



基于微振动监测的AFT厂房结构浆液耦合振动特性

宋波 李邦 肖楠 劳俊

Fluid-structure interaction vibration characteristics of the AFT workshop structure based on micro-vibration monitoring

SONG Bo, LI Bang, XIAO Nan, LAO Jun

引用本文:

宋波, 李邦, 肖楠, 劳俊. 基于微振动监测的AFT厂房结构 - 浆液耦合振动特性[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(7): 1255-1264. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.10.04.002

SONG Bo, LI Bang, XIAO Nan, LAO Jun. Fluid - structure interaction vibration characteristics of the AFT workshop structure based on micro-vibration monitoring[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(7): 1255-1264. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.10.04.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.10.04.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

SI-FLAT板形仪检测原理的流固耦合振动分析

Analysis of fluid-structure interaction vibration based on the detection principle of SI-FLAT flatness measurement systems
工程科学学报. 2017, 39(4): 593 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.04.015>

冲刷深度对海上风电塔地震动力响应的影响分析

Analysis of the influence of scour depth on the dynamic response of offshore wind turbine towers under earthquake action
工程科学学报. 2019, 41(10): 1351 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.01.20.001>

振动触觉编码的研究现状

Current situation of vibration tactile coding
工程科学学报. 2021, 43(9): 1261 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.01.12.007>

热轧过程中摩擦系数非对称性对轧机振动及稳定性的影响

Influence of friction coefficient asymmetry on vibration and stability of rolling mills during hot rolling
工程科学学报. 2019, 41(11): 1465 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.03.06.002>

口环密封对多级离心泵湿转子横-轴双向耦合动特性的影响

Effect of annular seal on the lateral-axial bi-direction coupled dynamic characteristics of a multi-stage pump wet rotor
工程科学学报. 2018, 40(12): 1540 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.12.013>

基于ANSYS的新型聚合物石英压电传感器振动性能分析

Influence of polymer coating dimension variation on the resonant frequency of polymer quartz piezoelectric crystal sensors based on ANSYS
工程科学学报. 2017, 39(2): 301 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.02.019>

基于微振动监测的 AFT 厂房结构–浆液耦合振动特性

宋 波^{1,2)}, 李 邦^{1,2)}✉, 肖 楠^{1,2)}, 劳 俊³⁾

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 强震区轨道交通工程抗震研究北京市国际科技合作基地, 北京 100083 3) 北京国电龙源环保工程有限公司, 北京 100039

✉通信作者, E-mail: y19801202162@163.com

摘 要 AFT 氧化风机房是脱硫工艺中的一种钢筋混凝土结构支撑钢罐的复合结构, 结构产生的明显振动不利于正常生产运营, 因此针对 AFT 结构进行现场监测和模拟计算。首先对 AFT 结构进行现场调查, 基于一种 AFT 结构视频监控与局部监测相结合的方法对其进行监测, 随后又提出简化搅拌机及氧化风作用的模拟方法, 通过数值模拟对 AFT 结构振动特性进行研究。结果表明: 对 AFT 结构进行视频监控可快速明确结构运动轨迹; 局部监测结果表明搅拌机作用是结构振动的主要因素, 氧化风的鼓入加剧了结构振动响应, 因此造成了结构各柱间填充墙不同程度的损伤; 将数值模拟结果与监测结果对比, 验证了简化搅拌机及氧化风作用的计算方法, 可为分析此类结构振动响应、损伤机制以及加固设计提供参考。

关键词 AFT 结构; 微振动监测; 运动轨迹; 振动特性; 流固耦合

分类号 TG142.71

Fluid–structure interaction vibration characteristics of the AFT workshop structure based on micro-vibration monitoring

SONG Bo^{1,2)}, LI Bang^{1,2)}✉, XIAO Nan^{1,2)}, LAO Jun³⁾

1) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) International Cooperation Base for Science and Technology-Aseismic Research of the Rail Transit Engineering in the Strong Motion Area, Beijing 100083, China

3) Beijing Guodian Longyuan Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Beijing 100039, China

✉ Corresponding author, E-mail: y19801202162@163.com

ABSTRACT An AFT oxidation fan room is a kind of composite structure of reinforced concrete structure supporting the steel tank in the desulfurization process. It is a common structural form of a power plant. The obvious vibration generated by the structure is not conducive to the normal production and operation of the power plant and may even cause accidents. Therefore, on-site monitoring and a simulation calculation are carried out for the AFT structure to study the causes of vibration of the AFT structure and clarify its vibration mechanism. First, a field investigation of the AFT structure is carried out combining video monitoring and local structure vibration monitoring. Based on the simulation method of the fluid-solid interaction, a simulation method to simplify the action of the mixer and the oxidation wind in the steel tank is then proposed, and the vibration characteristics of the AFT structure are further studied through the proposed numerical simulation method. Finally, numerical simulation results are compared with the monitoring results, and causes of vibration differences in various parts of the structure are studied. Results show that video monitoring can quickly identify the structure movement track. Local monitoring results show that the mixer is the main factor of the structural vibration, and the aeration of the oxidation wind intensifies the structural vibration response, causing different degrees of damage to the infill wall between the columns of

收稿日期: 2020–10–04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078038); 科技部国家级外专项目(G2021105009L); “一带一路”沿线国家土木工程防灾国际协作中心与支持平台搭建研究(2022KFYB012)

the structure. The dynamic response law of different positions of each column and the upper steel tank of the structure is found to be more different. A comparison of numerical simulation results with monitoring results verified the calculation method of simplifying the mixer and the oxidation wind effect, providing a reference for the analysis of the vibration response, damage mechanism, and reinforcement design of such structures.

KEY WORDS AFT structure; micro vibration monitoring; motion track; vibration characteristics; fluid structure interaction

近年来发电厂不断发展, 高效的脱硫技术对工业建筑结构的要求也不断提高. 单塔双循环^[1]的脱硫工艺中, 除脱硫吸收塔结构外, 还有吸收塔外浆液池结构, 又称 AFT(Absorber feed tank)氧化风机厂房结构(以下统称为 AFT 结构)与之匹配, 此种结构将浆液罐置于钢筋混凝土结构之上, 罐内浆液既要保持悬浮状态, 以防止产生较多沉淀, 又要鼓入氧化空气, 以提高浆液反应效率, 在结构“头重脚轻”的基础上, 浆液罐内部设置有搅拌机与氧化风持续作用^[2]. 由此 AFT 结构振动因素更加复杂, AFT 结构-液-气三场耦合作用下, AFT 结构振动问题凸显.

