

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2026.01.010

一种大型波浪能装置抗极端海况下的非线性锚泊系统特性研究

王伟¹, 聂铭¹, 黄圳鑫², 王文胜²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 我国海域近岸水深较浅且台风频发, 大型波浪能装置抗极端海况下的锚泊系统设计成为制约波浪能装置产业化发展的技术难点, 波浪能发电可为海洋经济提供绿色能源支持, 对海洋战略发展具有重要意义。本文针对一种改进型兆瓦级波浪能装置抗极端海况下的系统设计问题, 对不同水深下平台的水动力学特性进行分析, 并对采用具有超弹性和高强度材料的系泊设计方案与纯锚链悬链系泊方案进行计算和比较分析, 研究平台在极端海况下的系泊载荷与漂移运动特性。研究结果表明: 针对浅水锚泊设计, 采用具有弹性索材料的系泊系统可以有效降低系泊载荷, 同时随着弹性索使用量的增加, 系泊载荷峰值持续降低, 但是当弹性索使用量达到一定数值后, 弹性索的持续增加对系泊载荷峰值的降低效果将受到限制。本文研究成果可为浅水抗台风锚泊系统设计及弹性索使用的经济性评估提供参考。

关键词: 波浪能发电; 锚泊系统; 弹性索; 系泊载荷; 波浪能装置

中图分类号: P743.2; TK79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2026) 01-0085-09

波浪能作为一种清洁、可再生的能源, 其开发和利用在全球范围内受到了广泛关注。我国波浪能资源蕴藏量巨大, 但是分布不均, 渤海、黄海波浪能资源较差, 南海地区资源丰富, 具有较高的开发潜力, 是我国波浪能开发的重点区域^[1-2]。波浪能装置是实现波浪能转换为电能的关键技术装备, 而锚泊系统作为保障波浪能装置稳定运营的重要组成部分, 其系泊线的型式与设计对装置安全性能具有决定性影响^[3-5]。我国南海虽然波浪能资源丰富但台风多发, 且近岛礁附近的礁盘水深较浅, 因此, 针对我国台风频发、水深较浅的海域, 研究抗台风的锚泊系统技术, 是保障波浪能装置长期稳定运营、走向产业化的关键基石。

随着波浪能装置发电技术日趋成熟, 保障装置在极端海况下生存安全的锚泊系统设计成为亟须解

决的技术难题。目前, 国内外学者对波浪能装置抗台风锚泊系统的研究涵盖了理论分析、数值模拟和实验验证等多个方面。CERVEIRA F 等^[6]对波浪能发电装置锚泊系统进行设计, 并提出在悬链线和张紧式等不同类型的锚泊系统中加入“弹性腱”组件的概念, 以减小波浪能装置锚泊负荷。XU S 等^[7]对波浪能装置锚泊系统的系泊线分别采用了尼龙绳、聚酯缆、锚链等不同材料, 并进行了模型试验研究, 结果表明尼龙绳是一种可有效降低系泊载荷的材料, 聚酯缆能有效抑制波浪能装置的运动响应。THIES P R 等^[8]研究了一种新型智能主动系泊系统 (Intelligent Active Mooring System, IAMS), 旨在通过控制系泊线的刚度影响系泊载荷峰值, 风暴条件下的模拟结果显示, 使用 IAMS 可以减少 50% 以上的峰值线张力。马勇等^[9]基于悬链线理论

收稿日期: 2025-08-25

基金项目: 南方电网公司科技项目 (GDKJXM20230357); 广东省自然科学基金面上项目 (2025A1515011423)

作者简介: 王伟 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力变换、波浪能利用研究。E-mail: wwangcn@163.com

通信作者: 王文胜 (1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋能开发利用、锚泊系统研究。E-mail: wangws@ms.giec.ac.cn

