为横向弯曲,竖向振动的基频为0.785 4 Hz。不同振型的结构有不同的阻尼比,结构的实测阻尼比随着模态阶次的升高而下降。第1阶振动的阻尼比最大,在典型工况3末位置时达到11.176%。

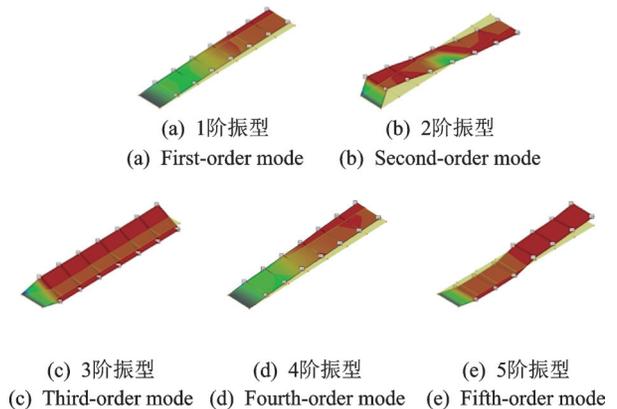


图10 模态试验振型

Fig.10 Modal shape test

5 结束语

笔者针对一种平推式桥梁架设工况进行了分析,并选取其最危险的典型工况3作为研究对象,建立了平推式桥梁展开桥工况下的柔性多体动力学模型。通过该模型对展开工况下桥梁的模态进行了分析,得到桥梁系统在典型工况3下的模态参数,并通过试验进行了验证。结果表明,试验结果与模拟结果基本吻合,展开工况时桥梁结构的各阶模态频率梯度明显,识别度高,前5阶模态振型多个包含结构

的扭转,说明该桥梁结构抗扭能力弱,应在此方面对设计方案作进一步改善。

参 考 文 献

- [1] 励东东. 桥梁快速修复中的保通技术研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(5): 73-74.
LI Dongdong. Research on maintenance technology in rapid repair of bridges[J]. Engineering Technology and Application, 2019, 4(5): 73-74.(in Chinese)
- [2] 庄卫林, 蒋劲松. 四川公路桥梁震后抢通、保通及恢复技术[J]. 西南公路, 2010(2): 33-37.
ZHUANG Weilin, JIANG Jinsong. Post earthquake emergency, maintenance, and restoration technologies for Sichuan highway bridges[J]. Southwest Highway, 2010(2): 33-37.(in Chinese)
- [3] 辛建成. 新一代工程桥梁[J]. 现代兵器, 1992(11): 22-23.
XIN Jiancheng. New generation engineering bridges[J]. Modern Weaponry, 1992(11): 22-23.(in Chinese)
- [4] 严国权. 世界架桥坦克概观[J]. 现代兵器, 1984(10): 15-20.
YAN Guoquan. Overview of world bridging tanks[J]. Modern Weaponry, 1984(10): 15-20.(in Chinese)
- [5] 吴磊. 装甲架桥车的发展[J]. 国外坦克, 2003(2): 34-38.
WU Lei. The development of armored bridge vehicles [J]. Foreign Tank, 2003(2): 34-38.(in Chinese)
- [6] 刘向平. 装甲架桥车发展动向[J]. 国外坦克, 2015(4): 39-42.
LIU Xiangping. Development trends of armored bridge trucks[J]. Foreign Tank, 2015(4): 39-42.(in Chinese)
- [7] 张国斌. 世界装甲车辆发展计划与进展[J]. 国外坦克, 2015(8): 15-24.
ZHANG Guobin. World armored vehicle development plan and progress[J]. Foreign Tank, 2015(8): 15-24.(in Chinese)
- [8] 米勒, 毕忠安, 刘家健, 等. 勇往直前现代战场上的战斗工程车辆[J]. 坦克装甲车辆, 2018(21): 47-51.
MI Le, BI Zhongan, LIU Jiajian, et al. Brave and advanced combat engineering vehicles on modern battle-
- fields [J]. Tank & Armoured Vehicle, 2018 (21): 47-51.(in Chinese)
- [9] 王笑梦. 战场筑新路天堑变通途——发展中的国产机械化桥、冲击桥系统[J]. 坦克装甲车辆, 2017(1): 9-15.
WANG Xiaomeng. Building new roads on the battlefield, transforming heavenly trenches into open paths-developing domestic mechanized bridge and impact bridge systems [J]. Tank & Armoured Vehicle, 2017(1): 9-15.(in Chinese)
- [10] 冯占辉, 苟明康, 梁川, 等. 军用桥梁平推式架设的若干关键技术[J]. 国防交通工程与技术, 2012, 10(4): 1-5.
FENG Zhanhui, GOU Mingkang, LIANG Chuan, et al. Certain key techniques for horizontally launch-erecting military bridges [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2012, 10(4): 1-5.(in Chinese)
- [11] ZHANG D D, ZHAO Q L, HUANG Y X, et al. Flexural properties of a lightweight hybrid FRP-aluminum modular space truss bridge system[J]. Composite Structures, 2014, 108: 600-615.
- [12] 姜雪. 一种新型快速架桥系统及其桁架桥跨的设计与分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [13] 李润成. 新型剪叉式应急桥梁的设计与分析[J]. 中外公路, 2017, 37(5): 108-111.
LI Runcheng. Design and analysis of a new type of scissor fork emergency bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(5): 108-111.(in Chinese)



第一作者简介:时运来,男,1976年7月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为振动利用技术及结构动力学分析。

E-mail: shiyunlai950438@nuaa.edu.cn

通信作者简介:邵飞,男,1975年2月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁工程。

E-mail: shaofei@aeu.edu.cn