

引用格式: 庄杰敏, 王洪庆, 付登峰, 等. 可移动自升式桩靴基础平台研究进展 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 1-12. ZHUANG Jiemin, WANG Hongqing, FU Dengfeng, et al. Research progress on spudcan foundation of movable jack-up platforms [J]. Southern energy construction, 2025, 12(5): 1-12. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-343.

可移动自升式桩靴基础平台研究进展

庄杰敏^{1,✉}, 王洪庆¹, 付登峰², 郑荣坤¹, 陈珂¹, 徐璐¹

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: [目的]可移动自升式平台近年来广泛应用于各类海洋工程。随着工程建设往深远海发展,更复杂的海洋环境条件对平台桩靴基础结构的承载性能提出严峻的挑战。为了应对这些挑战,需要对国内外的研究方法和成果进行汇总和分析,以寻求更有效的解决方案。[方法]文章介绍了桩靴基础承载力的常用分析方法与研究现状,并对桩靴贯入分析、在位承载性能、基础变形稳定性等关键设计理论的研究现状进行阐述。[结果]针对自升式平台桩靴贯入研究,目前一般采用离心机实验或大变形数值模拟方法,而数值模拟方法可以更高效、低成本地模拟桩靴贯入过程,但准确性仍需提升;桩靴基础在位承载性能研究主要集中在理想地质条件下的承载力破坏包络面分析,未能充分考虑其他复杂地质条件的影响;桩靴基础变形稳定性研究相对较少,短期平台承受的环境荷载主要借鉴其它工程的经验,长期荷载研究主要集中在桩靴基础的沉降变形和土体固结效应对基础竖向承载力的影响;对于自升式平台刚度的研究多依赖于理论模型和简化假设,忽略了复杂的海洋环境和结构非线性效应,导致模型精度不足,且研究多集中在平台的整体刚度,而忽略了局部刚度的影响。[结论]目前自升式桩靴基础平台关键技术研究仍存在诸多问题。针对桩靴贯入,可以通过优化模型参数提高模拟的精度和效率;针对桩靴基础在位承载性能,应在研究中引入更多地质条件的变量,同时寻求更为合适的加载方式及复合极限承载力界定方法,以科学、准确地评估桩靴基础的综合承载性能;针对桩靴变形稳定性研究,应加强非线性刚度的研究,采用更接近实际工况的刚度简化假设和土体模型全面评估平台的刚度特性。

关键词: 海洋工程; 钻井平台; 海上风电; 可移动自升式平台; 桩靴基础结构

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-343

文章编号: 2095-8676(2025)05-0001-12

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-343

中图分类号: TK89; P751



论文二维码

Research Progress on Spudcan Foundation of Movable Jack-up Platforms

ZHUANG Jiemin^{1,✉}, WANG Hongqing¹, FU Dengfeng², ZHENG Rongkun¹, CHEN Ke¹, XU Lu¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., LTD., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. Ocean University of China College of Environmental Science and Engineering, Qingdao 266100, Shandong China)

Abstract: [Objective] Movable jack-up platforms have been widely used in various types of marine engineering in recent years. With the development of engineering construction to the deep and distant sea, more complex marine environmental conditions pose significant challenges to the bearing performance of platform's spudcan foundation structure. To cope with these challenges, it is necessary to summarize and analyze research methods and results at home and abroad to seek more effective solutions. [Method] This paper introduced the common analytical methods and research status of spudcan foundation bearing capacity, and elaborated on the current research status of key design theories such as spudcan penetration analysis, in-situ bearing performance and foundation deformation stability. [Result] For the research on spudcan penetration of jack-up platform, centrifuge experiments or large deformation numerical

收稿日期: 2024-10-11 修回日期: 2024-12-22

基金项目: 广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(粤自然资合[2022]25)

simulation methods are generally employed at present. On the one hand, numerical simulation method can simulate the spudcan penetration process more efficiently and cost-effectively, but the accuracy still needs to be improved. The study on the in-situ bearing performance of spudcan foundation mainly focuses on the analysis of the damage envelope of the bearing capacity under ideal geological conditions, and fails to fully consider the influence of other complex geological conditions. The study on the deformation stability of the spudcan foundation is scarce, and the short-term environmental load of the platform is mainly based on the experience of other projects, while the study on the long-term load mainly focuses on the settlement deformation of the spudcan foundation and the influence of the consolidation effect of the soil on the vertical bearing capacity of the foundation. The study on the stiffness of the jack-up platform relies on the theoretical model and simplified assumptions, ignoring the complex marine environment and structural nonlinear effects, resulting in insufficient model accuracy, and the research mostly focuses on the overall stiffness of the platform, ignoring the influence of local stiffness. **[Conclusion]** At present, there are still many problems in the key technology research of spudcan foundation of movable jack-up platforms. For spudcan penetration, the simulation accuracy and efficiency can be improved by optimizing the model parameters; for the in-situ bearing performance of the spudcan foundation, more variables of the geological conditions should be introduced into the study, and at the same time, more suitable loading methods and composite limit bearing capacity definition methods should be sought to scientifically and accurately assess the overall bearing capacity of the spudcan foundation. For the study of spudcan deformation stability, research should strengthen the investigation of nonlinear stiffness, using stiffness simplifications and soil models that closely resemble actual working conditions to comprehensively evaluate the stiffness characteristics of the platform.

Key words: marine engineering; drilling platform; offshore wind power; movable jack-up platform; spudcan foundation structure.

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

步入二十一世纪,海洋建设在国家经济发展与对外开放中扮演着愈发关键的角色。当前,海洋经济正逐步成为国民经济的新增长点,而加快建设海洋强国也成为了当代中国的一项重大战略使命。我国海域辽阔且资源富饶,海底蕴藏着丰富的油气资源。为此,我国在渤海、南海等海域建设了众多钻井平台,进行深入探索与开发,旨在满足日益增长的石油资源需求。随着能源开发的深入,作业范围也由浅海区向近海深水区不断推进。近海海域的钻井平台类型多样,包括自升式、固定式(导管架平台)等,如图 1 所示。其中,导管架平台存在不能回收重复利用、下部桩基础插桩深度较大、具备一定安装难度等缺点,而自升式平台具备钢材需求少、成本低、适应多种海况、移动性强、作业平稳便捷等优势,被广泛应用于近海油气勘探钻井及风电设施安装维修等海洋工程^[1]。

我国海上风电起步较晚,但发展迅速,已经成为全球海上风电市场的重要组成部分,这也带动了可移动自升式平台的技术发展。可移动自升式平台在前期主要应用于海上风电的安装及维修等短期工作,随着海上风电场离岸距离越来越远,海况越来越复

杂,对运维设备和技术的要求也越来越高。自升式平台也开始由传统的短期工作平台向长期服役的生产平台发展。这对自升式平台的各项承载性能提出了更高的要求,传统的桩基础已不足以支持其在整个运行周期的运用。而随着海工技术的发展,为了进一步提升自升式平台的基础承载性能及稳定性,基础类型逐渐由传统的桩基础发展成为在桩底部安



图 1 自升式平台

Fig. 1 Jack-up platforms

装1个扩大头或“靴子”的桩靴基础。随着时间的推移,桩靴基础的设计和施工技术不断改进,使其能够适应各种不同的复杂地质条件。相比于传统的桩基础,桩靴基础有以下优势:

1)提高承载性能:桩靴基础能够有效增加桩底的承载面积,显著提高桩基的承载能力,这种承载力的提升主要来源于桩靴结构使基础与土体接触面积增加以提高承载反作用力,使桩基能够在较大荷载下保持稳定。

