

基于有限元的水下管汇在波浪与海流耦合作用下的动力响应

任晓芳

海洋石油工程股份有限公司 天津 300457

摘要: 为探究波浪与海流耦合作用下水下管汇的动力响应特征,构建三维有限元数值模型,基于流固耦合原理仿真分析管汇系统在复杂外载下的位移、应力及模态响应规律。结果表明,耦合载荷显著改变管汇应力分布,特定频率下出现共振风险,顺流向位移增幅大于横流向,海流流速与波浪周期共同决定响应幅值,研究为管汇安全设计与运维提供量化依据。

关键词: 有限元;水下管汇;波浪与海流耦合作用下;动力响应

引言:深海油气开发中,水下管汇作为核心连接枢纽,长期承受波浪与海流联合作用,其动力响应直接决定系统服役安全与寿命。现有研究多聚焦单一立管或简单管线,对复杂管汇的多向耦合载荷响应探讨不足。本文针对多分支管汇结构,引入有限元法与双向流固耦合技术,系统模拟波流共同作用下的动力学行为,旨在揭示耦合效应下的失效机理,为深海工程装备设计提供理论支撑。

1 相关理论基础与有限元方法

1.1 水下管汇结构特性与受力分析

(1) 水下管汇按功能可分为生产管汇、注入管汇等,核心构件包括主管汇本体、支管接头、法兰及支撑结构,其力学特性以高强度、抗腐蚀、抗疲劳为主,需满足水下复杂环境下的结构稳定性要求。(2) 水下管汇主要承受四类荷载:波浪力由表层水体波动产生,具有周期性;海流力为恒定或缓变荷载,影响结构长期受力;自身重力与浮力平衡维持结构姿态;管土相互作用力来自海底土壤对管道的支撑与约束,影响结构沉降与变形。(3) 动力响应评价以关键参数为核心,位移反映结构变形程度,速度与加速度体现动力冲击特性,应力应变参数则直接判断构件是否满足强度要求,避免发生塑性变形或断裂^[1]。

1.2 波浪与海流耦合作用理论

(1) 波浪理论以线性波浪理论为基础,假设波浪为小振幅规则波,可简化计算波浪参数;P-M谱等波浪谱用于描述不规则波浪的能量分布,适配实际海洋波浪特性。(2) 海流通过改变波浪传播速度、振幅实现对波浪的调制,耦合作用的核心是海流与波浪的能量叠加,其物理过程包括海流对波浪的折射、绕射及能量耗散。(3)

波流耦合荷载采用Morison方程合成,通过分别计算波浪力与海流力,结合相位差与荷载方向,叠加得到结构所受总荷载,兼顾计算精度与效率。

1.3 有限元分析核心理论与软件选型

(1) 有限元分析核心是将结构离散为若干单元,通过网格剖分保证计算精度,合理设定边界条件(如固定约束、弹性支撑),模拟水下管汇的实际受力环境。(2) 结构动力学求解采用瞬态动力学分析捕捉动态荷载下的瞬时响应,频域分析则聚焦结构在不同频率下的共振特性,避免共振破坏。(3) 选型ANSYS/ABAQUS两款软件,均适配水下结构分析,ANSYS擅长瞬态动力学计算,ABAQUS在非线性分析与管土相互作用模拟中更具优势,分析流程均包括建模、网格划分、荷载施加、求解及结果分析。

2 水下管汇有限元模型构建与验证

2.1 水下管汇几何模型建立

(1) 管汇结构简化遵循“抓主弃次”原则,忽略尺寸较小的附属连接件、装饰性构件及非受力焊缝,重点保留主管汇本体、支管接头、法兰及支撑结构等核心受力部件,既降低建模复杂度,又确保模型能真实反映结构受力特性,避免冗余细节影响计算效率。(2) 几何参数结合工程实际需求或典型管汇设计标准设定,明确主管直径、支管间距、法兰尺寸、支撑结构高度等关键参数,参数取值需贴合水下管汇实际工作工况,同时预留合理调整空间,为后续模型优化和参数修正提供便利。(3) 将简化后的几何模型导入有限元软件,进行预处理操作:清理几何模型中的冗余线条、重叠面及孔洞,确保模型几何完整性;明确各构件间的连接关系,采用绑定、铰接等方式模拟实际连接状态,避免因连接关系定