研发了一套带有弹性索的漂浮式潮流能电站系泊系统,理论分析了加入弹性索的长度,以及在不同水深下对系泊系统的影响。研究表明,针对浅水海域的漂浮式潮流能电站系泊系统设计,弹性索能够显著减少系泊张力载荷,在工程应用中弹性索系泊系统具有广泛的应用前景。王文胜等^[10]针对波浪能装置的抗台风系泊问题,通过对比加入浮筒、沉块、弹性索等几种不同组合方案,得出了在系泊线中加入非线性特性的系泊系统,构件可有效减小系泊载荷峰值的结论。韦斯俊等^[11]针对极浅水多体波浪能发电装置的锚泊系统设计开展了研究,结果表明,对于极浅水的锚泊系统设计,Lazy wave型锚泊系统优于传统悬链线式锚泊系统。黄硕等^[12]针对波浪能装置浅水抗台问题,研究了一种具有弹性系泊的多点锚泊系统,理论研究和模型试验证明了该锚泊系统能满足浅水恶劣海况下对波浪能装置锚泊设计的要求。盛其虎等^[13]对兆瓦级波浪能装置抗台风锚泊系统开展了理论研究与试验研究,研究表明锚泊系统的刚度系数越大,所受到的锚泊受力也越大,与纯锚链相比,带弹性索的系泊方案可减少尖峰载荷。黄正等^[14]为合理布设兆瓦级波浪能发电装置及其锚泊系统,开展浅水域含聚酯缆绳锚泊系统的疲劳损伤分析及布置方位优化研究,研究发现不同的布置方案中锚泊线疲劳寿命差异较大,并建议在工程中计算装置的布置对锚泊系统疲劳寿命的影响,从而得到相对最优设计方案。

综上所述,这些研究表明针对极端海况与浅水情况,采用具有弹性蓄能型的系泊材料将有助于降低锚泊载荷极值,保障波浪能装置锚泊安全,但同时采用此类具有较大弹性材料的系泊线,会导致波浪能装置的运动响应增大。

本文通过数值计算研究改进型兆瓦级波浪能装置在极端工况下抗台设计方案,通过采用具有弹性蓄能特性的弹性索系泊线材料,研究不同长度弹性索下的锚泊载荷极值特性,对比分析并验证该改进型兆瓦级波浪能装置抗台设计方案的可行性。

1 锚泊分析计算原理

在极端海况下,改进型兆瓦级波浪能装置吸波

浮体处于锁死状态,此时波浪能装置平台的多浮体机构成为一个整体。本文研究一种改进型兆瓦级波浪能装置在极端海况下的抗台风设计方案,并分析计算其锚泊载荷,锚泊分析计算步骤如下。

(1) 频域水动力计算:根据三维频域势流理论计算得到浮体的水动力学参数,包括附加质量、辐射阻尼和一阶波浪力及二阶波浪传递函数等。

(2) 水动力参数转换:将计算得到的频域水动力参数和波浪力传递函数通过傅里叶变换,转换为时域计算所需的无穷频率附加质量、延迟函数和波浪力脉冲函数。

(3) 静平衡计算:考虑定常环境载荷,包括定常风力、流力和二阶平均波浪漂移力,计算得到浮体初始平衡位置,作为时域动态耦合分析的初始条件。

(4) 动态耦合计算:考虑变化的环境载荷及锚泊系统的动态影响,求解浮体运动和锚泊缆动态张力。

浮体时域运动方程如下。

$$[\mathbf{M} + \mathbf{M}_\infty]\ddot{x} + \int_0^t h(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau + \mathbf{B} \cdot \dot{x}(\tau) + \mathbf{C} \cdot x(\tau) = F_e(t) + F_s(t) + F_w(t) + F_c(t) + F_m(t) \quad (1)$$

式中, \mathbf{M} 为浮体质量矩阵; \mathbf{M}_∞ 为附加质量矩阵; \mathbf{B} 为黏性阻尼系数矩阵; \mathbf{C} 为恢复力刚度矩阵; $h(t-\tau)$ 为系统的延迟函数; $F_e(t)$ 为一阶波浪力; $F_s(t)$ 为二阶波浪力; $F_w(t)$ 为风载荷; $F_c(t)$ 为流载荷; $F_m(t)$ 为锚泊载荷; x 为浮体运动位移; \dot{x} 为浮体运动速度; \ddot{x} 为浮体运动加速度。

1.1 风载荷和流载荷

风载荷流力系数和流载荷流力系数由石油公司国际海事论坛(Oil Companies International Marine Forum, OCIMF)提供,用于平台风载荷和流载荷估算,其中风载荷与流载荷计算公式如下。

$$F_c = \frac{1}{2}\rho_w L_{BP} T_d C_c V_c^2 \quad (2)$$

式中, ρ_w 为海水密度; V_c 为流速; C_c 为流力系数; L_{BP} 为装置垂线间长; T_d 为装置吃水深度。

$$F_w = \frac{1}{2}\rho_a S_l C_w V_w^2 \quad (3)$$

式中, ρ_a 为空气密度; V_w 为风速; C_w 为风力系数; S_l 为装置受风面积。

1.2 一阶波浪载荷

一阶波浪载荷时域表达式可由卡明斯基脉冲响应函数方法求得, 如式(4)和式(5)所示。

$$F_e(t) = \int_{-\infty}^t h_e(t - \tau) \eta(\tau) d\tau \quad (4)$$

$$h_e(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f_e^\omega(\omega) \cdot e^{-i\omega t} d\omega \quad (5)$$