此类结构的研究内容之一是流体、空气等多种振源作用下结构的振动特性, 目前针对 AFT 结构的相关研究中, 陈佳^[3]以一个直径和高度均为 13 m 的大型侧进式搅拌釜为研究对象, 对其内部均相宏观流场进行数值计算, 计算得到的搅拌功率曲线和流体速度分布与实验数据吻合较好. 徐国徽和顾学康^[4]研究大型液舱围护结构弹性对液舱内晃荡冲击压力的影响, 采用基于显式时间积分方法的有限元程序模拟流体和结构的运动和变形及其相互作用. Xu 等^[5]分析了引起小顺江泵站振动异常的原因, 结合频谱进行诊断分析和结构模态分析, 获得振动的傅里叶变换信号离散时间、振动源频率分布特性及结构响应. 虽然仅有相似结构的其他专业领域研究^[6-12], 但为本文提供了结构及浆液加载条件的计算思路.

目前的结构现场监测和数值模拟研究较多^[13-18], 与本文使用的监测手段及模拟分析方法类似, 董霄峰等^[19]以现场整体风机结构在停(开)机、台风等工况下的振动响应数据, 分析结构的振动响应时频域特性与变化规律. 王延林等^[20]根据海洋平台冰激振动的特点, 设计现场监测系统, 检验阻尼隔振系统的减振效果, 对平台隔振的上下两层甲板的加速度和相对位移响应进行监测, 并对实测数据进行对比分析. Rohan 等^[21]对大跨度桥梁的结构使用变传感器和加速度计进行损伤检测, 结合了每种类型传感器的优势. 朱斌等^[22]利

用现场监测数据建立 ANSYS/LS-DYNA 三维有限元数值计算模型, 分析计算了不同运行压力条件下埋地燃气管道的动力响应特性. Qarib 等^[23]以变电站的诸多结构振动报告为基础, 进行模态分析和 ANSYS 3D 双向流固耦合(FSI)模型对涡激振动效应进行了数值分析预测和研究并找到预测和预防振动的方法. 吴嵌嵌等^[24]将系统突增负荷过渡过程纳入机组-厂房结构振动研究体系, 并对水电站机组结构振动特性进行分析. 由于 AFT 结构受力复杂, 搅拌混合容器内, 搅拌桨叶轮附近的流体以射流的形式朝着相对的壁面推进, 当到达壁面, 流体流动方向将发生改变: (1)在水平方向上, 流体对称地分成两个支流, 转向沿着壁面流回到搅拌桨附近; (2)在垂直方向上, 大部分流体沿着壁面从釜底部向液面流动, 到达液面后再被卷吸回到搅拌机附近. 从而流体在水平方向上在射流两边形成两个大的回转流动, 而在垂直方向上产生一个大的循环流动. 另外陈功国等^[25]的模拟或实验结果都有类似结论. 与 AFT 厂房类似的结构研究主要集中在厂房模态分析、振动检测和对单一储液罐的流固耦合分析, 对 AFT 厂房结构进行流固耦合的振动研究分析较少. 本文以某电厂 AFT 结构为研究对象, 在结构现场微振动监测的基础上, 建立 AFT 结构-浆液模型, 并利用提出的简化搅拌机及氧化风作用的数值模拟方法, 进行流固耦合分析, 旨在研究 AFT 结构产生振动的原因, 明确结构振动机制, 为此类结构设计提供参考依据.

1 工程背景

实测工程选取某发电厂 AFT 结构, 此 AFT 结构截至 2021 年底已服役 4 a, AFT 结构下部钢筋混凝土柱高 13 m, 上部浆液钢罐内常持液高为 18 m, 最高可达 20 m, 罐直径 11 m, 如图 1 所示. 同时钢罐上布置有 2 层共 6 个搅拌机作用于内部浆液, 以及 3 个氧化风管道鼓入浆液, 如图 2 所示结构与设备设置图. 结构长期处于高温碱性环境, 与结构相连的各种管道布置复杂, 以及超重钢罐置于楼上的结构布置等因素均不利于结构稳定.



图 1 AFT 结构现场图
Fig.1 AFT structure site drawing

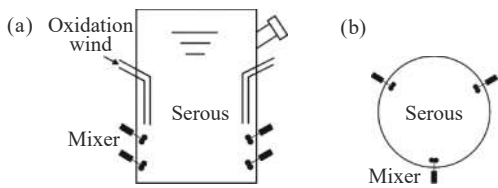


图 2 结构与设备的设置. (a)搅拌机与氧化风立面布置; (b)搅拌机平面布置
Fig.2 Structure and equipment set: (a) vertical layout of the mixer and the oxidation wind; (b) plane layout of the mixer

结构柱在长期的振动作用下,底部结构中柱与填充墙之间出现明显裂缝,如图 3 所示结构底部裂缝,结构中梁柱节点外观未出现明显裂缝,但整体结构振动明显,其位移不容忽视.

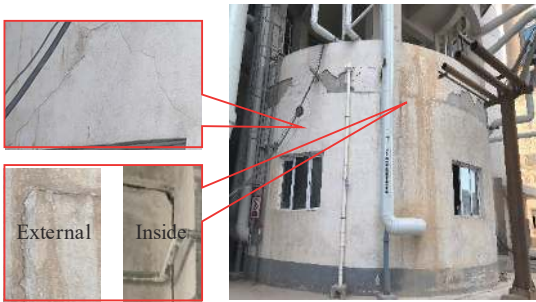


图 3 结构底部裂缝
Fig.3 Cracks at the bottom of the structure

2 AFT 结构微振动监测与振动响应分析

结构微振动监测采用运动轨迹监测及局部监测相结合的方法,因此所使用到的设备主要有: (1)摄像机; (2)941B 拾振器; (3)动态信号测试分析软件; (4)D1000 动态系统数据接收采集仪.

2.1 运动轨迹监测与分析

对 AFT 结构整体的运动轨迹记录时, AFT 上部钢罐结构周围布置着螺旋式钢架梯, 此钢架梯平台入口的结构标高为 18 m, 图 4 为结构背立面示意图及视频监测部位的相对位置. 由于 AFT 结

构与外部保护塔架无固接, 在平台入口处存在结构与塔架之间的缝隙, 且光线明亮, 即在此处设置视频监测测点, 记录 28 s AFT 结构的运动轨迹视频画面.

