

湿模态特征下张力腿结构传感器布点优化

刘 城¹, 常进云¹, 王世圣², 郭杏林¹, 武文华^{*1}

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 中海石油(中国)有限公司 北京研究中心, 北京 100027)

摘要: 传感器的测点优化布置是海洋工程装备结构健康监测的关键问题之一. TLP(tension leg platform)张力腿结构在海洋环境荷载的长期作用下可能出现疲劳损伤行为, 开展张力腿原型现场监测研究十分重要. 考虑张力腿结构的湿模态特征, 基于有效独立法开展了传感器初始测点位置的优化筛选研究, 结合模态置信度准则和最小均方差准则, 提出了适用于以张力腿为典型结构的大长细比水下结构的传感器布设方法. 以某待建 TLP 为例, 应用所提方法给出了张力腿结构的传感器布点优化方案. 所提方法在实际张力腿原型监测系统传感器布点优化方面具有一定应用价值, 对于水下直立结构也具有借鉴作用.

关键词: 张力腿结构; 湿模态特征; 有效独立法; 传感器布点优化; 结构健康监测

中图分类号: TE95

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202004001

0 引言

TLP 是一种广泛应用于深海的浮式平台, 由于采取一组张紧钢管系泊^[1], 故又称为张力腿平台. 作为 TLP 的重要组成部分之一, 张力腿在位时的工作状态受到操作条件、海洋环境条件和浮体运动等影响^[1]. 海洋环境条件的非平稳随机特征及其时变特征, 及张力腿与平台浮体相互作用的耦合性和非线性等, 使设计工况的海洋荷载模型无法准确反映作用在张力腿上的真实荷载和实际响应, 增加了张力腿在位安全的不确定性. 一旦张力腿结构在现场作业中出现故障, 将影响整个平台的生产和安全.

结构健康监测系统通过实时获取环境荷载和结构响应的监测数据, 能较为准确地评价大型装备在真实荷载条件下的结构运动状态和力学行为^[2], 已获得广泛的关注和足够的重视. 但是由于海洋环境存在很大的未知性和复杂性, 海水的腐蚀、海生物的附着都会缩短监测传感器的使用寿命, 影响整个系统的长期可靠性; 同时传感器的水下安装、维护和更换成本昂贵也给水下结构

的健康监测带来了不便, 合理有效地在结构上布置传感器, 尤其是张力腿等大长细比水下结构的传感器优化布设, 对于提高监测信息采集效率, 减少传感器安装的数量和维护费用有重要意义^[3].

TLP 张力腿监测主要分为张力状态监测和运动响应监测, 由于张力腿结构在安装过程中已有专门的顶张力监测设备, 文中主要讨论流致振动响应的监测传感器布点优化问题. 通过对张力腿位移和加速度的监测, 可以直观反映出其运动状态, 并可以计算出张力腿的应力和应变, 及时发现张力腿在位状态下的不安全因素.

当下诸多学者针对陆上结构的传感器布点优化问题开展了多方面的研究, 取得了众多研究成果^[4]. Kammer 于 1991 年提出的传感器布点优化的有效独立法(EI)^[5], 是根据每个传感器对结构模态向量保持线性无关的贡献度来筛选布点位置^[6]. Imamovic 于 1998 年对有效独立法进行了改进, 称之为有效独立-驱动点残差法^[7]. 近年来, 采用遗传算法^[8]、模拟退火算法^[9]、猴群算法^[10]等智能算法对结构进行传感器的布设优化也得到了关注和发展. 有效独立法筛选速度快, 并且可以

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2020-05-10.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05028-02-05).

作者简介: 刘 城(1995-), 男, 硕士生, E-mail: lcaisyb@163.com; 武文华^{*}(1973-), 男, 博士, 教授, E-mail: lxyuhua@dlut.edu.cn.

使关注的模态向量在较少测点状态下保持较高的线性独立,使得在监测中可以用较少数量的传感器获取到最优的模态信息^[11],因此被广泛应用于传感器的布点优化中,尤其适合于张力腿等沿轴向质量变化不敏感的大长细比结构^[12].

本文考虑张力腿结构的湿模态特征,利用有效独立法开展传感器初始测点位置的优化筛选,结合模态置信度准则(MAC)和最小均方差(MSE)准则,提出适用于大长细比水下结构的传感器布设方法.以中国南海某待建 TLP 张力腿为例,应用所提方法给出张力腿结构的传感器布点优化方案.