2)抗震性能提升:在地震多发地区,桩靴基础表现出优异的抗震性能。桩靴基础能够更好地分散和吸收地震能量,减少地震对桩基的冲击力,从而提高建筑物的整体抗震性能。同时桩靴的设计使得桩基在地震作用下能够更均匀地分布应力,降低桩体破坏的风险。

3)适应复杂地质条件:桩靴基础在复杂海床条件下具有更好的适应性。例如,在软土或泥沙质海床上,桩靴基础能够更有效地分散荷载,减少沉降和位移,减少后续维护和加固的需求,这在长期运行成本方面具有显著优势。

4)成本更低:桩靴基础的设计和施工更加高效,能够显著降低施工成本。传统的桩基础通常需要深度打入海床,以确保足够的稳定性和承载力,而桩靴基础则通过在桩顶或桩尖安装“靴子”或扩大头部来增加接触面积,从而提高承载能力。这种设计可以减少打桩的深度和数量,从而节省大量的材料和施工时间。

5)环保:桩靴基础还能够减少对环境的影响。传统桩基础的施工往往需要大规模的海床扰动,可能会对海洋生态系统造成不利影响。而桩靴基础由于打桩深度较浅,施工时的海床扰动较小,有助于保护海洋环境,这也使得其在环保法规日益严格的今天更加具有经济性和可行性。

桩基础向桩靴基础的转变不仅是技术进步的体现,更是工程实际需求的结果。桩靴基础在承载能力、抗震性能、环境适应性、经济性以及减少环境影响等方面,相对于传统桩基础都有显著的优势。这使得桩靴基础在海洋工程中越来越受到青睐,并在实际应用中展现出巨大的潜力和优势。目前,涉及自升式平台桩靴基础设计的关键技术主要包括桩靴贯入、在位承载性能、基础变形稳定性。本文针对

以上问题,系统地梳理桩靴设计过程中涉及的关键技术及研究现状。

1 桩靴基础结构及工作原理

早期的自升式平台一般设置3条桩腿,配备有辅助推进装置,整体尺度较小。这种结构的优势在于结构简单,安装和拆卸方便,适用于较小的工程项目。然而,随着工程规模的扩大和对安全性的要求提高,3条桩腿的结构在某些情况下可能不足以提供足够的稳定性和承载力。后经欧洲市场大力推广,逐步演变为4条桩腿乃至多条桩腿的形式,具备动力定位能力并带有推进装置。4条桩腿的工作原理是通过增加桩腿的数量和分布,使得平台在各个方向上都能够更好地承受外部作用力,从而提高整体的稳定性和安全性。多条桩腿的形式则进一步增强了这种效果,使得平台在更复杂的地质条件和更大的工程规模下也能够保持稳定。相比于3条桩腿,4条桩腿乃至多条桩腿的结构在提高稳定性和承载力方面有显著优势。这种改进不仅能够更好地分散和吸收外部作用力,还能够减少单个桩腿的负担,从而提高整个平台的耐久性和安全性。近年来受国际潮流影响,国内自升自航式服务平台的开发设计也逐渐开始发展^[2]。

可移动自升式平台主要由工作平台、桩腿以及桩靴基础等核心部件组成^[3]。工作平台一般设计为驳船式结构,依赖其固有的浮力特性,能够在海面上实现稳定的漂浮,不仅承载着工作设备,同时也为工作人员提供了1个综合性的作业与生活环境。桩腿作为平台的支撑结构,在作业期间深入海底,负责支撑上方工作平台的重量,并有效抵御海洋环境中多变的风、浪、流等荷载。平台各桩腿之间展现出卓越的机械独立性,在面对略微倾斜或不平整的海底地形时,也能确保平台维持水平状态。桩腿底部装配的桩靴基础,通常采用近似圆形或浅碟形的设计,如图2所示,其直径明显大于桩腿直径,有效直径范围一般介于6~20 m之间。桩靴基础的外部形态对桩腿的荷载分布、基础与地基土体的接触面积以及基础结构在荷载作用下的稳定性具有显著影响。桩靴的主要功能是为桩腿提供1个更大的支撑面积,同时有效保护桩腿在插入过程中免受劈裂的风险,这对于空心桩腿而言尤为重要。在桩腿贯入海底的

过程中, 桩靴还起到了引导和封堵的关键作用, 有效防止了持力层的破坏, 增强了海底地基对桩腿的反作用力, 进而提升了自升式平台的整体承载能力。此外, 桩靴的设计还有助于降低因穿刺现象导致平台倾斜的风险, 确保桩腿保持垂直状态, 从而赋予了自升式平台强大的抗倾覆能力和卓越的稳定性^[4]。

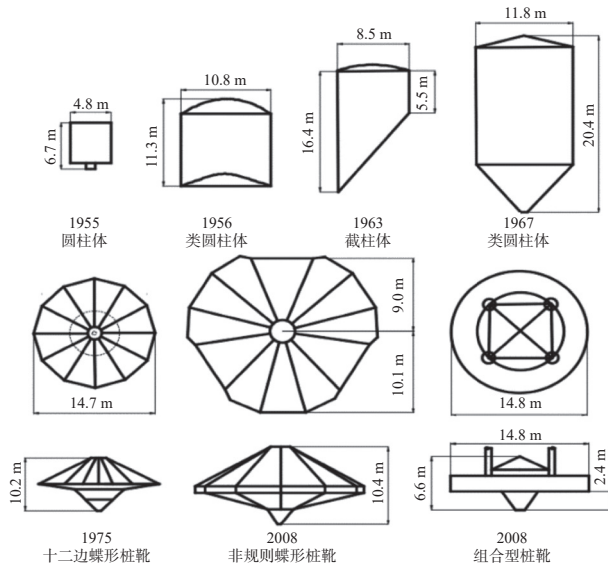


图 2 不同桩靴形式^[5]

Fig. 2 Types of spudcan

自升式平台具备自行安装的能力, 在拖航时桩腿抬升出水面, 依靠船体漂浮; 到达指定作业位置后, 首先将桩腿下沉至海床, 然后持续下放桩腿直至承载力能够使船体平台抬离水面, 随后将海水泵入船体的压载舱, 对桩靴基础进行预加载, 该预加载的目的是让基础提前承受比其作业期间更高的竖向荷载, 相当于对桩靴基础提前进行了 1 个“安全测试”。通常情况下总预压荷载(即自升式平台自重加海水的重量)的大小是自升式平台自重的 1.3~2 倍。在平台正式作业前压载舱会被清空; 自升式平台还具备可重复作业的能力, 在回收时通过拉动桩腿将桩靴拔出海床, 此时船体部分没入水中提供浮力, 之后利用托航船将自升式桩靴基础平台运回港口, 整体流程如图 3 所示。

