波浪补偿吊具模拟实验台的设计①

肖体兵，陈文杰，蔡海东
（广东工业大学 机电工程学院，广东 广州 510006）

摘　要：为研究波浪补偿吊具的升沉补偿能力，采用常规油缸和常规蓄能器替代结构复杂且昂贵的专用补偿缸和专用蓄能缸，搭建了波浪补偿吊具的模拟实验台，并基于 AMESim 建立了该模拟实验台的仿真模型，通过实验和仿真对吊具在被动、半主动和主动 3 种补偿模式下的补偿率与能耗进行了对比研究。结果表明，被动补偿模式下，仿真补偿率为 14.64%，实验补偿率为 13.51%；半主动补偿模式下，仿真补偿率为 91.01%，实验补偿率为 89.80%；主动补偿模式下，仿真补偿率为 94.44%。仿真结果与实验数据表明，该替代方案在实现高补偿率的同时能耗低，是一种低成本、高效的波浪补偿吊具模拟实验方案，为后续波浪补偿吊具设计与优化提供了验证平台。

关键词：海上吊装；仿真模型；波浪补偿；吊具；被动补偿；半主动补偿；升沉补偿；补偿率；船用起重机；船舶设备
中图分类号：TD857；TH137　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.014
文章编号：0253-6099(2026)03-0111-06

Design of Wave Compensation Hoisting Device Test Bench

XIAO Tibing, CHEN Wenjie, CAI Haidong
(*School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510006, *Guangdong, China*)

Abstract: To investigate the heave compensation capability of a wave compensation hoisting device, a simulation test bench for the hoisting device was built by using an ordinary hydraulic cylinder and an ordinary accumulator to replace dedicated compensation cylinders and accumulator, and a simulation model was then established based on AMESim. Experiments and simulations were performed to compare the compensation rate and energy consumption of the hoisting device under passive, semi-active and active compensation modes. In the passive compensation mode, the simulated compensation rate was 14.64% and the experimental value was 13.51%; in the semi-active compensation mode, the simulated compensation rate was 91.01% and the experimental value was 89.80%; the simulated compensation rate reaches 94.44% under the active compensation mode. Both simulation and experimental data prove that this alternative scheme can deliver high compensation rate with low energy consumption. It is regarded as a low-cost and efficient solution for testing wave compensation hoisting device, providing a verification platform for subsequent design and optimization of wave compensation hoisting device.

Key words: at-sea hoisting; simulation model; wave compensation; hoisting device; passive compensation; semi-active compensation; heave compensation; compensation rate; marine crane; marine equipment

深海矿产资源开发受到全球广泛关注，海上吊装作业变得更加繁忙，对船用起重机的需求随之增长[1]。然而，相较于陆地起重机，海洋作业环境中的船用起重机在吊装过程中受升沉运动的影响，极易导致设备失效、损伤，从而引发安全问题[2]。为保证吊装作业的安全和高效，船用起重机须具备波浪升沉补偿功能，从而抑制升沉摇摆产生的纵向变形等问题[3]。目前，船用起重机波浪补偿的方案主要有两种：方案 1 是采用专门设计的具有波浪补偿功能的吊机[4]；方案 2 是在普通吊机的吊钩上串联一个波浪补

① **收稿日期**：2026-04-07
基金项目：广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515240015)
作者简介：肖体兵(1975—)，男，湖南邵阳人，博士，副教授，主要从事机电液工程的节能设计、建模、仿真与智能控制方面的研究和工作。E-mail：xiaotb75@ gdut.edu.cn

偿吊具[5]。方案1存在占用空间大、成本高、维护困难和灵活性差等缺点[6]。方案2可与常规船用吊机配合使用,具有可移动、低成本、易于维护和拆卸等特点,应用前景广阔。因此,研制可与常规吊机配合使用,具有可移动、低成本、易于维护和拆卸特点的波浪补偿吊具,对推动波浪补偿技术的发展和应用具有重要意义。

本课题组近年来一直对波浪补偿吊具的升沉补偿能力开展研究[7],鉴于补偿缸与蓄能缸特殊结构[8]导致加工复杂且制造成本高昂,采用了常规元件替代补偿缸和蓄能缸,搭建了AMESim仿真模型,并通过实验分析了被动和半主动补偿模式下的补偿率。