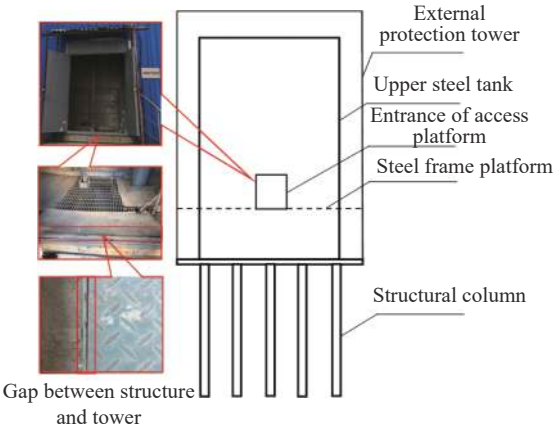


图 4 结构背立面示意及视频监测位置
Fig.4 Schematic diagram of the structure's back elevation and the video monitoring position

把 AFT 结构运动视频画面首帧进行分块并设置 x - y 坐标系, 如图 5 所示, 下侧框区域在实际结构中不发生位移变化, 该区域在视频中的位移可视为视频抖动区, 对分析 AFT 结构运动有扰, 因此需要进行过滤处理, 上侧框的区域则是实际的运动区域. 选取图中标记的静点 S、动点 M 为研究对象, 分别定位两个标记点的运动轨迹, 并逐帧分析其像素位置, 点的像素位置变化形成一系列的点, 即 S 点、M 点连成的轨迹.

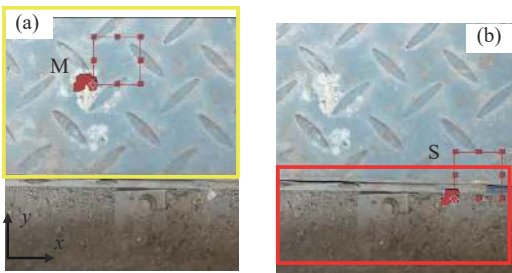


图 5 S 点(a)和 M 点(b)运动轨迹
Fig.5 Motion track of S (a) and M points (b)

对 S 点、M 点的运动轨迹, 每隔 4 s 取一帧图像提取点, 如图 6 所示. 可以看出, M 点的轨迹前 20 s 呈现为 x 轴负向位移, 这主要是受 S 点轨迹影响. 还需对视频抖动进行过滤处理, 这样得到的轨迹近似可说明 AFT 结构运动的规律. 将红色圆的运动追踪 M 点, 将黑色圆的运动追踪 S 点, 这样设置后, M 点与红色圆同步运动, S 点与黑色圆同步运动, 最后将黑色圆稳定, 即设置为不动点, 那么再次追踪红色圆的运动轨迹即为结构的实际运动轨迹.

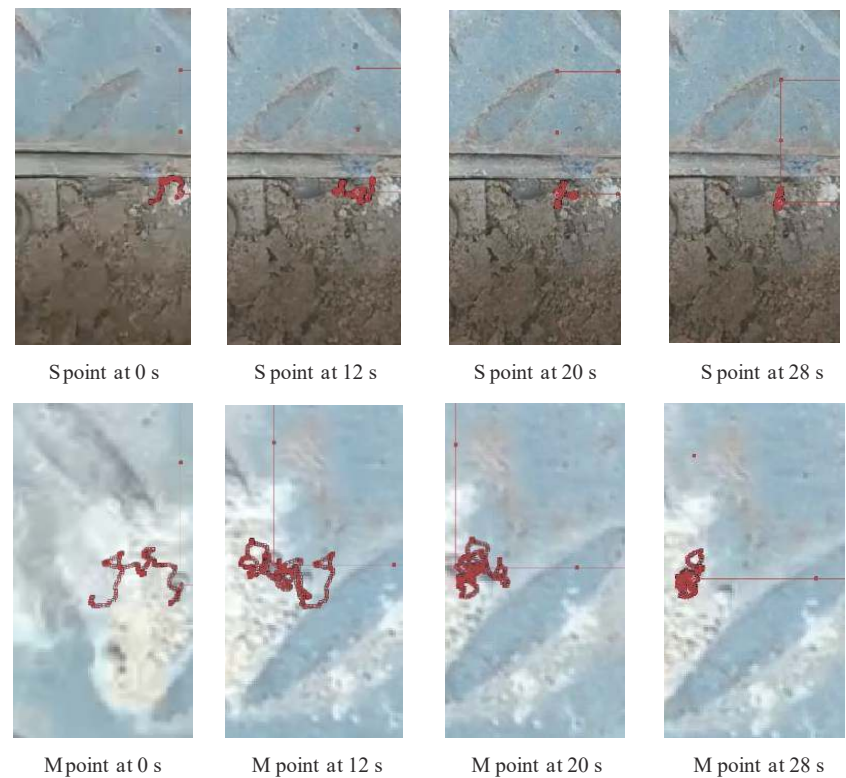


图 6 S、M 点各个时刻的位移轨迹
Fig.6 Displacement tracks of S and M points at each time

现假定 0 s 时, 红色圆与黑色圆重合, 绘制各个时刻的相对位置. 如图 7 所示, 运动在前 12 s 内, 相对位移较小且运动频率较大, 有复位现象存在, 后 8 s 的运动轨迹保持在 x 轴及 y 轴的负向运动, 相对位移较大并难以复位, 发现此现象的原因正是上部结构所受的不平衡扰力, 这种扰力又以搅拌作用主导、氧化风鼓入加剧, 导致 AFT 结构振动的规律难寻.

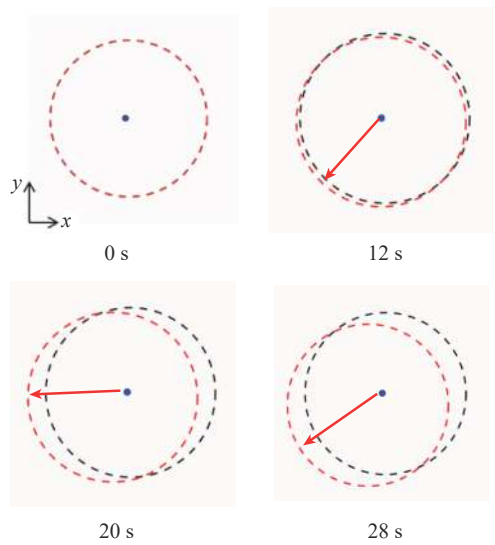


图 7 AFT 结构运动轨迹示意图
Fig.7 Schematic diagram of the AFT structure movement track

2.2 AFT 结构振动监测及振动响应分析

对 AFT 结构局部测点加速度及位移时, 监测点共 9 个, 布置如下: AFT 结构底部沿中柱中心对称共布置 5 个, AFT 上部钢筒沿竖向布置 4 个, 竖向 1、2、3、4 测点分别对应钢罐底部、上层搅拌机处、浆液液面处、钢罐顶部, 如图 8 所示.