2 桩靴基础设计理论研究现状

2.1 桩靴贯入分析

目前, 桩靴基础的承载力常用分析方法主要有 3 种: 理论解析法、物理模型试验方法及数值模拟

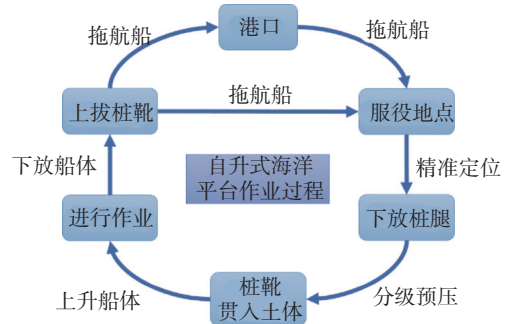


图 3 自升式平台作业过程

Fig. 3 Operating process at jack-up platforms

方法。

在理论解析方面, Houlsby 等^[6]基于上限应变理论, 将饱和软黏土简化为刚塑性材料, 研究了桩靴锥角、界面粗糙度、基础埋深及土体非均匀程度对基础承载力的影响, 在此基础上给出了 ISO 19905-1 规范^[7]中推荐的竖向承载力因子取值表, 该方法不考虑土体自重及基础上方的土体回流情况, 计算结果偏保守, 采用该理论分析方法得到的是桩靴基础竖向承载力的下限解。Hossain 等^[8-9]通过对桩靴在软黏土中贯入的有限元模拟结果进行拟合, 考虑不同贯入阶段土体破坏机制的演变, 提出了考虑土体强度非线性、基础界面粗糙度、土体灵敏度和塑性参数的桩靴基础承载力计算公式。

物理模型试验法以离心机试验为主, 通常结合数值模拟方法, 利用 Abaqus、Ansys 及 Plaxis 等有限元软件进行模拟对比研究。Hossain 等^[10-11]利用粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)与离心机试验相结合, 通过在透明有机玻璃箱体开展半桩靴模型试验, 成功揭示了在均质和非均质软黏土中桩靴贯入时的土体流动机理及承载力变化情况; 王冬石^[12]建立了 1 套大尺寸矩形桩靴离心机试验系统, 采用双面有机玻璃模型箱, 开发出 1 套插桩承载力试验测试系统, 利用 PIV 技术分析矩形桩靴在高岭黏土和粉质黏土贯入试验中长短边土体回流区别, 分析土体敏感性等参数对空腔形成、土体回流机理的影响。沈晓鹏等^[13]采用六边形桩靴模型, 按照 1:100 比尺开展离心模型试验, 对桩靴在经压载固结及离心场固结后的高岭土, 进行了贯入实验, 测得其贯入阻力曲线。

然而, 离心机试验对试验设备的要求十分严格, 并且试验成本较高。在实际工程中进行桩靴基础的

承载力设计时还需要寻求更便捷、高效的方法。为此,实际工程中更倾向于利用数值模拟方法研究桩靴贯入的全过程。

桩靴贯入数值模拟的研究,是1个由小变形模拟逐步向大变形模拟发展的过程,张浦阳等^[14]采用小变形数值分析方法模拟了桩靴在上硬下软黏土层中贯入的过程,对桩靴竖向承载特性开展了相关研究。结果表明,当桩靴贯入时,基础土体变形太大,容易导致网格发生畸变,从而使计算结果不够精确。并且为了确定不同埋深处桩靴的竖向承载力,还需要采用分层预埋的方式进行分析。可见小变形数值分析方法无法简单地反映桩靴连续贯入过程中土体真实的流动状态。Zhang等^[15]采用RITSS大变形数值分析方法模拟了桩靴在单一黏土层中贯入的情况,并将数值分析结果与采用传统的小变形方法获取的结果进行对比。结果表明,在桩靴深贯入阶段,RITSS大变形数值分析结果与小变形数值分析结果之间存在显著差异,可见采用大变形分析方法研究桩靴深贯入过程竖向承载特性是非常有必要的。而随着数值模拟技术的不断进步与深化应用,为了更精确、高效地模拟桩靴贯入全过程基础土体的复杂运动状态,国内外众多学者开始倾向于采用耦合欧拉-拉格朗日(Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)分析方法进行桩靴贯入全过程数值模拟研究。这一方法充分利用了欧拉单元允许材料在网格中自由流动的独特优势,有效克服了传统小变形数值分析方法中因网格畸变而导致计算中断或失真的问题。通过CEL方法,能够更真实、更全面地模拟桩靴在贯入过程中的各种复杂动态行为,为海工领域的桩靴基础设计与施工提供了更为可靠的数值分析手段^[16],不少学者利用CEL方法对桩靴贯入这一课题进行了大量的研究。Tho等^[17]采用CEL有限元大变形法模拟桩靴在单层黏土和双层黏土中贯入的过程,对桩靴贯入模拟时的模型网格密度、桩靴贯入速度及其它影响仿真时间的因素进行研究,给出上述影响因素的建议取值,为建模过程中的参数选取提供参考;同时将数值模拟的结果与土工离心机试验结果进行对比,验证了CEL方法的可行性;Zheng等^[18-19]基于CEL大变形有限元法对桩靴在硬-软-硬3层黏土地基中的贯入过程进行了数值模拟,研究不同土层厚度、强度比、归一化强度和强度非均匀性对桩

靴贯入的影响,将模拟的结果和土工离心机试验结果进行对比,表明CEL方法能够与试验结果较好吻合;之后采用改进的Tresca本构模型,研究了上硬下软黏土层中土层强度比、土层相对厚度、下层土强度非均匀性对桩靴贯入的影响,并提出了1种上硬下软黏土层中桩靴贯入阻力的预测方法,并在之后用同样的方式提出了预测硬-软-硬3层黏土中桩靴贯入阻力的方法。Qiu等^[20]采用CEL有限元大变形法模拟桩靴的贯入过程,并将分析结果与试验法、数值分析LDFE法、解析法计算结果进行对比,验证了CEL方法的可行性;焦钰祺等^[21]采用CEL有限元大变形法模拟了桩靴基础在结构性软黏土中贯入的全过程,研究了土体灵敏度、土体应变软化参数及土体脆性参数对桩靴贯入阻力的影响。戴笑如等^[22]通过研究网格尺寸、网格加密区域及桩靴贯入速率等因素对CEL数值分析结果的影响,给出上述影响因素的建议取值,为建模过程中的参数选取提供参考。范庆来等^[23]采用CEL方法,模拟了桩靴基础在上砂下黏和上硬下软黏土地基中的贯入过程,分析黏土软化特性对桩靴贯入阻力的影响,结果表明上层硬黏土层的软化特性会降低桩靴贯入过程中发生穿刺破坏的风险。张其一,李晓武^[24]采用CEL法进行大变形有限元分析,分析桩靴周围土体的塑性变形演变规律,研究土体的破坏机理,最后得到的桩靴峰值贯入阻力上限解与离心机试验对比误差在18%以内,且当桩靴阻力达到峰值时,桩靴带入下层软黏土的土塞高度约为桩靴直径的0.2倍。孔秋平^[25]基于耦合欧拉-拉格朗日法,模拟桩靴基础在“砂-黏”地层中的贯入过程,对桩靴贯入阻力进行了参数分析。潘泽华^[26]利用CEL大变形有限元法模拟了桩靴在常见海床地质条件下的安装沉放过程,分析了沉放贯入机理的差异性。结果表明,桩靴在沉放过程中,土体流动机制和贯入阻力受海床土体特性影响较大,受桩靴的界面粗糙度影响较小。通过与现行ISO设计规范计算结果结合,相互验证了CEL方法以及规范理论解的准确性,为桩靴沉放贯入插桩深度预测和穿刺风险评估提供设计依据。

综合以上研究可知,现有离心机实验和数值模拟方法在研究桩靴贯入中的应用各有优势和不足。离心机实验能够更大程度还原桩靴在海底条件下的贯入过程,通过对桩靴在不同贯入深度、速度和土体