1 波浪补偿吊具的工作原理

本文所研究的波浪补偿吊具具备两种补偿模式,分别为被动补偿模式[9]和半主动补偿模式[10]。波浪补偿吊具原理简图如图1所示。当波浪补偿吊具处于被动补偿模式作业时,伺服电机和二位二通电磁换向阀均不工作。以船舶上升为例,船体的上升动作经缆绳传递至补偿缸缸筒,带动其上升,因惯性因素的影响,补偿缸的空心活塞杆与吊物具有保持原有运动状态的趋势。此时,补偿缸被动腔内的油液会被挤压流向蓄能缸被动腔,使得蓄能缸被动腔油压升高,推动大活塞向上运动,致使气腔中的氮气受到压缩,进而储存能量。同时,由于蓄能缸的大、小活塞是由同一根杆连接,小活塞也向上运动,促使蓄能缸主动腔中的油液经电磁换向阀流入补偿缸主动腔室内,使空心活塞杆和吊物向下运动,维持吊物绝对位置不变。

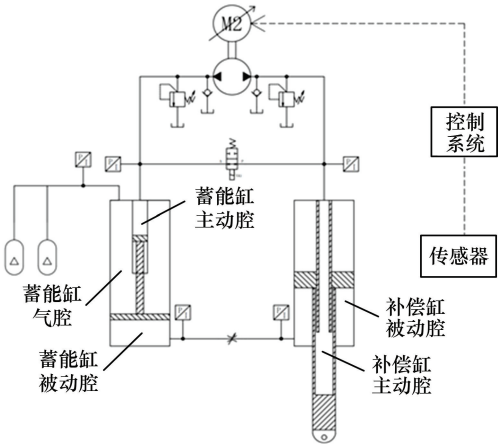


图1 波浪补偿吊具原理简图

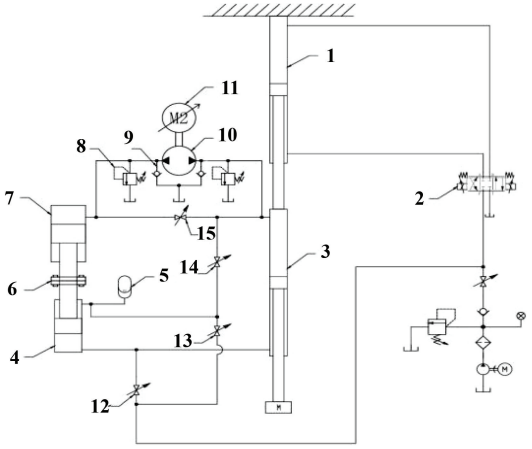
Fig. 1 Working principle of wave compensation hoisting device

当波浪补偿吊具处于半主动补偿模式作业时,伺服电机和二位二通电磁换向阀均处于工作状态。其工作流程与被动补偿模式基本一致,只不过补偿缸与蓄能缸主动腔的油液不通过电磁换向阀,而是由液压泵负责充油和排油。当船体随波浪上升时,通过传感器检测到船体位移并传递给控制器[11],控制器经计算后向伺服电机输出相应电压,驱动液压泵向补偿缸主动腔充油,油压升高,吊物相对缸筒下移,抵消船体上升对吊物的影响[12];船体下沉时,泵将补偿缸主动腔内油液泵回到蓄能缸主动腔。

波浪补偿吊具的补偿缸和蓄能缸是具有特殊结构的非标准件,定制价格昂贵,搭建完整的实验台成本高昂,因此通过常规油缸和蓄能器等普通元件替代补偿缸和蓄能缸,以低成本搭建能模拟波浪补偿吊具的实验台。

2 实验方案设计及实验台搭建

根据相似原理,针对四级海况下10 t级负载的波浪补偿吊具,搭建了100 kg负载、模拟波浪幅值30 mm的缩比原理样机实验台,如图2所示。图2中右侧的升沉补偿缸替代了补偿缸,左侧的上油缸和下油缸通过连接法兰与皮囊式蓄能器连成一体,替代了蓄能缸。



1—升沉模拟缸; 2—三位四通比例电磁换向阀; 3—升沉补偿缸; 4—下油缸; 5—皮囊式蓄能器; 6—连接法兰; 7—上油缸; 8—手动溢流阀; 9—单向阀; 10—齿轮泵; 11—伺服电机; 12~15—高压球阀

