

波浪运动补偿装置的研究现状与发展趋势

秦小健, 吴垠峰, 钱正宏, 刘碧燕, 邱利林

(江苏海上龙源风力发电有限公司, 江苏南通 226400)

摘要: 本文对波浪运动补偿装置的基本原理进行了介绍, 并简要分析了不同类型的波浪补偿装置的特点, 包含被动式、主动式和复合式系统。在此基础上分析了国内外波浪补偿装置的研究现状与研究热点, 最后分析了波浪补偿系统的未来发展趋势。总结国内外技术概况, 为研究波浪补偿系统提供重要的技术参考。

关键词: 运动补偿; 波浪; 反馈; 六自由度

中图分类号: P75 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2022) 12—0104—03

海上作业时, 往往需要船舶、海工装备保持位置稳定, 或者不同浮式装置在共同完成某项任务时保持相对位置不变, 如, 浮吊在海上起吊重物、补给船与被补给船之间进行货物运移、海洋平台钻探作业等。受海面波动影响, 这些浮式装置发生六自由度运动, 即使在同一海况下, 不同浮体的运动响应也不相同。为解决上述问题, 波浪补偿技术应运而生, 经多年研发, 当前波浪补偿技术和装置已较为成熟, 然而供应商主要为外企, 并逐渐形成技术壁垒, 垄断市场。

波浪补偿装置的研发, 最初主要针对波浪补偿起重机。Delago 等^[2]开发了一种由液压电机驱动的升沉运动补偿装置, 可用于恶劣海况下的供应船-钻井平台物资输送, 通过传感器和控制装置控制起重装置的上下移动。Alp 和 Agrawal^[3]研发了一种缆索悬挂式机器人, 通过反馈控制闭环系统, 并基于仿真和试验验证系统的有效性。Hanson 等^[4]设计了一种由交流异步电动机和齿轮箱构成的补偿垂荡绞车系统。

本文阐述波浪运动补偿基本原理, 分析国内外研究现状与热点, 总结国内外技术概况, 研究波浪补偿系统的发展趋势, 为研究波浪补偿技术和装置提供参考。

1 波浪运动补偿的基本原理

按照波浪运动补偿技术的分类及使用场合, 波浪补偿技术从工作原理主要分为以下三类^[6]:

1.1 被动波浪补偿

被动式补偿装置一般由张紧器部分、蓄能器部分和钢缆等组成^[7], 其中张紧器部分由滑轮组和补偿油缸构成; 蓄能器部分包括蓄能器与氮气瓶等; 钢缆绕过滑轮组与负载相连。浮体随波浪上升时, 钢缆拉力增加, 张紧器压缩, 释放钢缆, 补偿负载位移, 使负载尽量保持在平衡位置。同时补偿油缸中液压油进入蓄能器存储能量; 浮体随波浪下降时, 反向补偿。波浪补偿过程中, 系统相当于一个液压弹簧, 对波浪影响起缓冲作用。被动式波浪补偿系统工作过程不消耗能量, 适用于载荷较大、精度要求较低的浮体运动补偿。

1.2 主动波浪补偿

主动波浪补偿主要由运动测量系统、控制系统、作动系统等组成。运动测量系统收集传感器信号, 经多源融合算法处理, 输入到控制系统; 在完成数据处理后, 进行位置与姿态反解, 得出作动系统期望值, 控制作动产生与测得浮体运动大小相等方向相反的六自由度运动, 实现波浪补偿。

半主动波浪补偿系统通过液气弹簧和主动液压系统相结合, 前者为系统的承载构件, 后者用于克服载重的惯性和摩擦, 以提高精度。此外, 还有一种用于绞车的波浪补偿装置, 该装置通过电机驱动, 通过分析浮体垂荡数据, 主动控制绞车指令, 实现运动补偿。

