

引用格式: 吕晓莹, 刘涵, 苏焱. 便携集成式波浪补偿装置研究综述[J]. 中国舰船研究, 2026, 21(2): 317-339.

LÜ X, LIU H, SU Y. A review of portable integrated heave compensation devices[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2026, 21(2): 317-339 (in Chinese).

便携集成式波浪补偿装置研究综述



扫码阅读全文

吕晓莹, 刘涵, 苏焱*

中山大学 海洋工程与技术学院, 广东 珠海 519082

摘要: [目的] 海上吊装作业时, 波浪补偿装置对保障作业安全和延长作业窗口期意义重大。旨在系统剖析便携集成式波浪补偿装置, 结合国内外研究现状, 为我国相关研究及装备国产化提供有力支撑。 [方法] 通过系统探讨便携集成式波浪补偿装置, 详细阐述被动式、自适应式、主动式和混合式波浪补偿装置的工作原理, 对比分析其优缺点; 深入研究张力补偿、位置补偿和混合补偿在不同海上作业场景下的补偿原理与智能控制算法; 分析国际主流产品特点, 结合我国实际情况探讨发展现状; 总结装置的特性与优势, 展望未来研究方向。 [结果] 研究发现, 各类便携集成式波浪补偿装置在性能、适用场景等方面各有长短; 不同补偿目标与海上作业场景紧密适配; 国际市场产品成熟度高, 而我国在该领域仍处于研发探索阶段。 [结论] 该装置未来应朝着结构轻量化、模块化与标准化、稳定性与智能化控制发展, 我国需强化技术创新, 突破关键技术瓶颈, 优化制造工艺, 提升材料性能、密封技术和防腐能力, 以推动相关装备国产化进程, 增强我国在海洋工程领域的竞争力。

关键词: 便携集成式装置; 波浪补偿; 张力补偿; 位置补偿; 运动补偿; 船舶设备; 船舶减摇装置

中图分类号: U664.7

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04310

0 引言

随着海洋资源勘探与开发需求的持续增加, 依靠海上吊装技术的海底钻井、深海采矿、沉船打捞、海上货物转运、无人潜水器布放与回收等海上作业任务量显著增长^[1-2]。与地面吊装作业不同, 海洋作业时的风、浪、流等外部环境会导致工作船产生六自由度摇晃运动, 影响作业的平稳性和工作效率。为减少水平方向干扰对工作船的影响, 通常使用动力定位系统将工作船稳定在一定平面区域内^[3]。然而, 船舶垂直方向的升沉运动会造成缆绳张力变化剧烈、负载碰撞、设备对接困难等问题, 严重时甚至会引发吊装作业事故^[4]。因此, 需要使用波浪补偿装置对船舶升沉运动进行补偿, 将负载运动与船舶升沉运动解耦, 以延长恶劣海况下的作业窗口, 保障吊装作业顺利进行。

海上吊装过程中常见波浪补偿装置类型包括非便携式和便携集成式2种。

1) 非便携式波浪补偿装置。

需要固定于船体上, 通过控制绞车或液压机械机构收放缆绳, 进而实现缆绳末端负载的波浪补偿(图1), 主要包括3种类型:

(1) 针对绞车的波浪补偿装置。

通过控制系统读取船舶运动状态, 调整绞车正转与反转, 进而收放缆绳, 实现负载的波浪补偿^[5]。

(2) 针对缆绳的波浪补偿装置。

通过机械结构(如图1(b)中液压缸活塞杆)控制缆绳放缩, 实现缆绳末端负载的波浪补偿^[6]。

(3) 基于六自由度平台的波浪补偿装置。

采用六自由度平台的控制技术, 通过调节平台的位置与姿态, 实时补偿船舶对负载的扰动^[7]。非便携式波浪补偿装置具有较高的补偿精度, 能够应对复杂的海况变化, 具有高效的波浪

收稿日期: 2024-12-13 修回日期: 2025-03-06 网络首发时间: 2025-04-03 13:22

基金项目: 海洋石油工程股份有限公司科技创新研发项目(E-0822P017)

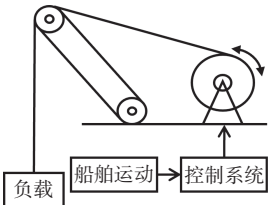
作者简介: 吕晓莹, 女, 1998年生, 博士生。研究方向: 海洋工程升沉补偿装置。E-mail: lvxy56@mail2.sysu.edu.cn

刘涵, 男, 2001年生, 硕士生。研究方向: 海洋工程升沉补偿装置。E-mail: liuh333@mail2.sysu.edu.cn

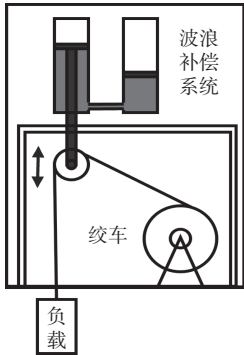
苏焱, 男, 1986年生, 博士, 副教授。研究方向: 海洋工程动力学与智能控制、海洋工程装备。

E-mail: suyan23@mail.sysu.edu.cn

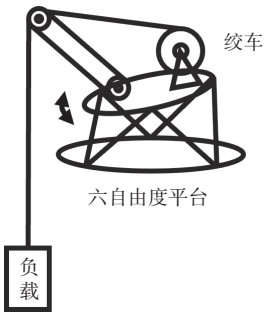
*通信作者: 苏焱



(a) 针对绞车的波浪补偿装置



(b) 针对缆绳的波浪补偿装置



(c) 基于六自由度平台的波浪补偿装置

图1 非便携式波浪补偿装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the non-portable heave compensation device system

补偿能力^[8-10]。但由于补偿装置被集成固定于船体上,占用舱室空间较大,设备失效风险较高,需要在船舶设计阶段进行统筹考虑。

2) 便携集成式波浪补偿装置。

这是一种新型补偿装置,使用时可悬挂于吊机、A架等吊装设备的缆绳吊钩上,进而对负载位置以及缆绳张力进行补偿^[11]。图2为Safelink AS公司便携集成式补偿装置的海试图,该装置即挂即用,在维护和更新波浪补偿器时,无须拆卸整个吊装系统,只需更换备用设备,从而降低故障误工率和因维护而产生的误工成本。相较于非便携式装置,便携式装置行程具有一定限制;此外,便携式装置需要在有限空间内集成高效能源系统,因此工作时间受限。整体而言,便携集成式波浪补偿装置灵活性高、维护便捷、成本低,相较传统非便携波浪补偿装置具有极大优势。

1 便携集成式波浪补偿装置类型

根据是否依赖外部能量输入,波浪补偿装置

图2 Safelink AS公司便携集成式波浪补偿装置^[12]Fig. 2 Portable integrated heave compensation device by Safelink AS^[12]

目前主要包括被动式波浪补偿装置(passive heave compensation, PHC)、自适应被动式波浪补偿装置(adaptive passive heave compensation, adaptive PHC)、主动式波浪补偿装置(active heave compensation, AHC)、主-被动混合型波浪补偿装置(active-passive hybrid system)。其中,常规的PHC装置和能够根据外部环境调节系统参数的自适应PHC装置无须外部能量输入即可实现波浪补偿;AHC装置需要外部能量驱动,具有更高的精度和补偿效率;主-被动混合型波浪补偿装置也被称为半主动式波浪补偿装置(semi-active heave compensation, SAHC)^[13],结合PHC和AHC的优点,能够以较低的能耗实现较高的补偿精度,综合成本较低,适应性更强^[14]。

1.1 被动式波浪补偿装置

如图3所示,PHC装置由液压缸和气液蓄能器组成,可以近似等效为一种并联弹簧-阻尼系统^[15],其中等效刚度 k 体现为装置内部气体的压缩特性,等效阻尼 c 体现为装置内部液压系统的阻尼特性。等效弹簧阻尼系统能够有效分离船舶和负载的耦合运动:当船体静止不动或补偿装置活塞杆锁死不工作时,补偿油缸产生的拉力等于负载重量;当船体上升时,补偿装置的缸筒会随着船体一起上升,补偿缸的活塞杆下端所连接的负载由于惯性作用,具有保持停留在平衡位置的趋势,油缸有杆腔内油液被压入蓄能器,蓄能器中气体压缩,补偿船体上升位移并存储能量;当船体下降时,补偿装置的缸筒随船体一起下降,补偿缸的活塞杆下端所连接的负载由于惯性作用仍然倾向于保持在平衡位置,有杆腔从蓄能器中

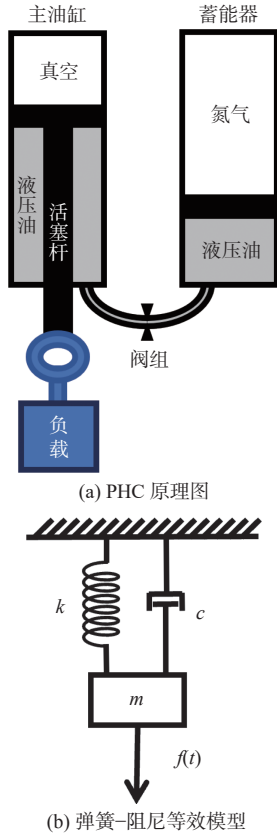


图3 PHC示意图

Fig. 3 Schematic diagram of PHC

吸入油液,蓄能器中的气体膨胀,补偿下降位移并释放能量,从而实现升沉补偿。

在使用被动波浪补偿装置时,初始状态将装置活塞杆设置到中性,记液压缸有杆腔环面积为 A_p ,液压缸活塞杆的面积为 A_{rod} ,负载在空中的质量为 m_{air} 。在水下时,由于受到浮力和拖曳力的影响,记负载在水中的等效质量为 m_{water} ,水的密度为 ρ 。气瓶的预充压力记为 P_0 ,气体体积为 V_0 ,当活塞杆伸出长度增加 x 时,气体体积会被压缩至 $(V_0 - A_p x)$,则此时气体的压力 P 会变为

$$P = \frac{P_0 V_0^\gamma}{(V_0 - A_p x)^\gamma} = \frac{P_0}{(1 - A_p x / V_0)^\gamma} \quad (1)$$

式中, γ 是绝热指数,对于氮气, γ 一般取1.4,在高压或高温状况下, γ 取为1.7。

由泰勒展开公式可知,当 z 很小时, $1/(1-z)^n \approx 1+nz$,式(1)中的 $A_p x / V_0$ 是一个小量,又 $P - P_0 = \Delta P = \Delta F / A_p$,则

$$P - P_0 = P_0 \left(1 + \gamma \frac{A_p x}{V_0} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\Delta P = P_0 \gamma \frac{A_p x}{V_0}$$

此时,对应等效弹簧力的变化为

$$\Delta F = \Delta P \cdot A_p = \frac{\gamma P_0 A_p^2}{V_0} x \quad (3)$$

装置的等效刚度 k 是等效弹簧力对位移的变化率,即

$$k = dF/dx = \frac{\gamma P_0 A_p^2}{V_0} \quad (4)$$

由式(4)可得,等效刚度 k 与液压缸环面积以及初始充气压力呈正相关,与装置氮气的体积呈负相关。

液压管道的阻尼力与液压管道自身的几何参数以及通过液压管道的流量有关。液压管道直径记为 d ,管道长度记为 l ,液压油的密度记为 ρ_{oil} ,通过液压管道的流量 Q 由液压缸活塞杆的运动速度 \dot{x} 所决定: $Q = A_p \dot{x}$ 。则管道的液压油流速 u 为

$$u = \frac{4A_p \dot{x}}{\pi d^2} \quad (5)$$

液压油通过液压管道的压力损失 Δp 为

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho_{oil} \cdot u^2}{2} \quad (6)$$

式中, λ 表示管道摩擦系数,主要由管道流速决定。当管道内液压油的流动为层流,即雷诺数 $Re < 2320$ 时, $\lambda = 64 / Re$;当液压油流动为湍流,雷诺数 $Re > 2320$ 时, $\lambda = 0.3164 / \sqrt{Re}$ 。

则液压管道阻尼力的大小 F_c 为

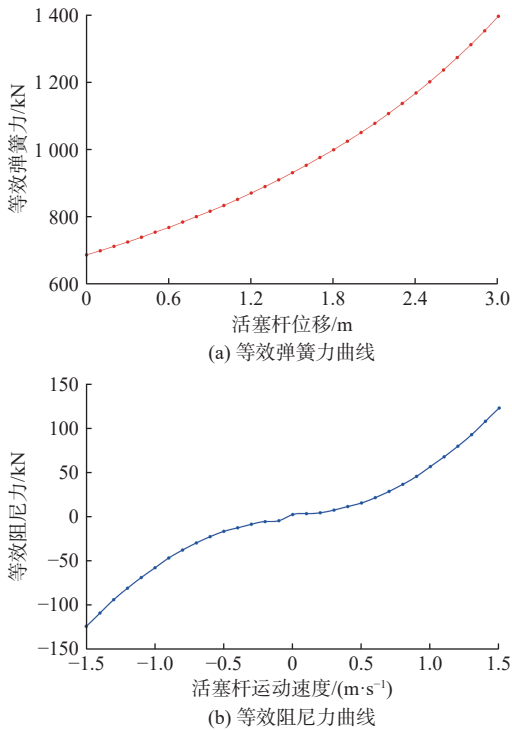
$$F_c = \Delta p \cdot A_p = \frac{8\lambda \rho_{oil} A_p^3}{\pi^2 d^5} \dot{x}^2 \quad (7)$$