图2 波浪补偿吊具实验台

Fig. 2 Schematic diagram of wave compensation hoisting device test bench

为了平衡升沉补偿缸的无杆腔与上油缸的无杆腔,以及升沉补偿缸的有杆腔与下油缸的无杆腔之间的流量,需要确保升沉补偿缸的有杆腔和无杆腔的面积比尽量与下油缸的无杆腔和上油缸的无杆腔的面积比相近。升沉补偿缸的有杆腔与无杆腔的面积比为0.609 375,下油缸的无杆腔与上油缸的无杆腔的面积比为0.620 156。虽然这2个面积比接近,但仍存在一定差异,会导致一定的容积差。

补偿缸具有 2 个工作腔室，分别是空心活塞杆内部的腔室（主动腔）和有杆腔（被动腔）。为了模拟升沉补偿缸，采用 HOB-40-300 重型液压缸，其中无杆腔用于模拟补偿缸主动腔，有杆腔则用于模拟补偿缸被动腔。利用实验室现有油缸作为升沉模拟缸，固定于横梁上，通过位移传感器监测活塞杆位移，借助三位四通比例电磁换向阀控制油缸活塞杆伸缩，模拟船舶的升沉运动[13]，升沉模拟缸活塞杆通过锁紧螺母连接升沉补偿缸，带动升沉补偿缸进行升沉运动。

蓄能缸具有 3 个工作腔室：小活塞上表面腔室（主动腔）、大活塞下表面腔室（被动腔）和两活塞之间的气体腔室（气腔）。使用 HOB-63-200 和 HOB-80-200 重型液压缸与 NXQ-2.5 L/31.5 MPa皮囊式蓄能器模拟这些腔室。上油缸和下油缸的无杆腔分别模拟蓄能缸的主动腔和被动腔。下油缸的有杆腔通过皮囊式蓄能器连接，以模拟气腔。上、下油缸的活塞杆通过法兰连接，实现联动。上油缸的有杆腔通过 C 形空气过滤器与大气相连，防止灰尘进入腔室。实验台主要元件如图 3 所示。

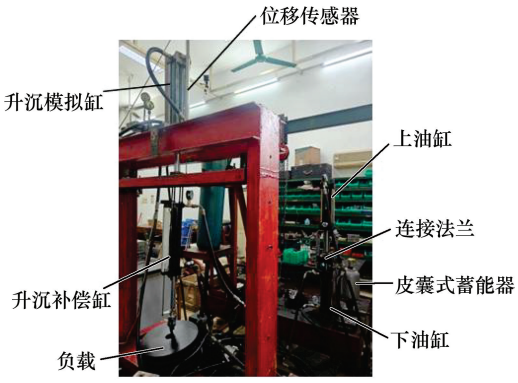


图 3　实验台主要元件

Fig. 3　Main components of test bench

半主动补偿模式采用 PID 控制方法，其控制原理框图如图 4 所示。在硬件测控上，利用差动变压器实时测量升沉绝对位移，电子尺位移传感器测量缸体相对位移，数据通过美国 NI 公司的 USB-6002 数据采集卡输入至控制系统。由于系统仿真步长设定为 0.01 s，对应实际控制系统采用 100 Hz 的采样频率与 10 ms 的控制周期。

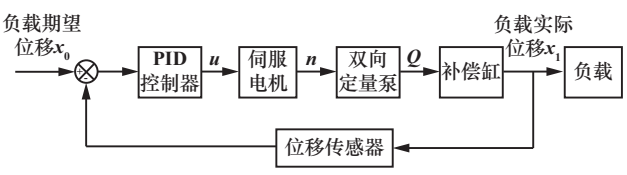


图 4　控制原理框图

Fig. 4　Block diagram of control system

控制算法根据期望与实际位移计算所需补偿量后，经采集卡 D/A 转化为电压信号输出给伺服电机。伺服电机的转速 n 与输入电压 u 成正比，从而驱动齿轮泵输出流量 Q。其电压-流量映射关系为：

