

# 无人生产平台管式分离系统撬装框架动力特性

吴奇霖<sup>1</sup>, 许晶禹<sup>2,3</sup>, 刘 硕<sup>2\*</sup>, 万年辉<sup>1</sup>, 张 琳<sup>1</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518000;

2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100149)

**摘 要:** 针对某边际油田无人生产平台管式分离系统的运行压力和布置方式的特殊要求, 提出一种支撑框架设计方案, 并通过有限元法开展静力分析、模态分析和瞬态动力分析, 以探究管式分离系统-支撑框架的静力和动力特性。结果表明: 该支撑框架设计方案满足静刚度和强度要求; 结构整体的特征频率不低于 6.9 Hz, 远高于管道内部段塞流动的冲击频率; 尽管存在动力放大效应, 但在段塞激励冲击下, 结构的变形和应力符合动刚度和强度要求。

**关键词:** 无人生产平台; 钢结构; 静力分析; 模态分析; 瞬态动力分析

**中图分类号:** TU311.3

**文献标志码:** A

## Dynamic Property of Skid-Mounted Frame of Unmanned Production Platform Tubular Separation System

WU Qilin<sup>1</sup>, XU Jingyu<sup>2,3</sup>, LIU Shuo<sup>2\*</sup>, WAN Nianhui<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Branch, CNOOC (China), Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China;

2. Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China;

3. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China)

**Abstract:** In view of the special requirements of the operating pressure and layout of the tubular separation system of an unmanned production platform in a marginal oilfield, a support frame design scheme is presented, and the static analysis, modal analysis and transient analysis are carried out by finite element method to explore the static and dynamic mechanical properties of the tubular separation system-supported frame. The results show that: the design scheme of the support frame meets the requirements of static stiffness and strength; the characteristic frequency of the whole structure is not lower than 6.9 Hz, which is much higher than the intrinsic frequency of the slug flow inside the pipeline; although there is a dynamic amplification effect, the deformation and stress of the structure meet the requirements of dynamic stiffness and strength under the slug flow impact.

**Key words:** unmanned platform; steel structure; static analysis; modal analysis; transient analysis

## 0 引 言

为响应《新时代的中国能源发展》白皮书“加

大低品位资源勘探开发力度”和“加强近海油气勘探开发”要求, 增强边际油田开发迫在眉睫。在海洋石油生产中, 为降低输送成本, 通常在生产平台

基金项目: 中海石油(中国)深圳分公司“管式分离技术在无人平台、智能自控平台及水下应用研究”(编号: CCL2021SZPS0332)

作者简介: 吴奇霖(1981-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为油气储运

\* 通信作者: 刘硕(1988-), 男, 副研究员, 主要研究方向为多相流及油气储运、流固耦合

进行采出液预处理, 初步分离油气水三相。在传统生产工艺中, 该工序一般采用重力式分离系统<sup>[1]</sup>。近年来, 管式分离技术逐渐拓展应用于海洋石油生产中的采出液预处理工艺中。基于浅池原理和离心分离原理, 管式分离技术可降低重力式分离装置所需的空间及重量, 从而降低成本、提高处理效率<sup>[2]</sup>。由于管道相对容器更具耐压优势, 管式分离系统更适用于带管线的在线采出液预处理工艺。

某边际油田无人平台的管式分离系统由 T 形管和偏心管组成, 根据 ASME 相关规范, 确定管道及法兰选型。为保证分离效果, T 形管下层管道需要与偏心管上层主管道保持相同的高程。在 15 MPa 设计压力条件下, T 形管和偏心管重量过大。为保证处理效果需要对偏心管进行架高处理。如何设计管式分离系统支撑框架成为一个技术难点。

