

刚性桥面板天然气管道悬索 跨越结构力学性能

陈誉, 林智寰

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 建立刚性桥面板天然气管道悬索跨越工程原型的有限元计算模型,并对有限元计算模型进行静力、模态和清管反应的有限元分析.结果表明:在成桥状态下,与设计资料对比,悬索跨越结构的整体位移曲线满足设计精度要求;天然气管道悬索跨越结构的前 3 阶模态均为平面内桥身的振动,直到第 4 阶才出现主缆的振动,在第 6 阶出现桥面板的平面外振动;清管球通过跨越结构时间为 110,120 s 的跨中竖向位移-清管球位置曲线发展完整,两个波峰和一个波谷并且整个的曲线形状同静力分析的形状大致相同;随着清管球经过全桥的时间不断减小,曲线发展得越来越不完整,第一个波谷出现的位置也不断地向坐标轴的右边推移,第二个波峰没有出现,其中通过时间为 30,40 s 的曲线甚至没有出现第一个波谷.

关键词: 天然气管道; 悬索跨越结构; 刚性桥面板; 力学性能; 数值分析; 模态分析; 清管球

中图分类号: TU 392.3

文献标志码: A

与简单的吊杆式柔性桥面板天然气管道悬索跨越结构相比,桁架式刚性桥面板悬索跨越结构能够实现更大的跨越及较小的位移,是目前采用较多的天然气管道跨越结构型式.悬索跨越结构在天然气长输管道当中具有相当重要的地位,而刚性桥面板天然气管道悬索跨越结构的安全性是一个十分重要的问题^[1-12].文献[3]提出了天然气管道悬索跨越结构的静力、风荷载,以及清管作用下的计算和设计方法.文献[4]提出了天然气管道悬索跨越结构的具体抗震计算方法及实用抗震构造.文献[5]提出天然气管道悬索跨越结构的具体施工方法.文献[6]围绕长输油气管道悬索跨越工程的抗震能力和健康诊断技术,利用理论分析、模型实验和数值模拟手段进行了较为系统的研究.文献[7]建立了悬索管道跨越结构分析的有限元模型,获得了结构的自振频率、振型,以及清管时跨越结构的动态力学特性.文献[8]建立悬索管道跨越结构有限元模型,利用 ANSYS 软件进行模拟静力及动力计算,并对对比分析通过振动台实验和现场动力测试实验收集数据.文献[9]制作了缩尺比例为 1:8 的试验模型,对试验模型进行了完好状态和 3 种模拟损伤状态下的输入白噪声和不同强度的 El-Centro 波的动力性能试验.文献[10]应用 ANSYS 有限元程序,建立长输管道悬索跨越工程有限元计算模型,对有限元计算模型进行静力、模态和地震反应的有限元分析.目前关于天然气管道悬索跨越结构静力、动力分析和计算的研究成果均针对吊杆式的柔性桥面板跨越结构,有关由桁架组成的刚性桥面板悬索跨越结构的研究成果较少.本文建立西气东送普光气田天然气管道悬索跨越结构的有限元分析模型,对模型进行静力分析,并与经典的悬索弹性模型计算结果进行对比,然后进行悬索跨越结构的模态和清管动力反应分析.

1 有限元建模

普光天然气管道后河悬索跨越结构的主跨全长为 180 m,两个边跨分别为 20,32 m.全桥矢跨比为 1:9.主塔结构采用钢桁架塔形式,东西塔采用对称形式,塔结构高度均为 26 m,由角钢和圆钢管组成.

收稿日期: 2014-08-10

通信作者: 陈誉(1978-),男,副教授,博士,主要从事钢结构的研究. E-mail:kinkingin@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478047, 51278209);华侨大学中青年教师科研提升计划资助项目(ZQN-PY110)

主塔基础采用桩基础跨越两岸,各设塔架基础一座.东西主塔承台高程相同,主塔与承台为铰接连接.天然气管道架设于桥身上,管道在沿桥身方向是可以自由移动的.设计主缆型号为 PES5-121(JT/6-94),直径为 71 mm.设计风索型号为 PES5-37,直径为 45 mm.主缆、吊索和风索拉索均采用 $\varphi 16-1670$ 单股镀锌钢丝绳,钢丝绳两端采用热铸锚头连接.跨越两岸设重力式主缆锚固墩各一座,东岸为钢筋混凝土和灌注桩结构,西岸为钢筋混凝土结构.跨越两岸各设置两个风索锚固,均为钢筋混凝土和灌注桩结构.普光气田天然气悬索跨越结构实际原型与有限元模型的对比,如图 1 所示.