1 张力腿结构湿模态特征分析

1.1 张力腿结构和数值模型

张力腿由标准件轧制钢管或高强度钢管组装而成^[13],主要用于连接 TLP 平台与海底基座,保证平台浮体在风、浪、流的作用下有良好的定位能力和运动状态^[14],为 TLP 提供相对稳定的海上作业环境,图 1 为 TLP 结构示意图.

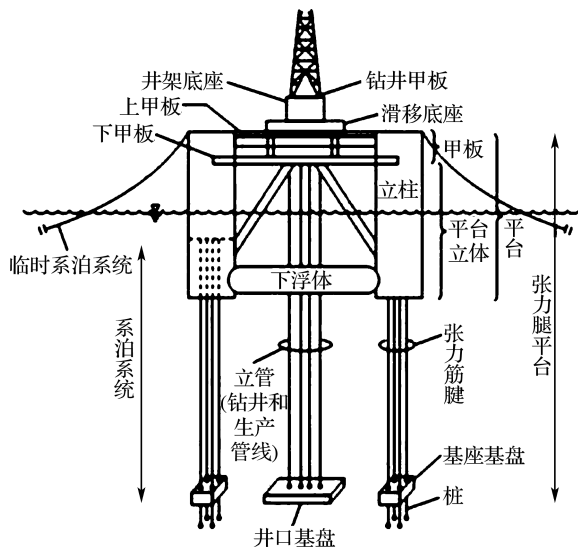


图 1 TLP 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tension leg platform

图 2 为典型张力腿结构示意图,其中张力腿顶端与平台连接,底端插入到海底基座中形成自锁连接.在数值模拟过程中将张力腿模型底端模型化为固支,顶端模型化为简支,图 3 给出了某典型张力腿结构的力学仿真模型.

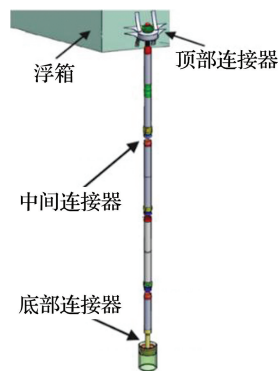


图 2 张力腿结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the tension leg structure



图 3 模型简化示意图

Fig. 3 Simplified schematic diagram of model

1.2 张力腿结构湿模态选择

模态分析是深海结构传感器布点优化的基础.通常将在空气/真空中的模态分析称之为干模态分析,湿模态分析是指考虑流体与结构之间耦合作用的模态分析.国内外一些学者在研究深海结构动态响应时,往往采用干模态分析,忽略了海水的作用,致使计算结果与实际情况有出入^[15].

考虑流固耦合作用,TLP 张力腿结构的动力学方程如下^[16]:

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_w) \mathbf{x}'' + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_w) \mathbf{x}' + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_w) \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为质量矩阵, $\mathbf{M}_w$ 为附加质量矩阵, $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵, $\mathbf{C}_w$ 为附加阻尼矩阵, $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵, $\mathbf{K}_w$ 为附加刚度矩阵, $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{x}'$ 、 $\mathbf{x}''$ 分别为振动位移、速度和加速度向量.

使用商业软件 Ansys 中 Modal + Acoustic Extension 模块进行湿模态分析.在忽略阻尼作用下,利用 Workbench DM 创建三维模型(如图 4 所示),分为固体区域和流体区域两部分.其中固体区域为空心圆管,底端和顶端分别采用固支和简支约束.根据文献^[17]进行圆柱体流固耦合数

值模拟计算时,圆柱体表面距离流场边界距离为 $20D$ (D 为圆柱体直径)有较好的模拟结果,因此设置流体区域为直径 $20D$ 的圆柱形流场,密度设置为 $1\,025\text{ kg/m}^3$,声速设置为 $1\,500\text{ m/s}$.将流体模型与固体结构模型的交界面设置为流固耦合面.首先对流体区域与固体区域分别建模,再将流、固模型合成新体,防止网格划分时出现干涉情况.文中流体区域和固体区域均采用六面体网格,其中流体区域共划分 $88\,400$ 个网格单元,固体区域共划分 $4\,600$ 个网格单元,并且近壁面处网格采用加密处理.流体区域网格划分如图5所示.