框架式钢结构已在通信、石油化工等工程建设领域获得了广泛应用<sup>[3-4]</sup>。凭借其强度高、质量轻、整体刚性高等优势, 钢结构框架已成为石油化工装置领域基本的建筑结构<sup>[4]</sup>。特别是在海洋石油开发领域, 钢结构框架发挥着举足轻重的作用。除导管架主体外, 直升机甲板、防爆墙等均应采用钢结构框架<sup>[5-6]</sup>。近年来, 业界对海洋平台钢结构的研究兴趣集中于动力分析、质量控制、结构优化和模块化等方向, 并出现了不同的研究手段<sup>[5-8]</sup>。由于应用场景不同, 导管架平台上部模块的载荷特征也不同, 例如: 与常规生活楼不同, 直升机甲板需要考虑轮印载荷对甲板的局部压力; 防爆钢结构框架则需考虑结构在冲击载荷下的瞬时响应<sup>[5,9]</sup>。管式分离系统支撑框架也有其独有的特征。事实上, 管道内的多相流动具有动力特征。当管道内的气液两相流动为段塞流时, 流体将对管式分离系统产生较为严重的周期性冲击, 如何保证管式分离系统在该冲击下平稳运行是支撑框架设计需要满足的一个主要要求。同时, 由于本研究中管式分离系统设计内压较高、重量较大, 且系统需要架高处理, 目前鲜有该特征框架的应用先例。为此, 提出一种适用于该条件下的支撑框架设计方案, 并采用有限元法对其静力和动力特性进行分析校核。

## 1 支撑框架参数

采用型材搭建的框架式结构支撑 T 形管和偏

心管, 如图 1 所示。T 形管支撑框架为双层框架结构, 偏心管支撑框架为单层框架结构。框架底部倒置槽钢与甲板肋骨焊接; 槽钢支撑工字梁作为侧梁, 中层水平支撑同样为工字梁; 顶层支撑采用槽钢。同时为保证截面外框架刚度, 采用多条槽钢焊接形成拉筋, 连接不同框架。另外, 在 T 形管支撑底层的每个框架设置 4 个肘板加强局部节点强度。型材具体规格如表 1 所示。

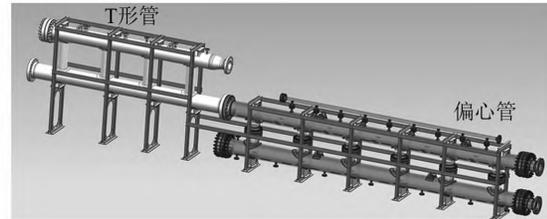


图 1 管式分离系统及支撑框架示例

表 1 支撑框架选型表

序号	位置	型材	长×宽×高/(mm×mm×mm)
1	底层水平梁	槽钢	200×75×9
2	中层水平梁	工字梁	200×102×9
3	顶层水平梁	工字梁	200×102×9
4	竖梁	工字梁	200×102×9
5	水平拉筋	槽钢	200×75×9

## 2 数学模型及求解设置

### 2.1 数学方程

管式分离系统-支撑框架静力及动力分析的实质为求解式 (1)<sup>[5]</sup>:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) \quad (1)$$

式中:  $M$  为质量矩阵;  $C$  为阻尼矩阵;  $K$  为刚度矩阵;  $X$  为位移;  $F(t)$  为外部输入激励。当加速度和速度均为零时, 方程退化为静力平衡方程。由于管式分离系统和支撑框架含有无限个质点, 难以进行具体量化计算, 因此通过有限元法将结构离散为有限节点进行分析。将节点向量组装形成刚度矩阵, 进行静力求解。如果外部激励为零, 也可求解奇异方程, 获得结构本身固有频率和特征变形, 即为模态分析。当输入外部激励后, 在时域内对方程进行离散求解, 即可获得该激励下的结构响应特性, 即为瞬态动力分析。上述方程求解手段为考察管式分离系统-支撑框架静力承载和动力特性的结构动力方程求解方法。

### 2.2 有限元模型

根据支撑框架设计方案建立结构有限元模型，模型包含 T 形管、偏心管和支撑框架等 3 部分。在有限元分析软件 ANSYS multi-physics 中，采用 Beam 188 单元模拟型材和分离装置管道，采用 Shell 63 单元模拟加强肘板，采用 Mass 21 单元模拟法兰集中质量。根据表 1 型材确定支撑框架各 Beam 单元截面形式及尺寸。模型包含 1 794 个单元、3 266 个节点。对底部支撑梁采取固支约束；T 形管、偏心管与框架连接的位置通过节点耦合所有自由度；对结构整体施加重力。整体模型如图 2 所示，图 2 中 A、B、C 为危险点。