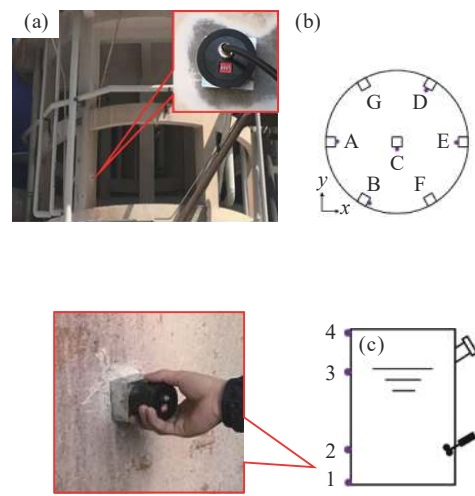


图 8 加速度及位移测点布置图. (a)底部 B 柱测点布置; (b)底部柱测点; (c)上部测点布置
Fig.8 Layout of acceleration and displacement measuring points: (a) layout of the measuring points of the B-pillar at the bottom; (b) bottom column measuring point; (c) arrangement of upper measuring points

结构现场监测需明确两个问题,其一是在搅拌机开机及氧化风鼓入时 AFT 结构的振动响应呈现何种分布,其二是搅拌机开机及有无氧化风鼓入时结构的位移增幅情况,设置以下两种监测工况:①搅拌机开机及氧化风鼓入时对 AFT 结构柱与钢罐进行振动位移和加速度监测;②仅搅拌机开机,即无氧化风鼓入时对 AFT 结构柱进行振动

位移监测。

监测工况①时,沿竖向高度方向 1、2、3、4 测点的加速度及位移时程曲线如图 9 所示,测点加速度及位移最大值分布如图 10 所示,钢罐底部加速度最大为 $0.9782 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,各点的加速度沿钢罐高度增加而先减后增,浆液液面对应的结构高度处为加速度最小值。

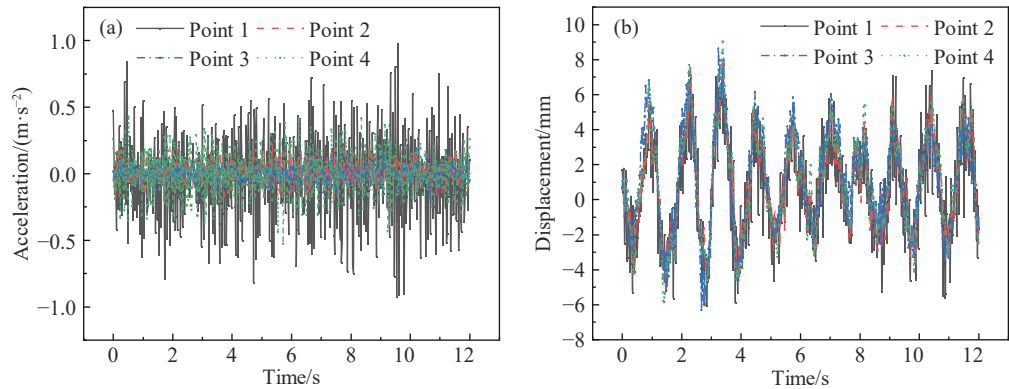


图 9 钢罐测点加速度时程(a)及位移时程曲线(b)

Fig.9 Time history curves of acceleration (a) and displacement (b)

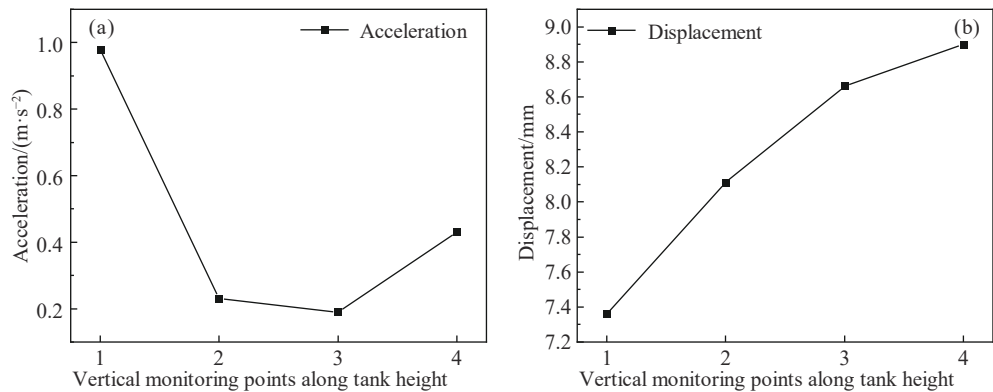


图 10 钢罐测点加速度(a)及位移峰值分布(b)

Fig.10 Peak distribution of the acceleration (a) and displacement (b) at measuring points of the steel tank

从图 10(b)中可以看出 1、2、3、4 各点的位移幅值总体上沿高度增大,位移值轻微增长,罐顶位移值为 9.022 mm 。监测工况①时,A、B、C、D、E 柱的加速度时程曲线分析,其频谱如图 11 所示,其峰值对应的频率主要集中在 11.56 Hz ,E 柱振幅为 $0.031 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,除 A 柱外,在 $15 \sim 20 \text{ Hz}$ 频段之间各柱的加速度频谱都存在多个峰值,其他频段振幅较小。

将监测工况①、②的监测结果对比,当搅拌机开机时,有无氧化风鼓入的 A、B、C、D、E 柱的位移峰值如图 12(a)所示,振动响应增减明显,各柱之间的幅值增减不同。另外从图 12(b)所示的结构 B 柱的位移曲线对比可以明显看出,当 AFT 结

