

# The Analysis of Ice-Induced Vibration on Bridge Connecting CEPD and SLPW Platform in Jinzhou 9-3 Oilfield

Wei Zhang

Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin  
Email: zhwei@mail.cooec.com.cn

Received: May 21<sup>st</sup>, 2016; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2016; published: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2016

Copyright © 2016 by author and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

As an important substructure of the offshore platform, the bridge connecting two platforms possesses a completely different inherent dynamic nature compared with the whole structure. Based on the engineering design of the bridge and pipelines connecting CEPD and SLPW platform in Jinzhou 9-3 oilfield, an analysis on the dynamic response of the bridge structure induced by sea ice is reached in this paper by using finite element method. According to calculation result, bridge, as a platform substructure, not only inherits the ice-induced vibration of the platform, but also translates vibration from the platform into its unique form due to the dynamic characteristics of structure. Especially the vertical vibration level is significantly enlarged. The relevant evaluation is discussed afterwards according to the computing result.

## Keywords

Offshore Platform, Bridge, Ice-Induced Vibration

---

# 锦州9-3油田CEPD-SLPW平台间栈桥冰激振动分析

张 伟

海洋石油工程股份有限公司, 天津  
Email: zhwei@mail.cooec.com.cn

收稿日期：2016年5月21日；录用日期：2016年6月20日；发布日期：2016年6月23日

## 摘要

平台间的栈桥作为海洋平台上的重要子结构，具备与整体平台结构完全不同的固有动力特性。本文针对锦州9-3油田CEPD与SLPW平台之间的栈桥及其附属的重要管线的工程设计，考虑平台在冰激振动事件中，平台间栈桥及其附属的重要管线上的振动响应，进行有限元分析计算，并根据计算结果进行相应的分析评价。计算发现栈桥作为平台子结构在继承了平台的冰激振动后，又由于结构特有的动力特征将平台整体传递的振动转化为其特有的振动形态，尤其是在垂向的振动水平明显放大。根据计算结果进行的相关评估见下文。

## 关键词

海洋平台，栈桥，冰激振动

## 1. 引言

移动浮冰与结构物相互作用产生的荷载是交变的，即为一种动力作用。结构在这种动力作用下，通常会产生一定幅值的振动，而这样的振动现象就称为冰激振动[1]。随着寒区海域油气开采事业的发展，越来越多显著的冰激振动现象开始出现，一些强烈的冰激振动事件对正常的生产作业、结构的安全性以及工作人员的人身健康造成了严重威胁[2]。我国渤海作为北半球海洋结冰的南边界，每年都有不同程度的结冰现象，由此引发的海洋平台冰激振动问题便尤为突出。历史上，渤海就有过因冰激振动致使平台毁坏的严重事故。1969年，“海一井”平台支座拉筋被海冰割断，“海二井”生活平台、设备平台和钻井平台被流冰推倒，1977年，“海四井”烽火台被流冰推倒，生活平台振动剧烈，平台栈桥难以行走[3]-[5]。1999~2000冬季，渤海JZ20-2中南平台，由于冰激振动导致了平台管线的断裂[6]。

为了确保平台的安全，有必要对平台进行冰激振动分析。目前我国对冰区海洋平台冰激振动的研究以平台整体结构的分析居多，而针对平台间栈桥等子结构的动力响应所展开的研究工作仍较为匮乏。栈桥是连接海上油气田两个或多个平台间油气水管道、电控线缆和人员通行的通道，一般采用空间框架钢结构[7]，如图1。栈桥由于自身结构尺寸较大，具备与整体平台结构完全不同的固有动力特性。作为平台的子结构，栈桥结构的振动主要由平台的整体结构振动所引发，同时，在其自身动力特征的控制下，



Figure 1. Bridge between platforms on the sea

图 1. 某海域平台间栈桥

会将由平台整体结构传递过来的振动加以放大，从而对栈桥自身结构造成严重损害。因此，在对平台整体结构进行分析的同时，还必须对栈桥结构进行单独的计算分析。

锦州湾 9-3 区域位于渤海辽东湾北部海域，东经  $121^{\circ}24' \sim 121^{\circ}37'$ ，北纬  $40^{\circ}37' \sim 40^{\circ}42'$ ，平均水深约 6.5~10.5 米，属于浅水重冰区，一些严重的海冰灾害多发生在这一区域。本文针对锦州 9-3 油田 CEPD 与 SLPW 平台之间栈桥及其附属管线的工程设计，在考虑平台在冰激振动的作用下，对平台间的栈桥及其附属管线造成的振动响应进行有限元分析计算。