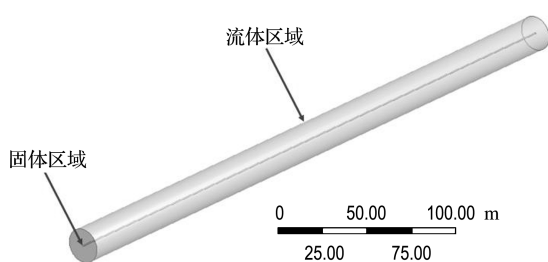


图4 几何模型

Fig. 4 Geometric model

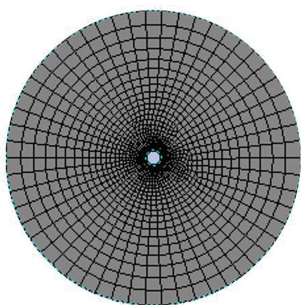


图5 网格划分图

Fig. 5 Mesh division map

2 张力腿结构布点优化方法及评价准则

2.1 有效独立法

有效独立法本质是根据每个传感器对结构模态向量保持线性无关的贡献度来筛选布点位置,利用较少的传感器得到更多的模态反应信息^[18].根据模态矩阵得到信息矩阵,以每个测点对目标模态矩阵独立性所做的贡献大小排序,顺次删去对其秩贡献最少的测点,使 Fisher 信息矩阵得到优化^[19].

定义输出响应为 u ,则^[5,20]:

$$u = \Phi q + N \quad (2)$$

式中: Φ 表示待监测结构的模态矩阵, q 表示模态坐标向量, N 表示方差为 Ψ_0^2 的静态高斯白噪声.

q 的最小二乘估计 $\hat{q}$ 为

$$\hat{q} = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T u \quad (3)$$

尽可能减小 q 和 $\hat{q}$ 之间的误差即可得到 q 的最佳估计,若该过程是一个无偏估计,则估计误差的协方差矩阵 P 表示为

$$P = E[(q - \hat{q})(q - \hat{q})^T] = [\Phi^T (\Psi_0^2)^{-1} \Phi]^{-1} \quad (4)$$

其中 E 表示期望值.

引入 Fisher 信息矩阵 A :

$$A = \Phi^T \Phi \quad (5)$$

将 A 代入式(4)可得:

$$P = \left(\frac{1}{\Psi_0^2} A \right)^{-1} \quad (6)$$

因为 Ψ_0^2 为常数,想要矩阵 P 取得最小,可以将矩阵 A 取到最大(文中取最大迹范数为标准),从而得到 Φ 的最优估计.将 A 分解至结构各点上,式(5)转化为

$$A = \sum_{i=1}^s \Phi_i^T \Phi_i \quad (7)$$

首先应该求解矩阵 A 的特征值 λ . Ψ 为 A 的特征向量,设定传感器监测结构的各阶振型是线性无关的,则可以知道 A 是正定阵,那么 λ 为实数,可以将 Ψ 转化成单位正交矩阵,即有:

$$\Psi^T A \Psi = \lambda \quad (8)$$

$$\Psi^T \Psi = I \quad (9)$$

Ψ 为单位正交性矩阵,所以有

$$G = [\Phi \Psi] \otimes [\Phi \Psi] \quad (10)$$

G 中每列之和为 A 的特征值,即测点对 A 的特征值贡献度可由各列元素值代表.因此可以构建各方向并重的绝对识别空间:

$$F = [\Phi \Psi] \otimes [\Phi \Psi] \lambda^{-1} \quad (11)$$

矩阵 F 中元素 F_{ij} 表示第 i 个测点对第 j 个特征值的贡献.

分别对 F 矩阵各行元素求和,故有效独立向量 E_d 表示为

$$E_d = \left(\sum_{j=1}^k F_{1j} \quad \sum_{j=1}^k F_{2j} \quad \cdots \quad \sum_{j=1}^k F_{sj} \right)^T \quad (12)$$

可以将 E_d 改写成对角矩阵 E :

$$E = \Phi \Psi \lambda^{-1} \Psi^T \Phi^T = \Phi [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T \quad (13)$$

有效独立系数 E_{ii} 等于或接近于0表示该传感器测点很难有效识别目标结构的模态,应该被

排除; E_{ii} 等于或接近于 1 时测点应当被留下. 有效独立法就是将有效独立系数按照大小进行排序, 在所有测点中顺次删除 E_{ii} 最小的点, 直至获得最终的传感器布设方案.