条件下的阻力变化进行测量,但受限于实验设备的精度和成本,实验结果的一致性和可靠性也会受到一定影响。因此采用数值模拟方法,尤其是基于耦合欧拉-拉格朗日(CEL)方法的数值模拟,可以更高效、低成本地模拟桩靴贯入过程中土体的复杂动态行为,并克服传统小变形分析中的网格畸变问题,然而在模拟多层土体和复杂土质条件时,准确性仍需提升。为改进这些不足,可以通过优化模型参数,结合实验数据校验,以提高模拟的精度和效率,例如采取更合适的本构以还原更真实的土体特性,如采用NGI-ADP模型、MCC模型以及HSS模型模拟基础土体;或通过有限元软件与二次开发的结合,例如可以考虑砂土内摩擦角、剪胀角和弹性模量变化的MMC模型和可以考虑黏土应变软化效应和率效应的Einav&Randolph应变软化模型^[27],进一步再现基础土体的特性,从而为桩靴基础的设计与施工提供更可靠的数据支持。

2.2 桩靴在位承载性能研究

桩靴基础的在位承载力决定了整个自升式桩靴基础平台抵抗极端风暴荷载的地基极限能力,是桩靴基础岩土设计中必不可缺的1个环节。平台通过桩腿将荷载作用传递至底部桩靴形成“竖向力(V)-水平力(H)-弯矩(M)”多向复合荷载^[28],如图4所示。桩靴基础在复合加载情况下,地基达到整体破坏或极限平衡状态时,其荷载组合在三维荷载空间(H-V-M)中形成的1个“橄榄球形”的三维破坏包络面^[29]。桩靴基础需要具备足够的复合承载性能,以确保自升式平台在极端工况条件下具备抵抗复合荷载的能力。对于自升式平台桩靴基础的承载力包络面计算,国内外已经有不少学者开展了相关研究:

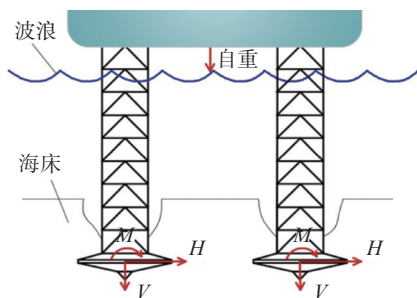


图4 桩靴基础受力情况

Fig. 4 The forces on spudcan foundation

Zhang等^[14]分析了正常固结黏土中深埋桩靴的

承载力破坏包络面,并提出了适用于浅埋桩靴基础和多种埋深的破坏包络面预测公式,从而较好地解决了埋深对桩靴基础承载力的影响问题。Zhang等^[30-31]利用小变形有限元分析、大变形有限元分析和离心机试验等方法,分别获得了正常固结黏土中深预埋桩靴基础的复合承载力失效包络面,并提出了相应的承载力包络面拟合公式。Templeton^[32]运用有限元方法对低强度软黏土中的桩靴基础复合承载力进行了研究,提出了适用于软黏土地基中深埋桩靴的复合承载力包络面预测公式,但该公式不适用硬黏土地基或浅埋桩靴。Martin等^[33]总结了近年来关于黏土地基中桩靴基础承载力包络面的离心机实验和理论研究,提出了适用于浅埋桩靴基础的地基失效模型,并通过固定位移比加载方法,得出桩靴基础在竖向力、水平力和弯矩荷载组合作用下的橄榄球形承载力包络面。Vulpe等^[34]采用小变形有限元分析方法,研究了正常固结黏土和均质黏土中多向复合荷载作用下裙式桩靴基础的承载力,并与常规桩靴基础进行比较,发现裙式桩靴显著提高了桩靴基础的水平和弯矩承载力,有助于自升式钻井平台抵御水平荷载。Cheng等^[35]通过离心机试验,研究了松砂中多向复合荷载作用下桩靴基础的承载力,并通过“Swipe”试验得到了桩靴基础的承载力失效包络面,将平板基础的承载力失效包络面公式修正为适用于桩靴基础的公式。Hu等^[36]利用离心机模型试验,研究了砂土覆盖黏土的土层中,预埋在黏土层中的桩靴基础的多向承载力。结果表明,桩靴基础的承载力失效包络面比单一黏土层中的更大,主要是由于桩靴基础从砂层贯入黏土层过程中形成了土塞,提升了桩靴基础的承载力。张浦阳等^[37]详细分析了筒型桩靴和传统桩靴装配平台的受力性能,研究了不同桩靴型式对桩腿刚度和平台整体承载能力的影响。通过Swipe和固定位移比加载方法,绘制了多向复合荷载组合下桩靴基础的各向复合承载力破坏包络面。陈洋彬^[38]运用小变形有限元分析方法,探讨了单层弱超固结黏土中桩靴上部孔洞对基础承载力的影响,并提出了相应的包络面预测公式。马思琪^[39]利用ABAQUS软件,考虑土质、附加构件、埋深、荷载组合及方向等因素,分析了黏土地基中桩靴基础的极限承载力,阐明了各因素对承载力破坏包络面的影响。

然而这些研究主要集中在桩靴基础在理想地质条件(如软黏土、正常固结黏土、砂土等)下的承载力破坏包络面,未能充分考虑其他复杂地质条件(如砂土覆盖软黏土或硬黏土覆盖软黏土)的影响。为了改进这些不足,可以通过进一步增加实验和有限元分析工况,综合考虑硬黏土地基或浅埋桩靴的特性,改进预测公式的精度和适用性,并在研究中引入更多种类的荷载组合,模拟实际工况下桩靴基础承受的多向荷载影响,通过比较不同类型桩靴基础的性能,开发适用于多种桩靴基础的通用预测模型,并引入更多地质条件的变量,分析复杂地质条件对桩靴基础承载力的影响,开展针对复杂地质条件下桩靴基础承载力的实验和数值模拟,从而更全面、准确地预测桩靴基础在各种复杂工况下的综合承载性能。

2.3 桩靴基础变形稳定性研究

桩靴基础变形稳定性主要包含两部分内容:一是在短期或者长期荷载作用下,桩靴基础平台的沉降尤其是各独立桩靴的差异性沉降,导致自升式平台存在整体发生失稳变形的风险;二是桩靴基础周围土体对其在位刚度的影响,在长期的荷载之下,桩靴基础结构测可能发生疲劳破坏

1) 桩靴基础在长短期荷载下的变形研究

在复杂的海洋环境中,自升式平台在服役时不仅要承受自重及设备的长期竖向荷载,还会面临风、浪、流等环境因素的多向荷载作用。由于桩靴贯入海底是1个不排水的过程,导致其下方产生大量超孔隙水压力,进入长期工作阶段后,这些压力逐渐消散至正常水平,并由土骨架承受,随着固结的进行,土体的有效应力增加,导致土体挤压变形和一定程度的沉降。如果各桩腿沉降不均,会引起上部结构变形,影响平台的功能性和系统正常运行。同时,平台还需在服役期间抵抗极端风暴荷载的影响。因此,为保障建造平台桩靴基础具有可靠的变形控制能力,并确保平台在风暴期间的安全稳定运行,需要对桩靴基础土体短期(作用于桩靴基础的瞬时荷载)及长期(由于固结效应导致的长期沉降)变形特性进行研究。