$$Q = \frac{u}{u_{\max}} \times n_{\max} \times V \times \eta \tag{1}$$

式中：$u_{\max}$ 为最大电压；$n_{\max}$ 为最高转速；V 为泵排量；η 为容积效率，取 95%。

控制器通过该映射关系精准控制进入补偿缸的流量。

3　仿真模型

在 AMESim 中搭建的波浪补偿吊具实验台仿真模型如图 5 所示，系统各组件连接与原理图基本一致。

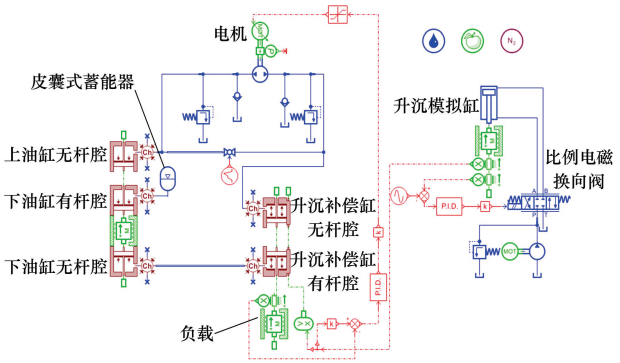


图 5　波浪补偿吊具实验台仿真模型

Fig. 5　Simulation model of wave compensation hoisting device test bench

AMESim 液压库中标准液压缸模型的缸筒无法移动，因此利用 Hydraulic Component Design（HCD）库搭建用于模拟升沉补偿缸的液压缸模型[14]。此外，上、下油缸是对顶关系且有一腔无需充入油液，标准液压缸模型无法满足需求，故也采用 HCD 库搭建仿真模型。波浪补偿吊具实验台仿真模型主要参数如表 1 所示。

表 1　实验台仿真模型主要参数

Table 1　Main parameters of test bench simulation model

缸种类	活塞直径/mm	活塞杆直径/mm	工作行程/mm
升沉模拟缸	50	35	300
升沉补偿缸	40	25	300
下油缸	63	35	200
上油缸	80	40	200

各连接管道通径/mm	截止阀通径/mm	皮囊式蓄能器体积/L	齿轮泵排量/（mL·r^{-1}）
15	6	2.5	6

4 仿真与实验分析

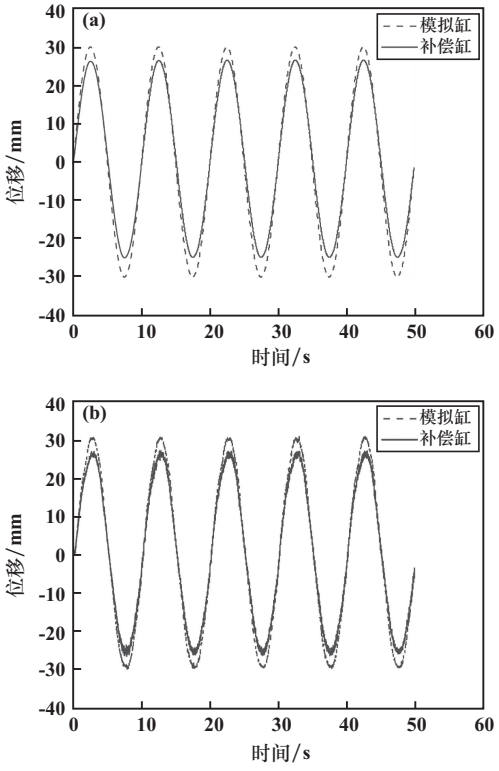
在仿真与实验数据处理中,补偿率 α 的计算公式为:

$$\alpha = \frac{|h_s - h_c|}{h_s} \times 100\% \quad (2)$$

式中:h_s 为模拟缸活塞杆升沉位移范围的绝对值;h_c 为补偿缸活塞杆升沉位移范围的绝对值。

4.1 被动补偿模式

被动补偿模式下模拟缸与补偿缸的升沉位移曲线如图6所示。仿真模拟中,升沉模拟缸活塞杆的升沉位移(对地)范围为-29.96~29.87 mm;升沉补偿缸活塞杆升沉位移(对地)范围为-24.84~26.23 mm。实验中,升沉模拟缸活塞杆升沉位移(对地)范围为-30.21~30.17 mm,升沉补偿缸活塞杆升沉位移(对地)范围为-26.13~26.09 mm。