2.2 模态置信度准则和最小均方差准则

2.2.1 模态置信度准则 根据动力学理论, 海洋结构的各阶模态向量在节点上具有正交性. 实际上, 传感器所测的自由度少于模型本身自由度, 且存在环境作用和仪器测量误差, 致使所测模态向量不具备正交性, 甚至会丢失关键模态^[21-23]. 故选择海洋结构传感器安装位置时应保证所测各模态向量具有足够的空间交角, 最大程度地保留原模型的动力学特性. MAC 矩阵表达式如下:

$$H_{ij} = \frac{(\boldsymbol{\varphi}_i^T \boldsymbol{\varphi}_j)^2}{(\boldsymbol{\varphi}_i^T \boldsymbol{\varphi}_i)(\boldsymbol{\varphi}_j^T \boldsymbol{\varphi}_j)} \quad (14)$$

其中 $\boldsymbol{\varphi}_i$ 、 $\boldsymbol{\varphi}_j$ 为第 i 、 j 阶模态振型向量. MAC 矩阵非对角线元素限定在 0 和 1 之间, 且数值越小模态正交性越好, 模态越容易分辨. 一般认为 0.05 为两个模态向量分辨的临界值^[24].

2.2.2 最小均方差准则 首先利用有限元数值计算方法获取海洋结构湿模态振型数据; 提取部分已知测点数据, 使用三次样条插值方法对其进行扩展, 得到一组扩展模态数据, 基于均方差来评价两组测点数据, 不同的传感器测点布置方案会计算出不同的均方差, 选取均方差最小的作为传感器布置方案. 其表达式为^[25-26]

$$\sigma_{\text{TMSD}} = \sum_{j=1}^N \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Phi_{ij}^{\text{CS}} - \Phi_{ij}^{\text{FE}})^2}{n} \quad (15)$$

式中: N 为模态阶数, n 为测点数目, σ_j 为第 j 阶模态的标准差, Φ_{ij}^{CS} 为第 j 阶第 i 个测点的扩展模态值, Φ_{ij}^{FE} 为第 j 阶第 i 个测点的有限元计算模态值.

3 某典型 TLP 张力腿传感器优化分析

以中国南海某待建 TLP 张力腿为例, 该 TLP 所处水深约 404 m, 平台连接 8 根张力腿筋腱. 每根张力腿底部与海底基座形成自锁连接, 顶部通过连接器与平台浮体连接, 其张力腿模型参数如表 1 所示.

表 2 给出了张力腿前 10 阶干模态和湿模态的固有频率.

表 1 张力腿结构模型参数

Tab. 1 Tension leg model parameters

长度/m	外径/m	内径/m	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/GPa
404	1.00	0.95	7 850	210

表 2 张力腿模型前 10 阶干-湿模态结果对比

Tab. 2 Comparison of the first ten-step dry and wet modal results of tension leg model

模态阶数	f_{dry}/Hz	f_{wet}/Hz
1	0.026 7	0.019 6
2	0.026 7	0.019 6
3	0.086 6	0.063 6
4	0.086 6	0.063 6
5	0.180 8	0.132 7
6	0.180 8	0.132 7
7	0.309 5	0.227 1
8	0.309 5	0.227 1
9	0.472 7	0.346 4
10	0.472 7	0.346 4

从干模态频率和湿模态频率对比可以发现, 相同阶数情况下湿模态频率比干模态频率降低 30% 左右. 第 1、3、5 阶湿模态的振型如图 6 所示.

沿张力腿轴向等间距选取 101 个待测点. 以前 10 阶模态为重点研究对象^[13]. 使用有效独立法进行张力腿测点位置的筛选. MAC 矩阵非对角线元素最大值变化曲线如图 7 所示, 横坐标为测点数目, 纵坐标为 MAC 矩阵非对角线元素最大值. 总均方差值变化曲线如图 8 所示, 横坐标为测点数目, 纵坐标为总均方差.

由图 7 可知当测点数目大于等于 9 时, MAC 矩阵非对角线元素最大值满足小于 0.05 的标准. 由图 8 可知当测点数目大于等于 12 时总均方差值保持较小, 且基本不变, 此时通过三次样条插值的扩展模态与原始模态对比如图 9 所示.