由式(7)可得,装置的阻尼力与活塞杆速度平方成正比,速度平方项前面的系数定义为等效阻尼系数:

$$c = \frac{8\lambda \rho_{oil} A_p^3}{\pi^2 d^5} \quad (8)$$

波浪补偿装置的等效刚度和阻尼可以通过上述公式近似计算,对于不同类型的波浪补偿装置以及同一装置的不同工作状态(装置初始充气压力不同或阀组开度不同),其等效刚度阻尼特性曲线会有所差异。以Norwegian Dynamics公司的RIGEL PHC为例,其安全载荷为150 t,行程是3 m,缸体外径为680 mm,氮气瓶的预充压力为177 bar,其刚度阻尼曲线如图4所示。

由图4可得,波浪补偿装置的等效刚度曲线存在一定曲率,说明装置的刚度具有非线性,等效弹簧力大小随着液压缸活塞杆外伸(氮气气体被压缩)而逐渐增大;装置的等效阻尼曲线近似关于原点对称,液压缸活塞杆在低速运动状态下阻尼力较小,而在高速运动时阻尼力迅速增大,这种特性有助于在平稳海况提供较小的阻尼,在恶劣海况大振幅运动时提供较大的阻尼,增强系

图4 RIGEL PHC(150 t/3 m)的刚度阻尼曲线^[16]Fig. 4 Stiffness and damping curve of RIGEL PHC (150 t/3 m)^[16]

统的稳定性。

在波浪补偿装置设计过程中,应综合考虑静态负载和波浪特性来确定刚度。刚度过大会导致系统响应较快,刚度过小会影响补偿效果。阻尼的选择则须确保系统具有足够的能量耗散能力,以减缓波浪引起的位移,但过大的阻尼会影响动态响应。刚度和阻尼确定后,装置初步设计方案随之确定,在进行强度校核并参考相关规范和标准后可得出装置的详细参数。另外补偿装置装配完成后,实际的刚度和阻尼曲线仍需要通过试验进行标定与修正。

PHC装置目前产品较为成熟,因其结构简单、无需复杂的控制系统,且不消耗额外的能源,具有较高的可靠性、较低的维护成本以及显著的成本效益优势,主要应用于缆绳张力补偿领域。基于等效弹簧-阻尼模型,PHC装置能够优化系统刚度,改善系统频幅特性,补偿远离其固有频率的高频运动与受力^[17]。然而,其补偿精度较低,在复杂海况下适应性差,难以满足高精度位置补偿的需求^[2-3,18]。

1.2 自适应被动式波浪补偿装置

海上吊装作业过程复杂,主要包括空中吊装(负载由船上到入水前)、浪溅区(负载通过波浪表面)、波浪区(负载低于水面,但仍受波浪运动的影响)、水中区(负载在水中不断下降)以及海底着陆(负载降落在海底)等工作阶段^[9]。在不同

作业阶段中,氮气压力需要通过适当的调节以适应作业环境的变化,具体来说,对应于1.1节所述的预充压力 P_0 在不同作业环境下是不同的。

$$P_0 = \begin{cases} m_{\text{air}}g/A_p & \text{在空中} \\ m_{\text{water}}g/A_p & \text{浪溅区} \\ (m_{\text{water}}g + \rho ghA_{\text{rod}})/A_p & \text{在水下} \end{cases} \quad (9)$$

在不同工作阶段,波浪补偿装置面临的挑战不同。例如在空中吊装阶段,波浪补偿装置需要解决负载因风、船舶运动导致的剧烈运动。在浪溅区,负载会受到海浪的“脉冲撞击”,进而导致负载的严重损坏以及缆绳断裂,因此该阶段需要波浪补偿装置提供缆绳张力补偿^[20]。在波浪区,负载受到波浪周期性载荷影响,需要波浪补偿装置进行动态补偿,减少负载的动态变化,消除吊索松动和负载弹跳的风险。在水中区,“船舶-缆绳-波浪补偿装置-负载”系统的固有周期与外界环境激励周期相等时,会产生共振现象,可以通过调整装置自身固有频率进而避免共振。在海底着陆区,波浪补偿装置需要拥有优异的减速性能,用于降低负载的着陆速度,以避免负载与海底碰撞。在吊装作业的每个阶段,PHC装置的最佳参数都是不同的,然而传统PHC装置的系统参数在使用前已经配置完毕,在使用过程中无法自动调整系统参数,因此不能针对所有阶段进行系统参数优化^[21]。为克服传统PHC装置的局限性,研究者设计自适应PHC装置,用于优化系统在不同吊装阶段的性能。

自适应PHC装置能够自动调节系统的刚度与阻尼,以Cranemaster公司的自适应PHC装置为例,其在不同工作阶段可选用的功能如表1所示^[9]。自适应PHC装置在吊装前进行编程设置,在空中以及水下不同深度,可以通过传感器以及辅助水下机器人调节系统刚度阻尼。由于能够根据应用场景动态调整系统的刚度与阻尼,因此相较于常规PHC装置,自适应PHC装置具有更高的补偿精度和海况适应性,但由于其结构较为复

表1 自适应PHC装置的功能

Table 1 Function of adaptive PHC device

功能	描述
干重校正	根据实际干重自动调整活塞杆至平衡点
湿重校正	根据实际湿重自动调整活塞杆至平衡点
深度补偿	连续调整平衡行程位置,以抵消活塞杆上的静液压力
海底着陆	系统设置调整到最小着陆速度
数据记录	记录力、速度、加速度、压力、冲程和温度,供提升后下载和分析

杂,其可靠性略低且成本略高。

1.3 主动式波浪补偿装置

与开环的PHC装置不同,结合主动控制的闭环AHC装置,波浪补偿效率更高、更精确、对恶劣海况的适应性更好。AHC装置的基本原理如图5所示,首先使用运动参考单元(motion reference unit, MRU)或其他位置测量传感器检测当前船舶在所有方向上的位移和旋转,然后基于极短期预报技术(short-term prediction)获得吊点未来短期运动,再通过可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)计算出装置在升降方向的位移补偿量,进而驱动电动机与泵,实现液压缸活塞杆运动的控制,抵消由于船舶升降运动而引起的负载额外运动。

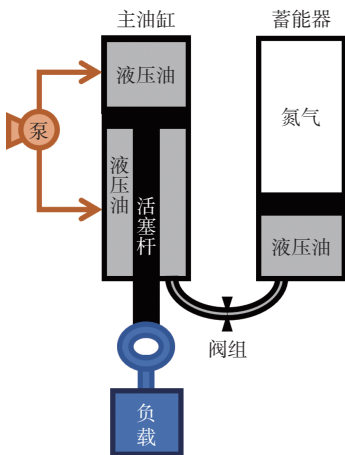


图5 AHC基本原理图

Fig. 5 Schematic diagram of AHC

极短期预报技术通过分析船舶的历史运动数据对船舶未来10s左右的运动进行预测。根据各种方法之间的理论差异,预测方法主要分为基于流体力学和基于统计学2类^[22]:基于流体力学的预测方法是线性模型,适用于小振幅波浪引起的船体运动,其性能依赖于简化后的线性流体力学方程系数的计算,如卷积预测器^[23]和卡尔曼滤波器^[24];基于统计学的预测方法核心在于分析浮体历史数据并提取规律进行预测,建模相对简单,经典时间序列模型如自回归模型(AR)、自回归滑动平均模型(ARMA)^[25]等,基于智能学习的模型如人工神经网络(ANN)^[26]、支持向量回归(SVR)^[27]等。

此外,根据船舶运动时域信号特性,极短期预报方法可分为4类:线性平稳、非线性平稳、线性非平稳以及非线性非平稳的预测方法,各类方法的细分如图6所示。

在极短期预报中,预测方法的选择应根据海

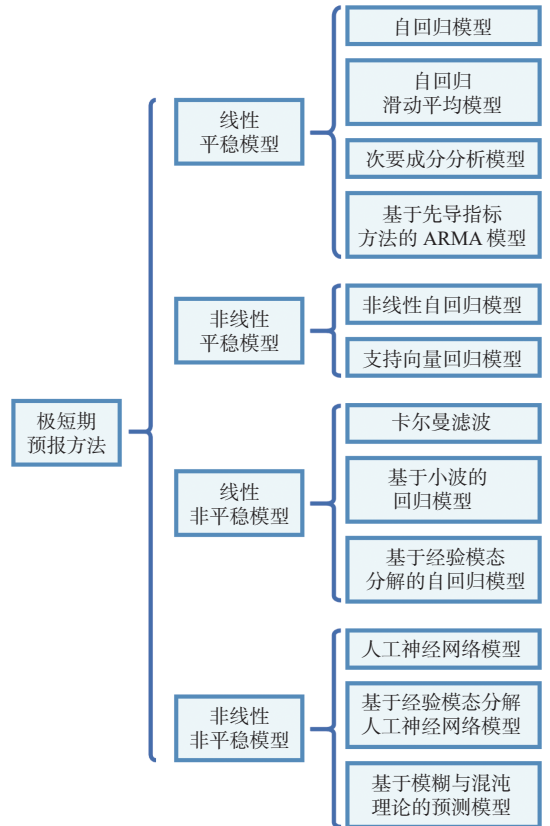


图6 极短期预报方法的分类^[28]

Fig. 6 Classification of short-term prediction approaches^[28]

况、船舶运动特性及数据条件决定。对于小幅波浪引起的线性船舶运动,基于流体力学的线性模型较为适用;而对于强非线性波浪引起的复杂船舶运动,在船舶运动历史数据充足的条件下,基于统计学的非线性模型更具优势。此外考虑到船舶运动时域信号的非平稳性问题,可以结合经验模态分解、小波分析^[22]等方法进行信号分解处理。

采用极短期预报技术对船舶运动进行预测,PLC控制器根据预测的运动信号结合液压缸活塞杆位移传感器信号,利用内部PID计算模块计算调整偏差值,并将其传递至比例放大器以实现液压泵电机驱动器精确控制^[29],输出的控制信号为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

式中: $u(t)$ 为PLC控制器的输出信号; $e(t) = r(t) - y(t) - z(t)$,表示误差信号(其中 $r(t)$ 为参考输入, $y(t)$ 为极短期预报的船舶运动信号, $z(t)$ 为液压缸活塞杆传感器采集到的位移信号); K_p , K_i , K_d 分别为PID控制的比例增益、积分增益和微分增益。

基于上述控制策略,液压油泵通过控制液压缸两侧的液压油量,实现对活塞杆下方负载位置的精确控制。对于图5所示的泵控系统,忽略液压泵的流量脉动以及油液因管道压力和沿程阻力所产生的流量损失,液压缸无杆腔记为A腔,有

B腔记为B腔,泵连接A,B两腔的流量可表示为

$$\begin{cases} q_A = D_p \omega_m - C_{ip}(p_A - p_B) - C_{ep}(p_A - p_0) \\ q_B = D_p \omega_m - C_{ip}(p_A - p_B) + C_{ep}(p_B - p_0) \end{cases} \quad (11)$$

式中: q_A, q_B 表示液压缸 A, B 腔流量; p_A, p_B 表示液压缸 A, B 腔压力; C_{ip}, C_{ep} 表示泵的内、外泄漏系数; p_0 表示回油腔压力; D_p 表示泵的排量。

将上式进行整合,得到泵的流量连续公式为

$$Q_p = D_p \omega_m - C_p P_L \quad (12)$$

式中: $Q_p = (q_A + q_B)/2$, 表示系统流量; $C_p = (C_{ip} + C_{ep})/2$, 表示泵总泄漏系数; $P_L = p_A - p_B$, 表示 A, B 腔压差; ω_m 表示泵的电机转速。

考虑液压缸活塞杆的运动和油液压缩等因素,可以得到液压缸 A, B 腔流量连续性方程为

$$\begin{cases} q_A = A_A \dot{x}_p + C_{ic}(p_A - p_B) + C_{ec} p_A + \frac{V_A}{\beta_e} \dot{p}_A \\ q_B = A_B \dot{x}_p + C_{ic}(p_A - p_B) - C_{ec} p_B - \frac{V_B}{\beta_e} \dot{p}_B \end{cases} \quad (13)$$

式中: C_{ic}, C_{ec} 表示液压缸内、外泄漏系数; V_A, V_B 表示液压缸 A, B 腔有效体积; A_A, A_B 表示液压缸 A, B 腔有效工作面积; x_p 表示液压缸活塞位移; β_e 表示油液有效体积弹性模量。

基于上述理论模型,补偿装置的控制目标是通过调节电机转速 ω_m 控制液压泵输出流量,进而实现对液压缸活塞位置的精准控制,具体的控制信号由式(10)决定。

AHC 装置具有补偿速度快、精度高以及抗干扰能力强等优点,但其运行依赖于电源驱动电动机、液压泵等执行机构,故需要额外消耗较多能量,受限于其高能耗特性,AHC 装置更适用于轻载的中小型吊装系统^[30-31]。

1.4 主-被动混合式波浪补偿装置

为降低 AHC 装置的能耗需求,研究者提出了包含 PHC 和 AHC 的 SAHC 装置^[13,32]。与 AHC 装置类似,SAHC 装置包含执行器的完整闭环系统,具体包括控制器、阀组、泵站、复合油缸、蓄能器、绞车、缆绳和传感器等。如图 7 所示,该 SAHC 装置^[13] 包括由刚性板联合的 2 个被动液压缸和 1 个较小的主动液压缸。被动液压缸承担负载的主要重量,主动液压缸只需要提供额外的调节力。因此相比于传统 AHC 装置,SAHC 装置能耗更低。