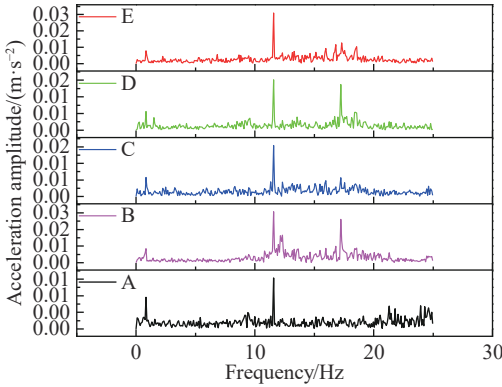


图 11 结构柱加速度频谱分析

Fig.11 Spectrum analysis of the structural column acceleration

构中的氧化风不再鼓入时,即浆液只在搅拌机作用下,B 柱监测到的位移峰值减小 55.34% 。为此可

判断结构在运转期间各部位受力分布不均, 同时也可判断结构自下而上的振动响应越来越大的一

种原因是搅拌机、氧化风等振源位于上部结构所导致。

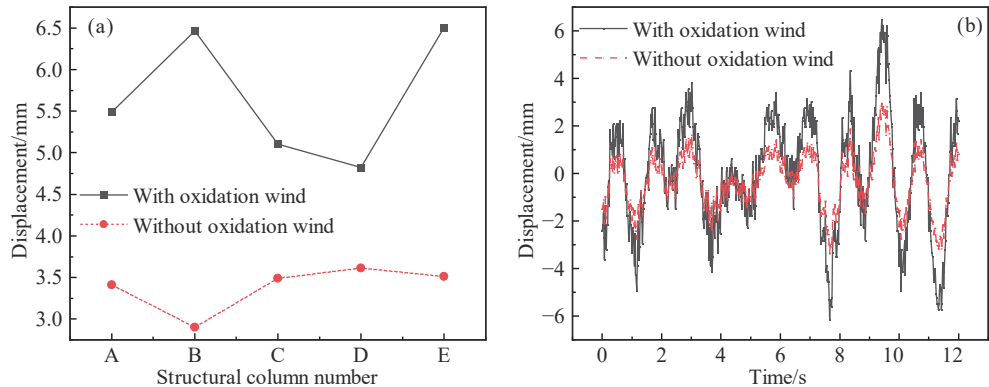


图 12 有无氧化风作用下结构位移对比。(a)结构各柱位移峰值对比;(b)结构 B 柱位移曲线对比

Fig.12 Comparison of the structural displacement with and without oxidation wind: (a) comparison of the peak displacement of each column; (b) comparison of displacement curves of the structural B column

如图 13 所示的频谱对比中可以看出, 结构位移在 0 ~ 3 Hz 时幅值最大并且集中, 其他频段的幅值较小。有无氧化风鼓入时, B 柱的位移频谱幅值减小了 52.30%, 综上所述, 结构在有氧化风鼓入时, 其振动响应明显强于无氧化风鼓入的情况。即由此可知, 结构主要由搅拌机引起, 上部钢罐的浆液内鼓入氧化风使整体结构振动响应增大, 振动现象更加明显。

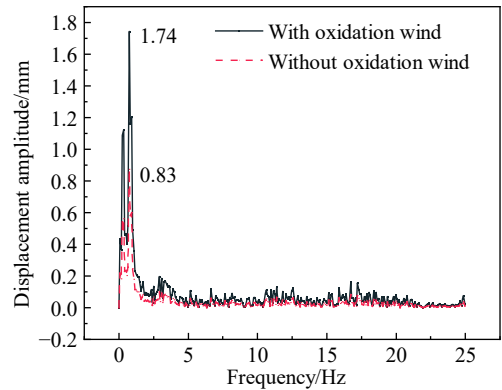


图 13 B 柱有无氧化风鼓入位移频谱对比

Fig.13 Displacement spectrum comparison of the B column with or without blowing of the oxidation wind

3 AFT 结构-浆液搅拌与氧化风作用的简化模拟方法与验证

3.1 简化的 AFT 结构数值模拟方法

以 AFT 现场结构为基础, 利用 ADINA 有限元分析软件建立计算模型。结构下部的混凝土底板标高 13.0 m, 上部钢罐罐顶标高 34.5 m。钢罐以 Sheel 单元建立, 厚度为 14 mm, 罐高 21500 mm; 底部柱高 13000 mm, 中柱横截面 800 mm×800 mm,

边柱 700 mm×700 mm。结构-浆液边界设为流固耦合边界条件, 即图 14(a)所示的黄色区域, 浆液液面设为自由液面。结构柱、圈梁采用 8 节点 3D-Solid 单元划分网格, 采用胶结网格连接, 板同样采用 8 节点 3D-Solid 单元划分, 柱与梁板相近节点采用刚性连接, 协同变形; 浆液沿环向分为 12 部分, 沿高度分为 10 部分, 采用 8 节点 3D-Fluid 单元划分, 加载时间为 12 s, 计算模型如图 14 所示, 具体材料计算参数见表 1。

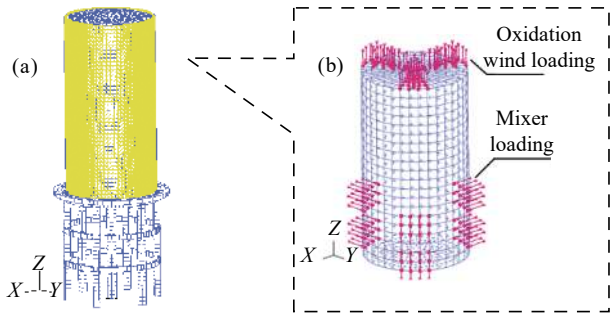


图 14 AFT 结构计算模型。(a)AFT- Structure 模型;(b)AFT-CFD 模型
Fig.14 AFT structural calculation model: (a) AFT structure model; (b) AFT-CFD model

表 1 模型计算参数

Table 1 Model calculation parameters			
Material	Elastic modulus/Pa	Density/(kg·m ⁻³)	Poisson's ratio
Concrete	3.1×10 ¹⁰	2550	0.2
Steel	2.06×10 ¹¹	7850	0.3
Material	Viscosity	Density	
Fluid	0.02	1250	

针对 AFT 结构提出一种简化的搅拌机及氧化风作用的模拟方法, 尝试提高计算效率。第一层搅

拌机加载高度为 13~15 m, 第二层搅拌机加载高度为 19~21 m, 每层 3 个, 图 14(b) 为搅拌机的相对位置及搅拌机与氧化风加载图。数值模拟中对搅拌机作用处的浆液进行射流加载, 即对浆液施加加速度荷载。

由监测数据可知, 氧化风的鼓入增大了结构的振动响应, 即加强了对浆液的扰动效果, 故采用造波理论^[6]对氧化风作用进行模拟, 选取有下部搅拌机作用的 3 处浆液液面施加正弦荷载。搅拌机及氧化风数值模拟的加载大小需考虑搅拌机型号及转速等、氧化风风速、风管直径、浆液密度、钢罐直径等各种因素, 因此在计算时控制氧化风的加载条件不变, 从而通过改变搅拌机的加载大小来设置计算工况。经多种计算工况的试验, 以周期为 2 s、幅值为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的加载方式较为适宜。同样地, 搅拌机按 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的加载大小。又因为结构监测了暂停氧化风鼓入的工况, 模拟时保持一致, 也考虑氧化风是否加载, 于是计算共分为 4 种工况, 见表 2 所示。