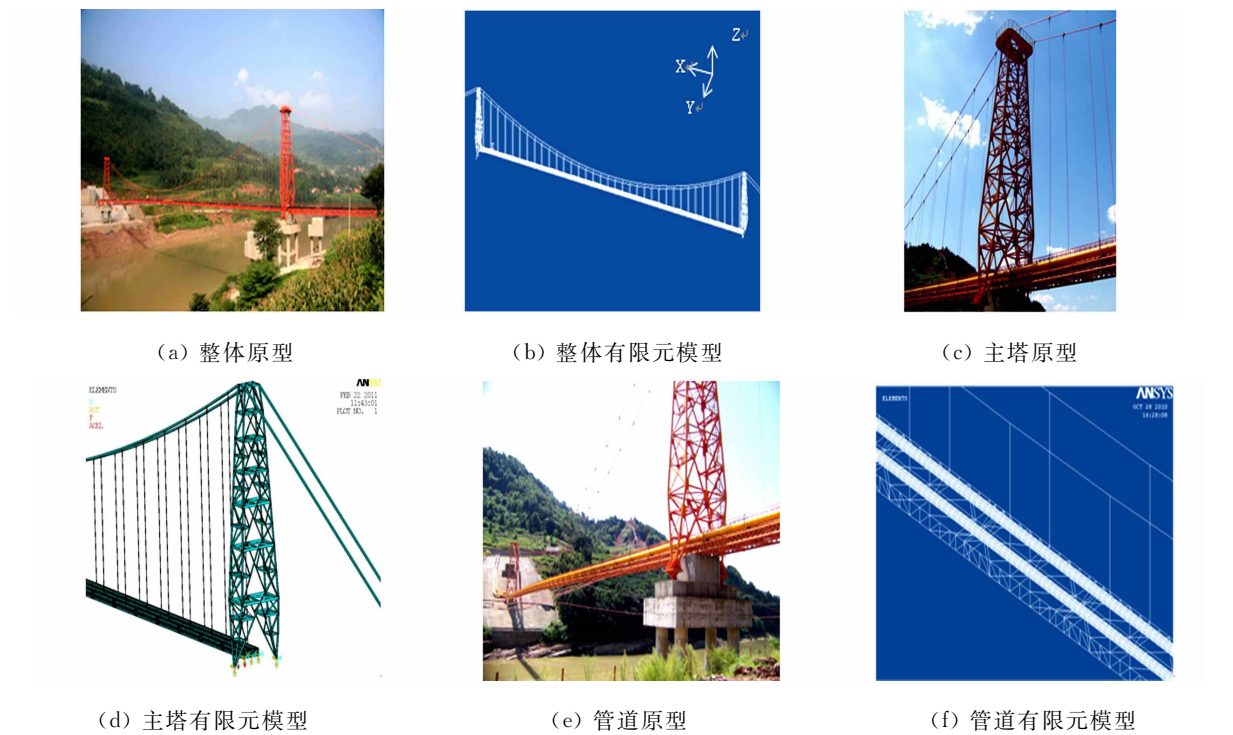


图 1 刚性桥面板天然气管道悬索跨越结构

Fig. 1 Cable-suspended structure of liquefied natural gas pipelines with rigid deck slab

根据天然气管道悬索跨越结构的受力特性,考虑选用有限元分析软件 ANSYS 单元库中的 Link 10 单元模拟主缆,Beam 4 单元模拟桁架桥面板和主塔,Shell 93 单元模拟天然气管道.建模过程中的难点主要是主塔的边界约束、天然气管道与桁架的连接以及主缆分别在不同阶段的线形.主塔支座原型与有限元模型的对比,如图 2 所示.管道与桥面滚轴支座,如图 3 所示.