## 2. 计算模型的建立

### 2.1. 整体模型中栈桥的模拟

如前文所述，栈桥作为平台上的子结构，由于自身结构尺寸较大，并具备与整体平台结构完全不同的固有动力特性。如果将栈桥结构融合到整体平台计算模型中，将产生主结构与子结构振型耦合后的计算失真效应[8] [9]。因此，必须将栈桥结构进行单独的建模计算分析工作。然而这样的单独分析计算过程，并不意味着将子结构与主结构脱离，二者间必须保持固有的主次或振动继承关系。

据此，在前期针对 CEPD 平台所进行的有限元分析计算中，对平台栈桥子结构与整体平台上部模块间的连接及其自身质量进行了准确模拟，如图 2。可以看到，由于平台设计中栈桥结构与 CEPD 平台一层独立的小型附加甲板(与平台 EL+21m 甲板相连)形成了连接，因此在计算模型中充分模拟了栈桥与这层甲板连接的一系列构件。

### 2.2. 栈桥计算模型

在对 CEPD-SLPW 栈桥进行单独的有限元分析时，计算模型分为栈桥钢结构模型和管线模型两个部分，如图 3 所示。其中，为保证栈桥与 CEPD 平台振动响应间的“继承”关系，栈桥与 CEPD 平台 EL+21m 甲板的连接处保留了原支撑甲板及其支撑构件。对于管线模型的建立，则具有十分特殊的边界条件。尽管本文的分析中仅针对栈桥上的管线，但这些管线是与两座平台上的总管网相贯通连接的，因此，在栈桥发生振动响应的过程中，这些管线的振动响应是不能以栈桥结构为边界的。据此，必须为栈桥上的管线提供半无限式的边界条件，以避免造成整体栈桥结构的边界条件具有局部边界效应。因此，计算模型中将栈桥上的管线系统向栈桥结构外侧(即两座平台的总管网上)各延伸了 15 m，然后在延伸端点施