表 2 加载工况对比表

Table 2 Comparison of the loading case

Working condition	If there is oxidation wind	Simulation loading size of mixer/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
a	No	1
b	Yes	1
c	No	2
d	Yes	2

3.2 流固耦合模拟结果分析

为与监测测点保持一致, 便于分析, 沿上部钢罐高度提取钢罐底部、上层搅拌机处、液面处以及罐顶的数据, 标记为 1、2、3、4 点。工况 b、d 作用下, 各提取点 x 向位移响应如图 15(a)、(b) 所示, 工况 d 的位移时程曲线相比工况 b 更为浮动, 工况 d 最大绝对位移为 4 点处的 8.80 mm, 而工况 b 的最大绝对位移为 4 点处的 5.88 mm。工况 b、d 的加速度响应如图 15(c)、(d) 所示, 工况 d 各点的加速度分布较工况 b 而言变化更加复杂。

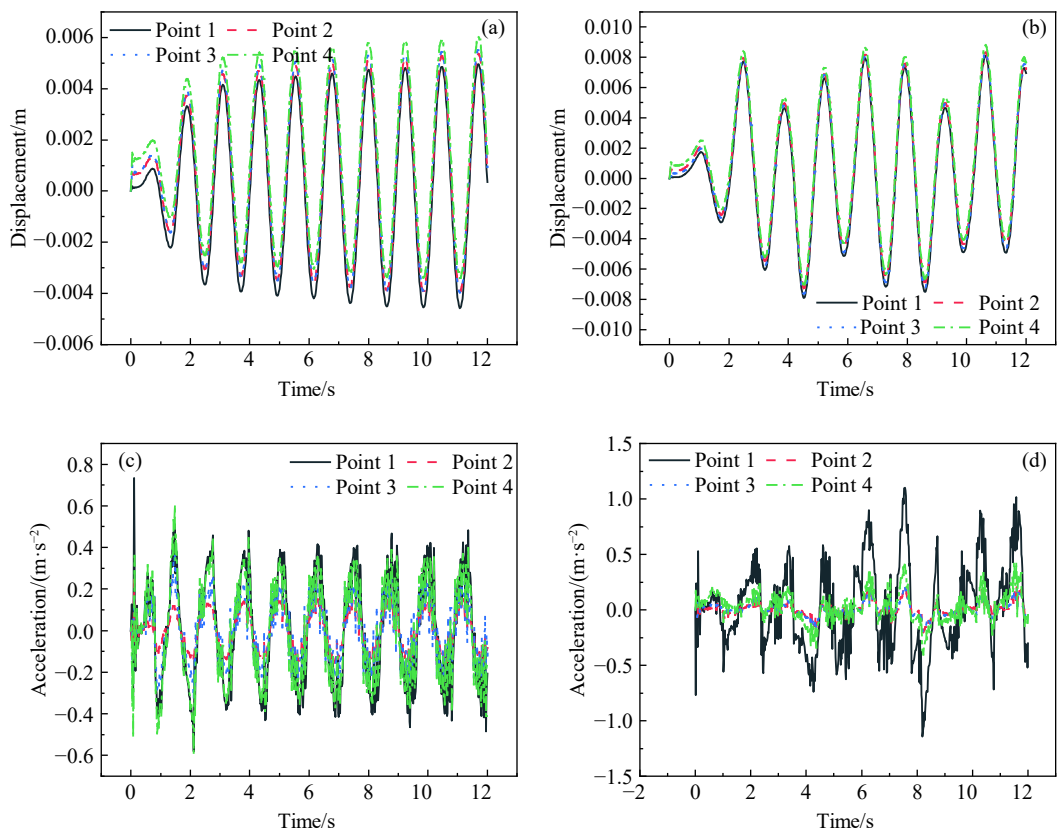


图 15 沿罐高位移及加速度时程曲线。(a) 工况 b 沿罐高的 x 向位移时程; (b) 工况 d 沿罐高的位移时程; (c) 工况 b 沿罐高加速度时程; (d) 工况 d 沿罐高加速度时程

Fig.15 Displacement and acceleration time history curves along the tank height: (a) x-direction displacement time history of Condition b along the tank height; (b) displacement time history of Condition d along the tank height; (c) acceleration time history of working Condition b along the tank height; (d) acceleration time history of working Condition d along the tank height

如图 16 所示, 工况 d 的 AFT 结构 x 向位移云图可以看出, 从下至上结构位移值逐步增大, 在下部结构的梁柱节点处也存在着较大的位移变形, 这与现场监测时结构底部出现明显裂缝相对应.

如图 17(a)所示, 可以看出各工况随加载大小的增加, 位移值逐步提高. 如图 17(b)所示, 工况 a、b、c、d 的最大加速度均在钢罐底部, 其分布形式都是先减小后增大. 工况 d 与监测工况①相比, 即都是在搅拌机开机及氧化风鼓入的情况下, 1、2、3、4 点的位移模拟值与监测值的平均差为 0.345 mm, 而加速度模拟值与监测值的平均差为 $0.0087 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

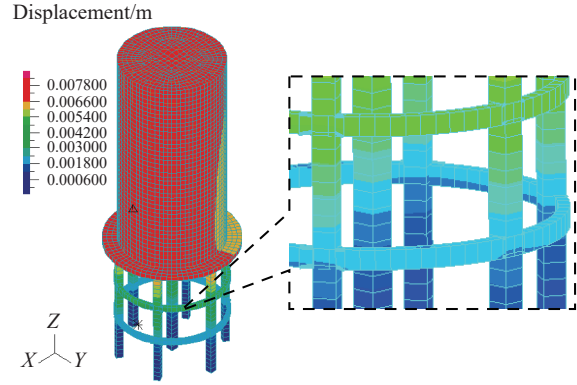


图 16 工况 d 的 AFT 结构位移云图
Fig.16 Displacement nephogram of the AFT structure in Condition d