图 2 主塔支座原型与有限元模型对比

Fig. 2 Comparison between the practical structure and finite element model

由图 2(a)可知:主塔并不是完全固结的,而是放松了桥身方向的转动,放松的是绕 Z 轴转动的约束.图 2(b)是模型中的主塔支座的约束.图 2(b)中:绿色的约束表示位移方向的约束;黄色的约束是转动的约束.由 2(b)可以看出:将 3 个方向的位移和绕 X,Y 方向的转动约束,放松 Z 轴方向转动约束,是符合实际情况的.

由图 3(a)可知:管道与桥身桁架的约束为管道的 Y,Z 轴的位移与该约束点上的桥身桁架是相同

的. 由图 3(b)可知:有限元模型中采用约束耦合自由度的方法,将该约束点上桥身桁架节点与油管节点的 Y,Z 自由度耦合起来,绿色的标志就是耦合自由度的标志.

整个建模过程如下:1) 建立空缆悬索模型(包括线形和空缆状态下主缆的应力);2) 建立出吊杆,桥身桁架和输油管道模型;3) 打开 ANSYS 软件中几何非线性和应力刚化命令,并考虑缆索的几何非线性和应力刚化敏感,将载荷子步设定为 20 步.



图 3 管道与桥面滚轴支座
Fig. 3 Connection pipeline and deck slab

2 结构模态分析

对悬索跨越结构的模态分析主要是采用 Block-Lancz 法. Lanczos 算法是用一组向量来实现 Lanczos 递归计算. 该方法对于大型复杂结构有速度快精度较高的优点. 计算时,求解从频率谱中间位置到高频段范围内的固有频率的收敛速度同求解低阶频率的速度一样快. 求解取前 10 阶的模态作为此悬索结构的主要模态. 各阶模态的变形,如图 4 所示.