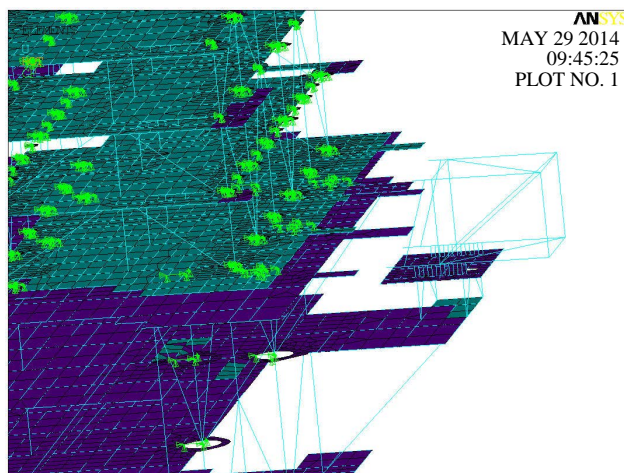


Figure 2. Connection component of the CEPD platform bridge general model

图 2. CEPD 平台整体模型中的栈桥连接构件

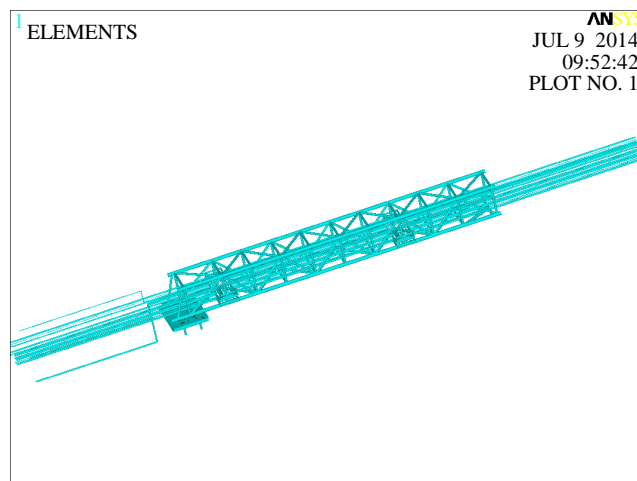


Figure 3. Integral model diagram of CEPD-SLPW bridge  
图 3. CEPD-SLPW 栈桥整体模型图

加铰接约束，这样就保证了边界条件的合理性。

栈桥钢结构模型和管线模型均采用 Pipe59 单元模拟，其中管线模型单元中添加了管内流体(原油)属性。整体结构阻尼比设定为 5%。

### 3. CEPD-SLPW 栈桥冰激振动分析

#### 3.1. 模态分析

模态分析的目的是识别出系统的模态参数，为结构系统的振动特性分析、振动故障诊断和预报以及结构动力特性的优化设计提供依据[10]。本文中的模态分析主要针对栈桥钢结构进行，而将栈桥上的管线系统作为附属结构，即将管线系统及其支撑构件的质量附加至栈桥结构上，并在模态分析中不体现其具体结构。这样处理的主要原因是因为管线系统与两座平台上的管网系统具有贯通连接，而在计算模型中是不可能也没有必要将整个管网系统建模模拟的，但这也同时说明在模态上栈桥管线系统是难以独立分析计算的。从另一方面讲，栈桥上的管线系统的振动响应则是主要“继承”自栈桥结构的振动的。首先，栈桥上的管线系统是通过一系列支撑构件与栈桥钢结构相连接的，因此，栈桥的振动将通过这些支撑构件传递至管线上。其次，尽管平台上的整体管网在平台的整体振动响应下也随之发生振动，但由于平台上管线的布置和支撑方式远较栈桥上的复杂，致使其振动阻尼耗散也十分显著，这就造成整体管网的振动是很难传递至栈桥管线系统的。因此，整个栈桥-管线系统的基础振动特征是由栈桥钢结构控制的。据此，模态分析主要针对栈桥钢结构进行，而栈桥上的管线系统作为附属结构处理。通过计算得到栈桥钢结构前 3 阶振型和自振频率如图 4 和表 1 所示。

#### 3.2. 冰激振动响应分析

在前期提取的 CEPD 平台整体结构冰激振动分析结果中可以发现，平台整体结构在最高天文潮水位下，冰速 1.2 m/s，冰厚 49.2 cm，来冰方向为 SSW 时出现了最大响应。以此为极端工况，对此工况下的栈桥结构冰激振动响应进行分析。

如前文 2.1 中所述，在针对 CEPD 平台所进行的有限元分析计算中，已经对平台栈桥子结构与整体平台上部模块间的连接及其自身质量进行了准确模拟，据此便可以准确提取与每种海冰作用工况相对应的栈桥连接点上的结构动力响应。这些动力响应的提取结果正是在对栈桥结构进行独立计算中采用的振

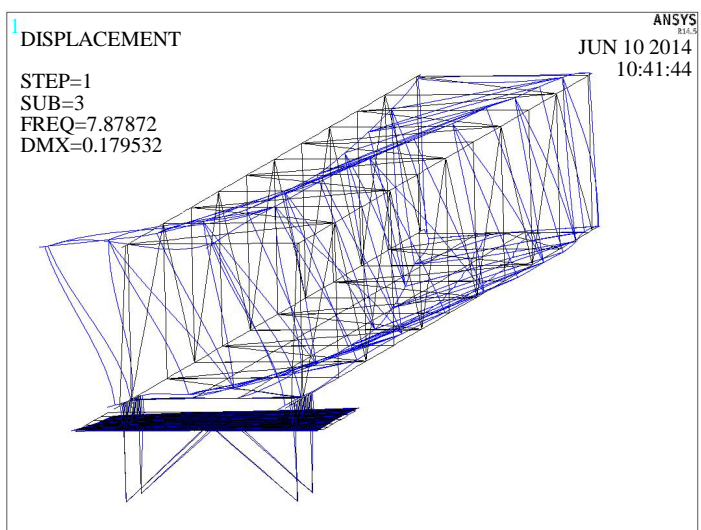
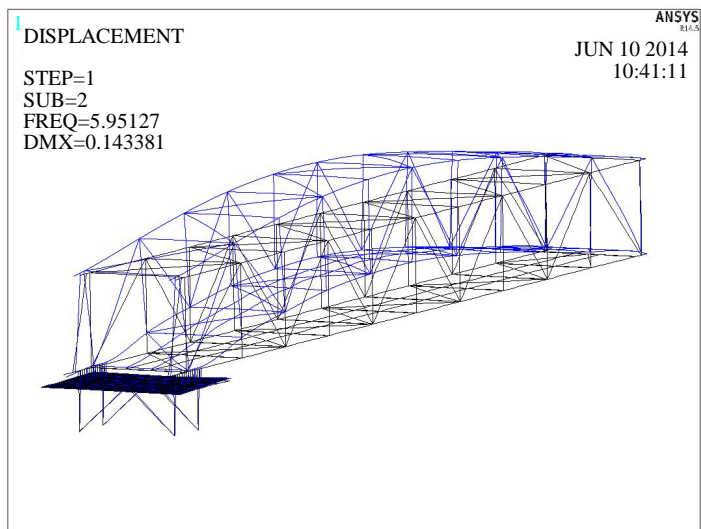
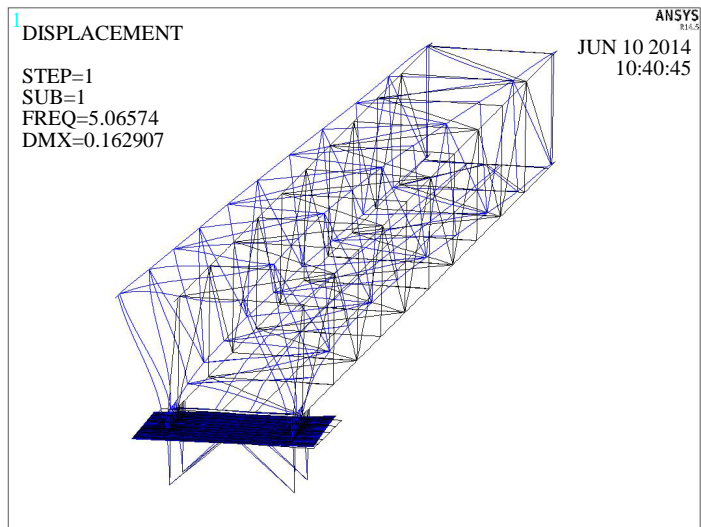