式中, f_e^ω 为单位波幅规则波作用在浮体上一阶波浪力频域响应函数; $h_e(t)$ 为脉冲响应函数; $\eta(\tau)$ 为波幅随时间的历程函数。

1.3 二阶波浪低频载荷

对于浅水, 一般采用二次传递函数 (Quadratic Transfer Function, QTF) 低频漂移载荷, 其表达式如下。

$$F_D(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^i a_i a_j \{ \text{Re}[QTF(\alpha, \omega_i, \omega_j)] \cos((\omega_i - \omega_j)t + (\varphi_i - \varphi_j) - (k_i - k_j)x) \} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^i a_i a_j \{ \text{Im}[QTF(\alpha, \omega_i, \omega_j)] \sin((\omega_i - \omega_j)t + (\varphi_i - \varphi_j) - (k_i - k_j)x) \} \quad (6)$$

式中, N 为规则波个数; a_j 为波幅; ω_j 为圆频率; φ_j 为相位; k_j 为波数; QTF 可以通过一阶频域计算获得。

2 计算模型

“南鲲号”波浪能装置为广东电网有限责任公司牵头研制, 中国科学院广州能源研究所设计研发的一种大型波浪能装置, 其锚泊系统采用悬链式多点系泊, 系泊线采用纯锚链设计。考虑“南鲲号”波浪能装置平台后续加装浮式风机与测量设备进行远洋科考的需求, 现拟设计一种改进型“南鲲号”波浪能装置, 在其三个立柱浮箱加装三个可调浮力浮筒, 增大平台的可承载重量并提高其平稳性, 并通过研究一种具有非线性弹性系泊材料融合的锚泊系统抵抗远海极端海况。

“南鲲号”波浪能装置作为远海运营的一种大型浮式平台, 其不仅可以俘获波浪能, 还可作为海上科考平台进行远海科研, 为提升“南鲲号”浮式平台的可搭载设备能力与增加波浪中的稳定性, 本

文研究基于“南鲲号”波浪能装置的基础上进行改造, 进行优化设计后研究其抗台锚泊性能, 改造后的“南鲲号”波浪能装置设计三维图如图 1 所示。

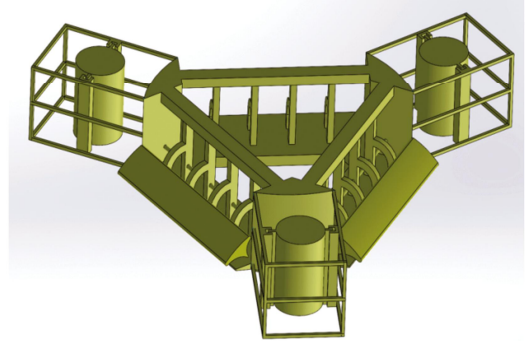


图 1 改进型“南鲲号”波浪能装置设计三维图

在“南鲲号”波浪能装置的三个立柱浮体前方用桁架各增加一个浮筒, 浮筒与桁架之间可以通过锁紧机构调节浮态, 此装置改造后将有利于平台提高设备载重量及装置的稳定性, 其主要尺度参数如表 1 所示。

表 1 改进型“南鲲号”主尺度参数

主尺度	抗台风工况
排水量/t	15 920.52
吃水/m	14.5
主平台型深/m	28
主平台型宽/m	88
外浮桶半径/m	8
回转半径 r_x /m	26.18
回转半径 r_y /m	26.18
回转半径 r_z /m	36.64

2.1 抗台风环境参数

锚泊分析中, 考虑极端海况下风、浪、流来自同一方向。由于装置锚泊系统呈正三角形布置, 且本文旨在研究非弹性系泊线特性对锚泊系统设计的影响, 因此, 本文仅取 180° 入射角来分析装置在环境作用下的锚泊特性。另外, 为研究不同水深下弹性索抗极端海况下的载荷特性, 本文分别取 40 m 和 80 m 两种水深进行研究与分析。环境条件如表 2 所示。

表 2 环境条件

环境要素	重现期	参数	数值
波浪	50 年一遇	有义波高/m	8.52
		谱峰周期/s	13.18
		谱峰因子	3.3
风	50 年一遇	10 分钟平均风速/($m \cdot s^{-1}$)	56.2
流	10 年一遇	流速/($m \cdot s^{-1}$)	1.0