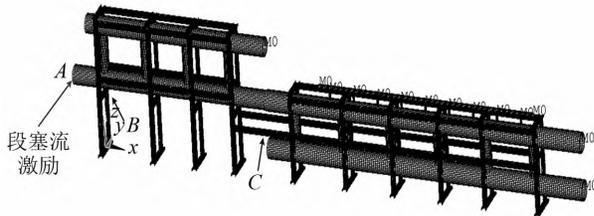


图 2 管式分离系统-支撑框架有限元模型

### 2.3 求解设置

在静力分析中直接加载求解。通过 Block Lanczos 法对整体结构开展模态分析，获得结构特征频率及特征频率下的特征变形。瞬态动力分析则在 T 形管入口施加垂直于管道平面方向的激励模拟段塞流动。激励时程曲线如图 3 所示。图 3 中： $t$  为时刻； $T$  为激励周期； $t/T$  为无量纲化时间； $F_y$  为  $y$  向加载数值。在特定条件下，管道中的气液两相流动会形成周期性气液间隔，对外部管路产生周期性冲击。一般该冲击的周期在 10 s 量级<sup>[9-10]</sup>。根据某平台配产方案，确定危险状况下的段塞流冲击载荷为 150 kN，其计算式为

$$F_y = \frac{\pi}{4} \rho_l u^2 D^2 \quad (2)$$

式中： $F_y$  为冲击载荷； $\rho_l$  为液相密度； $u$  为液相流速； $D$  为管道直径。据此通过完全法对管式分离系统-支撑框架系统开展瞬态动力分析，获取危险点 A 和危险点 C 的位移变化曲线，获取危险点 B 的应力变化曲线。为考察不同特征周期激励载荷对管式分离系统-支撑框架系统的影响，设置 1 s、4 s 和 12 s 等 3 个周期的激励作为输入激励，每个激励持续 3 个周期。

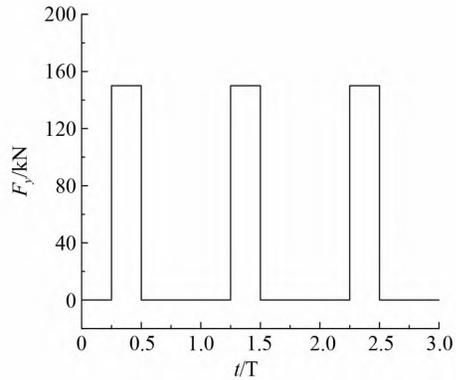


图 3 输入段塞流动激励

## 3 结果与讨论

### 3.1 结构静力承载特性

图 4 为静力分析的整体折算应力分布云图。由图 4 可知：结构整体应力较小，平均应力小于 3.2 MPa；支撑框架的高应力区主要位于下层侧梁，应力不超过 10 MPa，这是由于工字侧梁横截面积远小于上部 T 形管-框架系统，整体重力通过侧梁传递至底部甲板，因此出现一定程度的高应力区；另一部分高应力区位于偏心管靠近出口立管，这是由于底部框架在该部位有支撑点，且该部位靠近出口支撑法兰。在本模型中，出口法兰为自由端，而实际作业中的出口法兰与下游刚性管道连接，可提供额外支撑。因此，本模型的情况与实际生产情况相比更保守。尽管如此，整体应力峰值不超过 29 MPa，远小于钢材屈服强度，结构安全。