Figure 4. The first three order vibration mode of CEPD-SLPW bridge  
图 4. CEPD-SLPW 栈桥前 3 阶振型

**Table 1. First three order natural frequency of vibration of CEPD-SLPW bridge**  
**表 1. CEPD-SLPW 栈桥模型前 3 阶自振频率**

	频率(Hz)	方向
1	5.07	Y 向摇摆
2	5.91	Z 向摇摆
3	7.88	绕 X 轴扭转

动输入项。由此，便形成了对 CEPD-SLPW 栈桥与各组计算工况一一对应的振动输入时程的构建。

根据以上方法，对 CEPD-SLPW 栈桥有限元模型施加与上述极端工况相对应的平台整体位移响应时程曲线，采用瞬态动力计算方法，进行全时域范围内的冰激振动响应分析计算。图 5 展示了 CEPD-SLPW 栈桥钢结构和管线系统出现最大响应时刻的变形图。

由图 5 可以看到，钢结构和管线系统的最大响应位置均出现在靠近 CEPD 平台一侧的端点上。导致这样的变形形式的主要原因，是由于栈桥所连接的两座平台的振动存在差异。根据多年来针对锦州 9-3 沉箱平台上的冰激振动观测结果可知，SLPW 平台以其庞大的结构型式形成了良好的冰激振动抑制作用，而前期针对 CEPD 平台所进行的冰激振动模型试验和数值分析结果表明，CEPD 平台上经历的冰激振动水平是较为显著的。因此，在分析中也依据 CEPD 平台上振动响应对栈桥结构响应分析中的控制输入进行了构建。同时，考虑 SLPW 平台上相对 CEPD 平台几乎可忽略的振动水平，计算模型中将栈桥与 SLPW 平台连接处的边界条件设为了铰接。这样，栈桥结构在一端振动明显，而另一端振动可忽略的外部激励模式下，自然也就呈现出上面展示的变形和响应特征。

依据图 5 展示的变形图中标注的结构最大变形位置，分别提取对应的振动响应数据，进行结构响应特征分析。

### 3.2.1. 栈桥钢结构振动响应分析

图 6~8 分别给出了在上述极端工况下，栈桥钢结构最大响应位置沿 X、Y、Z 三个方向的位移响应，并与 CEPD 平台 EL+21m 甲板上的相应响应进行了对比。

