风浪联合作用下小型海洋平台的运动响应研究

李　帅[1]　张素珍[2]
1. 天津荣升石油科技有限公司　天津　300450
2. 瀚辰精英海洋工程（江苏）有限公司　江苏　南通　226000

摘　要：小型海洋平台在边际油田开发与海洋资源勘查中应用广泛，其结构尺度小、固有频率低，对风浪联合作用下的动力响应极为敏感。本文基于势流理论与莫里森公式相结合的数值方法，建立风浪联合作用下小型海洋平台运动响应的时域分析模型，系统研究不同风速、有义波高及谱峰周期组合工况下平台的六自由度运动响应规律。研究表明，风荷载对平台的漂移量和低频慢漂运动具有显著影响，波浪荷载主导了平台的振荡幅值，联合作用下的运动响应并非两者线性叠加，而是呈现明显的非线性增强效应。研究成果可为小型海洋平台的结构设计与作业安全评估提供理论依据。

关键词：小型海洋平台；风浪联合作用；运动响应；时域分析；非线性耦合

引言：小型海洋平台具有造价低、机动性好、可重复利用等优势，在浅海边际油田开发、海洋油气资源勘查及海洋环境监测等领域发挥着不可替代的作用。然而，小型平台结构尺度相对较小、吃水较浅、固有频率较低，在风浪联合作用下极易产生大幅运动响应，严重威胁平台作业安全与结构疲劳寿命。风暴条件下平台的运动响应特性直接决定了其能否安全作业及撤离时机。与大型固定式平台或深水浮式平台相比，小型平台在风浪耦合机理方面具有更强的非线性和多模态耦合特征。本文针对小型海洋平台在风浪联合作用下的运动响应问题，建立数值分析模型，揭示风浪耦合作用对平台运动特性的影响规律，为工程设计提供参考。

1 小型海洋平台运动响应研究基础

1.1 小型海洋平台的结构特征

小型海洋平台通常指工作水深小于 50m、甲板面积有限、作业载荷较轻的各类海洋平台，包括小型自升式平台、小型半潜式平台、坐底式平台及简易导管架平台等类型。与大型平台相比，小型平台的结构特点主要体现在以下几个方面。其一，结构尺度小导致水线面面积较小，恢复力刚度相对较低，平台固有周期接近波浪谱能量集中的周期范围，易发生共振响应。其二，小型平台的吃水较浅，波流荷载作用于平台主体和系泊系统的力臂较短，但风荷载作用点相对较高，风倾力矩对平台倾斜响应的影响更为显著。其三，小型平台的系泊系统通常采用多点锚链或缆绳系泊，系泊刚度较低，平台在风浪作用下的漂移运动幅度较大。小型平台的设计往往需要在经济性与安全性之间进行折中，对运动响应的准确预测提出了更高要求。

1.2 风浪联合作用的基本概念

风浪联合作用是指风和波浪同时作用于海洋平台时产生的组合环境荷载效应。在物理机制上，风作用于平台上部结构产生定常风力和脉动风力，前者使平台产生平均漂移，后者则激发平台的低频慢漂运动。波浪作用于平台水下部分产生一阶波浪力和二阶波浪力，一阶力与波浪同频，主导平台的波频振荡；二阶差频力则与风荷载共同驱动平台的低频运动。风与波浪虽在物理上相互独立，但在海洋环境中两者往往相伴而生，且通过平台结构产生耦合响应。风浪联合作用的本质在于，平台在风荷载作用下的位移改变了波浪荷载的作用点和作用方向，而波浪引起的平台运动又反过来影响风荷载的相对风速和攻角，二者通过平台的位移和速度形成非线性耦合。这种耦合效应在小型平台上尤为显著，因为小型平台的质量和刚度较小，对荷载变化的响应更为敏感[1]。

1.3 国内外研究现状

国内外学者对海洋平台运动响应问题开展了大量研究。在频域分析方法方面，早期研究主要采用线性化方法计算平台的传递函数和响应谱，适用于小幅运动假设下的初步设计。在时域分析方法方面，随着计算技术的发展，基于莫里森公式和面板法的时域模拟已成为主流手段，能够较好地处理非线性阻尼、非线性恢复力和瞬态响应等问题。在风浪联合作用方面，部分学者通过模型试验研究了风对平台慢漂运动的放大效应，发现风力可使平台低频响应幅值增加 30% 至 50%。在小型平台

专门研究方面，现有文献多集中于特定类型的单平台分析，对小型平台在风浪联合作用下的通用性规律和耦合机理缺乏系统总结。现有数值模型往往将风荷载和波浪荷载分别计算后简单叠加，忽略了运动引起的荷载耦合效应，这可能导致非保守的误差。