自升式平台短期可能遭受的瞬时荷载主要为环境荷载,包含风荷载、波浪荷载和海流荷载,具体如表1所示。

长期荷载作用下桩靴基础的沉降变形,与土体

固结效应对基础竖向承载力的影响相关。目前,现行规范尚未充分考虑固结效应对桩靴承载力的影响。部分学者已进行相关研究,探讨长期工作状态下桩靴因固结作用引起的沉降和承载力变化。Purwana等^[45]通过离心机试验模拟桩靴在正常固结黏土中的安装、工作及拆除过程,分为贯入-卸载-固结-再贯入-拔出5个阶段,研究固结效应对桩靴抗拔承载力的影响。实验结果表明,固结再贯入后桩靴的贯入阻力显著增加。Li等^[46]利用Abaqus有限元软件进行小变形模拟,构建二维平面应变模型研究固结阶段的桩靴沉降问题。由于小变形模拟无法完全再现桩靴的贯入过程,为了反映贯入后土体的应力和塑性状态,桩靴被预埋在距离目标深度1.5 m的位置,然后向下贯入至目标深度。模拟结果显示,不同荷载比例对固结沉降的影响大于深度的影响。邱子瞻^[47]深入研究了桩靴基础的长期沉降及刚度发展,采用二阶段欧拉-拉格朗日方法模拟桩靴从安装到工作荷载下固结的全过程,并通过与离心机实验结果对比,验证了有限元方法的准确性和可行性。

自升式平台桩靴基础受到的环境荷载中,风荷载是主要控制载荷,一般通过面积投影法计算,不考虑空气动力学影响。波浪荷载分析分为设计波分析法和随机波分析法,前者采用确定性波浪理论,后者基于概率统计建立谱分析方法。海流荷载主要包括潮流和风海流,对桩腿的作用力通过莫里森方程计算,考虑波浪和水流的运动学参数、拖曳力和惯性力。借鉴于其他海洋工程的设计经验,目前对于自升式平台环境荷载的研究较为成熟。针对于自升式平台桩靴基础长期荷载作用下的响应研究则较少,主要集中在长期荷载作用下桩靴基础的沉降变形和土体固结效应对基础竖向承载力的影响。目前,现行规范尚未考虑固结因素对桩靴承载力的影响,预测公式未考虑长期荷载作用下的固结效应,部分实验模拟的工况与实际情况存在差异,未能全面覆盖各种实际工况。

2) 桩靴基础在位刚度研究

为探究自升式平台的整体响应特性,在对自升式平台进行结构分析与荷载分析时,必须对桩靴基础的刚度进行科学合理的假定。常见的假定方法包括固定基础假定、铰接点基础假定、非耦合线性刚度假定以及非线性弹簧假定。其中,固定基础假定

表 1 环境荷载
Tab. 1 Environmental load

类型	成因	特点	计算方法
风荷载	在海洋环境中, 风速和风向的快速变化会对平台产生瞬时冲击, 形成风荷载	方向和变化性: 风荷载具有显著的方向性, 通常受到风向的影响。风速和风向的变化性较大, 尤其在台风或风暴等极端天气条件下, 风速可能会突然增加, 对平台造成较大的瞬时冲击。 动态特性: 风荷载是动态的, 它会产生周期性和随机性的波动, 导致结构物的振动和摆动。风荷载对结构的影响不仅仅是静态力, 还包括动能效应, 需要进行动态响应分析。 高度依赖性: 风速随高度增加而变化, 称为风速梯度效应。自升式平台的不同高度部分会受到不同大小的风荷载, 需要综合考虑平台整体的受力情况。 频谱特性: 风速的能量在不同频率范围内分布。频谱分析有助于了解不同频率的风对结构物的综合影响, 从而优化结构设计以抗击多频率风荷载。 区域和季节性差异: 风荷载的特征在不同地理区域和季节之间差异显著。例如, 热带地区的季风和台风带来的风荷载与温带地区的风暴荷载不同。设计时需考虑区域和季节性风荷载的差异。 极端性: 在极端天气条件下, 如台风、飓风等, 风荷载会急剧增加, 产生极大的冲击力和破坏力, 对结构的防风设计提出了更高要求。	风荷载是桩靴基础所受环境荷载的主要控制荷载^[40]。其主要由两部分组成: 一是桩腿的风荷载, 二是平台主体、上层建筑、升降机构等的风荷载。现行规范计算风荷载时, 主要采用面积投影法^[41], 风速区分根据高度系数确定, 不考虑空气动力学(尤其是遮蔽效应)的影响^[42]。
		周期性和波动性: 波浪荷载具有显著的周期性, 表现为波浪的周期性升高和降低, 对平台产生周期性的推力和压力变化。这种特性会引起平台的周期性振动, 需要设计结构具有足够的动态响应能力。 随机性和不确定性: 海洋环境中的波浪是随机和不规则的, 波高、波长、波周期等参数具有较大的变异性。这种不确定性增加了结构设计的复杂性, 需要采用统计方法和随机过程理论进行分析。 方向性: 波浪荷载的方向性明显, 主要受风向、海流等因素影响。波浪在不同方向上的作用力不同, 需要在设计中考虑各个方向的荷载影响, 以确保结构的全方位稳定性。 动态效应: 波浪荷载对平台结构产生明显的动态效应, 包括惯性力和阻尼力等。尤其在高海况下, 波浪荷载的动态效应更加显著, 对结构疲劳寿命和稳定性有重要影响。 冲击性: 在极端海况下, 波浪对结构物的冲击力非常大, 如浪打平台腿或甲板, 可能导致局部结构的损坏或破坏。需要在设计中考虑极端波浪荷载的冲击效应, 以提高结构的抗冲击能力。 频谱特性: 波浪荷载具有频谱特性, 即波浪的能量分布在不同的频率范围内。波浪频谱分析有助于了解不同频率波浪对结构物的综合影响, 从而优化结构设计以抗击多频率波浪荷载。	对于作用于自升式平台的波浪荷载, 目前有两种分析方法: 设计波分析法(确定性波浪理论)和随机波分析方法(随机波浪理论)。设计波法就是采用合适的波浪理论对波浪响应进行描述, 例如波浪的速度势、波高、水质点的速度和加速度等, 然后根据流体力学计算波浪载荷; 随机分析方法基于统计特征建立谱分析方法, 进而考虑到实际波浪的非线性、随机性和谱性^[43]。
海流荷载	自升式平台在海洋环境中受到的海流荷载主要由风力驱动、潮汐运动、密度差异、海底地形效应、全球洋流系统以及地转效应等因素共同作用形成。对自升式平台施加持续且多方向的动态荷载。	海流主要包括潮流、风海流和环流等, 但是在流载荷中, 通常仅考虑潮流和风海流这两个部分。海流荷载主要有以下特点: 方向和速度的变化: 海流具有复杂的动态特性, 方向和速度随时间和地点不断变化。这种变化性要求平台设计时能够适应多方向、多速度的流动荷载。 周期性和持续性: 不同于瞬时风荷载或波浪荷载, 海流荷载具有一定的周期性和持续性。长期持续的海流作用会对平台结构产生累积效应, 需在设计中考虑长期影响。 流体动力效应: 海流荷载会引起平台和桩腿周围的流体动力效应, 包括涡流脱落、流体诱导振动等。这些效应会影响平台的稳定性和结构疲劳寿命。 受水深和地形影响: 海流荷载的大小和分布受水深、海床地形等因素影响显著。浅水区和深水区的海流特性差异较大, 设计时需针对不同水深条件进行优化。 与其他荷载的相互作用: 海流荷载与波浪、风等荷载相互作用, 导致综合荷载效应更为复杂。这种相互作用需要在数值模拟和物理实验中综合考虑, 以确保平台在多种环境荷载下的安全性。	自升式平台上的浪荷载以及流荷载可通过整合从自由水表面至海床深度处桩腿所受的总波浪荷载来对其进行计算。只要确立了波浪和水流的运动学参数, 就可以使用改进的莫里森(Morison)方程来计算自升式平台桩腿上的水动力荷载, 自由水表面的变化及其他非线性因素, 如以拖曳力为主的荷载和相对运动效应, 均可在时域内进行考虑^[44]。