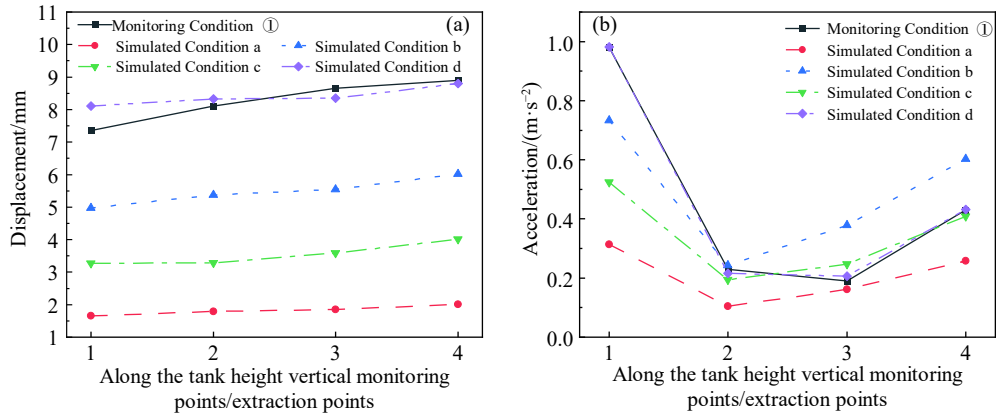


图 17 各工况沿罐高的位移峰值(a)及加速度峰值(b)对比
Fig.17 Comparison of the peak values of displacement (a) and acceleration (b) along the tank height under different working conditions

图 18 为 AFT 下部结构柱监测位移与各工况模拟的柱位移峰值对比, 工况 c 与监测工况②相比, 即都是在搅拌机开机且无氧化风鼓入的情况下, 各柱的位移模拟值与监测值平均差的为 0.3 mm, 而工况 d 考虑了氧化风的加载后, 工况 d 与监测工况①相比, 位移模拟值与监测值的平均差为 0.22 mm.

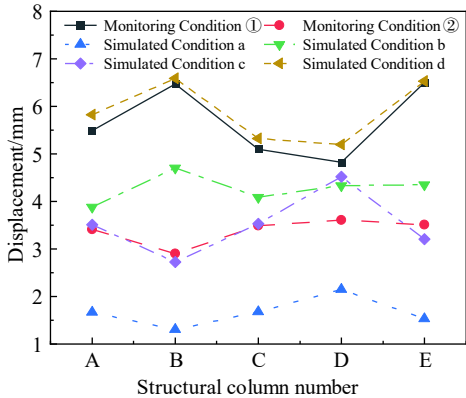


图 18 结构柱各工况的位移峰值对比
Fig.18 Comparison of the peak displacement of the structural column under different working conditions

对工况 d 沿罐高的 1、2、3、4 点位移及加速度时程曲线做频谱分析, 从图 19 的 (a) 中可以看出, 当频率为 0.748 Hz 时, 沿罐高的 1、2、3、4 点均达到位移峰值, 4 点的位移峰值为 5.39 mm.

由图 19(b)可以看出, 当频率 0.78 Hz 时, 沿罐高的 1、2、3、4 点均达到加速度峰值, 1 点的加速度峰值为 $0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 结合上述分析, 验证了简化搅拌机及氧化风作用的模拟方法快捷、有效. 与此同时监测及模拟结果还表明: 上部钢罐内部的两层搅拌机作用于浆液时, 搅拌机的运转不同步性、浆液内部流速分布不同等引起结构各柱、上部钢罐不同位置的动力响应规律不同; 氧化风鼓入作用导致浆液内部流速分布更加不均, 使结构各柱、上部钢罐不同位置的动力响应规律差异性更大.

4 结论

- (1)通过对结构进行动态视频分析, 研究了结构运动轨迹的规律, 对复杂的 AFT 厂房结构, 采用现场视频监测的方法可快速明确结构运动轨迹.
- (2)根据结构加速度及位移监测, 定量分析结

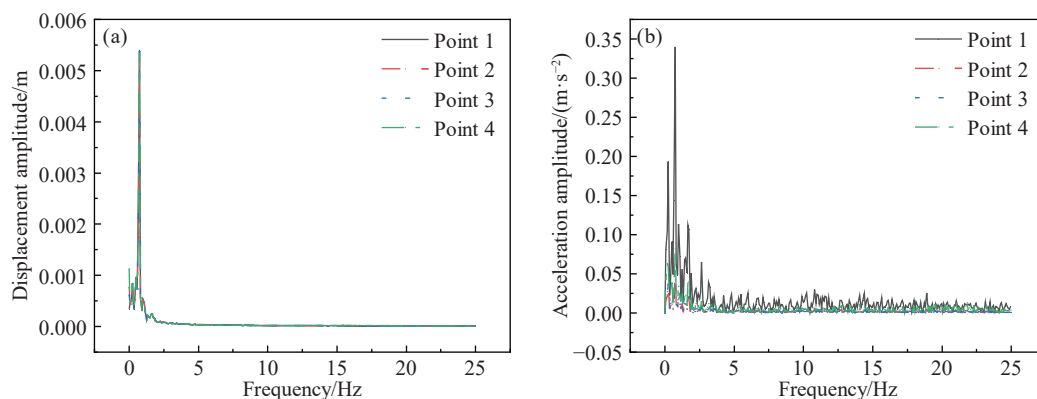


图 19 工况 d 频谱图. (a) 位移频谱; (b) 加速度频谱

Fig.19 Displacement (a) and acceleration spectra (b) of Condition d

构不同部位的振动响应,结构的振动主要有钢罐内搅拌机的作用造成结构振动,氧化风鼓入加剧了结构振动,内部浆液运动的不规律性引起结构各部位动力响应的差异性,导致结构不同部位出现不同程度的损伤。