海浪谱采用 JONSWAP 谱, 其定义如下。

$$S(\omega) = \frac{5}{16} \cdot H_s^2 \omega_p^2 \cdot \omega^{-5} e^{-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4} \cdot (1 - 0.287 \cdot \ln(\gamma)) \cdot \gamma^e \cdot e^{-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right)^2} \quad (7)$$

式中, $\omega_p = 2\pi/T_p$ 为谱峰圆频率; γ 为谱峰升高因子; H_s 为有义波高; σ 为谱峰形状参数。

2.2 锚泊设计方案

本文锚泊方案在纯锚链方案中嵌入弹性索, 研究不同长度、不同刚度特性的弹性索及不同水深对锚泊载荷的影响并获得安全的设计方案, 水深分别设置为 40 m 与 80 m 两种情况。

锚泊布置方案共有 6 根系泊线, 分为 3 组, 每组 2 根, 呈对称布置, 系泊线采用锚链与弹性索组合方式, 总长度为 605 m, 布置形式如图 2 所示。

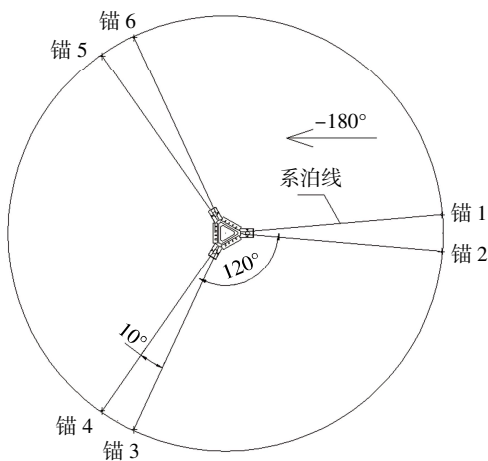


图 2 锚泊系统布置图

锚泊系统每根系泊线由弹性索和锚链组成, 弹性索布置在平台的导缆孔的一侧, 锚链连接弹性索与海底的锚固机构, 系泊线布置如图 3 所示。

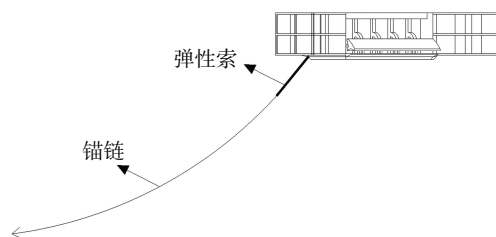


图 3 系泊线布置

锚链采用链径为 107 mm 的 R3 级有档系泊链, 弹性索采用 Superflex 公司的超级弹性索, 其是由包

含碳纤维、芳纶纤维和超高分子量聚乙烯 (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) 纤维等多种成分的合成材料制成, 具有高强度和高延伸率的特性。其可以采用数量不等的单芯弹性索组成具有不同力学特性的系泊缆, 根据不同的要求, 每根弹性索系泊缆可采用法兰盘固定多个单芯缆组成, 如图 4 所示。



图 4 Superflex 公司生产的高弹性索组装图

弹性索的刚度曲线具有非线性的特性, 可承受较大拉力和极大的应变。根据弹性索厂家的保函函说明, 弹性索在应变达到 70% 时仍可以无损坏循环 12 500 次, 且弹性索的拉力极限可以根据合成纤维材料混合比例的不同定制具有不同拉升特性的弹性索。本文采用单芯极限拉力 17 kN 的弹性索, 其应力应变曲线如图 5 所示。

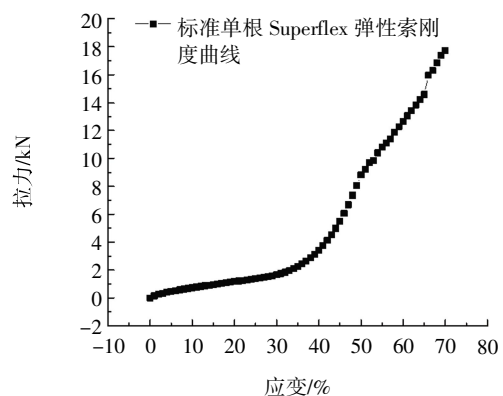


图 5 单芯弹性缆索拉力与应变关系

改进型“南鲲号”波浪能装置的锚泊设计方案如表 3 所示, 分别采用了纯锚链方案 (A0 方案)、锚链与 300 芯弹性索组合方案 (A1 至 A11)、锚链与 500 芯弹性索组合方案 (B1 至 B11), 其中, 300 芯弹性索组装在一起的极限载荷为 5 100 kN, 500 芯弹性索组装在一起的极限载荷为 8 500 kN, 不同芯数组成的弹性索单芯物理特性保持一致。