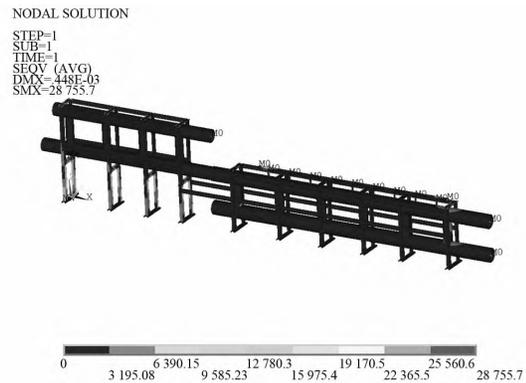


图 4 静力分析-折算应力分布云图

图 5 为静力分析中的变形分布云图。由图 5 可知：在自重作用下，结构的最大变形小于 0.5 mm，最大变形点为偏心管溢流口出口法兰；T 形管及附属框架整体变形较大，主要由于其高程较高，重力

作用下的型材产生轴向压缩, 但整体变形仍远小于结构主体尺度, 表明结构安全。

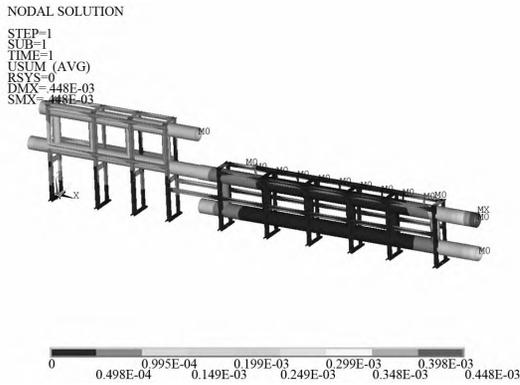


图 5 静力分析-变形分布云图

### 3.2 模态分析

表 2 为管式分离系统-支撑框架 1~10 阶特征频率, 整体为 6.9~27.0 Hz, 对应的特征周期远小于段塞流动秒量级的周期和海面波浪特征周期 (10 s 量级), 因此不会在相关载荷作用下引发共振。图 6 为不同特征频率下的结构变形。为便于分析变形趋势, 以线代表梁和管。在基频作用下, 管式分离系统-支撑框架结构变形主要以侧向往复振动为主, 表明在槽钢拉筋作用下结构整体较好 [见图 6 (a)] 且最大特征变形为 0.3 m, 远小于结构

20 m 几何尺度。随着能量增加, 特征频率提高, 进入二阶模态, T 形管及支撑框架的特征变形转化为竖向扭转变形 [见图 6 (b)], 而偏心管及支撑框架保持侧向振动不变。进一步提升频率, 达三阶特征频率, 偏心管及支撑框架形成反向竖向扭转变形 [见图 6 (c)], 说明该变形形式较平动变形需要更高的能量。然而二阶和三阶模态的最大特征变形幅值变化不大, 为 0.4 m 左右。随着能量进一步提高, 进入四阶模态, 结构变形主要在于偏心管的集油管盲板端 [见图 6 (d)], 这是由于在振动频率较高的情况下, 相对自由端吸收大部分动能出现较大幅度变形, 因此其他部分变形尺度较小。此时特征频率已达 18.6 Hz, 远大于正常管道内流动及海面波浪载荷, 较难出现共振情况。上述分析表明, 管式分离系统-支撑框架整体的动力学特性满足要求, 不会在内部流体作用下产生较大振动。

表 2 管式分离系统-支撑框架特征频率

模态/阶	特征频率/Hz	模态/阶	特征频率/Hz
1	6.918	6	21.880
2	8.407	7	22.689
3	12.404	8	26.076
4	18.635	9	26.237
5	20.529	10	26.999