此外,AHC 装置的性能很大程度上取决于精密的控制系统以及运动传感器,电气设备的故障会导致整个系统瘫痪。相比之下,SAHC 装置具

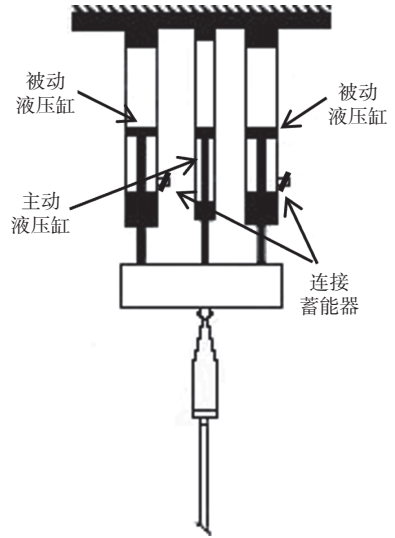


图7 SAHC 基本原理图^[13]

Fig. 7 Schematic diagram of SAHC^[13]

备在被动模式、主动模式之间快速切换的能力,即使 SAHC 装置中的 AHC 部分突发严重故障,装置仍可以运行被动模式。在此模式下系统补偿精度虽有所下降,但这种设计能有效避免系统全面崩溃,提升系统的可靠性^[4]。

1.5 不同波浪补偿装置优缺点对比

常规被动式、自适应被动式、主动式以及混合式波浪补偿装置优缺点如表 2 所示。

表 2 被动式、自适应被动式、主动式和混合式波浪补偿装置对比

Table 2 Comparisons of PHC, adaptive PHC, AHC and SAHC

	常规被动式 (PHC)	自适应被动式 (adaptive PHC)	主动式 (AHC)	混合式 (SAHC)
能量需求	无需外部能量	无需外部能量	较高	较低
系统结构	简单	相对简单	复杂	复杂
补偿精度	有限	高于PHC, 低于SAHC	高	高
可靠性	高	中等	较低	较高
维护成本	较低	中等	高	高
海况适应性	较差	中等	非常好	较好

PHC 装置依靠蓄能器吸收母船升沉运动,无须外界提供能量,结构较为简单,能够改善系统的幅频特性,维护成本较低、可靠性高,但存在补偿精度低、对于恶劣海况的适应性较差、滞后严重等问题。自适应 PHC 装置较 PHC 装置复杂,但能够根据工作环境自动选择工作模式,具有更高的补偿性能和海况适应性。SAHC 装置兼具主、被动波浪补偿的特点,能够以较少的能耗达到较高的补偿精度。同时由于 SAHC 装置能够在 PHC 和 AHC 两种模式之间切换,具有较高的可靠性。AHC 装置需要传感器、执行器等实现闭

环反馈控制, 补偿精度最高, 抗干扰能力最强, 但耗费能量较大, 工作时间受能源系统限制。

2 便携集成式波浪补偿装置的补偿目标

在吊装作业过程中, 不同应用场景下需要补偿的目标不同, 主要包括针对缆绳张力的补偿、针对负载位置的补偿, 以及混合补偿3类。

2.1 张力补偿技术

张力补偿技术主要聚焦于缆绳的恒张力控制, 适用于设备的水下拖曳、水下回收、沉船打捞、海洋结构物安装、深海养殖设施投放等应用场景。在此类应用场景中, 缆绳张力的稳定性至关重要: 张力过小, 缆绳会呈现松弛状态, 进而引发缆绳打结乃至脱钩; 反之张力过大, 则可能导致缆绳承受不住拉力而断裂, 导致负载丢失^[33]。因此张力补偿技术的核心任务在于确保缆绳张力能够持续保持在安全、合理的范围内, 这一技术在便携式与非便携式波浪补偿装置中得到了广泛的研究。

设备的水下拖曳与水下回收是海洋工程中重要的操作过程, 由于负载质量较轻, 属轻载张力补偿范围。设备的水下拖曳主要指通过缆绳系统拖曳遥控水下机器人 (remotely operated vehicle, ROV)、水声科考设备、渔网等完成相关任务。在设备拖曳过程中, 受波浪和工作船升沉运动影响, 被拖曳设备会产生明显的上下起伏运动, 此时如果缆绳张力波动过大, 会导致缆绳断裂以及负载丢失。

设备的水下回收指将设备回收至母船的过程, 在此过程中, 水下设备通过浪溅区时会导致缆绳张力急剧变化, 对缆绳的使用安全和水下设备的回收安全造成极大威胁^[34]。

以上应用场景中, 需要使用张力补偿装置将船舶与负载之间的运动解耦, 即当缆绳因风浪或负载变化而张力增大时, 补偿装置能够自动释放缆绳, 以缓解过大的张力; 相反, 当缆绳张力减小时, 装置则回收缆绳, 确保张力的稳定。

为实现上述功能, 传统张力补偿装置通常为PHC装置, 如图8所示^[35-37]。传统张力补偿装置主要由动滑轮、固定滑轮、液压缸以及蓄能器等部件组成, 当工作船上升时, 缆绳的张力增加, 动滑轮向下运动, 释放缆绳, 并产生恢复力; 相反, 如果船下降, 张力会降低, 动滑轮将向上运动并回收缆绳。选择PHC的原因主要有2点: 首先, PHC

具有“弹簧-阻尼”特性, 是一种隔振器, 能够有效缓解缆绳上张力; 其次, PHC装置组件少、结构简单, 制造成本较低, 方便后续维护与保养。

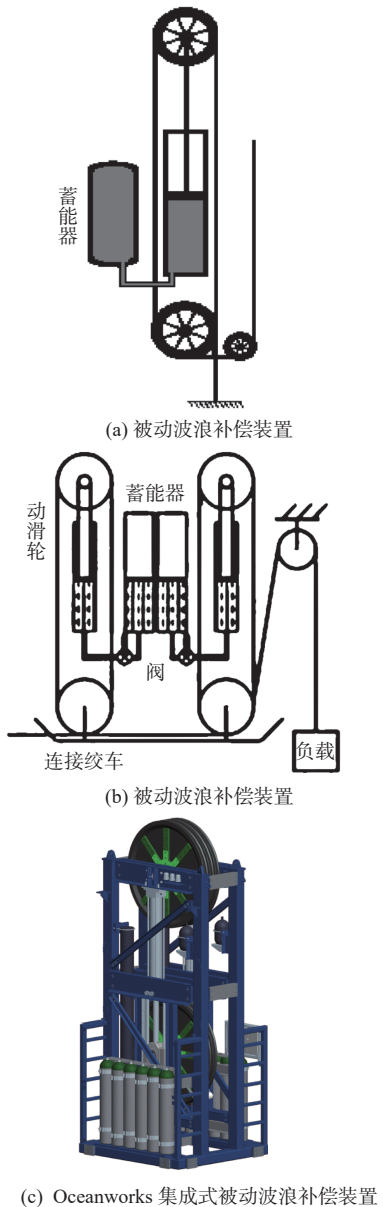
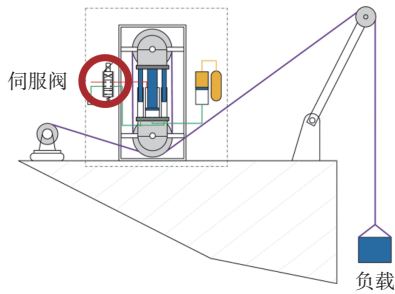


图8 恒张力波浪补偿装置示意图

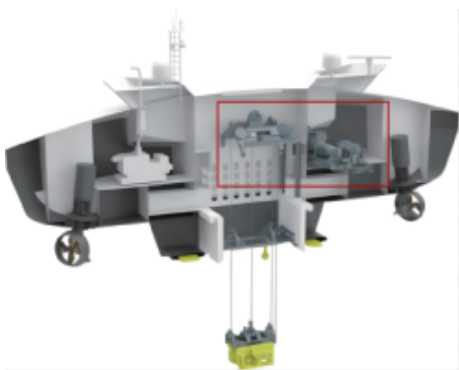
Fig. 8 Schematic diagrams of some constant tension heave compensation devices

尽管PHC的“弹簧-阻尼”结构适用于补偿缆绳张力, 但补偿精度相对有限, 无法满足对精度要求较高的应用场景^[38], 而SAHC及AHC由于具有控制系统, 能够实现更高精度的张力补偿。因此研究者们提出采用SAHC或AHC进行张力补偿的方案, 如Yan等^[2]为SAHC装置设计了一种基于反推法的自适应鲁棒积分滑模控制器, 应用于深海拖曳系统中。如图9所示, SAHC装置在传统波浪补偿装置的基础上增加伺服阀以及张力传感器元件, 通过调节液压缸内部压力, 实现对负载的恒张力控制。实验结果表明, 在6级海况

图9 基于SAHC的波浪补偿装置^[2]Fig. 9 A heave compensation device based on SAHC^[2]

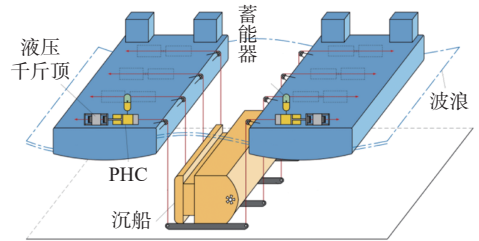
下,张力补偿效率高达99.21%。

由电驱动的波浪补偿装置以伺服电机为动力源,与液压驱动的波浪补偿装置相比,电驱动的AHC装置补偿精度与速度都更具优势^[1],如Tran等^[39]设计了如图10所示的电驱动AHC系统用于ROV回收,通过模型预测控制器实现张力控制,降低缆绳断裂、ROV与船舶撞击的风险。

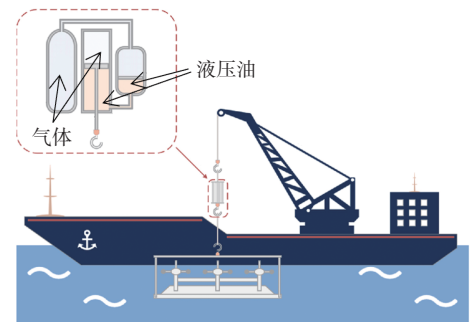
图10 基于AHC的波浪补偿装置^[39]Fig. 10 A heave compensation device based on AHC^[39]

沉船打捞是张力补偿的另一应用场景,需要将已经沉没在海底的船舶打捞出海面,由于沉船质量大,属于重载补偿。传统方法是在船体周围加装打捞浮筒,抽出密封腔室内部的水以获取浮力。受损严重的船排水不足以获得足够的浮力,因此还需使用浮式起重机将沉船打捞到海面。当把沉船从海底拉起的瞬间,缆绳需要克服海底对沉船巨大的吸附力,沉船被打捞出海底后吸附力消失,导致缆绳上张力变化巨大。在沉船上升过程中,由于受海流干扰,沉船将会产生晃动,从而改变沉船运动的方向与速度,导致缆绳上张力剧烈波动。此外,沉船结构易损坏,无法承受大幅度的张力变化。因此,在打捞过程中需要使用波浪补偿装置控制缆绳上的张力在合理范围内,而目前使用的单体起重机无法处理1万t以上的大型沉船,需要使用如图11所示的双驳船同步吊装技术进行打捞^[40]。2017年,中国上海海事局利用最大起重能力为1.1万t的双驳船成功打捞韩国“世越号”沉船^[41]。若需要完成大吨位沉船

起重的任务,AHC和SAHC因需要大量能源供给往往不被选用,而PHC结构简单,承载能力大,因此在沉船打捞等重载作业场景中,PHC装置仍占据主导地位^[40]。

图11 双驳船打捞系统示意图^[40]Fig. 11 Schematic diagram of a salvage of twin-barge hydraulic salvaging system^[40]

便携集成式波浪补偿装置在重载补偿应用领域已有相关研究。如图12所示,Xu等^[42]针对便携集成式PHC装置应用于大型平底结构穿越浪溅区时的张力补偿方法进行研究。该补偿装置是一种自适应PHC装置,能够根据运动补偿模式以及设备所处环境设置不同的补偿方式、动态调整参数。

图12 应用便携集成式PHC的海上起重系统示意图^[42]Fig. 12 Schematic diagram of an offshore lifting system using portable integrated PHC^[42]

海洋结构物安装是指在海洋环境中对各种工程设施(如油气平台、风机、海底管道等)的建设与组装过程。以风机为例,按照支撑结构是否触底,可以将海上风机分为固定式和漂浮式2类。固定式风机的安装过程中,风电机组吊装作业是海上风电场建设施工的关键环节^[43]。风电机组安装方法可分为整体式安装法和分体式安装法。整体式安装是指在海上风机吊装前,在组装基地将机舱、轮毂、叶片、塔筒等主要部件组合成风机组合体,通过特种运输船运输至施工现场,使用重型起重船完成风机整体的安装工作,如图13所示。受潮流、波浪等气象不利条件的影响,船舶与风机组合体之间会产生相对运动,此外由于风机结构复杂,受海风的影响会产生难以预测的运动,导致缆绳上的张力不断变化,增加操作难度和作业风险,因此需要使用波浪补偿装置对缆绳

上张力进行补偿。针对该问题, Safelink AS 公司设计了一种名为串入式主动波浪补偿装置(inline active heave compensator, IAHC)的 SAHC 装置, 保留被动波浪补偿装置的液压缸与蓄能器, 增加主动控制部分, 从而实现更高精度的波浪补偿。



图 13 海上风机整体式安装法^[44]

Fig. 13 Integral installation method of offshore wind turbines^[44]

分体式安装法则是在装配基地只对风电机组的各个部件进行适当组装, 而后再将这些部件运输至海上风电场进行整体组装, 如图 14 所示。虽然分体式安装方法负载的质量较整体式安装小, 但由于叶轮等结构在起吊过程还需调整姿态, 缆绳上的受力也在不断变化, 因此也需要使用波浪补偿装置对缆绳上的张力进行控制。目前国外已经出现应用于风电场建设的商业化便携集成式波浪补偿装置, 如 Cranemaster 公司基于 PHC 原理设计了 CM3-1000T-4300 设备, 其安全工作载荷为 1 000 t, 可靠性高, 能够在恶劣环境中有效运行, 延长作业窗口, 保障设备及工作人员的安全。