表 3 系泊线组成方案

序号	系泊线总长度/ m	锚链长度/ m	弹性索长度/ m	弹性索芯数
方案 A0	605	605	0	0
方案 A1	605	595	10	300
方案 A2	605	585	20	300
方案 A3	605	575	30	300
方案 A4	605	565	40	300
方案 A5	605	555	50	300
方案 A6	605	530	75	300
方案 A7	605	505	100	300
方案 A8	605	405	200	300
方案 A9	605	305	300	300
方案 A10	605	205	400	300
方案 A11	605	105	500	300
方案 B1	605	595	10	500
方案 B2	605	585	20	500
方案 B3	605	575	30	500
方案 B4	605	565	40	500
方案 B5	605	555	50	500
方案 B6	605	530	75	500
方案 B7	605	505	100	500
方案 B8	605	405	200	500
方案 B9	605	305	300	500
方案 B10	605	205	400	500
方案 B11	605	105	500	500

3 计算结果分析

浮体的锚泊载荷计算采用法国船级社的 Ariane 系泊软件, 计算模式采用低频叠加高频 (Low Frequency+High Frequency, LF+HF) 模式, 二阶力采用全 QTF 模式, 通过对表 3 的系泊线组成方案进行锚泊计算, 获得弹性索不同刚度、不同长度下的平台运动响应特性与锚泊极端载荷。由于本文仅考虑 180°浪向分析不同弹性索、水深对锚泊载荷的影响, 因此, 锚泊载荷的主要载荷集中在系泊线 1 与系泊线 2, 故本节将基于系泊线 1 与系泊线 2 的锚泊载荷、平台的 x 方向漂移半径来分析各参数之间的关系。

3.1 平台水动力学特性

由图 6 和图 7 可知, 对于一阶波浪力 F_{x-wave} 在 40 m 水深和 80 m 水深情况下, 仅在低频部分存在差异, 当频率大于 0.75 rad/s 之后, 水深对平台的影响较小; 对于二阶平漂力 $F_{x-drift}$, 其也仅仅在频率为 0.5—0.75 rad/s 之间有影响, 对于极小频率和较

大频率, 水深对平台的影响可以忽略。

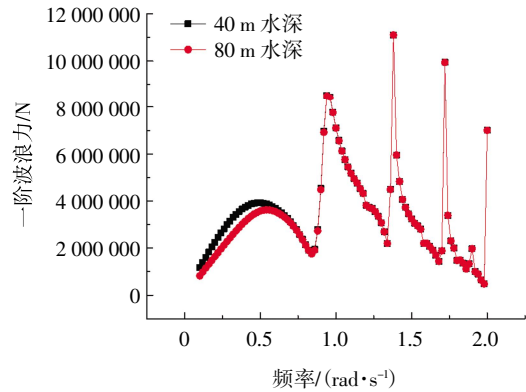


图 6 一阶波浪力频域特性

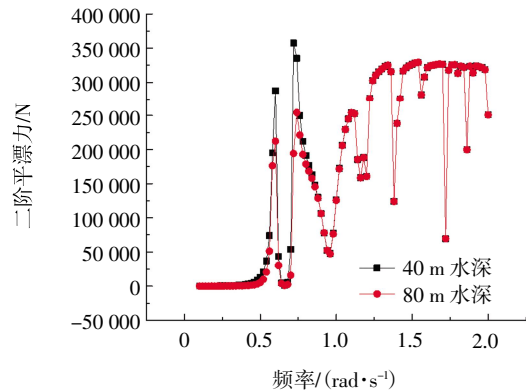


图 7 二阶平漂力频域特性

3.2 平台锚泊载荷受力分析

由图 8 和图 9 可得如下结论。

(1) 随着弹性索使用量的增加, 锚泊载荷急剧降低, 当弹性索使用量达到 300 m 时, 锚泊载荷减小趋势开始趋于平缓。

(2) 40 m 水深与 80 m 水深相比, 相同锚泊方案下, 40 m 水深锚泊载荷比 80 m 水深情况下的锚泊载荷大。

(3) 相同锚泊方案情况下, 对于 40 m 水深情况, 300 芯弹性索系泊线组成方案锚泊载荷略小于 500 芯系泊线组成方案, 分析认为, 对于浅水区如需降低锚泊载荷, 应需要设计刚度更为柔和的系泊线组成方案。