2 环境荷载计算理论

2.1 风荷载计算模型

作用于海洋平台的风荷载分为平均风和脉动风两部分。平均风采用指数律风速剖面描述，根据 API 规范，风速沿高度按指数分布，指数取值取决于海面粗糙度。作用在平台上部结构的风力基于阻力公式计算，风压与空气密度、风速平方及迎风面积成正比，具体系数依据平台各组成部分的形状系数确定。脉动风荷载采用 Davenport 风速谱或 Kaimal 风速谱模拟，通过谐波叠加法生成脉动风速时程，再换算为脉动风力时程。风倾力矩为各层风力与该层高度乘积的叠加，是评估平台倾覆稳定性的关键指标。对于小型平台而言，上部结构迎风面积相对较大，风倾力矩对平台横倾和纵倾响应的影响尤为突出，不可忽略。

2.2 波浪荷载计算方法

波浪荷载计算方法取决于平台结构尺度与波长的相对关系。对于尺度较大的沉箱和浮筒，采用绕射理论计算波浪力，基于三维势流理论求解速度势，进而通过压强积分获得一阶波浪力和二阶波浪力。对于尺度较小的杆件和支撑结构，采用莫里森公式计算拖曳力和惯性力，拖曳力与相对速度的平方成正比，惯性力与流体质点加速度及附加质量相关。波浪谱采用 JONSWAP 谱或 Pierson-Moskowitz 谱描述，通过随机相位法生成不规则波浪时程，实现波浪荷载的时域模拟。二阶波浪力对小型平台的低频慢漂运动贡献显著，其中差频二阶力与波幅平方成正比，频率为两组成波频率之差，可激发平台的慢漂共振响应。对于吃水较浅的小型平台，波浪荷载的非线性特征更为明显，需要采用高阶理论进行准确描述[2]。

2.3 风浪联合荷载的叠加与耦合处理

风浪联合荷载的处理存在简单叠加和耦合分析两种方法。简单叠加法将分别计算的风力和波浪力按对应时刻相加，忽略了平台运动与荷载之间的相互作用，计算效率高但可能引入误差。耦合分析法在每一时间步更新平台的位置和速度，分别计算该瞬时姿态下的风荷载和波浪荷载，再求合力。具体而言，平台运动引起风作用点的相对位置变化，改变了风力臂和风倾力矩；同时平台的水平和垂向速度改变了波浪荷载计算中的相对速度项，尤其对莫里森公式中的拖曳力影响显著。平台倾斜还会改变结构构件相对于波浪传播方向的攻角，影响波浪荷载的空间分布。合理的耦合处理应当包含几何耦合和动力耦合两个层面。研究表明，对于小型平台，忽略耦合效应可能导致对低频慢漂运动幅值低估约 15% 至 25%，这一误差对作业安全评估不可接受。

3 平台运动响应数值模型

3.1 时域运动方程

小型海洋平台在风浪联合作用下的时域运动方程采用六自由度刚体运动方程描述。六自由度包括纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和首摇，前三个为平移自由度，后三个为旋转自由度。运动方程的一般形式采用质量矩阵乘以加速度向量，加阻尼矩阵乘以速度向量，再加恢复力矩阵乘以位移向量，右侧为外荷载向量。质量矩阵包含结构自身质量和附加质量，后者反映平台周围流体对加速运动的阻抗效应。阻尼矩阵包括辐射阻尼、粘性阻尼和系泊阻尼等贡献，对于小型平台，粘性阻尼占主导地位，其阻尼系数通常基于模型试验或经验公式估算，不确定性较大。恢复力矩阵包含静水恢复力和系泊系统恢复力，前者与水线面面积和稳性高相关，后者取决于系泊缆绳的刚度布置和预张力水平。运动方程采用四阶 Runge-Kutta 方法进行时域数值积分求解，该方法具有良好的数值稳定性。

3.2 系泊系统恢复力模型

系泊系统是约束平台运动的关键部件，其恢复力特性直接影响平台的运动响应幅值。对于多点系泊系统，各系泊缆绳的张力与缆绳伸长量满足材料本构关系和几何相容条件。缆绳静力特性可采用悬链线理论计算，给出水平恢复力与平台水平位移之间的非线性关系。在风浪作用下，平台偏离平衡位置导致部分缆绳松弛而部分缆绳张紧，恢复力呈现明显的非线性分段特征，小位移时恢复力较小，大位移时恢复力急剧增大。这种非线性的刚度特性有利于限制平台在极端环境下的最大漂移量，但也可能导致剧烈的冲击响应[3]。在时域模拟中，系泊恢复力需要根据平台瞬时位置和各缆绳锚点、导缆孔位置进行几何更新计算，并考虑缆绳与海底接触以及缆绳动力效应。

3.3 数值求解方法与验证

运动方程的求解采用四阶 Runge-Kutta 法进行时间步进，时间步长根据波浪谱最高有效频率确定，通常取 0.05s 至 0.10s，以保证高频波浪力的准确积分。数值模