(a) 仿真曲线;(b) 实验曲线

图6 被动补偿模式下模拟缸与补偿缸的升沉位移曲线

Fig. 6 Heave displacement curves of simulation cylinder and compensation cylinder in passive compensation mode

被动补偿模式仿真与实验的补偿率如表2所示。根据表2可知,在被动补偿模式下,波浪补偿吊具的仿真模型预测的补偿率(14.64%)略高于实验测得的补偿率(13.51%)。该被动补偿率较低主要是因为蓄能器体积较小,影响了补偿性能。

表2 被动补偿模式仿真与实验的补偿率

Table 2 Compensation rates of simulation and experiment in passive compensation mode

项目	蓄能器体积/L	负载/kg	补偿率/%
仿真	2.5	100	14.64
实验	2.5	100	13.51

图7是不同蓄能器体积下仿真被动补偿率的变化。由图7可知,体积2.5 L蓄能器升沉补偿缸活塞杆的升沉位移(对地)范围为-24.84~26.23 mm;体积20.0 L蓄能器升沉补偿缸活塞杆升沉位移(对地)范围为-22.45~21.92 mm;50.0 L体积蓄能器升沉补偿缸活塞杆升沉位移(对地)范围为-20.83~19.77 mm。

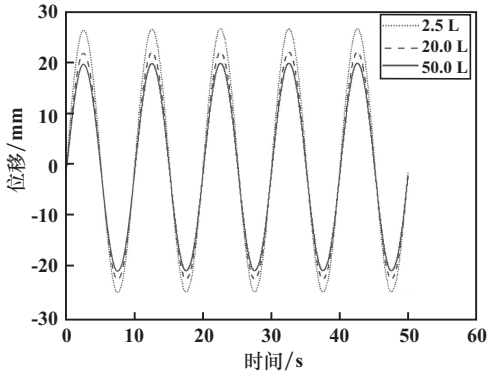


图7 不同蓄能器体积下仿真被动补偿率的变化

Fig. 7 Variation of simulated passive compensation rate with different accumulator volumes

被动补偿模式下不同蓄能器体积的仿真补偿率如表3所示。随着蓄能器体积增加,系统的补偿率有所增加,但并非线性增加,增幅越来越小。

表3 被动补偿模式下不同蓄能器体积的仿真补偿率

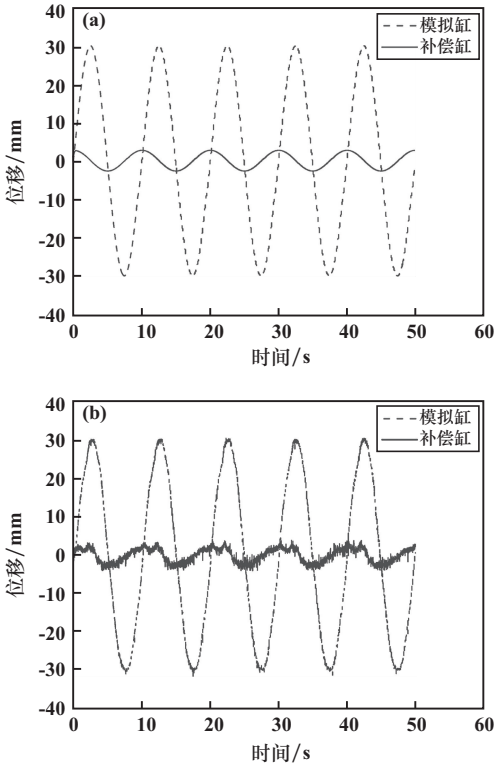
Table 3 Simulated compensation rate for different accumulator volumes in passive compensation mode

蓄能器体积/L	负载/kg	补偿率/%
2.5	100	14.64
20.0	100	25.84
50.0	100	32.14

4.2 半主动补偿模式

半主动补偿模式下模拟缸与补偿缸的升沉位移曲线如图8所示。由图8可知,半主动补偿模式仿真模拟中,升沉模拟缸活塞杆升沉位移(对地)范围与被动补偿模式相同,升沉补偿缸活塞杆升沉位移(对地)范围为-2.70~2.67 mm。半主动补偿模式实验中,升沉模拟缸活塞杆升沉位移(对地)范围与被动补偿模式相同,升沉补偿缸活塞杆升沉位移(对地)范围为

