

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.057

钢丝绳卷扬提升式垂直升船机受力均衡性控制技术

李倩¹, 胥胜洪², 黄金根¹, 陆永亚¹

(1. 杭州国电机械设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310030;

2. 贵州乌江水电开发有限责任公司构皮滩发电厂, 贵州 遵义 564400)

摘要:为研究钢丝绳卷扬提升式垂直升船机受力均衡性控制技术,在升船机系统动力学分析的基础上,明确钢丝绳卷扬提升式垂直升船机处于悬吊状态时,承船厢运动情况和特点;划分升船机系统获得4个子系统参数,基于各个子系统在升船机系统中的耦合关系,设计三闭环控制系统;通过转矩环控制器、速度环控制器和位置环控制器对升船机系统的转矩误差、速度误差和位置误差展开补偿控制,以此提高升船机系统的受力均衡性。经验证:可有效控制升船机系统的卷筒角、承船厢纵倾角和液压缸活塞处于稳定状态,具有良好的均衡控制效果。

关键词:动力学分析;升船机;耦合分析;三闭环控制;受力均衡性控制

中图分类号:TV734 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0280-05

Force Balance Control Technology of Vertical Ship Lift with Wire Rope Winch

LI Qian¹, XU Shenghong², HUANG Jingen¹, LU Yongya¹

(1. Hangzhou Guodian Machinery Design and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China;

2. Goupitan Power Plant of Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd., Zunyi 564400, China)

Abstract:To study the force balance control technology for a vertical ship lift with wire rope, the motion and characteristics of the ship carrying chamber of the wire rope winch vertical ship lift in the suspended state are clarified based on the dynamic analysis of the ship lift system. The ship lift system is divided into four subsystems, and a three closed-loop control system is designed based on the coupling relationship of each subsystem in the ship lift system. The torque loop controller, speed loop controller, and position loop controller are used to compensate and control the torque error, speed error, and position error of the ship lift system, improving the force balance of the ship lift system. It is verified that the proposed method can effectively control the reel angle of the ship lift system, the trim angle of the ship carrier chamber, and the piston of the hydraulic cylinder in a stable state with good balance control effects.

Keywords:dynamic analysis; ship lift; coupling analysis; three closed-loop control; force balance control

0 引言

承船厢在提升式垂直升船机中的弹性支座为钢丝绳,承船厢的扬程相对较高,因此产生的惯性通常较大,进而导致支撑偏低。由于上述特性,提升式升船机在运动过程中的动态特性相对较差^[1]。提升式垂直升船机属于一个复杂的机电液系统,由若干个子结构构成,子结构之间存在互相耦合作用。承船厢体内的液体在上升和下降时会发生晃动,影响整个箱体结构,增加了主提升机悬吊系统与承船厢之间动力特性的复杂程度,在此背景下研究升船机的受力均衡性控制技术具有重要的现实意义。

吕伟毕等^[2]建立了以结构柔度最小为优化目

标的拓扑优化模型,通过有限元对构建模型进行重构,实现了升船机平衡重滑轮结构拓扑优化设计,保证了升船机的稳定性。但是,该方法受提升的影响,控制效果有待进一步提高。桂远乾等^[3]结合传动控制技术、机电液一体化自感应控制技术和多机构协同交互控制系统来完成升船机的受力均衡控制。但是,该方法无法控制卷筒角位移处于稳定状态,控制效果不理想。李红章^[4]通过传感器获取钢丝绳的相关数据,利用去噪后的数据计算钢丝绳的振动幅值,设定阈值,通过对比阈值与振动幅值获得升船机的受力均衡情况,在此基础上展开减振控制。但是,该方法对升船机系统的承船厢纵倾角和液压缸活塞位移控制效果仍较差,控制均衡性较差。为了保证钢丝绳卷扬提

基金项目:中国华电集团重大科技项目(CHDKJ20-01-30)