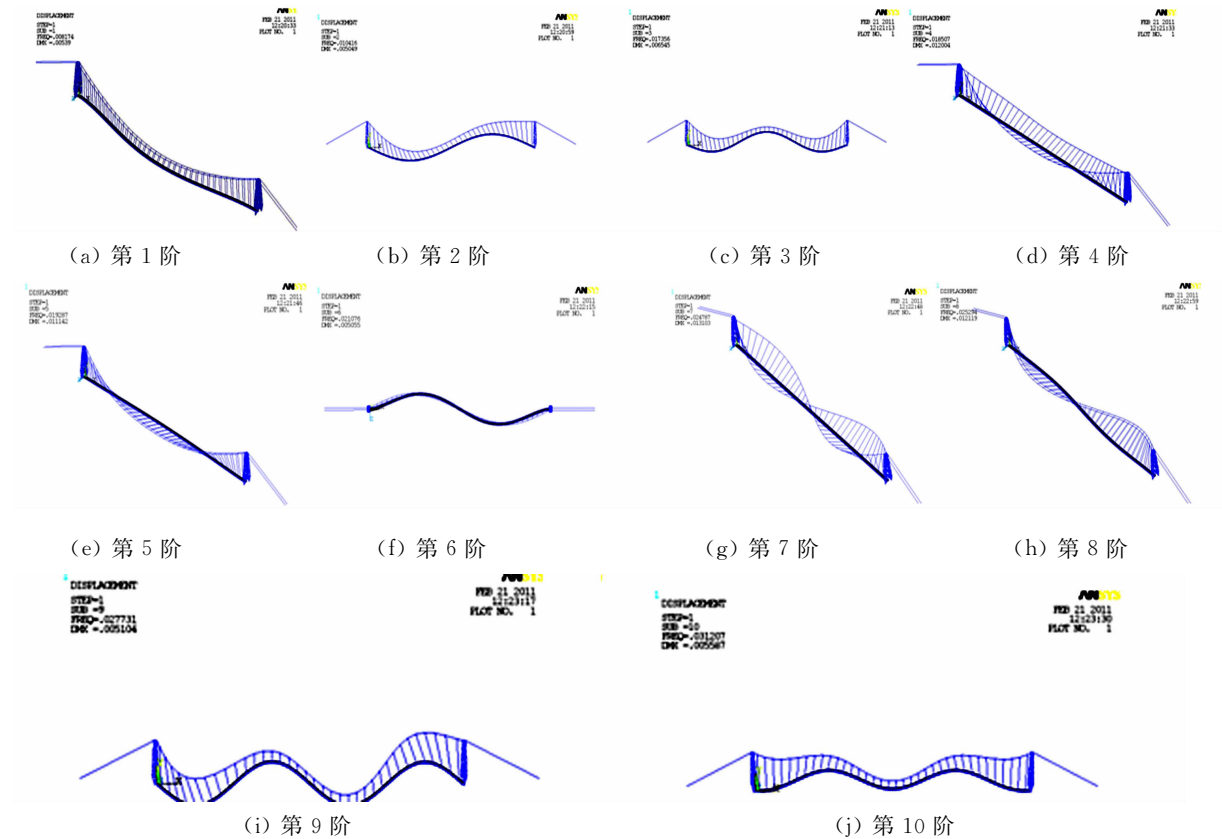


图 4 悬索跨越结构前 10 阶模态
Fig. 4 First 10 modes of cable-suspended structure

天然气管道悬索跨越结构前 10 阶模态的自振频率、自振周期和振动形态,如表 1 所示. 前 3 阶均为平面内桥身的振动,直到第 4 阶才出现主缆的振动,在第 6 阶出现桥面板的平面外振动.

表 1 天然气管道悬索跨越结构模态一览表
Tab. 1 Modes of cable-suspended structure

模态阶数	自振频率	自振周期/s	描述
1	0.008 2	122.399	平面内桥身 1 阶对称
2	0.010 4	96.154	平面内桥身 1 阶反对称
3	0.017 4	57.471	平面内桥身 2 阶对称
4	0.018 5	54.054	主跨缆索 1 阶平面外相反方向对称振动
5	0.019 2	52.083	主跨缆索 1 阶平面外相同方向对称振动
6	0.021 0	47.619	平面外桥身 1 阶反对称
7	0.024 7	40.486	主跨缆索 1 阶平面外相反方向反对称振动
8	0.025 3	39.526	主跨缆索 1 阶平面外相同方向反对称振动
9	0.027 7	36.101	平面内桥身 2 阶反对称
10	0.031 2	32.051	平面内桥身 3 阶对称

3 悬索结构清管动力响应

清管球在天然气管道中是一个不规则的移动过程,必然会使悬索跨越结构本身产生振动. 可以把清管球荷载考虑成两种情况的荷载,一种是匀速常量力,另一种是匀速简谐力. 匀速常量力就是把清管球荷载考虑为一个力本身大小不随时间变化,但是力的位置按照匀速通过整个悬索桥,匀速简谐力就是不但力的位置是匀速通过桥梁的,同时力的大小也是按照简谐振动变化的. 以下只讨论将清管球荷载简化为匀速常量力时管道悬索跨越结构的动力响应.

清管球考虑为实心橡胶,橡胶的密度为 $0.8\sim1.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,这里取最大值为 $1.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,并考虑清管球塞满整个天然气管道,即清管球的半径同油气管道的内径为 160 mm,整个清管球压力为 217 N,考虑简化为 220 N.

因为这些荷载都是在使用阶段出现的,故要把悬索跨越结构在成桥阶段的主缆的内力作为初始应力施加到结构中,并在分析过程中先把自重荷载按照阶跃加载的方式加载,自重荷载加载完后,整个结构的各个杆件都会有自重内力,在这个基础上再施加清管球荷载.

因为清管球荷载考虑为匀速常量力,清管球荷载在匀速通过管道时,由于需要进行有限元分析,因此,节点之间的是无法加载的,只有将节间荷载转化为节点荷载. 将在节点间单元匀速运动的力转化为节点力就是一个节点上大小匀速变化的力. 因为在清管球的清管行径的过程中,在每个节点上的力都可以考虑成好像是突然施加上来的,因此,考虑用瞬态分析来分析这一清管过程.

在有限元分析的过程中发现跨中节点的位移同整个清管球荷载经过全桥的时间有很大的关系,因为该桥的自振周期从 1 到 10 阶分布在 30~120 s 之间,因此,考虑清管球经过全桥的时间也控制在 30~120 s 之间,且每隔 10 s 分析一次. 通过全桥时间控制在 30~120 s 之间的跨中节点在整个分析过程中平面内垂直于桥面的跨中竖向位移图,如图 5 所示.