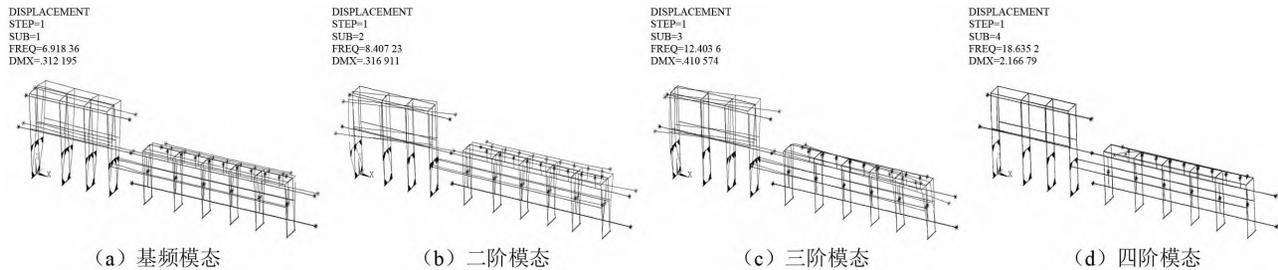


图 6 前四阶模态的支撑框架变形

### 3.3 瞬态动力分析

在上述分析的基础上对管式分离系统-支撑框架开展瞬态动力分析。图 7 为 A 点在 3 个方向的变形时程曲线。为便于分析, 横坐标的时间  $t$  通过周期  $T$  进行无量纲化。在  $y$  方向: 段塞流的激励对结构造成冲击, 结构在冲击作用下出现往复运动, 峰值达 4 mm, 运动幅值在阻尼作用下逐渐衰减, 随着段塞激励峰值突然归零, 结构同样出现往复运动, 运动幅值受阻尼作用逐渐衰减, 这种运动形式呈周期性变化; 随着周期逐渐减小,  $y$  向振动幅值

逐渐增大, 动力放大效应逐渐明显<sup>[11]</sup>, 这是由于外部激励的频率为 0.08~1.00 Hz, 远小于管式分离系统-支撑框架的基频, 随着外部激励频率提高, 激励频率越来越接近基频, 因此动力放大效应更明显, 振动峰值从 2.5 mm 逐渐增加至 4.0 mm, 同时, 随着激励周期减小, 往复振动幅度和时间都增加, 以致当激励周期为 1 s 时, 2 个激励引发的运动已开始出现叠加。类似现象在  $z$  向振动响应曲线上也同样存在。随着周期逐渐减小,  $z$  向运动幅值逐渐增大, 动力放大效应逐渐明显, 且相邻段塞冲

击造成的  $z$  向运动逐渐叠加。在  $x$  方向，由于静载下没有外力作用，因此振动的平衡点位移为零，第一波段塞冲击造成的振动幅值较大，后逐渐衰减至零，后续段塞冲击造成的幅值远小于第 1 个段塞冲击的振动幅值，这是由于管式分离系统-支撑框架在  $x$  方向（长度）刚度最大，同时由于  $x$  方向没有直接激励输入，因此呈现小幅值振动，且快速衰减。