1.3 复合波浪补偿

复合波浪补偿装置主要包括控制器、阀组、泵站、复合油缸、蓄能器、绞车、缆绳和传感器等。传感器测量出负载位移, 与期望值进行比较后输入到控制器, 控制器经计算输出控制信号, 从而控制阀组以增加或减少流量, 实现油缸动作。无波浪时, 浮体的重力主要由复合油缸被动腔承担; 有波浪时, 浮体和补偿装置随波浪上下运动, 被动腔充入或流出液压油, 从而通过活塞杆移动, 实现对浮体的运动补偿。

除上述被动补偿、主动补偿和复合补偿外, 还有综合补偿系统, 即将波浪产生的垂向和横向运动补偿相结合。

2 国外发展现状

波浪补偿技术始于美国, 首个使用机械反馈调整升沉幅度的主动式波浪补偿系统于 1970 年投入使用^[8]。此后, 被动式升沉补偿系统发展迅速, 并应用于海洋油气开发领域。自此, 波浪运动补偿技术得到广泛应用, 更多科研人员对波浪补偿技术展开理论研究和实验分析^[9]。近二十年来, 随着计算机和控制技术的发展, 实现了有效的传感器集成和系统建模, 波浪补偿技术快速提升, 补偿的灵敏度和精度得到了大大提高。

目前, 多家国外公司制造的波浪补偿装置在实际工程中被广泛应用。其中, 美国 NOV (National Oilwell Varco) 公司研发的升沉波浪补偿装置应用较广, 主要集

中在钻井船和浮式钻井平台,装置通过控制液压构件的平稳性,减少钻柱垂直运动,稳定井底钻压。挪威 MH 公司研发了以船用起重机以及配套为主的升沉补偿装置,其主要作用是隔绝浮吊船运动对起吊物的影响。英国 Houlder 公司生产的 TAS 系统主要安装在小型工作艇上,适用于近海风机运维作业。

在波浪补偿技术研究方面,最初的主动式升沉补偿装置通过机械反馈装置,构成了比例控制器。Korde 等^[10]提出了一种用于深水钻井装置在不规则波激励下的主动升沉补偿器,并验证其在大的波频带宽上表现良好,及其在线性范围内的有效性。Kuchler 等^[11]提出了一种船舶垂直运动主动补偿系统,针对时间延迟引入新的控制策略,并验证其有效性。J.Pan^[12]提出一种利用双杆制动器驱动的电液系统为主动升沉补偿系统设计的非线性控制器,控制系统通过调节立管上端到海床的距离,有效减少船舶垂荡运动对立管影响。

3 国内发展现状

国内波浪补偿技术基本处于理论和实验研究阶段,少量波浪补偿设备投入应用。

孙鲁闽等^[13]研究了用于二级海况下船与船的人员换乘装置,补偿两船间的相对升沉运动。完成了动力学分析、电气控制系统及实船实验。苏长青等^[14]提出一种三自由度主动补偿系统,装置固定于船艏,补偿船体的升沉、横摇和纵摇运动,并通过了模拟海况实验。2018 年底,由上海雄程海服研制能够补偿六个自由度的运动的海上风电登乘装置,名为“雄程云桥”,可以支持顶接和搭接两种对接方式,两种方式可分别消除沿桥梯方向和垂直方向的位移。

李春林等^[16]针对船舶运动对设备与人员的影响,提出了一种主动补偿系统,并通过验证仿真与试验结果,为系统设计和调试提供帮助。卢道华等^[15]设计了一种采用控制算法对进行通道控制的稳定平台,改进了由于机械元件引发的滞后性,并通过仿真与试验验证其有效性。杨文林等^[18]设计了一个主动波浪补偿系统,该系统能够结合自适应高通滤波器进行船舶运动检测,同时采用双目视觉系统检测补偿平台末端运动,并通过仿真验证系统的可行性。唐刚等^[17]基于波浪补偿平台工作原理设计一种电动自动补偿控制系统,对船舶升沉运动展开动力学建模与动力学分析,并利用仿真验证控制系统具有良好的灵敏性和稳定性。“蛟龙号”的母船“向阳红 09”采用了复合式波浪补偿器。利用该补偿装置可以在收放潜水器时提高作业过程的平稳度。