综合考虑 MAC 和 MSE 准则后, 确定以下 12 个测点为优选测点(见表 3), 作为比较, 表 4 也给出了基于干模态的测点优化位置分布.

从表 3 和表 4 的结果对比可以看出, 采用湿模态特征进行布点位置筛选与采用干模态特征进行筛选得到的结果具有明显区别, 其中采用湿模态特征筛选布点, 立管下部布点数量较多, 中部布点数量较少, 顶部布点数量与干模态特征下数量相同.

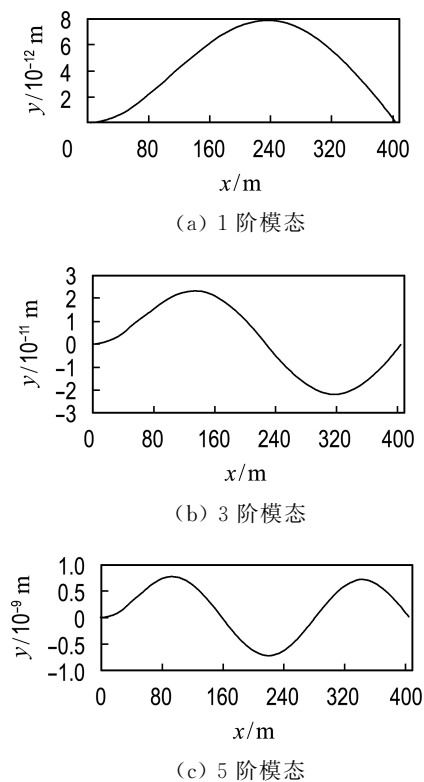


图6 张力腿湿模态振型图

Fig. 6 Tension leg wet modal vibration pattern

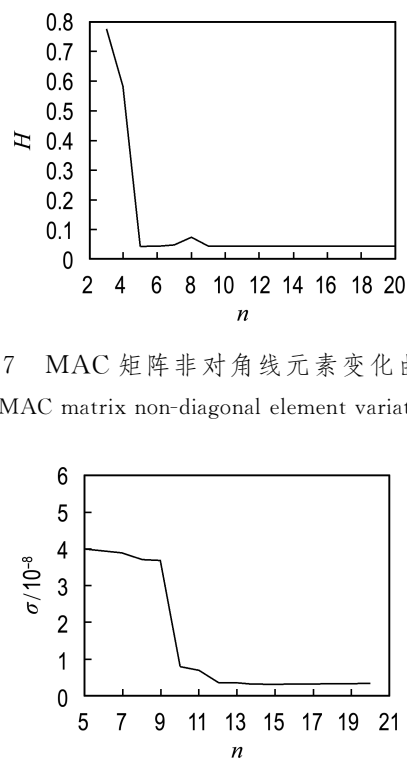


Fig. 7 MAC matrix non-diagonal element variation curve

图8 总均方差变化曲线

Fig. 8 Total mean square error variation curve

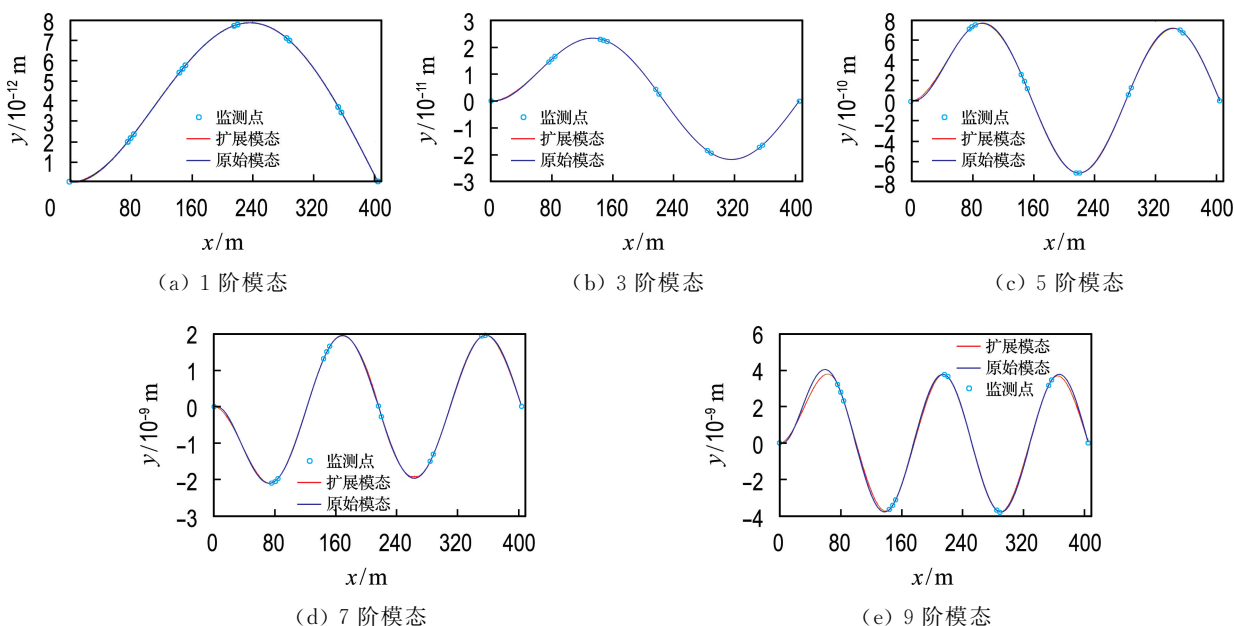


图9 原始模态振型与扩展模态振型对比

Fig. 9 Comparison between original modal vibration pattern and extended modal vibration pattern

湿模态特征下 12 个优选测点 MAC 矩阵值的柱状图如图 10 所示。

可以看出,利用有效独立法得到的测定布点

优化方案的 MAC 矩阵非对角元素值接近于 0,表明了测点间良好的独立性,显示出优化之后测点位置的合理性。

表3 湿模态特征下布点位置