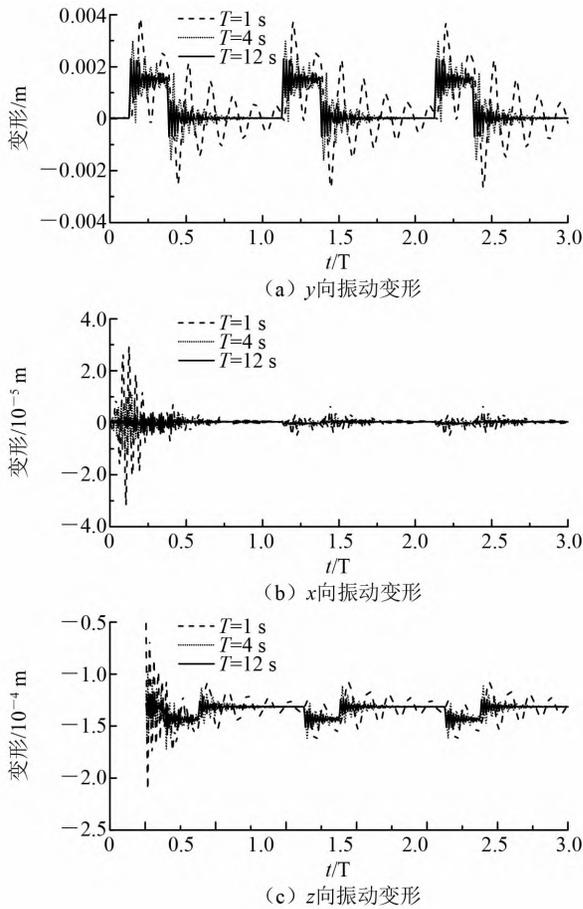


图 7 A 点 3 个方向变形时程曲线

图 8 为 T 形管-偏心管支撑框架连接杆的危险点 (C 点)  $y$  向变形时程。

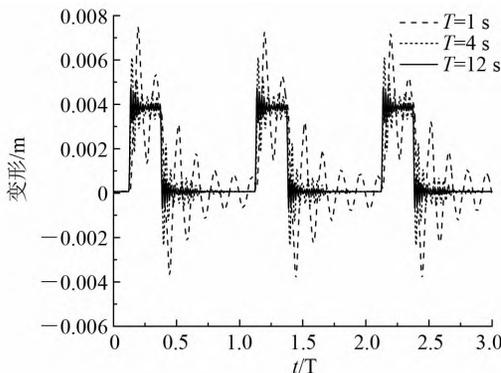


图 8 C 点  $y$  向变形时程曲线

由图 8 可观察到类似的现象，即激励周期越小，动力放大效应越明显，时程曲线幅值由 12 s 周期的 5 mm 增加至 1 s 周期的 8 mm。但总体来说，结构的振动幅值在毫米量级，远小于结构米量级的主尺度。

在结构名义应力响应方面，图 9 为高应力区 B 点在不同激励周期下的折算应力响应曲线。整体来说，不同周期激励产生的应力时程曲线与段塞激励形状相似，但曲线存在小幅高频振动。随着激励周期减小，小幅振动幅度增大，动力放大效应增强，但相同激励下的动力放大效果弱于位移。应力曲线峰值小于 175 MPa，远小于钢材 235 MPa 的屈服强度，表明结构在设计工况下的应力强度符合设计要求。

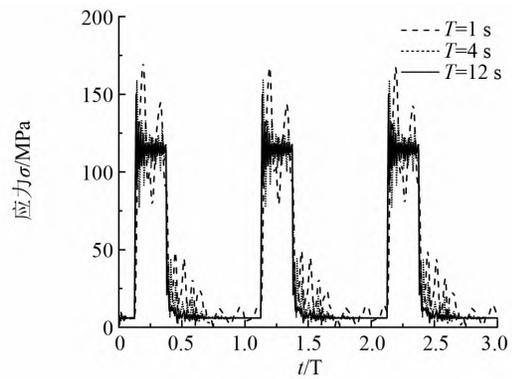


图 9 B 点折算应力响应曲线

#### 4 结论

针对某边际油田生产平台管式分离系统，提出一种支撑框架设计方案，采用有限元法开展静力分析、模态分析和瞬态动力分析，对支撑框架的静力和动力特性进行校核，结论如下：

(1) 在静力承载特性方面，由角钢、工字梁构成的双层框架结构可承载管式分离系统，变形和应力符合刚度和强度要求。

(2) 该支撑框架设计方案的特征频率大于 6.9 Hz，远高于常规气液两相段塞流的特征频率，主体结构不会因为管道内流体作用产生共振。

(3) 瞬态动力分析表明，在一般周期性段塞流冲击激励作用下，结构变形和应力呈现动力放大效应，随着冲击周期减小，放大效应逐渐明显。但在段塞流动特征频率下，结构的变形和应力曲线符合刚度和强度要求。