(4) 相同锚泊方案情况下, 对于 80 m 水深情况, 使用 300 芯弹性索与 500 芯弹性索系泊线组成方案相比, 在弹性索长度为 50—300 m 的设计中, 300 芯弹性索均比 500 芯弹性索的锚泊载荷小, 但是, 当弹性索长度小于 50 m 或大于 300 m 时, 两

者受到的锚泊载荷差距不大。分析认为,当弹性索长使用量较少时,系泊线蓄能效果有限与锚泊系统的最大能量相差较大,导致不能进一步降低锚泊载荷;而当弹性索长度超过300 m后,受波况影响锚泊系统拥有的最大能量达到上限,而300芯弹性索的蓄能又超过这个上限值,导致后续继续增加弹性索系泊缆的长度没有意义。

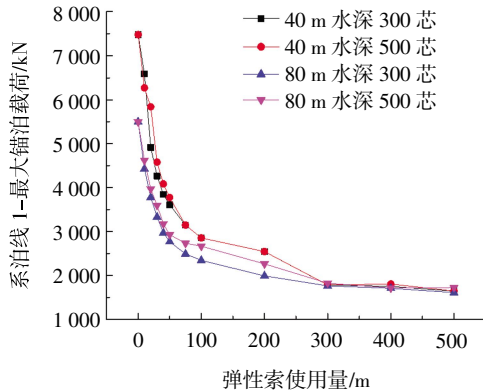


图8 系泊线1锚泊载荷

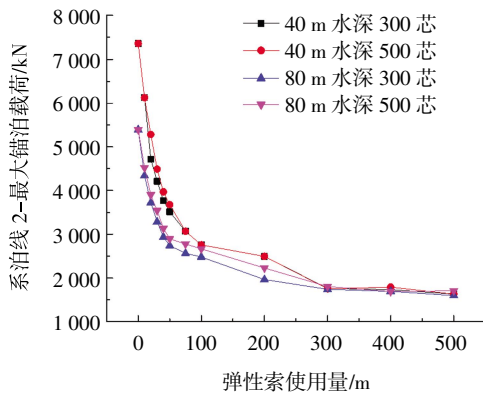


图9 系泊线2锚泊载荷

3.3 平台运动分析

由图10和图11可得如下结论。

(1) 40 m水深和80 m水深情况相比,相同系泊方案下,80 m水深情况下锚泊系统的纵荡方向漂移半径比40 m水深情况下的要大。

(2) 当弹性索使用量大于50 m情况下,对比300芯弹性索的系泊线组成方案与500芯弹性索的系泊线组成方案,前者纵荡方向漂移半径比后者大。

3.4 锚泊设计方案优选

系泊缆设计中,采用的直径107 mm的R3级有档系泊链破断极限载荷为9 049 kN,300芯弹性

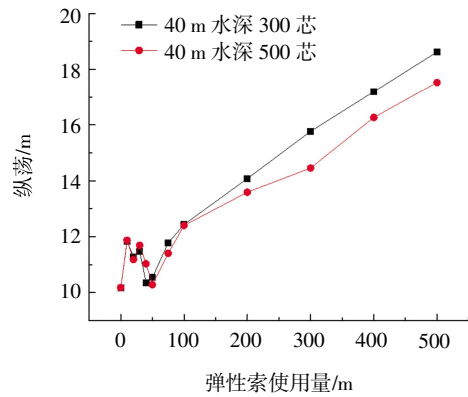


图10 水深40 m平台纵荡运动系泊半径

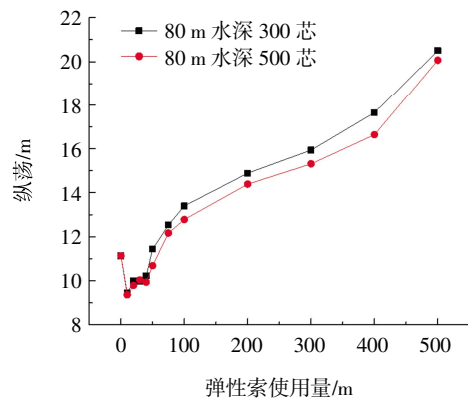


图11 水深80 m平台纵荡运动系泊半径

索组装在一起的极限载荷为5 100 kN,500芯弹性索组装在一起的极限载荷为8 500 kN,因此,只需要保障弹性索安全载荷即可。对于人工合成缆绳、钢链、钢缆等材料,其系泊强度设计标准应满足中国船级社《海上移动平台入级规范(2020)》相关衡准要求,系泊系统强度设计标准(系泊线张力安全因子)在完整工况时取值为1.67。40 m水深下系泊缆载荷安全系数见表4,80 m水深下系泊缆载荷安全系数见表5。