Tab.3 Location of the wet modal feature

节点号	底标高/m	节点号	底标高/m
19	76.1	54	216.4
20	80.1	55	220.4
21	84.1	71	284.5
36	144.2	72	288.5
37	148.2	88	352.6
38	152.2	89	356.6

表4 干模态特征下布点位置

Tab.4 Location of the dry modal feature

节点号	底标高/m	节点号	底标高/m
18	72.1	54	216.4
19	76.1	69	276.5
35	140.2	70	280.5
36	144.2	71	284.5
52	208.4	86	344.6
53	212.4	87	348.6

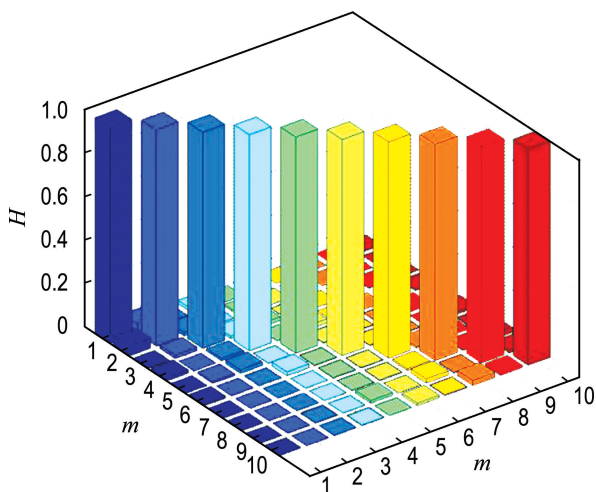


图10 MAC矩阵图

Fig.10 MAC matrix diagram

4 结 论

(1)应用 Ansys 中 Modal+Acoustic Extension 模块,考虑了张力腿结构湿模态特征,避免了只考虑干模态分析导致的与实际不符的情况。

(2)应用有效独立法对初始测点进行筛选,结合模态置信度准则和最小均方差准则逐步删除有效独立系数最小的测点,得到最终传感器测点的布置方案。

(3)以中国南海某待建 TLP 张力腿为例,利

用 EI-MAC-MSE 方法进行了该实际结构的传感器测点优化分析,最终采用 12 个传感器的优化方案。

本文提出的基于湿模态分析方法适用于深海大长细比结构的传感器优化布点,在实际张力腿原型监测系统传感器布点优化方面具有一定应用价值,对于其他水下直立结构也具有借鉴价值。

参考文献:

- [1] 王世圣,谢 彬. 张力腿安装及在位状态受力分析与强度评估 [J]. 海洋工程装备与技术, 2018, 5(5): 327-332.
WANG Shisheng, XIE Bin. Force analysis and strength evaluation for tension leg of TLP in installation and in-place states [J]. **Ocean Engineering Equipment and Technology**, 2018, 5(5): 327-332. (in Chinese)
- [2] 阴宏宇. 火炬塔和海洋立管原型监测传感器布点优化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
YIN Hongyu. Study on optimal sensor placement for prototype monitoring system of torch tower and marine riser [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [3] 刘福强,张令弥. 作动器/传感器优化配置的研究进展 [J]. 力学进展, 2000(4): 506-516.
LIU Fuqiang, ZHANG Lingmi. Advances in optimal placement of actuators and sensors [J]. **Advances in Mechanics**, 2000(4): 506-516. (in Chinese)
- [4] 张建伟,刘轩然,赵 瑜,等. 基于有效独立-总位移法的水工结构振测传感器优化布置 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 148-153.
ZHANG Jianwei, LIU Xuanran, ZHAO Yu, et al. Optimal sensor placement for hydraulic structures based on effective independence-total displacement method [J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2016, 35(8): 148-153. (in Chinese)
- [5] KAMMER D C. Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures [J]. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, 1991, 14(2): 251-259.
- [6] 江祥林,程 高. 基于 Efi 法的桥梁模态测试中传感器优化布置 [J]. 桥梁建设, 2012, 42(2): 59-65.
JIANG Xianglin, CHENG Gao. Optimal sensor

- placement for bridge modal testing based on Efl method [J]. **Bridge Construction**, 2012, **42**(2): 59-65. (in Chinese)
- [7] IMAMOVIC N. Model validation of large finite element model using test data [D]. London: Imperial College, 1998.
- [8] 黄维平,刘娟,李华军. 基于遗传算法的传感器优化配置[J]. 工程力学, 2005(1): 113-117.
HUANG Weiping, LIU Juan, LI Huajun. Optimal sensor placement based on genetic algorithms [J]. **Engineering Mechanics**, 2005 (1): 113-117. (in Chinese)
- [9] 田莉. 结构健康监测中的传感器优化配置研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.
TIAN Li. Research on optimal sensor placement for structural health monitoring [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2012. (in Chinese)
- [10] 伊廷华,张旭东,李宏男. 基于小生境猴群算法的传感器优化布置方法研究[J]. 工程力学, 2014, **31**(9): 112-119, 151.
YI Tinghua, ZHANG Xudong, LI Hongnan. The niching monkey algorithm for optimal sensor placement [J]. **Engineering Mechanics**, 2014, **31**(9): 112-119, 151. (in Chinese)
- [11] 刘伟. 空间网格结构健康监测系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
LIU Wei. Study on key technologies of health monitoring system for spatial lattice structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [12] 刘伟,高维成,李惠,等. 基于有效独立的改进传感器优化布置方法研究[J]. 振动与冲击, 2013, **32**(6): 54-62.
LIU Wei, GAO Weicheng, LI Hui, *et al.* Improved optimal sensor placement methods based on effective independence [J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2013, **32**(6): 54-62. (in Chinese)
- [13] 谷家扬. 张力腿平台复杂动力响应及涡激特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
GU Jiayang. Study on the complex dynamic response and vortex-induced motion characteristics of tension leg platform [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
- [14] 刘俭飞,王晶,赵倩. TLP 张力腿监测系统应用研究[J]. 自动化仪表, 2016, **37**(5): 36-38, 43.
LIU Jianfei, WANG Jing, ZHAO Qian. Application research on the tendon tension monitoring system [J]. **Process Automation Instrumentation**, 2016, **37**(5): 36-38, 43. (in Chinese)
- [15] 姜峰,郑运虎,梁瑞,等. 海洋立管湿模态振动分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, **37**(5): 159-166.
JIANG Feng, ZHENG Yunhu, LIANG Rui, *et al.* An analysis of the wet modal vibration of marine riser [J]. **Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)**, 2015, **37**(5): 159-166. (in Chinese)
- [16] 刘晓欧,尹韶平,严光洪. 基于 MSC Nastran 的水下环肋圆柱壳体振动模态计算方法[J]. 计算机辅助工程, 2006(S1): 124-127.
LIU Xiaoou, YIN Shaoping, YAN Guanghong. Underwater vibration modal calculation of the ring-stiffened cylindrical shell with MSC Nastran [J]. **Computer Aided Engineering**, 2006 (S1): 124-127. (in Chinese)
- [17] 刘跃,管小荣,徐诚. SAS 与 PANS 模型在圆柱绕流中的应用比较[J]. 空气动力学学报, 2019, **37**(4): 530-540.
LIU Yue, GUAN Xiaorong, XU Cheng. Assessment of SAS and PANS models in simulations of flow over a circular cylinder [J]. **Acta Aerodynamica Sinica**, 2019, **37**(4): 530-540. (in Chinese)
- [18] 刘艳,刘贵杰,刘波. 传感器优化布置研究现状与展望[J]. 传感器与微系统, 2010, **29**(11): 4-6, 13.
LIU Yan, LIU Guijie, LIU Bo. Research status and prospect on optimal placement of sensor [J]. **Transducer and Microsystem Technology**, 2010, **29**(11): 4-6, 13. (in Chinese)
- [19] 刘斌,姚永丁,叶贵如. 斜拉桥传感器优化布点的研究[J]. 工程力学, 2005(5): 171-176.
LIU Bin, YAO Yongding, YE Guiru. Study of optimal sensor placement for cable-stayed bridge [J]. **Engineering Mechanics**, 2005(5): 171-176. (in Chinese)
- [20] KAMMERD C. Effect of model error on sensor placement for on-orbit modal identification of large space structures [J]. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, 1992, **15**(2): 334-341.
- [21] 丛茂林. 考虑随机特征的空间结构传感器优化布置