第一作者简介:李倩(1986—),女,山东菏泽人,高级工程师,硕士,研究方向为大型通航建筑物(升船机)的设计, dafei7748@163.com。

升式垂直升船机的稳定性,提出升船机受力均衡控制技术就显得尤为重要。

1 升船机受力均衡性控制技术分析

1.1 升船机动力学控制不平衡问题分析

在升船机系统中,承船厢的纵倾、不平衡运动可通过图 1 描述。

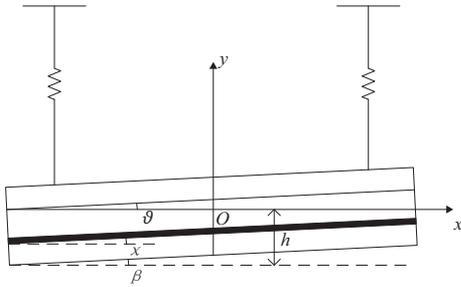


图 1 承船厢在升船机结构中的纵倾运动

分析图 1, h 为承船厢内水体对应的深度; ϑ 为水体在承船厢中处于晃动状态时产生的位移角; β 为承船厢受水体晃动的影响表现出纵倾运动时产生的角位移; 黑色横条为厚度薄膜; x 为厚度薄膜在 y 处产生的旋转角速度。

用 $\ddot{\beta}$ 表示水体的初始角加速度, 承船厢在水体 $\ddot{\beta}$ 的作用下发生纵倾现象, 并逐渐出现晃动^[5], 此时承船厢的角加速度为 $\ddot{\vartheta}$, 受水体晃动的影响, 承船厢会产生液动力, 进而生成一定的倾覆力矩。设置容器几何形状积分参数 O, K , 用 p 表示箱体内部处于晃动状态下的水体产生的压力^[6-7], 该值可通过下式计算:

$$p = -\rho x \sqrt{K/O} \{ [(\ddot{\vartheta} \cosh(\sqrt{K/O}h) - \ddot{\beta}) / \sinh(\sqrt{K/O}h)] [\cosh(\sqrt{K/O}h) - 1] + \ddot{\vartheta} \sinh(\sqrt{K/O}y) \} \quad (1)$$

式中: ρ 为水体密度; x 为水平方向; y 为竖直方向。设 p_y 为承船厢内水体产生的水动力, 可通过下式计算:

$$p_y \approx \frac{\rho x h (\ddot{\vartheta} + \ddot{\beta})}{2} - p \quad (2)$$

由 p_y 产生的转矩环力矩 Q_1 的表达式如下:

$$Q_1 = - \int_{-L/2}^{L/2} L \times p_y dL \quad (3)$$

式中 L 表示力臂。

用 Q_2 表示由于水体自由面晃动和承船厢倾斜产生的速度环力矩, 可通过下式计算:

$$Q_2 = - \int_{-L/2}^{L/2} p_y L g^2 (\beta - \vartheta) dL \quad (4)$$

式中 g 为重力加速度。

根据图 1 分析主提升机悬吊与承船厢系统之间存在的动力关系, 以此为依据, 结合上述参数获取升船机系统位置环为

$$\begin{cases} T = (K_1 + K_2 + K_3) (\gamma_1^2 + \gamma_2^2) / 2 + m_1 m_2 / 2 \\ V = J [(E\gamma_1 - Q_1 - s\beta/2)^2 + 2C(\gamma_1 - \gamma_2)^2] \end{cases} \quad (5)$$

式中: T 为系统的总动能; K_1 为卷筒转动惯量; K_2 为滑轮产生的转动惯量; K_3 为水体和箱体在运动过程中产生的转动惯量; γ_1, γ_2 分别为同步轴中卷筒和滑轮组的转动角位移; m_1 为水体在承船厢中对应的质量; m_2 为重力平衡重质量; V 为升船机系统产生的总动能; E 为卷筒对应的半径; s 为吊点中心距; J 为钢丝绳刚度; C 为同步轴刚度。由此可知, 转矩环、速度环和位置环是控制平衡的关键因素。

1.2 升船机整体耦合约束关系分析

钢丝绳卷扬提升式垂直升船机的耦合系统由卷扬子系统与液压力子系统^[8-9]、船厢子系统、塔柱子系统和电力拖动子系统 4 个部分构成。其中, 钢丝绳卷扬提升式垂直升船机通过卷扬子系统完成货物的升降。其工作原理是电动机通过减速器和链条传动装置传递动力到卷筒上, 使卷筒旋转, 卷扬绳随之卷绕在卷筒上, 从而产生拉力, 提升被吊起的物体, 如图 2 所示。