图 14 海上风机分体式安装法实例照片^[45]

Fig. 14 Example photograph of the split installation method of offshore wind turbines^[45]

图 15 为风机整机湿拖运输的示意图: 浮体湿拖运输过程中, 受到海风以及海洋波浪的影响, 会产生垂直和水平运动, 导致缆绳上受力时松时紧, 张力不断变化, 此时需要使用张力补偿装置保证拖航稳定, 防止浮体失去控制^[46-48]。在码头完成风机安装后, 整个系统的尺寸和质量进一步增加, 结构与受力更加复杂, 因此在整机湿拖过程中缆绳上产生的张力也更加复杂, 更加需要张力补偿来防止缆绳在使用中断裂。

波浪补偿装置在深海养殖设施投放中也有重



图 15 海上风机湿拖^[46]

Fig. 15 Diagram of wet towing operation of wind turbine^[46]

要应用。如图 16 所示, 深海养殖主要是指以重力式网箱、桁架类网箱及养殖平台、养殖工船等大型渔业装备为主体, 以机械化、自动化、智能化装备技术为支撑, 在深远海进行集约化、规模化的高效养殖方式^[49]。安装网箱时需要提前将网箱湿拖至指定位置, 而后与预先安装好的锚系系统进行连接。如图 16(a)所示, 在安装过程中, 需要使用吊机将网箱部署在预定位置。在此过程中, 网箱体积大、质量高, 运动惯性大, 当受到波浪等自然环境影响产生不规则运动时, 连接网箱的缆绳将受到较大的力, 容易导致缆绳断裂, 因此需要使用张力补偿装置对缆绳上的张力进行控制。此外深海养殖设施在使用过程中还需要具有鱼苗投放、饵料投喂等功能, 需使用起重机将鱼苗、饵料从船投放至网箱或鱼舱。在此过程中, 受海面风以及船舶不规则运动影响, 饵料、鱼苗等负载被吊起后也会产生不规则运动, 从而导致缆绳张力变化。由于质量较轻, 可使用轻载张力补偿技术对缆绳张力进行补偿。

目前波浪补偿装置已经被应用于深海科考设备拖曳、沉船打捞、海上结构物安装、深海养殖设施安放等张力补偿应用场景中, 在设计阶段需综合考虑应用场景的控制精度、安全载荷质量以及成本等因素选择合适的补偿装置。不同应用场景的特点及波浪补偿技术的适用性如表 3 所示。PHC 结构简单, 可靠性高, 适用于轻载及重载系统, 但存在补偿精度有限的问题。AHC 补偿精度高, 但能耗大, 因此更适用于需要高精度补偿的轻载系统。SAHC 控制精度、系统的安全载荷均处于 PHC 及 AHC 之间, 因此被广泛应用于设备拖曳等各类海上安装施工应用场景中。

在便携化、集成化设计中, 应重点关注设备的体积与质量。传统恒张力波浪补偿装置为保证控制精度, 往往会使用体积较大的液压系统与滑轮组, 而便携集成式波浪补偿装置悬挂于缆绳挂



(a) 重力式网箱



(b) 桁架式网箱(德海一号)



(c) 养殖工船(国信101)

图 16 深海养殖装备^[49]Fig. 16 Deep-sea aquaculture facilities^[49]

钩与负载之间,需要具有体积小且质量轻的特点,因此对装置的结构设计、材料选择提出更高

要求。

2.2 位置补偿技术

位置补偿技术使用传感器检测船舶运动,将数据传输给控制器,由控制单元计算控制信号驱动相关执行元件实现对负载位置的精确控制。因此,位置补偿技术采用 AHC 或 SAHC 装置,广泛应用于海上石油平台设备维修、海洋科考以及船只间货物转移等应用场景,辅助负载稳定、准确、快速移动至目标位置,实现空中对接作业、物资补给等任务。

海上石油平台设备在使用过程中,受海水侵蚀、海风破坏等因素的影响,会导致设备工作效率下降、设备损坏,因此需要对海上石油平台损坏设备进行及时维修^[50-51]。通常由专业人员乘坐工作船抵达平台附近,登上石油平台进行维修。当平台距离海岸较远或海况不佳时,也可通过直升机登上平台。受潮汐和海上风浪影响,工作船进行无规律的六自由度运动,会增加工作人员及相关物资在平台与甲板移动时的危险性,降低维修效率。为保障登上平台的安全性,工作船采用如图 17 所示的带有位置补偿装置的舷梯将维修人员送达平台^[52]。以平台衔接点的位置为控制变量,计算控制指令,驱动执行机构实现回转、变幅和伸缩动作,保证平台衔接点位置的稳定,为工作人员提供一个相对稳定的环境,减少滑倒、碰撞等受伤风险,确保工作人员安全。

如图 18 所示,吊装施工在海洋平台维修过程中被广泛使用。在维修过程中,需要使用吊机将

表 3 张力补偿技术在不同应用场景下的适用性比较

Table 3 Comparison of the applicability of tension compensation technology in different application scenarios

应用场景	应用场景特点	波浪补偿技术适用性
设备水下拖曳与回收	负载较轻,受波浪及船舶升沉运动影响,缆绳张力波动较大,易导致缆绳断裂、设备丢失	PHC: 能够有效减缓波浪引起的张力波动,但补偿精度有限 SAHC: 补偿精度较高,与AHC系统相比,能源需求小 AHC: 补偿精度和速度更具优势,但能源消耗较大,适用于精度要求较高且负载轻的应用场景
沉船打捞	沉船质量大,拔出淤泥时张力变化剧烈,受海流干扰时沉船会产生晃动,造成张力波动,需要防止缆绳断裂	PHC: 承载能力强,适合重载应用,能够有效控制大负载的张力波动,结构简单、易于维护
海洋结构物安装	风电机组等重型结构物,受到海浪、风力和船舶运动影响,张力变化较为复杂,精度要求较高	PHC: 承载能力强,适用于重载的吊装应用,能够有效控制缆绳上的波动 SAHC: 控制精度更高,适用于对精度要求较高的应用场景
深海养殖设施投放	安装网箱时,受波浪等自然环境影响,缆绳张力变化大,且在鱼苗、饵料的投放过程中,缆绳张力变化也较为复杂,需要保持稳定	PHC: 承载能力强,适用于网箱安装等重载吊装应用场景,能够有效控制缆绳上的波动 SAHC: 控制精度更高,适用于对精度要求较高的应用场景

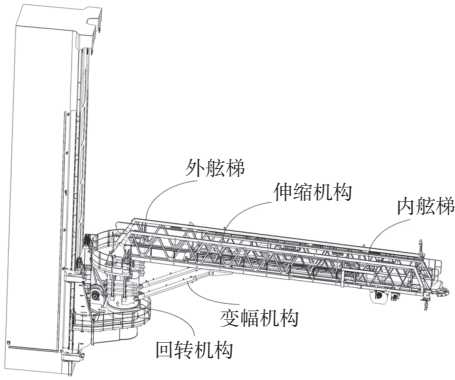


图 17 带有波浪补偿装置的舷梯示意图^[52]

Fig. 17 Schematic diagram of gangway with wave compensation device^[52]



图 18 海洋平台吊装施工现场照片^[53]

Fig. 18 Photo of offshore platform hoisting construction site^[53]

所需维修工具、备件等材料从工作船的储存区域吊装至工作现场。此外,在更换或维修大型设备时,需要使用吊机拆卸故障设备并安装新的或修复后的设备。对于高精度的维修工作,还需要将维修设备准确地对准故障设备,方便技术人员操作。然而,受到海面风浪影响,被吊起的负载往往会产生剧烈的晃动,为提升维修效率、延长作业时间窗口、保证工作人员安全,需要对负载位置进行补偿^[53]。

在水下设备回收过程中,需稳定控制回收装置的空间位置。以自主水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)为例,位置补偿可应用于 AUV 的自主对接和起吊回收阶段。

图 19 为 Bluefin Robotics 公司为其 AUV 设计的对接设施^[54]。在 AUV 自主对接阶段,需要 AUV 靠近捕捉装置,进而完成回收。在此过程中, AUV 需要实时测量其与对接装置的距离、方位等信息,完成对接操作。为提升工作效率,在复杂海洋环境的干扰下,需要保证回收机构稳定

在水中固定位置,这一过程可使用位置补偿算法对回收机构位置进行稳定性控制^[55]。

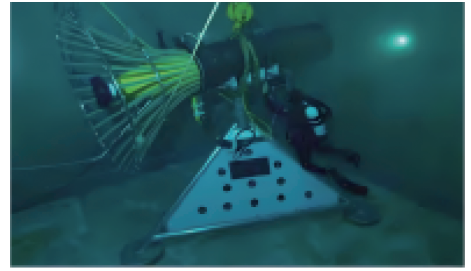
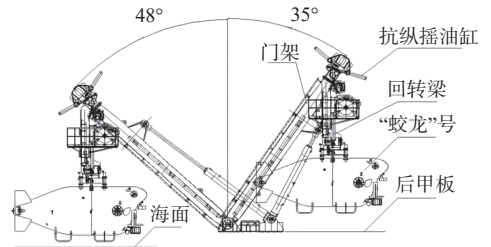


图 19 Bluefin AUV 对接装置^[54]

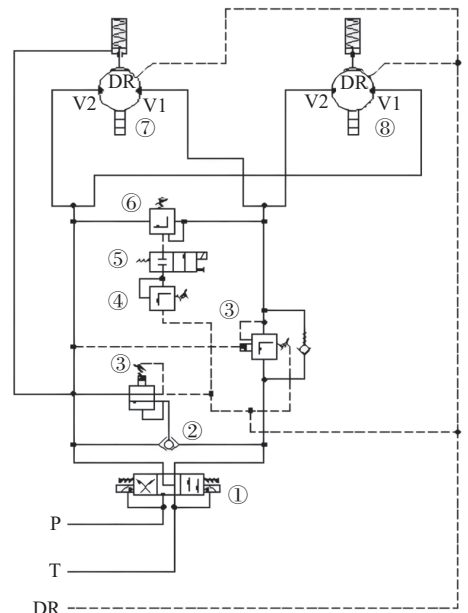
Fig. 19 Bluefin AUV docking device^[54]

在起吊阶段,受船舶升沉运动干扰,需要使用波浪补偿装置将 AUV 的运动与船舶运动解耦。以“蛟龙”号为例,如图 20 所示,“蛟龙”号的回收装置采用恒张力波浪补偿装置以缓解“蛟龙”号的快速升沉运动,该系统已经完成了近 200 次布放回收作业,能够很好地适应恶劣海况下的升沉运动,满足三、四级海况的布放回收要求^[56]。

船只间货物转运是位置补偿装置的又一重要应用场景。将货物或设施从一艘船转移到另一艘



(a) A 型架的主要结构



① 三位四通换向阀; ② 梭阀; ③ 先导顺序阀;
 ④ 先导安全阀; ⑤ 二位二通阀; ⑥ 高压溢流阀;
 ⑦ 液压马达; ⑧ 液压马达;
 (b) 主绞车恒张力控制系统

图 20 A 型框架式布放回收装置^[56]

Fig. 20 Placement and recovery device for A-frame^[56]

船的过程中,受风、浪、流等外部扰动影响,船只间会发生相对运动^[57]。这种相对运动若不加以补偿,将导致已被提起的货物与甲板发生碰撞,造成负载损坏。因此需要使用波浪补偿装置对负载位置进行准确控制。目前波浪补偿装置设计厂商已经开发主动波浪补偿装置,如图 21 所示为 Cranemaster 公司研发的主动波浪补偿装置,该装置能够通过传感器检测平台运动,准确调整负载位置,保持负载在作业过程中的稳定性。该装置被广泛应用于海上风电场建设、码头货物转移、海上维护作业以及船只间货物转移等需要在船只之间或船只与码头之间进行负载转移的应用场景,有效扩大海上作业窗口期,降低设备损坏风险,节约建设与运营成本^[58]。

位置补偿技术可以应用于海上石油平台维修、水下设备回收、船只间货物转运等应用场景,其共同特点是环境复杂多变,因此需要控制系统



图 21 Cranemaster 公司从供给船向安装船吊装风电机组件^[58]
Fig. 21 Cranemaster transferring wind turbine components from a supply vessel to an installation vessel^[58]

能够实时应对波浪、潮汐、风力等多种外部扰动影响,确保负载在作业过程中的位置稳定性。场景特点和装置适用性归纳如表 4 所示。

表 4 位置补偿技术在不同应用场景下的适用性比较

Table 4 Comparison of the applicability of position compensation technology in different application scenarios

应用场景	应用场景特点	波浪补偿技术适用性
海上石油平台维修	需保障工作人员安全,对位置控制精度要求高。此外,在吊装作业中,需准确控制负载位置,提升维修效率	AHC/SAHC: 升沉补偿精度高,能够实现对平台衔接点以及负载位置的准确控制
水下设备回收	水下工作,需要降低船舶运动以及海流对接装置的影响,保证对接装置位置相对稳定 在AUV的拖曳过程中,为保障设备安全,需维持缆绳张力恒定	AHC/SAHC: 补偿精度高,适合对对接系统位置进行准确控制 PHC: 能源需求低,补偿精度有限,能满足较低海况布放回收要求
船只间货物转运	需避免负载与甲板发生碰撞	AHC/SAHC: 补偿精度高,适合对负载位置进行准确控制