从表4和表5可以看出:①相同的系泊方案下,80 m水深情况下的锚泊安全系数大于40 m水深情况;②相比较而言,要想达到满足中国船级社要求的系泊载荷安全系数,40 m水深情况比80 m水深情况需使用更长的弹性索;③弹性索在浅水情况下能快速降低锚泊载荷,对于40 m水深情况下,改进型“南鲲号”波浪能装置需使用100 m弹性索,可满足中国船级社锚泊安全系数大于1.67的要求,对于80 m水深情况,使用40 m弹性索即可使锚泊安全系数大于1.67。

表 4 40 m 水深系泊缆载荷安全系数

序号	系泊线总长度/m	锚链长度/m	弹性索长度/m	弹性索芯数	系泊缆最大载荷/kN (系泊线 1 或系泊线 2)	安全系数
方案 A0	605	605	0	0	7 478.549	1.210 0
方案 A1	605	595	10	300	6 592.268	0.773 6
方案 A2	605	585	20	300	4 913.595	1.037 9
方案 A3	605	575	30	300	4 261.946	1.196 6
方案 A4	605	565	40	300	3 842.965	1.327 1
方案 A5	605	555	50	300	3 607.125	1.413 9
方案 A6	605	530	75	300	3 147.376	1.620 4
方案 A7	605	505	100	300	2 853.647	1.787 2
方案 A8	605	405	200	300	2 542.591	2.005 8
方案 A9	605	305	300	300	1 783.582	2.859 4
方案 A10	605	205	400	300	1 750.607	2.913 3
方案 A11	605	105	500	300	1 644.607	3.101 0
方案 B1	605	595	10	500	6 277.402	1.354 1
方案 B2	605	585	20	500	5 838.221	1.455 9
方案 B3	605	575	30	500	4 579.139	1.856 2
方案 B4	605	565	40	500	4 083.063	2.081 8
方案 B5	605	555	50	500	3 775.065	2.251 6
方案 B6	605	530	75	500	3 288.678	2.584 6
方案 B7	605	505	100	500	2 984.864	2.847 7
方案 B8	605	405	200	500	2 737.909	3.104 5
方案 B9	605	305	300	500	1 906.009	4.459 6
方案 B10	605	205	400	500	1 912.300	4.444 9
方案 B11	605	105	500	500	1 676.317	5.070 6

表 5 80 m 水深系泊缆载荷安全系数

序号	系泊线总长度/m	锚链长度/m	弹性索长度/m	弹性索芯数	系泊缆最大载荷/kN (系泊线 1 或系泊线 2)	安全系数
方案 A0	605	605	0	0	5 496.939	1.646 2
方案 A1	605	595	10	300	4 426.331	1.152 2
方案 A2	605	585	20	300	3 776.437	1.350 5
方案 A3	605	575	30	300	3 329.836	1.531 6
方案 A4	605	565	40	300	2 969.766	1.717 3
方案 A5	605	555	50	300	2 768.717	1.842 0
方案 A6	605	530	75	300	2 902.367	1.757 2
方案 A7	605	505	100	300	2 805.562	1.817 8
方案 A8	605	405	200	300	1 990.687	2.561 9
方案 A9	605	305	300	300	1 762.957	2.892 9
方案 A10	605	205	400	300	1 707.973	2.986 0
方案 A11	605	105	500	300	1 609.745	3.168 2
方案 B1	605	595	10	500	4 620.431	1.839 7
方案 B2	605	585	20	500	3 969.936	2.141 1
方案 B3	605	575	30	500	3 596.418	2.363 5
方案 B4	605	565	40	500	3 173.065	2.678 8
方案 B5	605	555	50	500	2 927.390	2.903 6
方案 B6	605	530	75	500	2 964.528	2.867 2
方案 B7	605	505	100	500	2 922.329	2.908 6
方案 B8	605	405	200	500	2 546.097	3.338 4
方案 B9	605	305	300	500	1 824.979	4.657 6
方案 B10	605	205	400	500	1 715.371	4.955 2
方案 B11	605	105	500	500	1 725.944	4.924 8