拟的初始条件取平台静止于平衡位置，通过前期的过渡段衰减消除初始瞬态效应后，再提取稳态运动响应。为了验证数值模型的可靠性，针对特定平台尺度，将数值计算结果与文献中的模型试验数据进行对比。对比参数包括幅值响应算子、响应谱和统计特征值，验证结果表明本模型能够合理预测平台在风浪联合作用下的运动响应特征。模型验证的有效性高度依赖于输入参数的准确性，尤其是粘性阻尼系数和附加质量系数，这些参数仍需通过模型试验或经验公式确定，构成数值模拟的主要不确定性来源。

4 算例分析与参数研究

4.1 计算工况设置

以一座工作水深 35m 的小型半潜式平台为算例，选取典型风暴环境参数作为基准工况。平台上部结构设有生活模块和钻修井设备，水下结构包括浮箱和立柱，系泊系统采用 6 根系泊缆绳均匀布置。计算工况覆盖风速、有义波高和谱峰周期的多水平组合，共设计 8 个典型工况。基准工况设定风速为 25m/s、有义波高 4.5m、谱峰周期 7.2s，代表该海域百年一遇风暴海况，以此作为其他工况比较的基准。在此基础上，对风速、有义波高和谱峰周期进行单因素变化，分别考察各参数对运动响应的影响。每个工况模拟时长取 3600s，涵盖约 500 个波浪周期，确保响应统计的平稳性。输出参数包括各自由度运动响应最大值、有义值、平均值及响应谱特征频率，系统记录纵荡、垂荡、纵摇三个主导自由度响应时程。

4.2 运动响应特性分析

对基准工况下平台六自由度运动响应进行统计分析，纵荡自由度响应最为显著，有义值为 1.52m，最大值达 3.86m，这主要源于风荷载产生的平均漂移量和二阶波浪力引起的低频慢漂运动的叠加。垂荡自由度有义值为 0.42m，最大值 1.08m，以波频响应为主。纵摇自由度有义值为 2.8°，最大值 7.2°，风倾力矩和波浪纵倾力矩共同贡献。通过对响应时程进行频谱分析，发现纵荡响应包含三个显著频率成分：波浪谱峰频率附近（约 0.14Hz）的波频成分、极低频（约 0.02Hz）的慢漂成分和近零频率（约 0.001Hz）的平均漂移成分。后两者主要由风荷载和二阶差频波浪力驱动。横荡和横摇响应相对较小，反映了来浪方向与平台对称轴夹角的影响[4]。对比风浪联合工况与纯波浪工况的响应差异，联合工况下纵荡响应有义值增大约 32%，纵摇响应有义值增大约 18%，充分体现了风荷载对平台运动的显著增强效应。

4.3 关键参数影响规律

风速影响方面，当风速从 15m/s 增至 35m/s 时，纵荡平均值从 0.85m 增至 3.20m，近似与风速平方成正比，符合风力公式的物理规律。纵荡有义值从 1.18m 增至 4.52m，增幅更为显著，表明脉动风对平台慢漂运动的激发随平均风速增大而增强。风荷载对低频运动的贡献在高速风条件下起主导作用。波浪参数影响方面，有义波高从 2.5m 增至 6.5m 时，垂荡有义值从 0.22m 增至 0.78m，近乎线性增长，反映了波浪荷载与波高的线性关系。谱峰周期偏离平台固有周期时响应减小，接近时响应显著增大，平台垂荡固有周期约为 5.6s，当谱峰周期接近此值时垂荡响应可增大近一倍，设计中应避免平台固有频率与典型波浪谱峰频率过于接近。

结束语

本文建立了基于时域运动方程的数值分析模型，系统研究了风浪联合作用对小型海洋平台六自由度运动的影响规律。研究发现，风荷载主导平台的漂移量和低频慢漂运动，波浪荷载主导振荡幅值，联合作用下的运动响应呈现非线性增强效应。风速对纵荡响应的影响近似与风速平方成正比，有义波高对垂荡响应近乎线性影响，谱峰周期与平台固有周期的接近程度是决定共振响应的关键因素。本文揭示的规律可为小型平台结构设计、系泊配置及作业决策提供理论依据。后续可进一步开展模型试验验证，引入运动对荷载的实时耦合反馈，拓展至多平台阵列的波浪干涉效应研究。

参考文献

[1] 高虎山, 唐文献, 陈德开, 等. 多种副浮筒结构半潜式海洋平台运动响应分析 [J]. 舰船科学技术,2024,46(9):93-98.

[2] 陈悦. 基于数值分析的半潜式海洋平台结构强度计算 [J]. 机电信息，2024(2)：44-47.

[3] 雷林, 李文杰, 季孟洁. 海洋浮式平台复杂运动响应数值模拟研究 [J]. 中国水运,2025(4):33-35.

[4] 洪华斌, 牛一诺, 俞涵, 等. 风浪流联合作用下海上风电单桩基础稳定性分析 [J]. 科技通报,2025,41(11):37-42.