义不当导致计算结果偏差。

2.2 有限元模型参数设置

(1) 材料参数根据管汇所用钢材型号确定, 准确设定弹性模量、泊松比、密度等核心力学参数, 同时考虑水下腐蚀环境对材料性能的影响, 合理修正参数取值, 确保材料特性与实际工程材料一致, 为受力分析提供可靠基础。(2) 单元类型结合构件受力特点选择: 主管汇本体、支管采用管单元, 兼顾计算精度与效率; 法兰、支撑等受力复杂部位采用实体单元, 精准捕捉局部应力应变; 网格划分采用“疏密结合”策略, 受力集中区域加密网格, 非受力区域适当简化, 平衡计算精度与计算成本^[2]。(3) 边界条件与约束设定贴合海底实际工况, 模拟管汇与海底土体的连接状态, 对支撑结构底部采用固定约束, 限制其位移与转动; 对管汇与土体接触部位采用弹性约束, 模拟土壤的支撑作用, 确保约束条件与实际受力环境高度契合。

2.3 模型验证与网格独立性分析

(1) 网格独立性验证通过设置3-4种不同网格密度的模型, 计算各模型的关键响应参数(如应力、位移), 对比分析计算结果的偏差, 选取结果趋于稳定、偏差在允许范围内的网格密度作为最优网格方案, 避免网格密度不足或过度加密影响计算精度与效率。(2) 模型有效性验证结合已有试验数据或工程实测数据进行校核, 将有限元计算结果与试验、实测数据对比, 重点验证位移、应力等核心参数的一致性, 若偏差超出允许范围, 需排查模型简化、参数设置等环节的问题并调整^[3]。(3) 对验证结果进行系统分析, 明确模型偏差来源, 针对性修正材料参数、边界条件或网格划分策略, 逐步提升有限元模型的计算精度, 确保模型能够准确模拟水下管汇的实际受力与动力响应特性, 为后续结构分析提供可靠模型支撑。

3 波浪与海流耦合作用下水下管汇动力响应仿真分析

3.1 波流耦合荷载施加与工况设计

(1) 耦合荷载计算以波浪与海流耦合理论为基础, 结合Morison方程完成总荷载求解, 先分别计算波浪力与海流力, 考虑两者相位差与荷载方向的叠加效应, 代入波浪振幅、周期、海流流速等关键参数, 修正波浪与海流的相互调制影响, 最终得到水下管汇各构件所受的耦合总荷载, 确保荷载计算贴合实际海洋环境。(2) 典型工况设计结合实际海洋环境特征, 采用多变量组合方式设定工况, 涵盖不同波高(低、中、高)、波浪周期及海流流速的组合, 涵盖极端海况与常规海况, 明确各工况的参数取值范围, 确保工况设计的全面性, 可有效分析不同海洋环境下管汇的动力响应差异, 为工程设计提供

针对性参考。(3) 荷载施加方式需适配有限元模型, 将计算得到的波流耦合总荷载, 转化为模型可识别的集中荷载或分布荷载形式, 根据荷载作用位置与方向, 精准施加于管汇对应的构件表面, 同时设置荷载施加的时间步长, 模拟波浪与海流的动态作用过程, 避免荷载施加不当导致仿真结果失真^[4]。

3.2 瞬态动力响应仿真与结果分析

(1) 瞬态响应计算基于有限元模型参数设置, 采用瞬态动力学求解方法, 设定合理的计算时间步长与终止时间, 求解水下管汇在波流耦合荷载动态作用下的位移、速度、加速度时程曲线, 捕捉不同时刻管汇的动力响应状态, 完整呈现管汇从受力到稳定的全过程响应特征。(2) 关键部位动力响应分析聚焦管汇受力薄弱环节, 重点分析管汇节点、弯头及法兰连接部位的位移、应力应变响应特性, 判断此类关键部位是否存在应力集中现象, 明确其响应峰值与出现时刻, 为结构强度优化提供重点关注方向。(3) 响应规律总结结合时程曲线特征, 梳理耦合荷载作用下管汇动力响应的时程演化特征, 明确位移、速度、加速度的变化周期与峰值规律, 分析波高、海流流速等参数对响应强度的影响, 总结管汇动力响应随荷载变化的内在规律, 为后续结构优化提供理论依据。

3.3 频域动力响应仿真与结果分析

(1) 频域响应计算采用频域分析方法, 基于有限元模型求解管汇的固有频率与振型特性, 明确管汇各阶固有频率的取值范围, 分析不同振型下管汇的变形特征, 识别管汇的主要振动方向与薄弱振动部位, 为共振特性分析奠定基础。(2) 共振特性分析重点对比波流耦合荷载的激励频率与管汇的固有频率, 判断两者是否存在匹配关系, 若激励频率接近或等于管汇固有频率, 需分析共振风险及对管汇结构的影响, 提出规避共振的优化措施, 确保管汇在实际工作中避免共振破坏。(3) 频域响应与瞬态响应对比从不同维度验证仿真结果的合理性, 对比两者在核心响应参数(如应力峰值、位移峰值)上的一致性, 分析差异产生的原因, 若偏差在允许范围内, 则证明仿真模型与计算过程可靠, 可用于后续工程分析; 若偏差过大, 需针对性修正模型参数, 提升仿真精度。