通过图 6~8 展示的对比如可以得出，作为平台整体结构上的子结构，栈桥钢结构在吸收了平台甲板传递过来的振动能量后，已将其转化为自身特有的振动形态。具体表现为：

- 1) X 向：振动形态基本与平台甲板保持几乎相反的相位，位移响应水平较平台甲板缩减了 5 倍；
- 2) Y 向：振动形态与平台甲板基本一致，位移响应水平较平台甲板放大了 1.2 倍；
- 3) Z 向：振动形态与平台甲板完全不同，甲板在该向的振动水平十分微弱，但栈桥钢结构已将其转化为较为稳定的低频振动，振动水平较平台甲板放大了近 30 倍。

### 3.2.2. 栈桥管线系统振动响应分析

如图 5 所示，CEPD-SLPW 栈桥管线系统的最大响应出现在管线与 CEPD 平台主管网相连接处。图 9~11 分别给出了栈桥管线系统最大响应位置沿 X、Y、Z 三个方向的位移响应，并与 CEPD-SLPW 栈桥钢结构上的最大响应进行了对比。

可以看到，作为栈桥钢结构上的子结构，栈桥管线在吸收了平台甲板传递过来的振动能量后，在三个方向上均形成了动力放大，具体表现为：

- 1) X 向：位移响应水平较栈桥钢结构缩减了 1.3 倍；
- 2) Y 向：位移响应水平较栈桥钢结构放大了 3.2 倍；
- 3) Z 向：位移响应水平较栈桥钢结构放大了 4 倍。

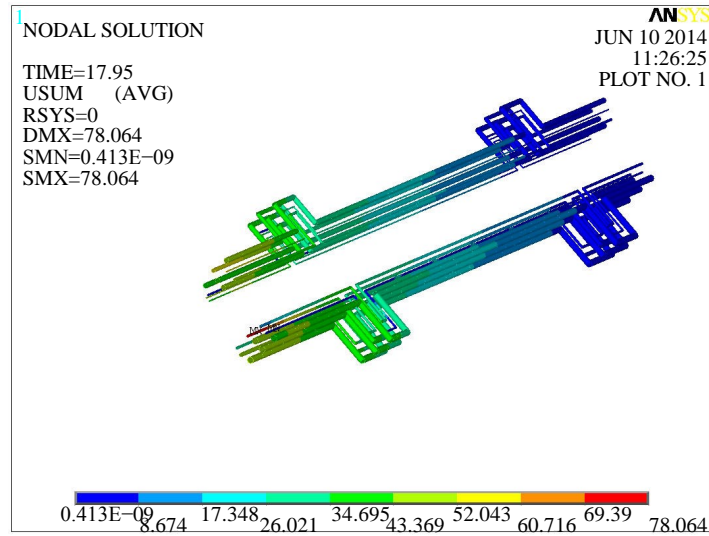
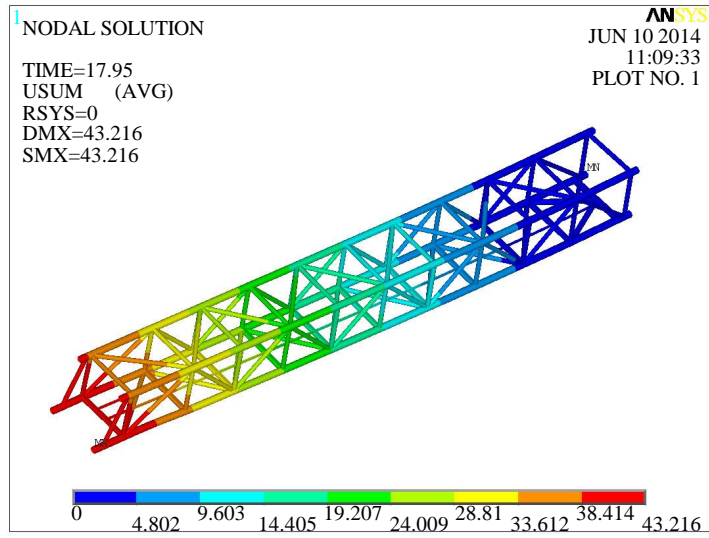


Figure 5. Deformation figure of CEPD-SLPW bridge and pipe system at maximum response time  
 图 5. CEPD-SLPW 栈桥钢结构和管线系统最大响应时刻变形图