位置补偿技术使用传感器实时检测船舶运动状态,利用控制算法实现对位置的高精度控制。根据控制策略的不同,常用的位置控制算法可以分为经典控制算法、现代控制算法以及智能控制算法 3 类。经典控制算法认为升沉补偿系统是线性时不变的单输入单输出系统,常见的算法有 PID 控制算法、前馈控制等。现代控制算法基于状态空间模型,可以处理多输入多输出模型,常见的有模型预测控制(model predictive control, MPC)、滑模控制(sliding model control, SMC)等。智能控制算法结合人工智能技术,能够处理复杂非线性系统的控制问题。为比较不同控制算法的效果,Zinage 和 Somayajula^[59]基于线性模型研究比例微分、线性二次积、MPC 和 SMC 控制器对干扰和噪声的响应,仿真结果表明 SMC 对噪声的抑制效果较好,MPC 具有较强的抗干扰能力,而 PD 控制器在实际应用中具有最佳的折中性能。

在经典控制算法领域,PID 算法是较为成熟的基于反馈的控制技术。如图 22 所示,PID 通过

计算误差信号的比例、微分和积分,控制执行机构,具有结构简单,稳定性好,可靠性高的特点,能够有效控制负载位置。例如,Zhao 等^[60]提出如图 23 所示的适用于深海水下安装的波浪补偿装置,使用运动参考单元检测船舶运动,并将该信号传给控制单元,采用 PID 控制方法,以负载位移为被控制量,通过调节泵的流量实现升沉补偿。

在负载位移控制的过程中,整个控制系统结构复杂,受机械摩擦、电子元件迟滞效应等影响,系统具有较强的非线性特征,同时船舶及负载具有很大的惯性,此外波浪、风等因素会对系统造成强干扰,这些都导致预先设置参数的传统

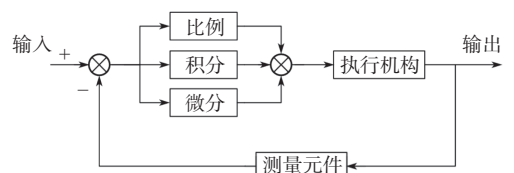


图 22 PID 控制示意图

Fig. 22 Diagram of PID control

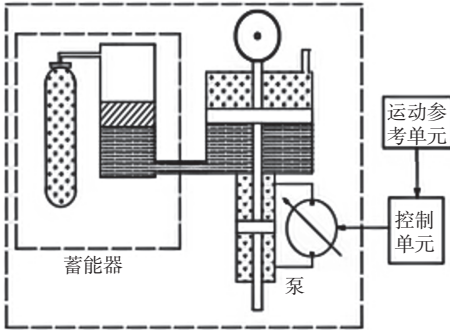


图 23 适用于深海安装的波浪补偿装置结构图^[60]

Fig. 23 The structure map of heave compensation device for the deep water installation^[60]

PID 算法无法始终达到最佳效果, 需要根据工作状态动态调整 PID 参数, 实现最优控制。以包含空中阶段、入水阶段的救生艇下放过程为例, 在下放过程中根据海况、工作阶段、工作船及救生艇运动状态调整 PID 参数, Mei 等^[61]设计如图 24 所示绞车型波浪补偿装置, 用于救生艇的安全下放任务, 使用传感器检测波浪、工作船以及救生艇的运动参数。基于变参数 PID 算法计算控制信号, 通过调节绞车卷筒控制救生艇下降速度, 从而保障救生艇稳定运动并安全入水。变参数 PID 控制算法能够考虑船舶在海上运动时参数不确定且时变的特点, 能够根据不同的海况和工作模式调整 PID 控制器参数, 进而实现最优控制。

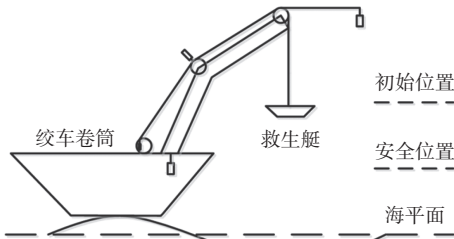


图 24 救生艇下放系统示意图^[61]

Fig. 24 Schematic diagram of lifeboat lowering system^[61]

由于基于反馈的控制算法没有考虑执行器与控制系统之间的通信延迟, 系统在时间和相位上存在滞后^[38]。为解决该问题, 研究者将船舶升沉运动预测数据作为系统的前馈输入, 提高控制精度。Chu 等^[62]使用多层感知器预测船舶运动, 并根据船舶升沉速度计算绞车升沉运动参考速度实现前馈, 最后基于 PID 控制系统实现对负载的升沉补偿。Hu 等^[63]针对浮式平台, 分别验证了基于反向传播神经网络 (back propagation neural network, BPNN) 以及长短期记忆递归神经网络 (long short-term memory recurrent neural network, LSTM) 控制算法的性能。结果表明, 基于 BPNN 的控制算法计算成本低, 性能可靠, 基于 LSTM 的控制算法性能更优, 在不规则波的运动情况下具有更

好的表现。尽管预测船舶运动参数能够补偿校正控制系统中的滞后, 但是由于船舶起伏运动本质上难以长时间预测, 且错误率较高, 因此面对不规则干扰或不确定系统时, 就很容易导致控制精度降低^[38]。

现代控制算法采用状态空间表达式, 能够更全面地反映系统的动态特性, 目前常用的算法有 MPC, SMC 等。例如 Chen 等^[15]针对比例阀液压驱动系统固有的非线性问题, 基于非线性模型预测控制算法, 为液压驱动的绞车设计二级调节主动升沉补偿控制器, 如图 25 所示。该控制器的外层为 NMPC-PID 负载位置控制器, 内层为 NMPC-PID 扭矩控制器。实验结果表明, 这种双层结构能够保证内环扭矩严格跟踪外环提供的参考轨迹, 在面对模型的不确定性和不规则扰动时, 补偿效率较高。Richter 等^[64]使用船舶吊点姿态和升沉运动进行估计, 基于 Levinson 递归最小二乘法对升沉运动进行预测, 使用 MPC 和基于模型的两自由度控制器对绞车运动进行控制, 结果表明该算法在短时间内有较高的控制精度。为提高系统的实时性和控制精度, Leng 等^[13]针对 SAHC 系统, 设计波浪补偿装置, 如图 26 所示。该装置采用改进的自回归算法预测船舶升沉运动, 并设计自适应反步滑模控制器, 与传统 PID 控制算法相比, 系统的实时性得到了明显提升, 且能够抑制非线性因素和扰动带来的影响。相比于传统控制算法, 现代控制算法能够提升系统控制精度和实时性, 具有较为广阔的应用场景。

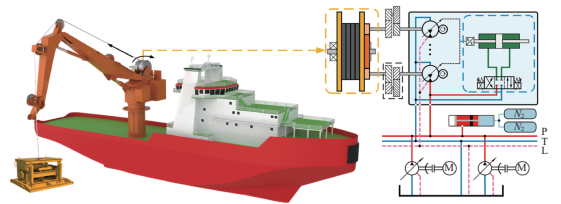


图 25 配备波浪补偿装置的液压绞车^[15]

Fig. 25 Hydraulic winch equipped with a wave compensation system^[15]

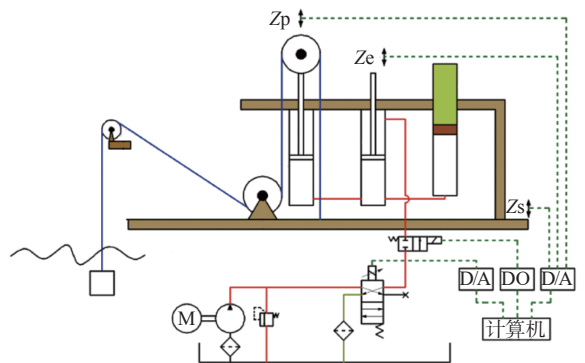


图 26 集成 SAHC 的绞车^[13]

Fig. 26 Winch integrated with SAHC^[13]

智能控制算法结合了人工智能算法,理论上更适合处理升沉补偿这种非线性、时变、多变量的系统。例如,针对船舶升沉运动高度动态且非线性的特点,Zhang等^[65]将强化学习算法与传统PID算法结合,提出一种基于行为-评价(actor-critic)框架的混合控制方法,使用actor网络输出动作,critic网络评估动作质量,并将船舶的升沉位移、控制平台动作、评估结果(奖励)以及下一状态存入经验回放池用于训练。在不同海况下,该方法的补偿效率超过92%,并且在3~4级海况下补偿效率高于96%。然而该方法仅进行了仿真验证,且模型复杂,计算量大,其有效性还需进一

步验证^[61]。

如表5所示,在位置补偿技术设计过程中,需要结合应用场景、对补偿效果的要求以及设备的计算能力,选择合适的控制算法。传统PID方法结构简单,计算成本极低,但控制精度有限;相较于传统PID算法,变参数的PID控制算法虽然计算成本稍高,但具有更高的控制精度。基于强化学习的PID算法理论上具有更高的控制精度,但其有效性还需进一步验证。基于最小二乘法、BP神经网络、LSTM神经网络等利用预测算法构建前馈的控制算法具有较高的控制精度,但相较于PID算法,该类控制算法计算成本较高。

表5 不同控制算法对比

Table 5 Comparison of different control algorithms

控制算法	补偿精度	抗干扰能力	计算成本	预测船舶运动需求
PID	补偿精度中等,适用于线性定常系统	抗干扰能力一般,易受外部干扰影响	结构简单,计算成本极低	无需预测船舶未来的运动
变参数PID控制	补偿精度高,能够动态调整参数,补偿效果优于传统PID	抗干扰能力较强,适合动态环境	结构较PID复杂,计算成本较低	无需预测船舶未来的运动
基于强化学习的PID控制算法	适合非线性、环境复杂的船舶系统,补偿精度非常高	适合复杂多变的环境,抗干扰能力强	训练过程复杂,计算成本高	无需预测船舶未来的运动
基于BP神经网络预测的控制算法	补偿精度较高	抗干扰能力较强	计算成本较低	控制性能依赖于BP神经网络的预测结果
基于LSTM预测的控制算法	补偿精度较高,优于基于BP神经网络预测的控制算法	抗干扰能力优于基于BP神经网络预测的控制算法	计算成本高于基于BP神经网络预测的控制算法	控制性能依赖于LSTM算法预测结果
基于MPC的控制算法	补偿精度较高	抗干扰能力较强	计算成本较低	控制性能依赖于MPC的预测结果,该预测结果受构建的物理模型影响
基于Levinson递归最小二乘法预测的控制算法	在较短时间内具有较高的补偿精度	抗干扰能力较强	计算成本较低	控制性能依赖于Levinson递归最小二乘法预测结果
基于改进自回归预测自适应反步滑模控制算法	补偿精度较高	能够抑制非线性因素和扰动带来的影响	计算成本较低,具有较高的实时性	控制性能依赖于自回归预测算法

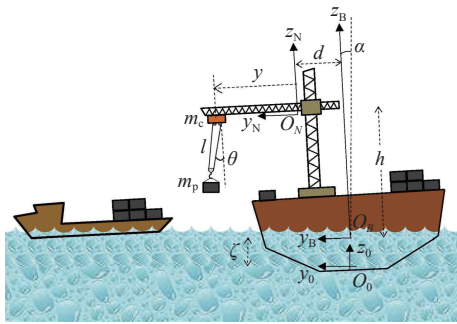
在设计便携集成式波浪补偿装置时,由于AHC或SAHC系统需要消耗大量能量调节控制系统中的执行元件,而便携集成式波浪补偿装置通常采用独立集成的能源供给系统。为防止因能量供应不足而导致系统无法实现持续、稳定的补偿,需要研发功耗更低的波浪补偿装置,以确保系统运行的可靠性与持久性。

2.3 混合补偿技术

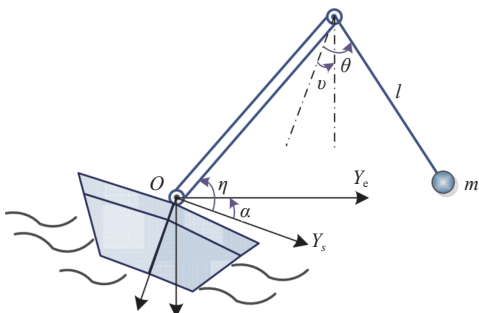
当系统所处环境复杂时,单一变量的补偿方法难以确保其补偿效果,例如仅对缆绳张力进行补偿不能保证负载位移的稳定性^[66];同时当系统面临不规则干扰或存在不确定性时,即便仅针对系统位置进行控制,其精度也仍有提升的空间。

因此在空中阶段、入水阶段以及水下波浪区等负载受到剧烈扰动且需要精确控制的阶段,必须综合考虑波浪补偿装置中的缆绳、负载甚至工作船的受力、运动参数等多个状态变量进行补偿,从而提升控制系统精度,增强其抗干扰能力。

在负载的空中阶段,尽管位置补偿技术已经取得了一定成果,但其控制性能仍然存在着进一步提升与优化的空间。为抵抗海风、海浪等不确定干扰的影响,Raja Ismail等^[67]在如图27(a)所示的起重机系统中设计了一种鲁棒滑模控制器,综合考虑负载运动状态、缆绳长度等状态变量,实现对负载位移的精确控制。此外结合人工智能技术,能构建控制性能更为卓越的系统,例如Yang等^[68]等设计的基于神经网络的自适应控制方法,