4 发展趋势

随着深海工程的发展,各类海上施工作业的需求,促进了波浪补偿技术的快速发展。近年来,波浪运动补偿技术存在以下发展趋势:

(1) 波浪补偿的精度逐步提高。在深海海洋的复杂环境下,要满足严苛的作业要求,波浪补偿的目的已逐步从早期的安全性,向现在的高精度发展。在满足海上作业的安全要求之外,补偿的精度要求也越来越高。这对于波浪补偿系统的机构设计、以及作动系统的软硬件都提出了更高的要求。

(2) 动作响应灵敏度高。随着海上施工作业的需求,波浪运动补偿系统的反应快速性和灵敏性直接关系到补偿系统的性能优劣。这对于控制算法的有效性和控制设备的精密程度提出了更高的要求。

(3) 适应更大的浮体载荷。随着人类对海洋探索的深度不断刷新、以及大型浮体及设备的应用,在采矿领域随着及海洋科考方面,设备重量越来越大,这对于波浪补偿来说,需要适应更大的载荷要求。

5 结论

波浪补偿装置及其相关技术,原理多样,类型繁多,同时,该类装置具有集成性,是集多学科于一体的高新技术产品,因此也具有试验验证困难、核心技术复杂性高等问题。为此,需要从基本原理做起,通过试验验证与改进,逐步掌握相关关键技术,突破技术瓶颈,实现自主设计、制造。

波浪补偿装置的核心技术主要是控制方式,现今的位移、速度和加速度控制方法已趋于成熟,难以提高补偿精度。为此,需要进一步提高研发力度,开展浮体姿态预测工作,同时探究混合驱动模式等新型技术的研究工作。

应加快带主动控制功能的波浪补偿装置研究。从仅能补偿升沉、横摇和纵摇三个方向运动的三自由度补偿,到能全自由度运动补偿,更适合应用于深海开发。

波浪补偿系统具有军民通用的特点,海洋工程领域应用已越来越广泛。国外波浪补偿技术基本成熟,而国内还处于起步阶段,大部分情况下还是在使用进口产品。近年来,波浪补偿技术受到国内许多厂家和研究机构的重视,未来相关技术和装置将在我国海洋开发事业中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 李欢,樊春明,李鹏,郑万里,刘启蒙.浮式波浪补偿装置研究及发展建议[J].石油机械,2022,50(2):53-58.
- [2] Delago P. C. Heave motion compensation apparatus[M]. US. 1984.
- [3] Alp A. B., Agrawal S. K. Cable suspended robots: feedback controllers with positive inputs[C]. Proceedings of the American Control Conference, 2002: 815-820 vol.1.
- [4] Hanson K., Hanson L., Bentley M. A. T. Marine Heave Compensating Device and Winch Drive[M]. EP. 2003.
- [6] 王哲骏,谢金辉,高剑,邓智勇.波浪补偿技术现状和

基于 CFD 方法的 7800PCTC 艏部结构波浪砰击预报

周恩鑫¹, 张吉萍¹, 杨阳², 夏小浩³

(1. 浙江海洋大学 船舶与海运学院, 浙江 舟山 316022; 2. 舟山技师学院, 浙江 舟山 316012;
3. 扬帆集团股份有限公司, 浙江 舟山 316100)

摘要: 伴随着舰船大型化、高速化的发展趋势以及高性能舰船的广泛应用, 传统的砰击理论和规范已无法很好地应用于工程实践, 而 CFD 技术的发展则给这类问题带来了新的解决方案。本文选取了一艘具有实船图纸与运营情况的大型汽车运输船进行数值建模, 制定了两组波浪工况, 使用计算流体力学软件 STAR-CCM+, 对 7800 车汽车运输船在不同波浪参数的波浪作用下的砰击情况进行了数值模拟并预报砰击压力, 根据仿真结果系统研究了各种波浪参数(波浪周期、波高等)、以及船艏部结构位置对波浪砰击压力的影响, 为强化船体应对实际波浪砰击提供指导意义。