-3.12~3.04 mm。



(a) 仿真曲线; (b) 实验曲线

图 8　半主动补偿模式下模拟缸与补偿缸的升沉位移曲线

Fig. 8　Heave displacement curves of simulation cylinder and compensation cylinder in semi-active compensation mode

半主动补偿模式下仿真与实验的补偿率如表 4 所示。根据表 4 可知,半主动补偿模式下,波浪补偿吊具的仿真补偿率略高于实验补偿率。这种差异源于容积差与面积比不完全匹配、传感器精度与间接计算误差、液压油泄漏与非线性摩擦等多方面因素的影响。

表 4　半主动补偿模式下仿真与实验的补偿率

Table 4　Compensation rates of simulation and experiment in semi-active compensation mode

项目	蓄能器体积/L	负载/kg	补偿率/%
仿真	2.5	100	91.01
实验	2.5	100	89.80

4.3　补偿率及能耗仿真对比分析

基于所搭建的实验台仿真模型,本文对被动、主动与半主动 3 种补偿模式的补偿精度及能量消耗特性进行比较分析。不同补偿方式下升沉位移仿真曲线如图 9 所示。由图 9 可知,被动补偿位移变化范围为-24.84~26.23 mm,主动补偿位移变化范围为-1.65~1.68 mm,半主动补偿位移变化范围为-2.70~2.67 mm。主动补偿模式下位移波动小,能够保证负载在波浪下保持较好的稳定性。

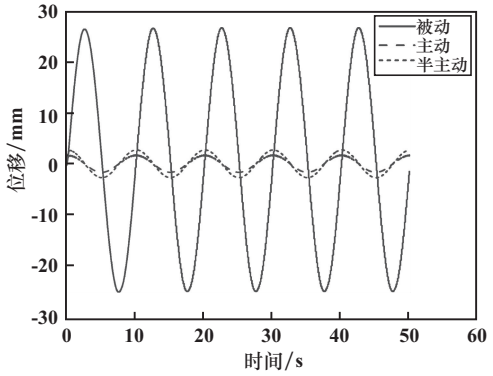


图 9　不同补偿方式下升沉位移仿真曲线

Fig. 9　Heave displacement simulation curves in different compensation modes

图 10 展示了不同补偿模式下的系统能耗变化曲线。被动补偿模式下系统能耗曲线始终与时间轴重合,能耗为 0,而另外两种补偿模式下系统能耗随时间延长而不断增大,主动补偿模式完全由电机供能,能耗最高;半主动模式由系统本身和电机共同供能,因此需要的能量远低于主动模式。

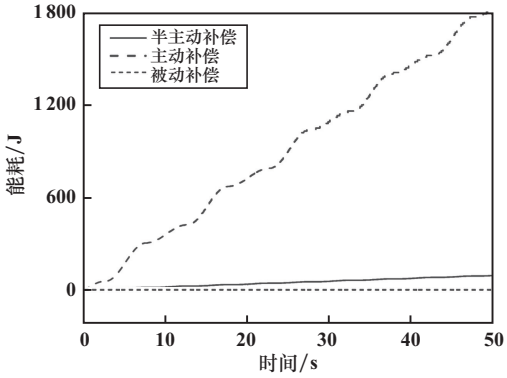


图 10　不同补偿模式下的系统能耗曲线

Fig. 10　System energy consumption curves in different compensation modes

3 种补偿方式的补偿率与能耗结果对比如表 5 所示。从表 5 可知,在补偿效果方面,半主动补偿模式的补偿能力略逊于主动补偿模式,但显著优于被动补偿模式;在能量消耗方面,半主动补偿模式的能耗明显低

表 5　不同补偿模式下的补偿率与能耗结果对比

Table 5　Comparison of compensation rates and energy consumption results in different compensation modes

补偿模式	补偿率/%	能耗/J
被动	14.64	0
主动	94.44	1 825.47
半主动	91.01	96.18

于主动补偿模式,能耗约为 96.18 J,仅占主动补偿模式系统能耗的 5.27%,被动补偿模式不消耗能量。综合考虑 3 种补偿模式的补偿效果与能量消耗,半主动补偿模式不仅具备较好的补偿能力,而且能耗较低,运行稳定,具有较高的应用价值。