(a) 集装箱转运系统示意图



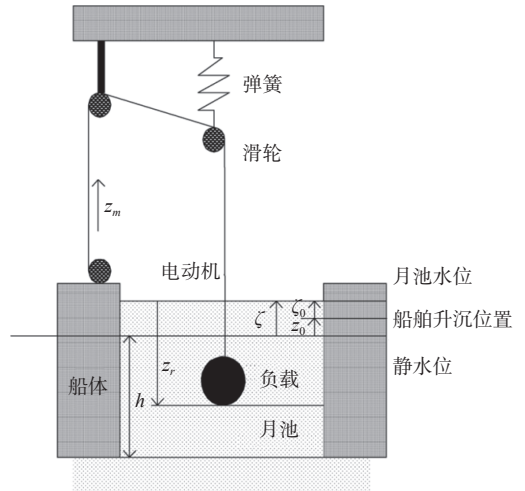
(b) 船载起重机系统示意图

图 27 空中阶段起重机系统示意图

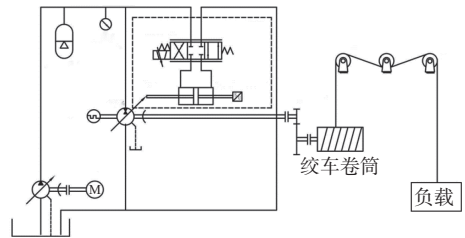
Fig. 27 Schematic diagram of crane system in the airborne phase

可对如图 27(b)所示的系统进行波浪补偿。该方法无须对系统进行线性化处理,即可实现对如起重机吊臂的俯仰角度、绳索长度等驱动状态变量以及负载摆动角度等非驱动状态变量的有效控制,使负载能够准确达到期望位置并抑制其摆动,从而提高船载起重机系统的安全性和稳定性。

负载入水阶段会受到水动力的影响,导致瞬态载荷激增,进而造成负载损坏以及缆绳断裂。考虑到负载的位移以及入水时受到的水动力,Skaare和Egeland^[69]借鉴机器人领域中常使用的力/位混合控制方法,为如图 28(a)所示的系统设计了并行力-位置控制器,采用频率分离方案,在高频率范围主要控制负载位置,在低频率范围主要控制力。与传统控制方法相比,并行力-位置控制器能很好地降低缆绳张力,但在规则波设备出水以及入水的应用场景下,控制器的性能仍可进一步优化。考虑到波浪补偿装置与环境之间的相互作用,研究者提出阻抗控制方案,其中阻抗产生单位实际谐波速度位移(或旋转)所需的复杂谐波力(或力矩),能够反映系统的动态刚度特性。阻抗控制是一种基于力的控制方法,通过调节系统动态刚度来控制波浪补偿装置与环境之间的动态交互响应,从而控制负载的受力与位移^[70]。Wu等^[71]为如图 28(b)所示的系统提出一种双环控制结构,外环使用拓展状态控制器估计负载状态,内环使用阻抗控制器跟踪负载的轨迹并实现阻抗调



(a) 月池负载入水示意图



(b) 起重机系统示意图

图 28 入水阶段起重机系统示意图

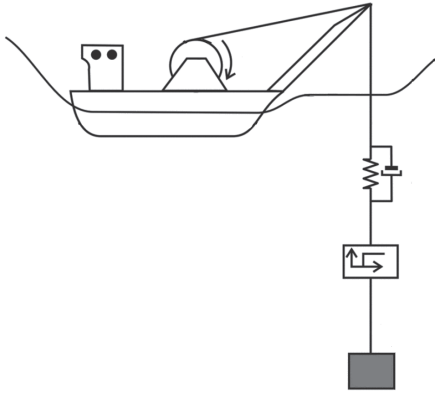
Fig. 28 Schematic diagram of crane system in the water entry phase

节。实验结果表明,综合考虑负载位移与受力的控制器能够将有效载荷降低到期望位置,同时保持缆绳张力、负载受到的水动力在可控范围内。

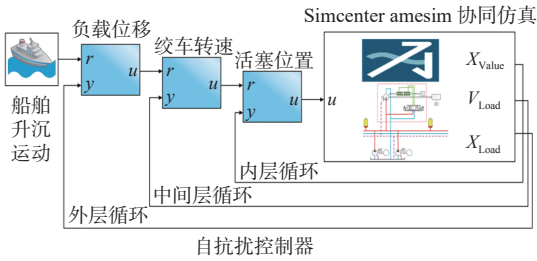
负载位于水下区域时,作业缆绳长度较长,而绳上张力波传递速度有限,因此波浪补偿装置与载荷之间存在力的时间延迟。如图 29(a)所示,考虑到缆绳长度导致的时滞现象,Küchler和Sawodny^[72]提出一种非线性控制器,综合考虑载荷与工作船运动状态,构建前馈控制算法并提升控制精度。Li等^[73]提出如图 29(b)所示的 3 层自抗扰控制策略,包括活塞位置、绞车转速控制以及负载位移控制,每个回路的自抗扰控制器都能够从输入和输出信号中实时提取总扰动信息进行补偿,具有较好的控制性能和抗干扰能力,在各种海况下均能精确、快速地控制负载位置。

为保障控制效果,混合控制技术基于 AHC 装置进行设计,对缆绳的长度、倾角、负载的位置、速度,活塞的位置等多个状态变量进行实时测量与控制。然而过多的控制变量会带来较大的计算负担,因此在设计中还需合理选择控制变量。

在设计便携集成式波浪补偿装置时,考虑到便携集成式波浪补偿装置通常具有设计紧凑且空间有限的特点,需将多个传感器、控制器和执行器集成到有限的空间中,其对系统的硬件设计提



(a) 基于船载起重机的波浪补偿系统示意图



(b) 波浪补偿系统三层自抗扰控制策略示意图

图 29 水下区域波浪补偿系统示意图

Fig. 29 Schematic diagram of heave compensation system in underwater zone

出更高要求, 为此需要开发小型化、高集成度的传感器与执行器, 以满足便携、集成的需求。

3 便携集成式波浪补偿装置产品发展现状

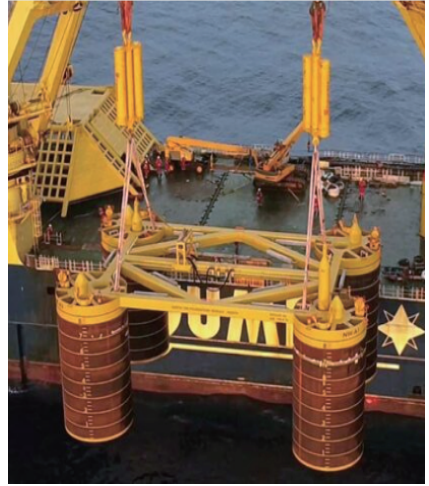
便携集成式波浪补偿装置近年来在海洋工程领域受到越来越多的关注, 国际上相关研发公司主要包括 Safelink AS, Cranemaster 和 Vremac Cylinders 等。以上公司在 PHC, AHC 等领域开发出系列产品, 并深入研究了深度温度补偿、自适应 PHC 设计、驳船起吊、快速提升以及活塞杆锁定与释放等关键技术。

3.1 国际主流产品

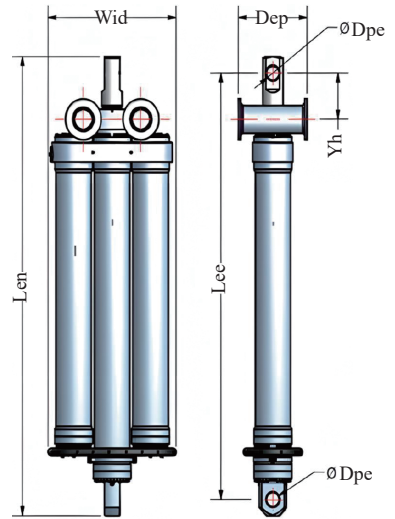
PHC 产品具有技术成熟、可靠性高、无需外部能量驱动、成本相对较低、适应性强等优点, 已被广泛应用于减振、缆绳过载保护、快速升降、张力控制、海底着陆以及重载提升等作业中。图 30 为由 Safelink AS, Cranemaster, Vremac Cylinders, Norwegian Dynamics 以及 Tensa 公司设计的 PHC 产品 [16,74-77]。Safelink AS 公司的 PHC 产品凭借其具备的减振、过载保护、甲板快速起升等功能, 显著提高了海上吊装作业的安全性和效率; Crane-master 公司 PHC 产品可靠性高, 同时可以根据客户需求, 选配快速提升和锁定释放功能, 即使在恶劣天气下也可以准确定位负载, 提高了作业效



(a) Safelink AS 公司 PHC 产品



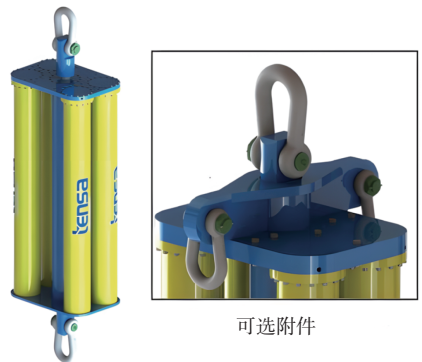
(b) Cranemaster 公司 PHC 产品



(c) Vremac Cylinders 公司 PHC 产品



(d) Norwegian Dynamics 公司 PHC 产品



(e) Tensa 公司 SPHC 产品

图 30 不同公司生产的标准 PHC 产品示意图

Fig. 30 Standard PHC products designed by different companies

率; Vremac Cylinders 公司为海上起重作业设计出 Maxine heave compensation 产品, 该产品承载重量范围高达 500 t, 水上、水下均可使用, 能够保障吊装作业安全高效地进行; Norwegian Dynamics 公司主要提供 PHC 产品, 涵盖多种安全工作负载 (safe working load, SWL), 从 10 t 到 250 t 不等的 PHC 产品, 并具有 3 000 m 的深海作业能力; Tensa 公司提供一系列的水下被动升沉补偿产品 (subsea passive heave compensation, SPHC), 可与现有的起重机或绞车配合使用, TENSA SPHC 系列是模块化的产品, 能够迅速适应不同行程和工作条件, 还可以增加额外的蓄能器, 进一步提高设备在极端条件下的工作性能。

除传统 PHC 产品外, Cranemaster 及 Safelink AS 等公司也推出新型的自适应 PHC 产品, 如图 31 所示^[12,78]。自适应 PHC 产品改进了传统设计理念, 能够根据工作阶段动态调整系统参数, 优化吊装作业过程中的产品性能。



(a) Safelink AS 公司自适应 PHC 产品^[12]



(b) Cranemaster 公司自适应 PHC 产品^[78]

图 31 不同公司生产的自适应 PHC 产品

Fig. 31 Adaptive PHC products designed by different companies

AHC 产品主要由 Cranemaster 和 Safelink AS 两家公司研发, 适用于控制精度高、作业环境复杂的海上环境。图 32 为 Cranemaster 公司的 AHC 产品, 该设备将 PHC 与 AHC 相结合, 利用被动补偿降低主动补偿能耗, 同时通过主动张力调节和精确运动控制, 实现产品的最佳性能。产品尤其适用于要求苛刻的转运和提升作业, 显著减少动态载荷并避免负载与甲板发生碰撞。Safelink AS 公司的串入式升沉补偿装置 (inline active heave compensator, IAHC) 如图 33 所示, 该产品同样集成 PHC 和 AHC 的优点, 具有 PHC 的减振器功能



图 32 Cranemaster 公司设计的 AHC 产品^[58]

Fig. 32 AHC product designed by Cranemaster^[58]



图 33 Safelink AS 公司设计的 IAHC 产品^[79]

Fig. 33 IAHC product designed by Safelink AS^[79]

同时能够对位置精准控制, 此外 IAHC 可在被动和主动模式之间切换, 具有较高的灵活性和可靠性。

Cranemaster 和 Safelink AS 公司结合被动补偿与主动补偿技术研制出智能化 AHC 产品, 在复杂工况和高精度需求场景中具有显著竞争优势; 对于大负载或深海作业场景, Vremac Cylinders 公司以高达 500 t 的负载能力确保重载安全性; Norwegian Dynamics 公司凭借 3 000 m 深海作业能力覆盖多种深海作业需求; Tensa 公司则通过模块化设计提供灵活适应各种工况的 PHC 产品。除此之外, 以上公司的市场份额与其所在地及供销关系密切相关, 总部位于挪威的 Cranemaster, Safelink AS, Norwegian Dynamics 公司以及总部位于荷兰的 Vremac Cylinders 公司受益于北欧发达的海洋工程产业, 他们的产品广泛应用于北海的海上作业项目, 在欧洲市场占据主要地位, 而 Tensa 公司总部位于澳大利亚西部的珀斯, 其业务重点集中在澳大利亚和东南亚地区。对于上述国际主流产品的对比总结如表 6 所示。

3.2 国产化研究的发展方向

我国在便携集成式波浪补偿装置领域的研究与应用尚处于研发阶段, 相较于国际主流产品, 仍然具有一定差距。通过对国外相关产品的深入分析, 可以为我国国产化研究提供重要的借鉴。总体而言, 补偿装置未来的发展可以从技术创新

表6 国际主流产品对比

Table 6 Comparison of different international mainstream product

公司名称	公司总部所在地区	产品类型	产品特点
Safelink AS	挪威	PHC	Safelink在标准PHC产品基础上, 首创自适应PHC, 实现自动化作业; 之后推出AHC产品, 提供活塞杆高精度闭环控制, 满足不同作业环境需求
		Adaptive PHC	
		IAHC	
Cranemaster	挪威	PHC	Cranemaster在紧凑型减震器基础上逐步推出PHC产品系列、自适应PHC以及AHC产品, 提供浪溅区、水下、海底着陆和回收等多种工作模式
		Adaptive PHC	
		AHC	
Vremac Cylinders	荷兰	PHC	Vremac Cylinders主要提供基础PHC系列产品, 专注于液压缸制造, 能够定制长行程和高负载的PHC产品
Norwegian Dynamics	挪威	PHC	Norwegian Dynamics致力于提供成本最低、重量最轻、性价比最高的基础PHC系列
Tensa	澳大利亚	SPHC	Tensa主要提供水下被动下沉补偿设备(SPHC), 与现有绞车配合使用, 通过模块化设计能够迅速适应不同行程和工作条件