视桩靴与基础为1个整体进行分析;铰接点基础假定则将桩靴与土体的相互作用简化为1个具有无限平移刚度但无旋转刚度的铰接点,此方法应用广泛但相对保守;非耦合弹簧假定则为每个自由度设定特定的刚度值,尽管未考虑土体的非线性力学行为,但可通过刚度折减公式进行修正。

针对桩靴在位刚度计算的问题,诸多学者采用了多种研究方法进行探讨。Vlahos等^[48]在1g环境下,通过三腿自升式平台模型的试验,模拟了软土条件下的平台工作状态,并详尽描述了各桩腿独立支承的荷载分配情况。试验显示,迎风腿的弯矩随着转角增加而增大,而背风腿的弯矩达到峰值后,刚度迅速衰减,呈现铰接状态。Wong等^[49]采用离心机试验研究了黏土中三腿桩靴基础平台模型,将泥水线处实际弯矩与理论弯矩的关系定义为桩靴固定度,并提出了计算割线模量和切线模量的方法。Dean等^[50]的离心机实验模拟了桩靴贯入后的循环水平荷载作用过程,发现慢荷载下水平荷载-位移响应存在滞后现象,桩靴受力路径近似固定约束。Zhang^[51]通过小变形有限元模拟,考虑桩靴形状、孔穴高度及土体强度分布等因素,提出了适用于桩靴基础的弹性刚度取值表格。Hambly等^[52-53]使用有限差分法,对结构与海床相互作用进行了动力分析,研究了不同海床类型下桩靴的刚度特性,归纳出弹性与塑性刚度的无量纲因子,描述了刚度与屈服面的过渡关系。

自升式平台的刚度研究在最近几年取得了显著进展,但仍存在一些不足之处。首先,现有的研究多依赖于理论模型和简化假设,忽略了复杂的海洋环境和结构非线性效应,导致模型精度不足,目前针对桩靴基础刚度的非线性刚度评估,仍未有准确的方法进行计算,还需进一步完善及发展。其次,现有的研究多集中在平台的整体刚度,而忽略了局部刚度的影响,导致对平台结构的全面评估不够全面。为了改进这些不足之处,可以从以下几个方面入手:首先,应加强海洋环境和结构非线性效应的研究,结合实际工程选取合适的刚度简化模型进行分析,并选取适合的土体模型及参数对基础刚度进行研究,这点与前述桩靴贯入研究类似;其次,还应加强对平台局部刚度的研究,全面评估平台结构的刚度特性。

3 结论

针对自升式桩靴基础平台在安装设计全过程中可能遇到的关键技术问题,通过汇总国内外研究方法及其成果发现:为应对复杂的荷载组合、多变的工作环境、深海作业及更长的服役周期等挑战,自升式桩靴基础平台的发展趋势及面临的挑战如下:

1)桩靴贯入是自升式平台设计与作业过程中的首要环节,其成功与否直接关系到平台的整体稳定性与作业安全性。近年来,桩靴贯入的研究热点主要包括对复杂地层贯入的准确模拟以及贯入时发生穿刺破坏的原因解析。目前,针对桩靴贯入的研究方法主要以离心机实验和数值模拟为主:离心机实验能够更大程度还原桩靴在海底条件下的贯入过程,但受限于实验设备的精度和成本;数值模拟方法可以更高效、低成本地模拟桩靴贯入过程中土体的复杂动态行为。然而在模拟多层土体和复杂土质条件时,准确性仍需提升。为改进这些不足,可以通过优化模型参数以提高模拟的精度和效率,例如采取更合适的本构以还原更真实的土体特性或通过有限元软件与二次开发的结合,进一步再现基础土体的特性。

2)目前,对桩靴基础平台在位承载力包络面的研究较为成熟完善,也有相对应的规范公式。现有的研究方法主要包括离心机试验进行模拟或采用有限元小变形法进行各极限荷载组合模拟,通过位移控制法或力加载法的方式,解析桩靴基础的综合承载性能。然而对于复杂分层土地质条件下桩靴基础的承载性能研究,目前尚未有准确、成熟的方法进行分析计算。在未来的研究中,可以通过在研究中引入更多地质条件的变量,寻求更为合适的加载方式以及复合极限承载力的界定方法,科学、准确地评估桩靴基础的综合承载性能。

3)自升式平台服役过程遭受的长、短期荷载是桩靴基础设计过程中不可忽视的重要因素。目前针对桩靴基础长期服役下土体固结效应导致的上部平台差异性沉降变形以及平台遭受短期环境荷载时整体结构的瞬时分析,相对于桩靴贯入和在位承载力包络面的研究较少。目前,还未有相关的规范用以分析土体固结效应对桩靴承载力和基础沉降变形的影响;短期遭受的瞬时荷载包括风浪流等这些环境荷载,均有相应的计算理论和公式,也可采用数值模

拟方法进行研究。

4) 为确定复合荷载作用下自升式平台的整体响应, 在进行桩靴基础设计时必须对基础的刚度进行假定。现有的方法包括固定基础假定、铰接点基础假定和非耦合线性刚度假定以及非线性弹簧假定。桩靴基础的在位刚度需要考虑当时准确的荷载水平以及刚度评估的复杂特性。目前, 针对桩靴基础刚度的非线性刚度评估, 仍未有准确的方法进行计算, 还需进一步完善及发展。对此, 首先应加强刚度非线性效应的研究, 采用更接近土体真实情况的模型, 这点与前述桩靴贯入研究类似, 选取适合的土体模型及参数能够更好地对基础刚度进行研究; 其次, 还应加强对平台局部刚度的研究, 采用更加细致的分析方法, 全面评估平台结构的刚度特性。

参考文献:

- [1] 张海亚, 郑晨. 海上风电安装船的发展趋势研究 [J]. *船舶工程*, 2016, 38(1): 1-7, 30. DOI: [10.13788/j.cnki.cbge.2016.01.001](https://doi.org/10.13788/j.cnki.cbge.2016.01.001).
ZHANG H Y, ZHENG C. Developing trend analysis of wind turbine installation vessel [J]. *Ship engineering*, 2016, 38(1): 1-7, 30. DOI: [10.13788/j.cnki.cbge.2016.01.001](https://doi.org/10.13788/j.cnki.cbge.2016.01.001).
- [2] 张力, 黄钺, 王洪庆, 等. 海上风电嵌岩桩水平承载力特性数值模拟研究 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(3): 34-43. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.005).
ZHANG L, HUANG Y, WANG H Q, et al. Numerical simulation research on the horizontal bearing capacity of rock-socketed piles for offshore wind turbines [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 34-43. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.005).
- [3] DEAN E T R. Offshore geotechnical engineering: principles and practice [M]. London: Thomas Telford Ltd, 2010.
- [4] 李书兆, 李亚, 鲁晓兵. 自升式钻井船插桩对邻近平台桩基影响的评价方法探讨 [J]. *海洋通报*, 2017, 36(3): 293-301. DOI: [10.11840/j.issn.1001-6392.2017.03.007](https://doi.org/10.11840/j.issn.1001-6392.2017.03.007).
LI S Z, LI Y, LU X B. Discussion of methods evaluating the effects of the jack-up spudcan penetration on the adjacent platform pile [J]. *Marine science bulletin*, 2017, 36(3): 293-301. DOI: [10.11840/j.issn.1001-6392.2017.03.007](https://doi.org/10.11840/j.issn.1001-6392.2017.03.007).
- [5] MENZIES D, ROPER R. Comparison of jackup rig spudcan penetration methods in clay [C]// Anon. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 5-8, 2008. Houston: OTC, 2008. DOI: [10.4043/19545-MS](https://doi.org/10.4043/19545-MS).
- [6] HOULSBY G T, MARTIN C M. Undrained bearing capacity factors for conical footings on clay [J]. *Géotechnique*, 2003, 53(5): 513-520. DOI: [10.1680/geot.2003.53.5.513](https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.5.513).
- [7] International Organization for Standardization. Petroleum and natural gas industries — site-specific assessment of mobile offshore units (Part 1: Jack-ups): ISO 19905-1: 2012 [S]. 2012.
- [8] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F. Effect of strain rate and strain softening on the penetration resistance of spudcan foundations on clay [J]. *International journal of geomechanics*, 2009, 9(3): 122-132. DOI: [10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2009\)9:3\(122\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2009)9:3(122)).
- [9] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F. SS: jack-up rig technology-new mechanism-based design approach for spudcan foundations on stiff-over-soft clay [C]// Anon. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 4-7, 2009. Houston: OTC, 2009. DOI: [10.4043/19907-MS](https://doi.org/10.4043/19907-MS).
- [10] HOSSAIN M S, HU Y, RANDOLPH M F, et al. Limiting cavity depth for spudcan foundations penetrating clay [J]. *Géotechnique*, 2005, 55(9): 679-690. DOI: [10.1680/geot.2005.55.9.679](https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.9.679).
- [11] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F, HU Y, et al. Cavity stability and bearing capacity of spudcan foundations on clay [C]// Anon. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 1-4, 2006. Houston: OTC, 2006. DOI: [10.4043/17770-MS](https://doi.org/10.4043/17770-MS).
- [12] 王冬石. 大尺寸矩形桩靴在黏土中贯入的穿刺风险及工程应用研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023. DOI: [10.27643/d.cnki.gsybu.2023.001388](https://doi.org/10.27643/d.cnki.gsybu.2023.001388).
WANG D S. Research on the piercing risk of large-size rectangular pile boots penetrating into clay and its engineering application [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023. DOI: [10.27643/d.cnki.gsybu.2023.001388](https://doi.org/10.27643/d.cnki.gsybu.2023.001388).
- [13] 沈晓鹏, 李书兆, 李伟, 等. 桩靴插桩动力过程的数值模拟方法研究 [J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(增刊 2): 208-213. DOI: [10.11779/CJGE2023S20029](https://doi.org/10.11779/CJGE2023S20029).
SHEN X P, LI S Z, LI W, et al. Numerical simulation method for dynamic process of spudcan penetration [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2023, 45(Suppl.2): 208-213. DOI: [10.11779/CJGE2023S20029](https://doi.org/10.11779/CJGE2023S20029).
- [14] 张浦阳, 于晓洋, 丁红岩. 海上自升式钻井平台插桩阶段桩靴承载力计算 [J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(5): 613-619. DOI: [10.1016/S1876-3804\(11\)60060-8](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(11)60060-8).
ZHANG P Y, YU X Y, DING H Y. Spudcan bearing capacity calculation of the offshore jack-up drilling platform during the preloading process [J]. *Petroleum exploration and development*, 2011, 38(5): 613-619. DOI: [10.1016/S1876-3804\(11\)60060-8](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(11)60060-8).
- [15] ZHANG Y H, WANG D, CASSIDY M J, et al. Effect of installation on the bearing capacity of a spudcan under combined loading in soft clay [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2014, 140(7): 04014029. DOI: [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001126](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001126).
- [16] QIU G, HENKE S, GRABE J. Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations [J]. *Computers and geotechnics*, 2011, 38(1): 30-39. DOI: [10.1016/j.compgeo.2010.09.002](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.09.002).
- [17] THO K K, LEUNG C F, CHOW Y K, et al. Eulerian finite-element technique for analysis of jack-up spudcan penetration [J].

- International journal of geomechanics, 2012, 12(1): 64-73. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000111.
- [18] ZHENG J, HOSSAIN M S, WANG D. Prediction of spudcan penetration resistance profile in stiff-over-soft clays [J]. Canadian geotechnical journal, 2016, 53(12): 1978-1990. DOI: 10.1139/cgj-2015-0339.
- [19] ZHENG J B, HOSSAIN M S, WANG D. Estimating spudcan penetration resistance in stiff-soft-stiff clay [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2018, 144(3): 04018001. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001820.
- [20] QIU G, GRABE J. Numerical investigation of bearing capacity due to spudcan penetration in sand overlying clay [J]. Canadian geotechnical journal, 2012, 49(12): 1393-1407. DOI: 10.1139/t2012-085.
- [21] 焦钰祺, 贺林林, 梁越, 等. 考虑结构性黏土应变软化效应的桩靴竖向承载特性研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1374-1382. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1420.
- JIAO Y Q, HE L L, LIANG Y, et al. Study of vertical bearing capacity of spudcan foundations considering strain-softening effect of structured clay [J]. Rock and soil mechanics, 2022, 43(5): 1374-1382. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1420.
- [22] 戴笑如, 王建华, 范怡飞. 钻井船插桩 CEL 数值模拟中的若干问题分析 [J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2278-2286. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2142.
- DAI X R, WANG J H, FAN Y F. Issues of numerical simulation of the spudcan penetration based on CEL method [J]. Rock and soil mechanics, 2018, 39(6): 2278-2286. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2142.
- [23] 范庆来, 苏煜茹, 张炳磊. 双层地基中纺锤形桩靴基础贯入阻力及机理分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2): 452-459. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2020.02.018.
- FAN Q L, SU Y R, ZHANG B L. Analyses of penetration resistance and mechanism of spudcan foundations in double-layered soil [J]. Journal of basic science and engineering, 2020, 28(2): 452-459. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2020.02.018.
- [24] 张其一, 李晓武. 黏土地基上海洋平台桩靴峰值阻力上限分析 [J]. 海洋工程, 2023, 41(1): 29-38. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2023.01.004.
- ZHANG Q Y, LI X W. Upper limit analysis of spudcan peak resistance of offshore platform on clay foundation [J]. The ocean engineering, 2023, 41(1): 29-38. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2023.01.004.
- [25] 孔秋平, 刘炎, 郑敬宾, 等. 新型平台桩靴在“砂-黏”地层中穿刺的数值模拟研究 [J]. 海洋工程, 2023, 41(1): 20-28. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2023.01.003.
- KONG Q P, LIU Y, ZHENG J B, et al. Prediction of peak resistance for a new type of spudcan through sand overlying clay [J]. The ocean engineering, 2023, 41(1): 20-28. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2023.01.003.
- [26] 潘泽华, 刘博, 刘东华. 可移动自升式平台的桩靴沉放安装研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(1): 48-56. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.006.
- PAN Z H, LIU B, LIU D H. Research on the penetration of spudcan foundation for mobile jack-up platform [J]. Southern energy construction, 2023, 10(1): 48-56. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.006.
- [27] CASSIDY M J, BYRNE B W, RANDOLPH M F. A comparison of the combined load behaviour of spudcan and caisson foundations on soft normally consolidated clay [J]. Géotechnique, 2004, 54(2): 91-106. DOI: 10.1680/geot.2004.54.2.91.
- [28] EINAV I, RANDOLPH M F. Combining upper bound and strain path methods for evaluating penetration resistance [J]. International journal for numerical methods in engineering, 2005, 63(14): 1991-2016. DOI: 10.1002/nme.1350.
- [29] 范庆来, 栾茂田. V-H-T 荷载空间内海上风机桶形基础破坏包络面特性分析 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(4): 113-118. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2010.04.016.
- FAN Q L, LUAN M T. Failure envelopes of bucket foundation for offshore wind turbines in V-H-T loading space [J]. China civil engineering journal, 2010, 43(4): 113-118. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2010.04.016.
- [30] ZHANG Y H, BIENEN B, CASSIDY M J, et al. The undrained bearing capacity of a spudcan foundation under combined loading in soft clay [J]. Marine structures, 2011, 24(4): 459-477. DOI: 10.1016/j.marstruc.2011.06.002.
- [31] ZHANG Y H, BIENEN B, CASSIDY M J. Development of a combined VHM loading apparatus for a geotechnical drum centrifuge [J]. International journal of physical modelling in geotechnics, 2013, 13(1): 13-30. DOI: 10.1680/ijpmg.12.00007.
- [32] TEMPLETON III J S. Jackup foundation performance in clay [C]// Anon. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 1-4, 2006. Houston: OTC, 2006. DOI: 10.4043/18367-MS.
- [33] MARTIN C M, HOULSBY G T. Combined loading of spudcan foundations on clay: laboratory tests [J]. Géotechnique, 2000, 50(4): 325-338. DOI: 10.1680/geot.2000.50.4.325.
- [34] VULPE C, BIENEN B, GAUDIN C. Predicting the undrained capacity of skirted spudcans under combined loading [J]. Ocean engineering, 2013, 74: 178-188. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2013.06.027.
- [35] CHENG N, CASSIDY M J. Combined loading capacity of spudcan footings on loose sand [J]. International journal of physical modelling in geotechnics, 2016, 16(1): 31-44. DOI: 10.1680/jphmg.15.00016.
- [36] HU P, BIENEN B, CASSIDY M J. Combined loading capacity of a spudcan in clay after penetrating through a sand layer [J]. Géotechnique letters, 2017, 7(1): 97-103. DOI: 10.1680/jgele.16.00163.
- [37] 张浦阳, 丁红岩. 海上自升式钻井平台新型筒型桩靴承载力 [J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 237-242. DOI: 10.1016/