(3)提出了简化搅拌机与氧化风作用的模拟方法,并验证了此方法简单、快捷、有效。将 AFT 结构的数值模拟工况 d 的计算结果与现场监测工况①的结果对比发现,各点的位移及加速度响应拟合,简化的模拟方法可为分析此类结构振动响应、损伤机制以及加固设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] Li Y, Yang Z Z. Influence of key factors on lime-gypsum wet flue gas desulfurization and two circulations per tower technology. *Environ Eng*, 2016, 34(1): 69
(李元, 杨志忠. 湿法烟气脱硫关键影响因素及新型单塔双循环技术. 环境工程, 2016, 34(1): 69)
- [2] Han P, Mao X J, Zhou L H, et al. Mechanism modeling for forced oxidation system of flue gas desulfurization device. *J North China Electr Power Univ*, 2006, 33(5): 60
(韩璞, 毛新静, 周黎辉, 等. 湿法烟气脱硫中强制氧化系统的机理建模. 华北电力大学学报, 2006, 33(5): 60)
- [3] Chen J. *Single-and Multi-Phase Flow Dynamics Simulations of the Side-Entering Stirred Reactors* [Dissertation]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013
(陈佳. 侧进式搅拌反应器内均相及多相流体动力学的数值研究[学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2013)
- [4] Xu G H, Gu X K. Investigation to the numerical simulation approach for sloshing in tanks considering fluid-structure interaction. *J Ship Mech*, 2012, 16(5): 514
(徐国徽, 顾学康. 液舱晃荡载荷数值模拟中的流固耦合影响研究. 船舶力学, 2012, 16(5): 514)
- [5] Xu Y X, Shao C F, Zheng D J, et al. Diagnosis of abnormal structural vibration for Xiaoshunjiang pumping station // 15th Biennial ASCE Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Florida, 2016: 943
- [6] Ding Y, Ma R, Li N. A simulation model for three-dimensional coupled wave-current flumes. *Eng Mech*, 2015, 32(10): 68
(丁阳, 马瑞, 李宁. 三维波流耦合水槽模拟模型. 工程力学, 2015, 32(10): 68)
- [7] Shi Y, Shu G Q, Bi F R. Acoustic characteristics simulation of engine exhaust muffler based on CFD. *J Vib Eng*, 2011, 24(2): 205
(石岩, 舒歌群, 毕凤荣. 基于计算流体动力学的内燃机排气消声器声学特性仿真. 振动工程学报, 2011, 24(2): 205)
- [8] Bigoni C, Hesthaven J S. Simulation-based anomaly detection and damage localization: An application to structural health monitoring. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2020, 363: 112896
- [9] Limongelli M P, Giordano P F. Vibration-based damage indicators: A comparison based on information entropy. *J Civ Struct Heal Monit*, 2020, 10(2): 251
- [10] Wang X. *The Reaction Process and Optimization of Flow Field in Slurry Pond of WFGD Towers* [Dissertation]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016
(王旭. 湿法烟气脱硫塔浆液池内反应过程及流场优化[学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016)
- [11] Zhang C W. Analytical study of transient coupling between vessel motion and liquid sloshing in multiple tanks. *J Eng Mech*, 2016, 142(7): 04016034
- [12] Lu S S, Zhang Z F, Liu J B, et al. Passive suction and blowing flow control of wind-induced vibration of tall buildings. *J Vib Shock*, 2021, 40(11): 7
(卢姗姗, 张志富, 刘金博, 等. 高层建筑结构风致振动的被动吸吹气流动控制研究. 振动与冲击, 2021, 40(11): 7)
- [13] Li Z L, Zhang L Z, Zhu X D, et al. Design and validation of wireless dynamic testing system for bridge based on the 941B type vibration sensor // Ninth International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP). Harbin, 2009: 1
- [14] Shi Y C, Li S Q, Li Z X, et al. Rapid evaluation method for blast damage of reinforced concrete columns based on measured frequency. *J Build Struct*, 2021, 42(11): 155

- (师燕超, 李绍琦, 李忠献, 等. 基于实测频率的钢筋混凝土柱爆炸损伤快速评估方法. 建筑结构学报, 2021, 42(11): 155)
- [15] Jiang X L, Zhang C X, Jiang N, et al. Shaking table test method for equipment-structure dynamic interaction. *J Vib Shock*, 2019, 38(3): 108
(姜忻良, 张崇祥, 姜南, 等. 设备-结构动力相互作用振动台试验方法研究. 振动与冲击, 2019, 38(3): 108)
- [16] Guo J, Zhu C A. Dynamic displacement measurement of large-scale structures based on the Lucas-Kanade template tracking algorithm. *Mech Syst Signal Process*, 2016, 66-67: 425
- [17] Zhao C, Zhao J Y, Sun Q, et al. A study on identification of dynamic characteristic parameters of a transmission tower under ambient excitations. *J Vib Shock*, 2021, 40(4): 30
(赵超, 赵家钰, 孙清, 等. 环境激励下输电塔动力特性参数识别. 振动与冲击, 2021, 40(4): 30)
- [18] Zhu B R, Sun C, Huang Y. Ice-induced vibration response analysis of monopile offshore wind turbine. *China Civ Eng J*, 2021, 54(1): 88
(朱本瑞, 孙超, 黄焱. 海上单桩风机结构冰激振动响应分析. 土木工程学报, 2021, 54(1): 88)
- [19] Dong X F, Lian J J, Wang H J. Monitoring experiment and characteristic analysis of structural vibration of offshore wind turbine. *J Tianjin Univ (Sci Technol)*, 2019, 52(2): 191
(董霄峰, 练继建, 王海军. 海上风机结构振动监测试验与特性分析. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(2): 191)
- [20] Wang Y L, Yue Q J, Bi X J, et al. Ice-induced vibration control effectiveness evaluation for an offshore platform based on a field monitoring. *J Vib Shock*, 2012, 31(7): 39
(王延林, 岳前进, 毕祥军, 等. 基于现场监测的海洋平台冰振控制效果评价. 振动与冲击, 2012, 31(7): 39)
- [21] Soman R, Kyriakides M, Onoufriou T, et al. Numerical evaluation of multi-metric data fusion based structural health monitoring of long span bridge structures. *Struct Infrastructure Eng*, 2018, 14(6): 673
- [22] Zhu B, Jiang N, Zhou C B, et al. Effect of excavation blast vibration on adjacent buried gas pipeline in a foundation pit. *J Vib Shock*, 2020, 39(11): 201
(朱斌, 蒋楠, 周传波, 等. 基坑开挖爆破作用邻近压力燃气管道动力响应特性研究. 振动与冲击, 2020, 39(11): 201)
- [23] Qarib H, Mohamed D. Analysis, prediction, and mitigation of vortex induced vibrations in substation structures // *Electrical Transmission and Substation Structures* 2018. Atlanta, 2018: 191
- [24] Wu Q Q, Zhang L K, Ma Z Y, et al. Vibration characteristics of the unit-plant structure of a hydropower station under transient load-up process. *J Vib Shock*, 2019, 38(18): 53
(吴嵌嵌, 张雷克, 马震岳, 等. 水电站机组-厂房结构突增负荷过渡过程振动特性研究. 振动与冲击, 2019, 38(18): 53)
- [25] Chen G G, Zhang L J, Bai Y, et al. Numerical simulation of the influence of the agitator parameter on the field characteristics and the power in a side-entering stirred reactor. *J Beijing Univ Chem Technol (Nat Sci Ed)*, 2012, 39(3): 29
(陈功国, 张林进, 柏杨, 等. 侧入式搅拌槽中桨叶参数对流场及功率影响的数值模拟. 北京化工大学学报(自然科学版), 2012, 39(3): 29)