## 参考文献

- [1] 吴应湘, 许晶禹. 油水分离技术[J]. 力学进展, 2015, 45:179-216.
- [2] LIU S, ZHANG D, YANG L L, et al. Breakup and coalescence regularity of non-dilute oil drops in a vane type swirling flow field[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 129:35-54.
- [3] 周兆明, 夏懿琳, 王磊, 等. 通信塔钢结构动力特性的数值计算与现场测试[J]. 测试技术学报, 2020, 34(1):61-67.
- [4] 王坤, 金亮. 关于石油化工装置钢结构框架安装技术分析[J]. 建材与装饰, 2018(47):185-186.
- [5] 马振森, 朱伯华, 张金宝, 等. 直升机甲板结构优化设计[J]. 船舶与海洋工程, 2017, 33(5):34-38, 47.
- [6] 高伟. 海洋平台钢结构防爆墙设计[J]. 天津科技, 2018, 45(12):53-55.
- [7] 陈邦敏, 李军, 李振鹏, 等. 部分熔透焊与填角焊区域过焊孔开设方式[J]. 中国海洋平台, 2020, 35(5):94-97.
- [8] 赵槐叶. 模块式钢结构框架在海洋运输中的受力分析[J]. 工程建设与设计, 2019(3):130-132.
- [9] 王锐. 海洋平台防爆墙结构冲击动力响应特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [10] 王权. 适用于大倾角上倾气液混输管道段塞流模型研究[D]. 北京: 中国石油大学(华东), 2018.
- [11] 吴晓, 王兆婷, 史瑶. 水平管气液段塞流流动特征模拟[J]. 石油化工高等学校学报, 2020, 33(3):80-85.

(上接第 87 页)

口方案进行数值模拟, 并对比不同高度处的流场速度, 发现将进风口与排风口分别布置在病房靠近床头的两侧时, 通风效果对伤病员最佳, 因此将其作为最终的通风口布置方案, 为后续通风的进一步优化设计奠定基础。

对平台在南海十年一遇海况下的  $90^\circ$  横摇、 $90^\circ$  垂荡、 $0^\circ$  纵摇的运动响应和  $90^\circ$  垂荡的加速度响应进行预报, 发现该医疗平台的运动响应满足设计要求, 说明平台具有良好的水动力性能, 同时平台上的医护人员及伤病员等有较好的舒适性。

## 参考文献

- [1] 蔡金辉. 中美医院船现状与思考[J]. 医疗卫生装备, 2017, 38(4):127-130.
- [2] 张慎, 程明, 辜文飞, 等. CFD 技术在雷神山医院负压病房通风系统设计中的应用实践[J]. 华中建筑, 2020, 38(4):78-81.
- [3] 刘扩军. CFD 商业软件介绍及病房通风应用一例[J]. 供热制冷, 2006(3):33-36.
- [4] 骆红, 廖国进. 病房通风 CFD 模拟及其方案优化[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2010, 28(2):243-246.
- [5] MAZUMDAR S, YIN Y G, GUILTY A, et al. Impact of moving objects on contaminant concentration distributions in an inpatient ward with displacement ventilation[J]. HVAC & R Research, 2010, 16(5):545-563.
- [6] 罗红星. 半潜式平台的水动力及系泊系统性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [7] 张剑锋, 陈海泉, 孙玉清, 等. 基于 AQWA 的半潜式平台动力特性分析[J]. 船舶工程, 2016(S2):174-176, 240.
- [8] LIN Y H, YANG C H. Hydrodynamic simulation of the semi-submersible wind float by investigating mooring systems in irregular waves [J]. Applied Sciences, 2020, 10(12):4267.
- [9] 严琦, 郭建廷, 杨弘炜, 等. 半潜式海洋平台水动力性能分析[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(9):157-159.
- [10] 陈博, 喻志勇, 吕勇, 等. 基于系统仿真的常见构型半潜式钻井平台频域分析[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(3):1154-1161.
- [11] 陈鹏, 马骏, 黄进浩, 等. 基于 AQWA 的半潜式平台水动力分析及系泊性能计算分析[J]. 船海工程, 2013, 42(3):44-47.
- [12] 田雪, 赵建亭, 刘海霞. 超深水半潜式钻井平台双井口作业系统总体设计[J]. 中国海洋平台, 2021, 36(4):77-81.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 综合医院建筑设计规范: GB 51039—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [14] 张再鹏, 陈焰华, 雷建平, 等. 某方舱医院的通风空调系统设计[J]. 暖通空调, 2020, 50(11):62-65, 87.
- [15] 白云山. 半潜式平台水动力性能分析与优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [16] 耿宝磊. 波浪对深海海洋平台作用的时域模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [17] 陈子煜, 刘德辅, 王风清. 中国南海极端海况概率预测及海洋工程防灾标准研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(1):115-120.