(主要包括产品设计、功能实现和控制策略等方面)和制造工艺(主要包括材料选择、密封技术和防腐设计等方面)两个方面推进。

1) 在技术创新方面, 部分国外公司选择继续优化传统 PHC 产品, 如 Vremac Cylinders, Norwegian Dynamics 和 Tensa 公司推出的不同规格的 PHC 产品系列, 能够使设备灵活适应不同工作条件需求, 且能够快速部署, 降低系统综合成本。此外, Safelink AS 和 Cranemaster 等公司通过应用智能控制技术, 推出自适应 PHC 产品和 AHC 产品, 通过动态调整系统参数, 优化吊装性能。

对于产品设计, 我国目前具备推出 PHC 产品系列的能力, 能够根据不同负载、行程以及作业需求, 定制匹配的 PHC 产品。之后可推进设备的模块化设计, 将复杂的产品分解成若干独立模块(液压缸、蓄能器、气瓶、控制模块、传感器模块等), 每个模块进行独立开发与测试, 以提高产品灵活性、可扩展性和生产效率。同时, 为保证不同模块之间的兼容性, 需采用标准化接口设计。对于功能实现, 主要是加强智能控制算法的研究及其在补偿装置上的应用, 需要深入研究与探索实时数据分析与处理、系统自适应调整、波浪变化预测、复杂海况下的实时响应、精确控制及多模式操作控制技术等。对于控制策略, 则需要针对我国海洋作业区域的特点, 根据实际作业需求进一步优化, 以提升设备整体性能。

2) 在制造工艺方面, 便携集成式波浪补偿装置的作业环境需求为深海, 材料的选择和密封防腐设计是保证装置可靠性和耐久性的关键。

(1) 在材料选择方面, 国际产品的 PHC 设备通常采用高强度合金钢作为装置主体的主要材料, 以实现设备的轻量化和高强度性能。我国在

高性能合金钢材料的研发和制造方面具备成熟条件, 后期可以在成本控制和重量控制方面, 结合我国新材料的研发现状, 优选性价比高、强度高和耐腐蚀的材料, 逐步实现产品的轻量化和低成本, 进一步提升产品整体竞争力。

(2) 在密封设计方面, 液压缸作为关键的执行部件, 其密封性能直接关系到波浪补偿装置运行的稳定性。液压缸密封设计需要满足深海环境的动态密封要求, 特别是在往复运动条件下, 需要长期保持优异的密封性能, 防止海水进入设备内部。Norwegian Dynamics 公司采用 Hunger Dichtungen 品牌的密封设计^[6], 其密封件以低摩擦和高效密封性能著称, 能够满足深海高压环境的作业要求^[80]。此外国际品牌 Trelleborg 的密封技术也被用于各种液压设备, Trelleborg 密封的专有材料, 如基于聚四氟乙烯的 Turcon®或基于聚氨酯的 Zurcon®, 可确保液压密封件的耐用性和性能^[81]。我国在针对深海设备的密封技术研发过程中, 可以借鉴国际密封品牌的技术经验, 积极推进自主高性能密封材料的开发, 以解决复杂海洋环境中的多重挑战, 满足便携集成式波浪补偿装置的深海应用需求。

(3) 在防腐设计方面, 便携集成式波浪补偿装置需应对深海作业环境中压力、溶解氧诱发的氧化反应、温度变化引起的应力效应以及微生物侵蚀等多重挑战, 而且补偿器在使用时还涉及海洋大气区(受海盐微粒和陆地大气影响)、飞溅区(海水飞溅)和全浸区(全部浸泡)3种典型海洋环境。这些环境条件会导致装置不同程度的腐蚀。为延长波浪补偿器的使用寿命并确保其运行安全, 需采用经济且科学的防护策略以降低腐蚀风险。国际产品在深海设备防腐领域已广泛应用多

种技术, 主要包括激光熔覆技术、超音速火焰喷涂、达克罗表面处理以及水下油漆涂层处理等。激光熔覆技术是通过激光辐照将涂层材料与基体表面同时熔化, 快速凝固后形成与基体冶金结合的防腐表面涂层^[82]; 超音速火焰喷涂是通过电弧、火焰、等离子体、压缩空气等为热源或动力源, 将具有特定成分的线材或者粉末加热和加速, 以熔化或部分熔化固态粒子流的方式, 沉积在基板表面, 形成具有耐磨、耐蚀、耐高温等特殊功能的覆层^[83]; 达克罗表面处理技术是将锌铬涂料浸涂、刷涂或喷涂于钢铁零件或构件表面, 经烘烤形成的防腐蚀涂层, 我国有关标准中称为“锌铬涂层”^[84]; 水下油漆防腐技术是在水下结构表面涂覆特殊配方的油漆形成保护层, 有效隔绝水和氧气与金属基材的直接接触^[85]。以上防腐技术已在国内得到应用, 为满足深海设备不同位置的防腐需求, 可以选用多种防腐技术组合的方式, 确保便携集成式波浪补偿装置与海水接触的部分能够通过严格的中性盐雾试验, 达到耐腐蚀标准。

4 结 语

便携集成式波浪补偿装置包括被动式、自适应被动式、主动式以及混合式。被动式结构简单稳定性高, 但补偿精度较低; 自适应被动式能够根据外部环境调节系统参数, 具有较高的适应性, 主动式补偿精度较高, 但能耗较大; 混合式结构较为复杂, 兼顾主动式和被动式的优点。在海上吊装作业过程中, 不同吊装阶段的补偿目标不同, 主要包括缆绳张力补偿、负载垂向位置补偿和混合补偿。张力补偿主要为了防止缆绳动态载荷剧烈波动, 负载垂向位置补偿主要在于负载空中与水下对接等应用场景, 负载混合补偿主要应用于载荷剧烈波动且位置需要精确控制的阶段。

目前便携集成式波浪补偿产品主要来自国外公司, 作为一种新型海洋吊装作业稳定性技术, 未来的主要发展趋势如下:

1) 结构轻量化。目前波浪补偿装置的自重均较大, 导致吊机的有效载荷减少, 而轻量化设计可以有效提高吊机的有效载荷。

2) 模块化与标准化。目前波浪补偿装置属于定制化产品, 由于作业需求的多样化, 采用模块化与标准化设计建造能够有效降低产品成本, 能够根据不同的作业环境和需求进行快速配置、替换与维修, 提高装置的市场适应性。

3) 稳定性与智能化控制算法。海上作业装备稳定可靠至关重要, 通过系统可靠性设计以及

智能化控制算法, 可以降低装置在复杂环境中的失效概率。

参考文献:

- [1] 黄晓刚. 基于 MPC 的海上浮吊波浪补偿控制研究 [D]. 上海: 上海海事大学, 2022.
HUANG X G. Research on wave compensation control of floating crane based on MPC[D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2022 (in Chinese).
- [2] YAN F, FAN K, YAN X C, et al. Constant tension control of hybrid active-passive heave compensator based on adaptive integral sliding mode method[J]. IEEE Access, 2020, 8: 103782–103791.
- [3] LI J, WANG S H, WANG J L, et al. A novel 3-DOF rope-driven wave motion compensation device for marine crane: System modeling and analysis[J]. Ocean Engineering, 2024, 304: 117799.
- [4] QUAN W C, LIU Y S, ZHANG Z Y, et al. Scale model test of a semi-active heave compensation system for deep-sea tethered ROVs[J]. Ocean Engineering, 2016, 126: 353–363.
- [5] 吴正鑫. 折臂伸缩式主动波浪补偿起重机控制系统研究及实验验证 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
WU Z X. Research and experimental verification on the control system of a folding arm telescopic active wave compensation crane[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023 (in Chinese).
- [6] 葛政. 50t 海洋起重机补偿绞车系统设计研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2016.
GE Z. Research and design on compensation winch system of 50t marine crane[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016 (in Chinese).
- [7] 陈宁, 许鲜, 张怡萌. 一种船舶间运动补偿方法及系统: 中国, CN201910427468.1[P]. 2019-05-22.
CHEN N, XU X, ZHANG Y M. Inter-ship motion compensation method and system: CN, CN201927468.1[P]. 2019-05-22 (in Chinese).
- [8] CAI Y F, ZHENG S T, LIU W T, et al. Adaptive robust dual-loop control scheme of ship-mounted Stewart platforms for wave compensation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 164: 104406.
- [9] LI Z, MA X, LI Y B, et al. ADRC-ESMPC active heave compensation control strategy for offshore cranes [J]. Ships and Offshore Structures, 2020, 15(10): 1098–1106.
- [10] ZINAGE S, SOMAYAJULA A. Deep reinforcement learning based controller for active heave compensation [J]. IFAC-PapersOnLine, 2021, 54(16): 161–167.
- [11] 毛涵宇, 余龙. 吊钩式波浪补偿装置深水吊装作业分析 [J]. 船舶工程, 2023, 45(7): 109–114, 123.
MAO H Y, YU L. Analysis of deep water hoisting operation with Hook-Type heave compensation device[J]. Ship Engineering, 2023, 45(7): 109–114, 123 (in Chinese).
- [12] SAFELINK AS. Adaptive passive heave compensation [EB/OL]. [2024-11-27] <https://www.safelink.no/adaptive->

- passive-heave-compensation/.
- [13] LENG J X, XU C G, LI M, et al. Control strategy for performing predictions for a semi-active compensation system[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109816.
- [14] WOODACRE J K, BAUER R J, IRANI R A. A review of vertical motion heave compensation systems[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 104: 140–154.
- [15] CHEN S L, XIE P, LIAO J H. Cascade NMPC-PID control strategy of active heave compensation system for ship-mounted offshore crane[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 302: 117648.
- [16] NORWEGIAN DYNAMICS AS. Basic PHC[EB/OL]. [2024-12-24]. <https://nodynamics.com/riigel-passive-heave-compensator>.
- [17] NI J, LIU S J, WANG M F, et al. The simulation research on passive heave compensation system for deep sea mining[C]//Proceedings of 2009 International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun: IEEE, 2009: 5111–5116.
- [18] HATLESKOG J T, DUNNIGAN M W. Heave compensation simulation for non-contact operations in deep water[C]//Proceedings of OCEANS 2006. Boston: IEEE, 2006: 1–6.
- [19] CANNELL D, MILLER C, RIDDELL S, et al. Adaptive passive heave compensation systems - the next generation[C]//Proceedings of Offshore Technology Conference Asia. Kuala Lumpur, 2016: 1–14.
- [20] XIE T C, HUANG L P, XU J W, et al. Dynamic analysis of active heave compensation system for marine winch under the impact of irregular waves[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(2): 240.
- [21] YI B L, ZHAN Y, XU J A. Dynamic analysis and optimization of a novel Dual-valve heave compensator for heavy lifting operations[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 309: 118528.
- [22] 盖晓娜, 杨建民, 田新亮. 基于小波_SVR模型的浮体极短期运动预报方法[J]. *舰船科学技术*, 2018, 40(11): 66–70.
- GE X N, YANG J M, TIAN X L. A method for very short-term motion prediction of floaters based on Wavelet-SVR model[J]. *Ship Science and Technology*, 2018, 40(11): 66–70 (in Chinese).
- [23] KAPLAN P. A study of prediction techniques for aircraft carrier motions at sea (deterministic and statistical prediction techniques for aircraft carrier motions at sea for application to aircraft landing operations)[J]. *Journal of Hydronautics*, 1969, 3(3): 121–131.
- [24] TRIANTAFYLLOU M, BODSON M, ATHANS M. Real time estimation of ship motions using Kalman filtering techniques[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1983, 8(1): 9–20.
- [25] BROOME D R, PITTARAS A. The time prediction of ship motions at sea[C]//Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston: OTC, 1990: OTC-6222-MS. Doi: 10.4043/6222-MS.
- [26] HU X, ZHANG B Y, TANG G. Research on ship motion prediction algorithm based on dual-pass long short-term memory neural network[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 28429–28438.
- [27] NIE Z H, SHEN F, XU D J, et al. An EMD-SVR model for short-term prediction of ship motion using mirror symmetry and SVR algorithms to eliminate EMD boundary effect[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107927.
- [28] 黄礼敏, 段文洋, 韩阳, 等. 船舶运动极短期预报方法综述[J]. *船舶力学*, 2014, 18(12): 1534–1542.
- HUANG L M, DUAN W Y, HAN Y, et al. A review of short-term prediction techniques for ship motions in seaway[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2014, 18(12): 1534–1542 (in Chinese).
- [29] 周健. 船用吊放设备升沉补偿试验系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- ZHOU J. Research on heave compensation experiment system for marine hanging equipment[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019 (in Chinese).
- [30] HUANG X G, WANG J C, XU Y H, et al. Research on heave compensation control of floating crane based on permanent magnet synchronous motor[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Control, Automation and Information Sciences. Hangzhou: IEEE, 2018: 331–336.
- [31] CHEN H, XIE J K, HAN J G, et al. Position control of heave compensation for offshore cranes based on a particle swarm optimized model predictive trajectory path controller[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(10): 1427.
- [32] HATLESKOG J T, DUNNIGAN M W. Active heave crown compensation sub-system[C]//Proceedings of OCEANS 2007. Aberdeen: IEEE, 2007: 1–6.
- [33] MITCHELL M R, DESSUREAULT J G. A constant tension winch: design and test of a simple passive system[J]. *Ocean Engineering*, 1992, 19(5): 489–496.
- [34] 徐小进, 邹剑波, 李新喜. 不同冲击方向下海洋绞车系统张力控制动态仿真[J]. *船舶工程*, 2024, 46(4): 153–157, 174.
- XU X J, ZOU J B, LI X X. Dynamic simulation of tension control of ocean winch system under different impact directions[J]. *Ship Engineering*, 2024, 46(4): 153–157, 174 (in Chinese).
- [35] DRISCOLL F R, NAHON M, LUECK R G. A comparison of ship-mounted and cage-mounted passive heave compensation systems[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2000, 122(3): 214–221.
- [36] WU K T, YAO B H, FU B, et al. Research on the performance of passive heave compensator for tethered remotely operated vehicle system[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2011, 16(1): 40–44.
- [37] HUSTER A, BERGSTROM H, GOSIOR J, et al. Design and operational performance of a standalone passive heave compensation system for a work class ROV