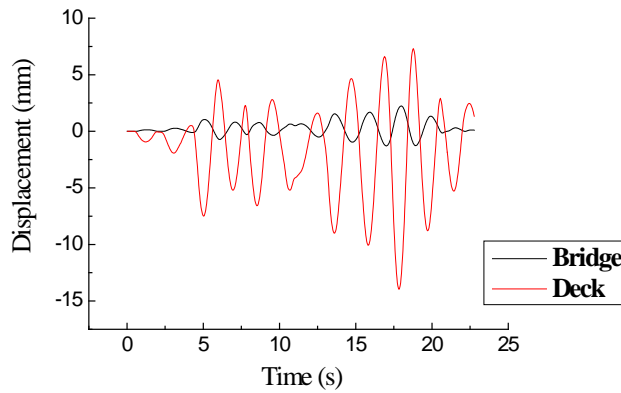


Figure 6. X displacement response of bridge steel structure and deck of platform  
 图 6. 栈桥钢结构与平台甲板 X 向位移响应

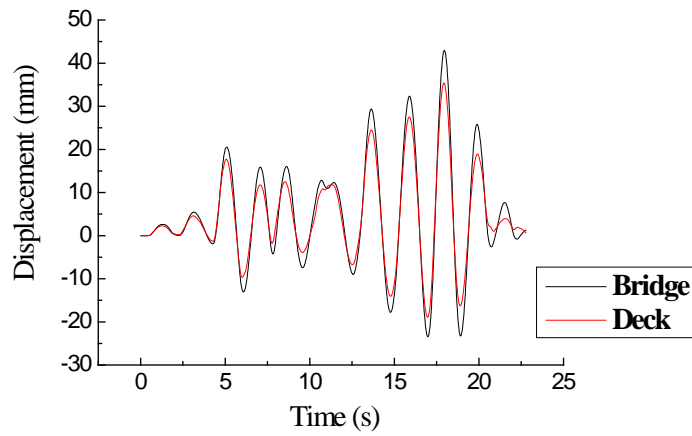


Figure 7. Y displacement response of bridge steel structure and deck of platform

图 7. 栈桥钢结构与平台甲板 Y 向位移响应

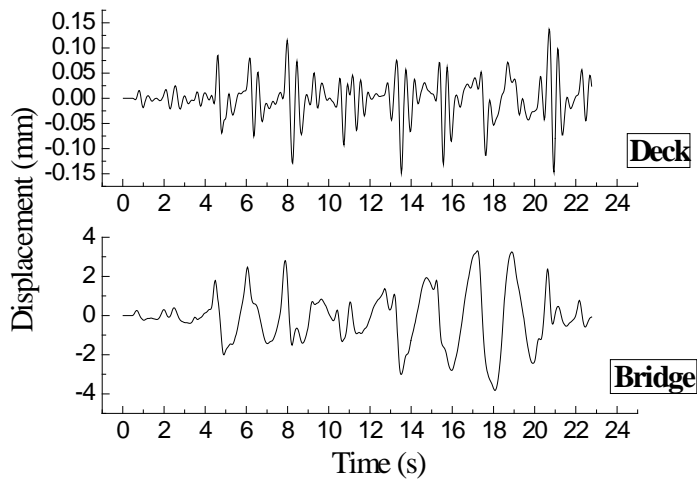


Figure 8. Z displacement response of bridge steel structure and deck of platform

图 8. 栈桥钢结构与平台甲板 Z 向位移响应

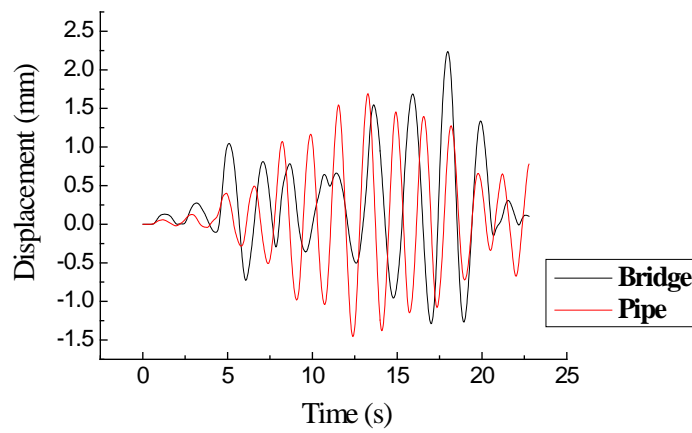


Figure 9. X displacement response of bridge line and steel structure

图 9. 栈桥管线与栈桥钢结构 X 向位移响应



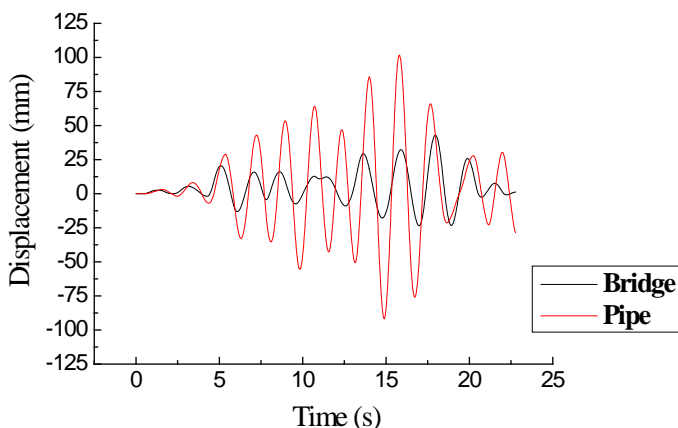


Figure 10. Y displacement response of bridge line and steel structure  
图 10. 栈桥管线与栈桥钢结构 Y 向位移响应

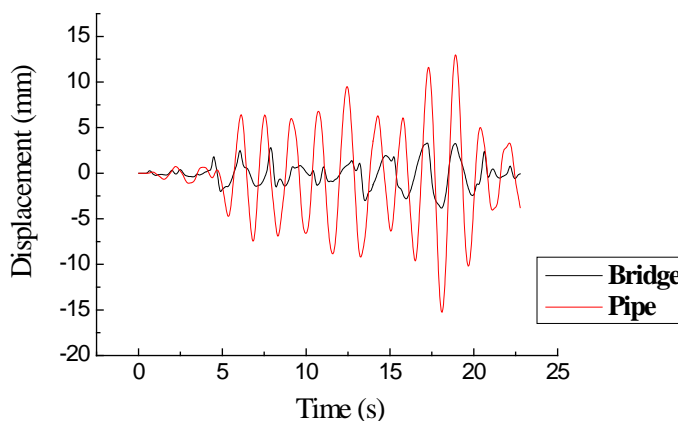


Figure 11. Z displacement response of bridge line and steel structure  
图 11. 栈桥管线与栈桥钢结构 Z 向位移响应

#### 4. 结论

1) 本文在准确模拟平台栈桥结构与整体平台上部模块间的连接及自身质量的前提下，对 CEPD-SLPW 栈桥结构进行了单独的建模计算分析，保证了子结构与主结构二者间固有的主次及振动继承关系；

2) 栈桥钢结构在垂向(Z 向)的振动响应水平已接近于 Y 向的振动，因此在与平台结构的联合振动过程中，其垂向的相对振动才是占据主导地位的振动模式；