由图 5 可知:所有的曲线都有第一个波峰,这第一波峰是在清管球走到 1/4 跨左右位置时出现的,这和静力分析是大致相同的;但是只有 50~120 s 时的曲线有出现明显的第一个波谷,40 s 的曲线第一个波谷不明显,30 s 曲线没有第一个波谷,在有出现第一个波谷

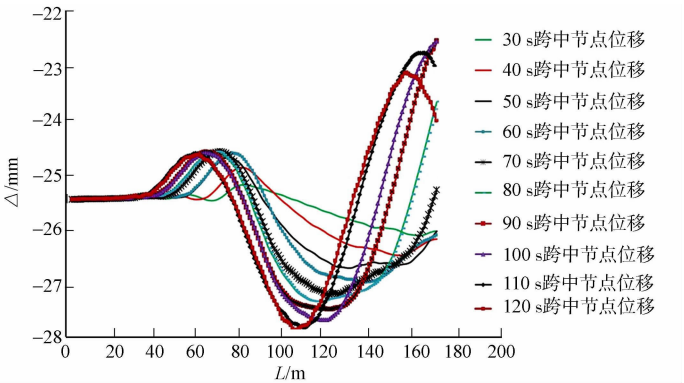


图 5 跨中节点竖向位移-清管球位置曲线
Fig. 5 Vertical displacement-location of pigging ball curves of middle span

的曲线中,出现的位置点也不像前面出现第一个波峰那样集中;120 s 的曲线第一个波谷出现在跨中节点位置,120 s 之前曲线的第一个波谷出现位置是不断向坐标轴右边移动的,一直到 30 s 的曲线没有出现第一个波峰,而前面的静力分析是出现在跨中位置的;第二个波峰只有 110,120 s 的曲线有出现,出现的位置在清管球到 3/4 跨的位置。

清管球通过悬索时间从 30~120 s 的变化过程中:30~100 s 曲线中整个跨中节点的竖向正向的位移幅度是不断变大的,100~120 s 的变化过程中竖向正向位移幅度有开始减小的趋势。在整个 30~120 s 的变化过程中,竖向负向位移幅度都是不断变大的;对于有出现第二波峰的曲线,第二个波峰都比第一个波峰的位移幅度大;80~100 s 的曲线虽然没有出现第二波峰,但是其达到的最大正向位移也比第一波峰大。

110,120 s 曲线的同静力影响线对比,如图 6 所示。由图 6 可知:清管球通过跨越结构时间为 110,120 s 与全桥的第一阶自振周期相接近,因此,整体位移曲线发展完整出现两个波峰和一个波谷,并且整个的曲线形状同静力分析的形状大致相同。清管球通过跨越结构时间为 50~100 s 的曲线随着清管球经过全桥的时间减小,曲线发展的越来越不完整,出现第一波谷的位置也不断的向坐标轴的右边推移,没有出现第二波峰,其中通过时间为 30,40 s 的曲线甚至没有出现第一波谷。第二波峰之所以会比第一波峰的位移幅度更大,是因为通过时间为 110,120 s 接近结构的第一振型自振周期,产生的共振放大作用。建议清管球通过管道悬索的时间控制在较短的 30,40 s 清管球对悬索跨越结构的影响最小。

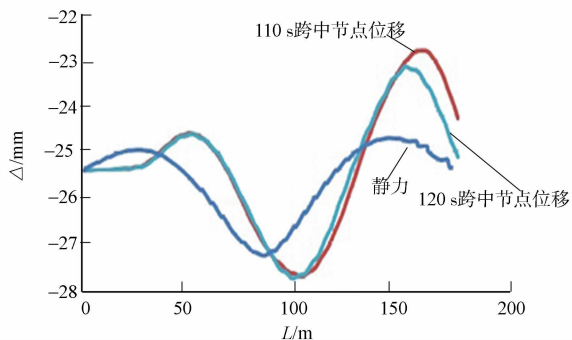


图 6 120 s 和 110 s 曲线同静力影响线对比

Fig. 6 Comparison between 120 s and 110 s curves and static influence line curve

4 结论

通过对天然气管道悬索跨越结构有限元分析模型的进行静力分析,并与经典的悬索弹性模型计算结果进行对比,以及悬索跨越结构的模态和清管动力反应分析,可以得出以下 4 点主要结论。