- [C]//Proceedings of OCEANS 2009. Biloxi: IEEE, 2009: 1–8.
- [38] WOODACRE J K, BAUER R J, IRANI R. Hydraulic valve-based active-heave compensation using a model-predictive controller with non-linear valve compensations [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 152: 47–56.
- [39] TRAN C, ØVERAAS H, JOHANSEN T A. ROV recovery with wave-motion compensation using model predictive control[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 293: 116764.
- [40] ZHANG F R, HOU J Y, NING D Y, et al. Performance analysis of the passive heave compensator for hydraulic shipwreck lifting systems in twin-barge salvaging[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114469.
- [41] YAO Z, WANG W P, JIANG Y, et al. Coupled responses of sewol, twin barges and slings during salvage [J]. *China Ocean Engineering*, 2018, 32(2): 226–235.
- [42] XU J A, YI B L, ZHAN Y. A semi-analytical method of passive heave compensator for the splash zone crossing: modeling and application[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 286: 115613.
- [43] 张吉海, 郑康胜, 王耀武, 等. 海上风电机组吊装技术研究 [J]. *机电工程技术*, 2024, 53(9): 22–26, 116.
ZHANG J H, ZHENG K S, WANG Y W, et al. Research on hoisting technology for offshore wind turbine [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2024, 53(9): 22–26, 116 (in Chinese).
- [44] Safelink AS. New product lines for the offshore wind market[EB/OL]. [2024-12-31]. <https://safelink.no/new-product-lines-for-the-offshore-wind-market/>.
- [45] Cranemaster. CM3-1000T-4300[EB/OL]. [2024-12-31] <https://cranemaster.com/units/cm3-1000t-4300/>.
- [46] 中国三峡集团. “三峡引领导”: 中国漂浮式海上风电, 我是“破壁人”[EB/OL]. [2024-12-31]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_14025120.
China Three Gorges Corporation. "Three Gorges Leading": for China's floating offshore wind power, I am the "barrier breaker".[EB/OL]. [2024-12-31]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_14025120 (in Chinese).
- [47] 赵树杰, 白浩哲, 徐琨, 等. 漂浮式海上风机施工安装现状与发展趋势及技术挑战 [J]. *中国海洋大学学报*, 2024, 54(10): 13–28.
ZHAO S J, BAI H Z, XU K, et al. Current sates, development trends, and technical challenges for floating offshore wind turbine installation[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2024, 54(10): 13–28 (in Chinese).
- [48] JIANG Z Y. Installation of offshore wind turbines: A technical review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 139: 110576.
- [49] 徐皓, 刘晃, 黄文超. 深远海设施养殖装备技术进展与展望 [J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(5): 893–902.
XU H, LIU H, HUANG W C. Advances and outlook of offshore aquaculture equipment technology[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(5): 893–902 (in Chinese).
- [50] 秦杰. 浅谈我国海上石油平台机械设备损坏维修手段 [J]. *内燃机与配件*, 2019(7): 106–107.
- QIN J. A brief discussion on the maintenance methods for the damage of mechanical equipment on offshore oil platforms in China[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2019(7): 106–107(in Chinese).
- [51] 张彦方. 海上风电登靠步桥发展与关键技术研究综述 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(4): 48–58.
ZHANG Y F. Overview of offshore wind power gangway development and key technologies[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(4): 48–58 (in Chinese).
- [52] 刘建成, 张磊, 洪学武, 等. 一种用于海上舷梯的三自由度主动波浪补偿控制方法: 中国, CN202410369927.6 [P]. 2024-03-29.
LIU J C, ZHANG L, HONG X W, et al. Three-degree-of-freedom active wave compensation control method for offshore gangway ladder: CN, CN202410369927.6 [P]. 2024-03-29 (in Chinese).
- [53] 龙 de 船人. 案例分享: “海洋石油 981”坞修之麦基嘉海工抓管吊维修 [EB/OL]. [2024-11-27]. <https://www.imarine.cn/81888.html>.
Dragon Boat People. Case sharing: maintenance of MacGREGOR offshore pipe handling derrick during the dock repair of "HYSY 981"[EB/OL]. [2024-11-27]. <https://www.imarine.cn/81888.html> (in Chinese).
- [54] 孟令帅, 李明烁, 林扬, 等. 自主水下机器人布放回收技术综述 [J]. *无人系统技术*, 2024, 7(1): 1–19.
MENG L S, LI M S, LIN Y, et al. Launch and recovery technology of autonomous underwater vehicle[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2024, 7(1): 1–19 (in Chinese).
- [55] 洪琼, 蒲进菁, 周立, 等. 基于无人艇平台的 AUV 回收技术发展趋势 [J]. *水下无人系统学报*, 2023, 31(3): 501–508.
HONG Q, PU J J, ZHOU L, et al. AUV recovery technology development based on unmanned surface platform[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2023, 31(3): 501–508 (in Chinese).
- [56] 鲁德泉, 李德威, 杨磊, 等. “蛟龙”号载人潜水器的布放回收系统及其关键技术 [J]. *海洋开发与管理*, 2020, 37(8): 69–74.
LU D Q, LI D W, YANG L, et al. The launch and recovery system and key technical of "Jiaolong" manned submersible[J]. *Ocean Development and Management*, 2020, 37(8): 69–74 (in Chinese).
- [57] CHEN S L, XIE P, LIAO J H, et al. Model experimental studies on active heave compensation control strategy for electric-driven offshore cranes[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 311: 118987.
- [58] Cranemaster. Cranemaster active heave compensator[EB/OL]. [2024-11-27]. <https://cranemaster.com/products/active-heave-compensation/>.
- [59] ZINAGE S, SOMAYAJULA A. A comparative study of different active heave compensation approaches[J]. *Ocean Systems Engineering*, 2020, 10(4): 373–397.
- [60] ZHAO T, SUN P, DING Y. The research on the hy-

- draulic-control system for the heave compensation under the deepwater installation[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 468-471: 1806-1809.
- [61] MEI T X, YANG Y, CHEN J B, et al. Design of heave compensation control system based on variable parameter PID algorithm[C]//*Proceedings of 2018 Chinese Control And Decision Conference*. Shenyang: IEEE, 2018: 825-829.
- [62] CHU Y G, LI G Y, ZHANG H X. Incorporation of ship motion prediction into active heave compensation for offshore crane operation[C]//*Proceedings of the 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Kristiansand: IEEE, 2020: 1444-1449.
- [63] HU L F, ZHANG M, YUAN Z M, et al. Predictive control of a heaving compensation system based on machine learning prediction algorithm[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(4): 821.
- [64] RICHTER M, SCHAUT S, WALSER D, et al. Experimental validation of an active heave compensation system: estimation, prediction and control[J]. *Control Engineering Practice*, 2017, 66: 1-12.
- [65] ZHANG Q, TAN B, GU B P, et al. Docking ship heave compensation system for loading operations based on a DDPG and PID hybrid control method using a judge network[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 305: 117727.
- [66] LI M J, GAO P, ZHANG J L, et al. Study on the system design and control method of a semi-active heave compensation system[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2018, 13(1): 43-55.
- [67] RAJA ISMAIL R M T, THAT N D, HA Q P. Modelling and robust trajectory following for offshore container crane systems[J]. *Automation in Construction*, 2015, 59: 179-187.
- [68] YANG T, SUN N, CHEN H, et al. Neural network-based adaptive anti-swing control of an underactuated ship-mounted crane with roll motions and input dead zones[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 31(3): 901-914.
- [69] SKAARE B, EGELAND O. Parallel force/position crane control in marine operations[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, 31(3): 599-613.
- [70] SAGATUN S I. Active control of underwater installation[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(5): 743-748.
- [71] WU J B, YANG Z Y, WU D L. Impedance control of secondary regulated hydraulic crane in the water entry phase[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 169: 134-143.
- [72] KÜCHLER S, SAWODNY O. Nonlinear control of an active heave compensation system with time-delay[C]//*Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Control Applications*. Yokohama: IEEE, 2010: 1313-1318.
- [73] LI S Z, WU Q F, LIU Y F, et al. Research on three-closed-loop ADRC position compensation strategy based on winch-type heave compensation system with a secondary component[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(2): 346.
- [74] Safelink AS. Standard passive heave compensation[EB/OL]. [2024-11-27]. <https://www.safelink.no/standard-passive-heave-compensation/>.
- [75] Cranemaster. Passive heave compensators[EB/OL]. [2024-11-27]. <https://cranemaster.com/products/passive-heave-compensators/>.
- [76] Vremac. Maxine heave compensation[EB/OL]. [2024-11-27]. <https://vremac.com/product/maxine-heave-compensation/>.
- [77] Tensa. In line heave compensation[EB/OL]. [2024-12-26]. <https://www.tensaequipment.com.au/product/inline-heave-compensation/>.
- [78] Cranemaster. Securing offshore lifting operations[EB/OL]. [2024-11-27]. <https://www.uniquegroup.com/wp-content/uploads/2022/08/Cranemaster20Company20Brochure-6.pdf>.
- [79] Safelink AS. Inline active heave compensator (IAHC)[EB/OL]. [2024-11-27]. <https://safelink.no/product/inline-active-heave-compensator-iahc/>.
- [80] Hunger Dichtungen. Sealing technology from practice into practice[EB/OL]. [2024-12-25]. <https://www.hungerdichtungen.de/home>.
- [81] Trelleborg. Sealing solutions[EB/OL]. [2024-12-25]. <https://www.trelleborg.com/zh-cn/seals/products-and-solutions/hydraulic-seals>.
- [82] LIU Y A, DING Y, YANG L J, et al. Research and progress of laser cladding on engineering alloys: a review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 66: 341-363.
- [83] YU J X, LIU X, YU Y, et al. Research and application of high-velocity oxygen fuel coatings[J]. *Coatings*, 2022, 12(6): 828.
- [84] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 锌铬涂层技术条件: GB/T 18684—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Specifications of Zinc/Chromate coatings: GB/T 18684—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002 (in Chinese).
- [85] LI R. Painting technology[M]//CUI W C, FU S X, HU Z Q. *Encyclopedia of ocean engineering*. Singapore: Springer, 2022: 1281-1283.

A review of portable integrated heave compensation devices

LÜ Xiaoying, LIU Han, SU Yan*

School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

Abstract: Heave compensation devices play a crucial role in offshore lifting operations, significantly enhancing operational safety and extending operational windows by mitigating the adverse marine environmental effects. This paper presents a review of portable integrated heave compensation devices, offering in-depth insights into this field. Firstly, the paper classifies portable integrated heave compensation devices into four main types: passive heave compensation (PHC), adaptive passive heave compensation (adaptive PHC), active heave compensation (AHC), and semi-active heave compensation (SAHC). PHC is a mechanical system mainly composed of a hydraulic cylinder and a gas-liquid accumulator, which can be approximated as a parallel spring-damper system. It does not require a supply of energy and sensors for operation, and it has the advantages of a simple structure, high reliability, and low maintenance costs. However, its compensation precision is limited, and it has poor adaptability to complex sea conditions. Adaptive PHC can automatically adjust the system's spring-constant and damping according to different lifting stages, improving the compensation performance and sea-state adaptability compared with traditional PHC. AHC involves closed-loop control, which uses motion sensors to detect ship motion. Through control algorithms and an actuator, it can achieve high-precision compensation. However, AHC requires a large amount of energy input. SAHC combines the advantages of PHC and AHC, requiring less power to maintain adequate compensation compared to a strictly active system, and achieving higher reliability through its ability to switch between passive and active modes. Secondly, the paper elaborates on the compensation objectives of these devices, which mainly include tension compensation, position compensation, and hybrid compensation. Tension compensation can maintain cable tension within a safe range to prevent cable failure and load loss. This is crucial for applications such as underwater towing, underwater recovery, shipwreck salvage, and marine structure installation. Position compensation focuses on accurately controlling the position of the load to ensure the operational safety and precise equipment docking, and is widely used in scenarios like offshore oil platform equipment maintenance, underwater device recovery, and ship-to-ship cargo transfer. Hybrid compensation comprehensively considers multiple state variables to improve the control system's accuracy and resistance to disturbances, and is applied in complex situations where the load is severely disturbed and requires precise control, such as topside lifting, splash zone crossing, and landing. Finally, this paper introduces mainstream portable integrated heave compensation devices available internationally and, by analyzing them, offers suggestions for the future direction of research in China. Internationally, companies such as Safelink AS, Cranemaster, Vremac Cylinders, Norwegian Dynamics, and Tensa have developed a series of products that encompass a range of heave compensation devices. These products are characterized by high reliability, adaptability to varying operational conditions, and advanced control functions. Meanwhile, through an in-depth analysis of these international products, China's integrated heave compensation devices can be further advanced in two main aspects: technological innovation and manufacturing processes. Technological innovation includes optimization of product design, enhancement of functionality, and improvement of control strategies. Improvements in manufacturing processes involve material selection, sealing technology, and corrosion-resistant design. In conclusion, this review provides a detailed overview of portable integrated heave compensation devices, which is of great significance for promoting the development of related technologies in China and enhancing the competitiveness of China's offshore engineering equipment.

Key words: portable integrated device; wave compensation; tension compensation; position compensation; motion compensation; ship equipment; stabilizers (marine vessel)