关键词: 波浪砰击; 计算流体力学; 汽车运输船; STAR-CCM+

中图分类号: U663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 12—0106—03

砰击现象是船舶在航行过程中常见的现象, 这种局部的强度问题要给予重视^[1]。王珂^[2]利用有限元软件对一艘 LNG 船的艏部结构进行入水砰击研究, 分析了这艘船的纵向、横向曲率以及入水速度对砰击压力值的影响; 张智^[3]利用 Fluent 软件, 模拟不同高度自由下落的三维楔形体, 得到其加速度、位移以及压力分布随时间的变化, 并提出一种预报方法; 陈震^[4]基于有限体积法, 通过改善球鼻艏的曲率分析影响砰击压力的因素; Meyerhoff^[5]提出三维结构物在研究砰击压力时, 需要根据其长宽比参数减小砰击压力, 原因是三维特征的砰击压力具有衰减特性; Scolan^[6]在他人研究基础之上, 基

于扰动法, 分析了轴对称物体的砰击, 并在三维物体砰击问题中应用。

1 砰击压力理论公式

冲量砰击原理^[7]中砰击压力受时间和位置影响, 其计算公式如下:

$$P(x) = \frac{1}{2} \rho V^2 \left[\frac{\pi}{\beta(1-\frac{x^2}{L^2})^{\frac{1}{2}}} - \frac{\frac{x^2}{L^2}}{1-\frac{x^2}{L^2}} + \frac{2Z}{V^2} (L^2 - x^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1)$$

式中: ρ —水的密度; V —砰击速度; β —砰击角度; L —作用长度; Z —作用高度。

发展趋势 [J]. 舰船科学技术, 2014, 36(11):1-7.

[7] 施平安. 船用波浪补偿技术研究 [C]. 第四届广东海事高级论坛论文集, 2012:43-46.

[8] 汪耀源. 波浪补偿并联机构的动力学建模与控制研究 [D]. 大连理工大学, 2021. DOI:10.26991/d.cnki.gdllu.2021.000142.

[9] 贺子奇, 曹旭阳, 董航, 高顺德. 深海作业起重机升沉补偿系统的研究现状 [J]. 工程机械与维修, 2015(09):56-58+60.

[10] U Korde. Active heave compensation on drill-ships in irregular waves [J]. Ocean Engineering, 1998, 25(7):541-561.

[11] S Kuchler, T Mahl, J Neupert, et al. Active control for an offshore crane using prediction of the vessels motion [C]. IEEE/ASME Trans Mechatron. 2011, 16(2): 297-309.

[12] K Do, J Pan. Nonlinear control of an active heave compensation system [J]. Ocean Engineering, 2008, 35:558-571.

[13] 孙鲁闽, 顾炳, 余德全. 基于波浪补偿技术的新型海上换乘装置研究 [J]. 机电设备, 2009, 26(03):8-11+26.

[14] 苏长青, 郑文彬, 曾悠兵, 丁德甫. 一种用于登乘栈桥的主动波浪补偿方法 [J]. 船舶与海洋工程, 2017, 33(04): 22-25. DOI: 10.14056/j.cnki.naoe.2017.04.005.

[15] 卢道华, 李春林, 王佳, 曹志远. 主动补偿平台系统的仿真与实验 [J]. 机床与液压, 2018, 46(02):17-20.

[16] 李春林, 卢道华, 曹志远, 王佳. 主动补偿平台单通道控制系统研究 [J]. 机床与液压, 2018, 46(11):194-198.

[17] 唐刚, 李庆中, 杨志启, 胡雄. 基于 MATLAB 的波浪补偿平台动力学分析 [J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(02):81-85. DOI: 10.13340/j.jsmu.2018.02.015.

[18] 杨文林, 周小琦, 吕浩亮, 张弓, 侯至丞, 王卫军. 六自由度主动波浪补偿装置测控系统设计与仿真 [J]. 集成技术, 2021, 10(02):50-62.