4 结 论

本文针对不同水深及不同弹性索长度的非线性刚度弹性系泊缆,研究其在极端海况下的锚泊载荷特性,研究结论如下。

(1) 在不同水深情况下,一阶波浪载荷在低频段受水深影响较大,在高频段则对水深不敏感,二阶漂移力在高频段受水深影响的差异可以忽略。

(2) 在抗极端海况情况下,使用弹性索可以显

著降低系泊载荷,随着弹性索使用量的增加,系泊载荷可以持续降低。本文算例中,当弹性索使用量增加到300 m时,弹性索继续增加使用量对系泊载荷的降低作用将不再明显。

(3) 研究表明,弹性索在浅水抗极端海况下的锚泊设计中的作用是积极且巨大的,合理设计一定长度一定刚度的弹性索可以有效降低锚泊载荷和提高系泊线的经济性。本文研究结果对浅水大型波浪能发电平台的锚泊系统设计具有参考价值。

参考文献:

- [1] 武贺,方叙洲,张松,等.南海岛礁海域波浪能资源分析及总量评估[J].太阳能学报,2022,43(9):416-423.
- [2] 胡聪,毛海英,尤再进,等.中国海域波浪能资源分布及波浪能发电装置适用性研究[J].海洋科学,2018,42(3):142-148.
- [3] MARTINELLI L, RUOL P, CORTELLAZZO G. On mooring design of wave energy converters: The seabreath application[J]. Coastal Engineering Proceedings, 2012, 1(33): 1-12.
- [4] WANG L, SON D, YEUNG R W. Effect of mooring-line stiffness on the performance of a dual coaxial-cylinder Wave-Energy Converter[J]. Applied Ocean Research, 2016, 59(1): 577-588.
- [5] 崔琳,栾富刚,段云棋.一种具有能量吸收特性的非线性锚泊系统数值模拟与分析[J].海洋技术学报,2016,35(5):45-50.
- [6] CERVEIRA F, FONSECA N, PASCOAL R. Mooring system influence on the efficiency of wave energy converters[J]. Energy, 2013, 3(1): 65-81.
- [7] XU S, WANG S, SOARES C G. Experimental investigation on hybrid mooring systems for wave energy converters[J]. Renewable Energy, 2020, 1(158): 130-153.
- [8] THIES P R, JOHANNING L, MCEVOY P. A novel mooring tether for peak load mitigation: Initial performance and service simulation testing[J]. International Journal of Marine Energy, 2014, 1(7): 43-56.
- [9] 马勇,李炳强,徐颜,等.带有弹性索的潮流能电站系泊系统的设计及特性[J].船舶工程,2017,39(3):60-64.
- [10] 王文胜,游亚戈,盛松伟,等.波浪能装置弹性系泊系统抗台风的设计与研究[J].哈尔滨工程大学学报,2017,38(10):1505-1510.
- [11] 韦斯俊,王义,高明,等.极浅水多体波浪能发电装置锚泊系统设计[J].船舶工程,2017,39(3):70-76.
- [12] 黄硕,盛松伟,游亚戈,等.超浅水浮式波浪能发电装置弹性系泊系统及水动力性能的数值与模型试验研究[J].太阳能学报,2019,40(3):715-723.
- [13] 盛其虎,张紫昊.MW级波浪能装置浅水系泊系统模型试验研究[J].哈尔滨工程大学学报,2025,46(2):189-196.
- [14] 黄正,聂铭,梁永纯,等.含聚酯缆绳锚泊系统疲劳分析及布置方位优化[J].广东电力,2023,36(8):1-7.

Study on Nonlinear Mooring System Characteristics of a Large Wave Energy Device in Extreme Sea Conditions

WANG Wei¹, NIE Ming¹, HUANG Zhenxin², WANG Wensheng²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Ltd., Co., Guangzhou 510080, China;

2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The water depth near the coast of China is relatively shallow and typhoons frequently occur. The design of mooring system for large wave energy installations against extreme sea conditions has become a technical difficulty restricting the industrialization development of wave energy installations. Wave energy power generation can provide green energy support for Marine economy and is of great significance for the development of Marine strategy. Aiming at the system design problem of an improved MW wave energy device against extreme sea conditions, this paper studies the hydrodynamics characteristics of the platform under different water depths, and compares the mooring system design scheme using mooring line material with super-elastic and high-strength materials with that of pure anchor chain catenary mooring system. The mooring load and drift motion characteristics of the platform under extreme sea conditions are studied. The results show that for shallow water mooring design, the mooring system with elastic cable material can effectively reduce the mooring load, and can continue to reduce the peak value of mooring load with the increase of the use of elastic cable. However, as the use of elastic cable reaches a certain value, the continuous increase of elastic cable will limit the effect of reducing the peak value of mooring load. This study provides valuable insights for the design of shallow-water anti-typhoon mooring systems and the economic assessment of elastic cable utilization.

Keywords: wave power generation; mooring system; elastic cable; mooring load; wave energy device