3) 整体栈桥结构具有多重的“子结构”与“主结构”匹配关系，即相对于平台结构，整体栈桥结构具有“子结构”特征，而栈桥上的管线系统相对于栈桥钢结构，又具备了第二阶的“子结构”与“主结构”匹配关系；

4) 本文所进行的工作可为渤海浅水重冰区类似结构物的设计和分析提供参考和借鉴。

#### 参考文献 (References)

- [1] 黄焱. 冰激海洋平台振动的动力模型试验研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2004.
- [2] Sodhi, D.S. (2001) Crushing Failure during Ice-Structure Interaction. *Engineering Fracture Mechanics*, **68**, 1889-1921.
- [3] 张方俭, 费立淑. 我国的海冰灾害及其防御[J]. 海洋同胞, 1994, 13(5): 75-83.

- 
- [4] 张树祥, 周森. 渤海航运中的海冰危害和防冰减灾对策[J]. 冰川冻土, 2003, 25(S2): 360-362.
- [5] 李志军. 渤海海冰灾害和人类活动之间的关系[J]. 海洋预报, 2010, 27(1): 8-12.
- [6] Yue, Q.J. (2004) Crushing Formed Dynamic Ice Loads during Interacting with Vertical Compliant Structure. *Engineering Mechanics*, 2, 200-208.
- [7] 刘戈, 宋克新, 张海. 海洋平台栈桥动力分析[J]. 海洋技术, 2009, 28(2): 84-87.
- [8] 王文亮, 杜作润. 结构振动与动态子结构方法[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1985.
- [9] 克拉夫, R., 彭津, J. 结构动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] 陈道章. 随机振动理论及其应用[J]. 电子科技大学学报, 1993, 22(4): 428-433.

**再次投稿您将享受以下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>