4 动力响应影响因素分析与优化建议

4.1 海洋环境参数对动力响应的影响

(1) 波浪参数中, 波高与管汇位移、应力响应呈正相关关系, 波高越大, 管汇所受波浪力越大, 位移峰值和应力峰值随之显著增大; 波浪周期对响应影响呈阶段性, 当周期接近管汇固有频率时, 易引发共振, 导致响

应强度骤升,周期偏离固有频率时,响应强度随周期变化趋于平缓,整体呈现“共振区间峰值突出、非共振区间稳步变化”的规律。(2)海流参数中,流速增大时,管汇所受恒定荷载增强,动力响应幅值整体提升,且对管汇底部约束部位的应力影响最为明显;海流方向与管汇轴线平行时,主要产生轴向荷载,对位移影响较小,垂直时产生横向荷载,易引发管汇弯曲变形,显著增大横向位移与弯曲应力,调制作用更突出。(3)波流耦合效应的影响程度显著高于单一荷载,对比分析表明,耦合荷载作用下管汇的位移、应力峰值,均高于单一波浪荷载或单一海流荷载,且耦合效应并非简单叠加,海流的存在会放大波浪力的作用效果,使管汇动力响应更剧烈,尤其在极端海况下,耦合效应的影响更为突出,是管汇结构设计需重点考虑的因素。

4.2 结构参数对动力响应的影响

(1)管汇管径、壁厚直接影响结构刚度,管径增大、壁厚增加时,结构刚度显著提升,抗变形能力增强,管汇的位移响应明显减小,应力分布更均匀,应力峰值降低;反之,管径过小、壁厚不足时,结构刚度薄弱,易产生较大变形和应力集中,动力响应幅值显著增大。(2)管汇布置方式对受力分布和动力响应影响显著,分支角度合理(一般控制在 30° ~ 60°)时,荷载可均匀传递,减少局部应力集中,响应幅值较低;分支间距过小会导致荷载叠加,增大局部应力,间距过大则会降低结构整体稳定性,增加位移响应;不合理的布置方式会加剧管汇动力响应,增加结构损坏风险^[5]。(3)管土相互作用参数中,土壤弹性模量越大,对管汇底部的约束作用越强,管汇位移响应越小;土壤阻尼比增大,可有效衰减管汇振动响应,降低应力峰值;反之,土壤松软、约束不足时,管汇底部易产生沉降和振动放大,动力响应显著增强,需合理匹配管土相互作用参数,保障结构稳定性。

4.3 水下管汇结构优化建议

(1)基于动力响应分析结果,优化管汇结构参数,针

对响应幅值较大的部位,适当增大管径、增厚壁厚,提升结构刚度;结合管汇受力特点,合理调整参数取值,在保证结构强度的同时,避免过度设计造成成本浪费,实现强度与经济性的平衡。(2)优化抗波流设计,在管汇受力集中部位增设防护套、阻尼器等装置,减小波流耦合荷载的冲击作用;合理设计管汇外形,采用流线型结构,降低波浪与海流的阻力,减少荷载作用强度,从源头削弱动力响应幅值。(3)提出工程应用建议,设计阶段需结合实际海洋环境参数,合理设定结构参数和布置方式,规避共振风险;施工阶段严格控制管土接触质量,确保底部约束可靠;维护阶段定期检测管汇结构状态和海洋环境变化,及时排查隐患,保障水下管汇长期安全稳定运行。

结束语

本研究通过有限元仿真实现了波浪与海流耦合作用下水下管汇动力响应的精准刻画,明确了载荷参数与结构响应的量化关系,验证了特定频率下的振动特性与风险区间。研究成果为管汇结构优化、抗振设计及疲劳寿命评估提供关键数据支撑,后续可结合物理模型试验进一步修正模型,深化多相流与土-管相互作用机制,推动深海管汇安全技术的工程应用。

参考文献

- [1]姚芳华.基于水下预置系统的深远海水下作战体系[J].数字海洋与水下攻防,2020,3(1):82-86.
- [2]朱坤,陈焕龙,等.波浪相位对航行体出水过程水动力特性的影响[J].兵工学报,2021,35(3):355-361.
- [3]蔡帆,张宇文,侯二虎,等.潜射导弹水面分离运动建模与仿真[J].计算机测量与控制,2022,20(7):191-194.
- [4]张重先,曹廷旭,刘吉成.小型水下运载器快速上浮导弹发射过程扰动分析[J].数字海洋与水下攻防,2020,2(5):54-57.
- [5]谭桂林,赵加鹏.深海上浮平台线型设计及水动力特性预报[J].数字海洋与水下攻防,2022,5(1):73-79.