- 及损伤识别 [D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- CONG Maolin. Optimal placement of sensor and damage identification for space structure considering randomness [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [22] 李 斌. 基于 EI 及 MAC 混合算法的传感器优化布置研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- LI Bin. Optimal sensor placement of research using mixed algorithm based on effective independence and modal assurance criterion methods [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [23] 丁志凯. 基于人工神经网络的海洋平台损伤诊断技术研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- DING Zhikai. Research on damage diagnosis technology of offshore platform based on artificial neural network [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [24] 宗周红, 孙建林, 徐立群, 等. 大跨度连续刚构桥健康监测加速度传感器优化布置研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2009, **29**(2): 150-158.
- ZONG Zhouhong, SUN Jianlin, XU Liqun, *et al.* Study on optimal placement of acceleration sensors for health monitoring of a long-span continuous rigid-frame bridge [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2009, **29**(2): 150-158. (in Chinese)
- [25] 詹杰子, 余 岭. 传感器优化布置的有效独立-改进模态应变能方法 [J]. 振动与冲击, 2017, **36**(1): 82-87.
- ZHAN Jiezi, YU Ling. An effective independence-improved modal strain energy method for optimal sensor placement [J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2017, **36**(1): 82-87. (in Chinese)
- [26] 吴子燕, 代凤娟, 宋 静, 等. 损伤检测中的传感器优化布置方法研究 [J]. 西北工业大学学报, 2007, **25**(4): 503-507.
- WU Ziyang, DAI Fengjuan, SONG Jing, *et al.* A more efficient optimal sensor placement method for structure damage detection [J]. **Journal of Northwestern Polytechnical University**, 2007, **25**(4): 503-507. (in Chinese)

Sensor placement optimization of tension leg structure by considering wet modal characteristics

LIU Cheng¹, CHANG Jinyun¹, WANG Shisheng², GUO Xinglin¹, WU Wenhua^{*1}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, China;

2. CNOOC, Beijing Branch, Beijing 100027, China)

Abstract: Sensor placement optimization is one of the main issues in the structural health monitoring of offshore engineering equipment. The tension leg structure of tension leg platform (TLP) could be led to the fatigue and damage behavior under the harsh working environment loads in deep sea. It is important to perform the on-site prototype monitoring. By considering the wet modal characteristics of tension leg structure, effective independent (EI) method is used to optimize the initial locations of the sensors. Combined with the modal assurance criterion (MAC) and the minimum mean square error (MSE) criterion, a sensor placement optimization method is proposed for the large slenderness ratio underwater structures such as the typical structure of tension leg. Taking a tension leg of a TLP to be built as an example, the sensor placement optimization scheme is given by the proposed method. The method has certain application value in the optimization of sensor placement of the actual tension leg prototype monitoring system, and it also has reference value for other underwater upright structures.

Key words: tension leg structure; wet modal characteristics; effective independence method; sensor placement optimization; structural health monitoring