- 1) 在有限元分析时将主缆的预应力作为设计变量,而主缆各个节点在完成阶段时的最大位移作为状态变量,进行结构优化设计使其状态变量最小,即可保证其当前阶段和完成阶段的线形一致。
- 2) 按照抛物线建立的模型在完成阶段的曲线有按照悬链线变形的趋势,说明在主缆自重荷载作用下,按照悬链线分析主缆比按照抛物线分析更具有优势。
- 3) 该工程天然气管道悬索跨越结构前 3 阶模态均为平面内桥身的振动,直到第 4 阶才出现主缆的振动,在第 6 阶出现桥面板的平面外振动。
- 4) 该工程天然气管道悬索跨越结构中清管球通过跨越结构时间为 110,120 s 的跨中 Y 向位移-清管球位置曲线发展完整,出现两个波峰和一个波谷并且整个的曲线形状同静力分析的形状大致相同;随着清管球经过全桥的时间不断的减小,曲线发展的越来越不完整,出现第一波谷的位置也不断的向坐标轴的右边推移,没有出现第二波峰,其中 30,40 s 的曲线甚至没有出现第一波谷。

参考文献:

- [1] 高建,王德国,何仁洋. 基于 ANSYS 的悬索跨越管道地震时程响应分析[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2010,32(1):155-159.
- [2] 李冰,黄丽华,雷刚. 大跨度悬索管道桥的 ANSYS 有限元分析综述[J]. 防灾减灾工程学报,2010,30(9):262-263.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫局. GB 50459-2009 油气输送管道跨越工程设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2009:15-19.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫局. GB 50470-2008 油气输送管道线路工程抗震设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2009:7-10.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局. GB 50460—2008 油气输送管道跨越工程施工规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009: 2-4.

[6] 王金国. 管道悬索跨越结构抗震能力和健康诊断研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2005: 37-42.

[7] 王恩青. 悬索式管桥静力、清管及地震分析研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2007: 10-12.

[8] 张峰. 悬索式管道跨越结构计算方法分析[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2007: 36-49.

[9] 王金国, 丁阳. 模拟损伤状态下长输管道悬索跨越结构抗震性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(8): 192-198.

[10] 王金国, 丁阳. 长输管道悬索跨越结构静动力性能的有限元分析[J]. 工程力学, 2007, 24(8): 173-177.

[11] 罗喜恒. 悬索桥缆索系统的数值分析法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(4): 441-446.

[12] 罗喜恒, 肖汝诚, 项海帆. 空间缆索悬索桥的主缆线形分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(10): 1349-1354.

Research on Mechanical Property of Cable-Suspended Structure of Liquefied Natural Gas Pipelines with Rigid Deck Slab

CHEN Yu, LIN Zhi-huan

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The finite element model of engineering prototype of cable-suspended structure of liquefied natural gas pipelines with rigid deck slab is established, and the static, modal and pigging response are carried out. The whole displacement curve of cable-suspended structure under dead load, meets the design accuracy by comparison with the design data; The first three rank modes of cable-suspended structure of liquefied natural gas pipelines are in-plane vibration of bridge, the vibration of main cables appears at the fourth rank, the out-plane vibration of bridge deck appears at the sixth rank. Mid-span vertical displacement-position of pigging ball curve of pigging ball taking 120 s and 110 s to cross suspended structure develops completely, appearing two wave crests and one trough, and the shape of whole curve is similar to the shape of static analysis. With the time of pigging ball through bridge decreases, the development of curve is more and more incomplete, the position of the first trough moves continuously to the right of axis, the second wave crest does not appear, when the crossing bridge's time is 30 s or 40 s, the curve of even does not appear the first trough.

Keywords: liquefied natural gas; cable-suspended structure; rigid deck slab; mechanical property; numerical analysis; modal analysis; pigging ball

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)