- S1876-3804(11)60029-3.
- ZHANG P Y, DING H Y. Bearing capacity of bucket spudcan foundation for offshore jack-up drilling platform [J]. *Petroleum exploration and development*, 2011, 38(2): 237-242. DOI: 10.1016/S1876-3804(11)60029-3.
- [38] 陈洋彬, 郑敬宾, 王栋. 弱超固结黏土中桩靴贯入形成孔洞对承载力影响 [J]. *海洋工程*, 2021, 39(1): 112-120, 170. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2021.01.012.
- CHEN Y B, ZHENG J B, WANG D. Effect of cavity on the bearing capacity of spudcan foundation in lightly overconsolidated clay [J]. *The ocean engineering*, 2021, 39(1): 112-120, 170. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2021.01.012.
- [39] 马思琪. 黏土地基中海洋平台裙式桩靴基础极限承载力研究 [D]. 烟台: 鲁东大学, 2023. DOI: 10.27216/d.cnki.gysfc.2023.000527.
- MA S Q. Studies on ultimate bearing capacity of skirted spudcan foundations in clay for offshore platforms [D]. Yantai: Ludong University, 2023. DOI: 10.27216/d.cnki.gysfc.2023.000527.
- [40] 王永发, 孙震洲, 贺林林, 等. 海上升压站平移过程中自升式工作船桩靴沉降分析方法 [J]. *船舶工程*, 2022, 44(12): 149-156, 165. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2022.12.24.
- WANG Y F, SUN Z Z, HE L L, et al. Analysis method on settlement of spudcan of jack-up platform during translational of offshore substation [J]. *Ship engineering*, 2022, 44(12): 149-156, 165. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2022.12.24.
- [41] 中国船级社. 海上移动平台入级规范 [R]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- China Classification Society. Rules for the classification of offshore mobile platforms [R]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [42] 林一, 胡安康, 孙建. 自升式平台风载荷的空气动力学干扰研究 [J]. *船舶与海洋工程*, 2013, 29(2): 5-10. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4069.2013.02.002.
- LIN Y, HU A K, SUN J. Study on the aerodynamic interference of wind loads on jack-up platforms [J]. *Naval architecture and ocean engineering*, 2013, 29(2): 5-10. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4069.2013.02.002.
- [43] 樊佳. 基于设计波法的舰船整船有限元强度分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. DOI: 10.7666/d.d187649.
- FAN J. Strength analysis of overall ship FEM model based on design wave approach [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. DOI: 10.7666/d.d187649.
- [44] 徐显明. 深海自升式钻井平台静态与动态响应分析研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2017.
- XU X M. Static and dynamic response analysis research of a deepwater jack-up drilling platform [D]. Ningbo: Ningbo University, 2017.
- [45] 孙东昌, 潘斌. 海洋自升式移动平台设计与研究 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- SUN D C, PAN B. Design and research of marine jack-up mobile platform [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2008.
- [46] LI Y P, YI J T, LEE F H, et al. Effects of the lattice leg on cavities and bearing capacity of deeply embedded spudcans in clay [J]. *Géotechnique*, 2017, 67(1): 1-17. DOI: 10.1680/jgeot.15.P.014.
- [47] 邱子瞻. 固结作用下桩靴基础长期沉降与刚度发展规律研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2020.001056.
- QIU Z Z. Study on long-term settlement and stiffness development of spudcan foundation under consolidation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2020.001056.
- [48] VLAHOS G, MARTIN C M, PRIOR M S, et al. Development of a model jack-up unit for the study of soil-structure interaction on clay [J]. *International journal of physical modelling in geotechnics*, 2005, 5(2): 31-48. DOI: 10.1680/ijpmg.2005.050203.
- [49] WONA P C, CHAO J C, MURFF J D, et al. Jackup rig foundation modeling II [C]// Anon. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 3-6, 1993. Houston: OTC, 1993. DOI: 10.4043/7303-MS.
- [50] DEAN E T R, JAMES R G, SCHOFIELD A N, et al. Drum centrifuge study of three-leg jackup models on clay [J]. *Géotechnique*, 1998, 48(6): 761-785. DOI: 10.1680/geot.1998.48.6.761.
- [51] ZHANG Y H, CASSIDY M J, BIENEN B. Elastic stiffness coefficients for an embedded spudcan in clay [J]. *Computers and geotechnics*, 2012, 42: 89-97. DOI: 10.1016/j.compgeo.2011.12.011.
- [52] HAMBLY E C, IMM G R, STAHL B. Jackup performance and foundation fixity under developing storm conditions [C]// Anon. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 7-10, 1990. Houston: OTC, 1990. DOI: 10.4043/6466-MS.
- [53] HAMBLY E C, NICHOLSON B A. Jackup dynamic stability under extreme storm conditions [C]// Anon. Proceeding of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 6-9, 1991. Houston: OTC, 1991. DOI: 10.4043/6590-MS.

作者简介:

庄杰敏 (第一作者, 通信作者)

1993-, 男, 广东佛山人, 工程师, 武汉大学水利水电工程专业, 硕士, 主要从事海上风电风机基础结构与施工技术研究工作 (e-mail) zhuangjiemin@gedi.com.cn.

(责任编辑 孙舒)