5 结论

本文利用 AMESim 软件搭建了波浪补偿吊具仿真模型,对仿真模型的主要参数进行了详细说明,并以常规油缸和蓄能器等元器件代替价格昂贵的专用补偿缸和蓄能缸搭建实验台,分析对比被动、半主动和主动补偿模式的补偿能力与能耗,得出以下结论。

1) 仿真和实验结果实现了预期的高补偿率和低能耗,说明采用常规油缸和蓄能器替代结构复杂且昂贵的专用补偿缸和专用蓄能缸来搭建波浪补偿吊具模拟实验台的方案是可行的,是一种低成本高效的波浪补偿吊具模拟实验方案。

2) 半主动补偿系统补偿能力好、能耗低。

3) 仿真结果与实验数据误差较小,说明仿真与实验具有较好的一致性。

4) 实验台虽然是面向四级海况下 10 t 级负载搭建,但也可用于定性验证其他规格吊具补偿器的控制算法。

参考文献(References):

[1] 靳国良,王生海,牛安琪,等. 海上吊装运动补偿技术综述[J]. 船舶工程, 2025,47(8):102-114.
JIN Guoliang, WANG Shenghai, NIU Anqi, et al. A review of motion compensation techniques for offshore lifting[J]. Ship Engineering, 2025,47(8):102-114.

[2] 吴少飞. 船用起重机半主动升沉补偿系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2022.
WU Shaofei. Research on semi-active heave compensation system in offshore crane[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.

[3] 金永平,董向阳,万步炎,等. 深海金属采矿装备与技术发展现状及分析[J]. 煤炭学报, 2024,49(8):3316-3334.
JIN Yongping, DONG Xiangyang, WAN Buyan, et al. Research status and analysis of deep-sea metal mining equipment and Technologies[J]. Journal of Coal Science, 2024,49(08):3316-3334.

[4] 上海振华重工 12000 吨全回转起重船"振华 30"轮[EB/OL]. (2020-12-22)[2026-1-20]. https://cn.zpmc.com/content/67659605006017c80000407f.
The 12,000-ton fully rotating crane ship "Zhenhua 30" of Shanghai Zhenhua Heavy Industries[EB/OL].(2020-12-22)[2026-1-20]. https://cn.zpmc.com/content/67659605006017c80000407f.

[5] 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.
LYU Xiaoying, LIU Han, SU Yan. A review of portable integrated heave compensation devices[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2026,21(2):317-339.

[6] 宝鸡石油机械有限责任公司. 轻便型海洋吊机波浪补偿装置:201721124207.5[P]. 2018-04-13.
Baoji Petroleum Machinery Co., Ltd. Compact marine crane wave compensation device:201721124207.5[P]. 2018-04-13.

[7] 金浩澜. 基于直驱容积控制的半主动吊钩波浪补偿器研究[D]. 广州:广东工业大学,2024.
JIN Haolan. Research on semiactive hook type wave compensator based on direct drive volume control[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2024.

[8] 蔡海东. 10T 半主动波浪补偿吊具的数字化样机与实验研究[D]. 广州:广东工业大学, 2025.
CAI Haidong. Digital prototype and experimental study of a 10T semi-active wave compensation device[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2025.

[9] 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.
MAO Hanyu, YU Long. Analysis of deep water hoisting operation with hook-type heave compensation device[J]. Ship Engineering, 2023, 45(7):109-114.

[10] MOSLÅTT G A, RYGAARD HANSEN M, PADOVANI D. Performance improvement of a hydraulic active/passive heave compensation winch using semi secondary motor control: Experimental and numerical verification[J]. Energies, 2020,13(10):2671.

[11] 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.

[12] 李世振. 重型海工装备升沉补偿电液控制系统研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
LI Shizhen. Research on the electro-hydraulic system of heave compensation in marine operations[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[13] 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 Jian. Research on heave compensation experiment system for marine hanging equipment[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

[14] 李小孟. 液压缸式升沉补偿系统的建模及仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2017.
LI Xiaomeng. Modeling and simulation of hydraulic cylinder heave compensation system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.

引用本文:肖体兵,陈文杰,蔡海东. 波浪补偿吊具模拟实验台的设计[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):111-116.
XIAO Tibing, CHEN Wenjie, CAI Haidong. Design of wave compensation hoisting device test bench[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026, 46(3):111-116.