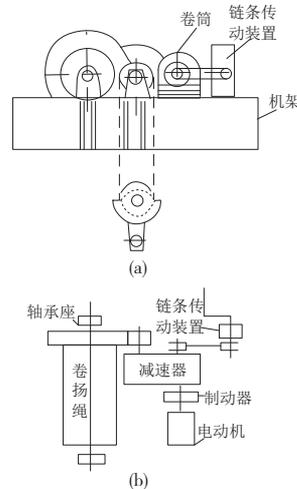


图 2 卷扬子系统运行原理示意图

设 w_μ 为耦合子系统 μ 对应的广义坐标集; G_μ 为耦合子系统 μ 对应的广义力集, 其表达式分别如下:

$$w_\mu = T \begin{bmatrix} w_{\mu i} \\ w_{\mu j} \end{bmatrix}; G_\mu = V \begin{bmatrix} G_{\mu i} \\ G_{\mu j} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: 坐标集 $w_{\mu i}$ 由子系统 μ 中存在的内部节点构

式中: L_3 为控制器对应的积分系数; L_{fp} 表示位置环在控制器中的反馈系数。综合转矩环、速度环和位置环控制器对应的传递函数获取钢丝绳卷扬提升式垂直升船机受力均衡性控制函数为

$$H = H_{SCR}(s) + H_{ACR}(s) + H_{ASR}(s) \quad (14)$$

根据上述过程,实现钢丝绳卷扬提升式垂直升船机受力控制,下文将进行实验验证控制效果。

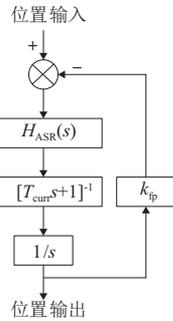


图5 位置环控制器

2 实验与分析

本次测试所用的钢丝绳卷扬提升式垂直升船机系统模拟如图6所示。



图6 钢丝绳卷扬提升式垂直升船机

图6所示的钢丝绳卷扬提升式垂直升船机对3000t的货轮进行提升作业。作业时需满足以下要求:最大允许晃动量为1%,以保持平稳运行;最大允许位置偏差为5mm,以保证控制精度;最大允许质心偏移量为5%,以保证载荷平衡。

将吊点中心距分别设置为19.0m和18.5m,测试所提方法、文献[3]多机构协同交互控制方法和文献[4]减振控制方法的均衡性控制结果,如图7—图8所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

1) 吊点中心距为19.0m

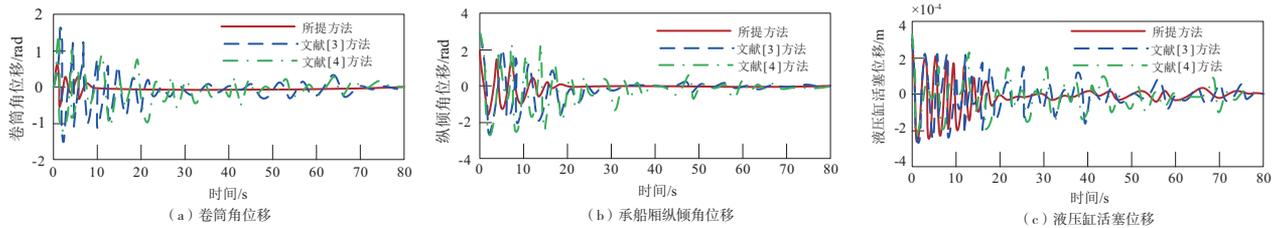


图7 吊点中心距为19.0m时的均衡性控制结果

分析图7可知,采用所提方法展开均衡性控制时,升船机的卷筒角在10s内趋近稳定;在20s内承船厢纵倾角和液压缸活塞位移保持稳定;采用文献[3]方法和文献[4]方法展开控制时,升船机的卷筒角、承船厢纵倾角和液压缸活塞位移曲

线均呈现出较大波动,表明这两种方法对钢丝绳卷扬提升式垂直升船机展开控制时,无法控制升船机卷筒角、承船厢纵倾角和液压缸活塞保持稳定均衡状态,控制效果较差。

2) 吊点中心距为18.5m

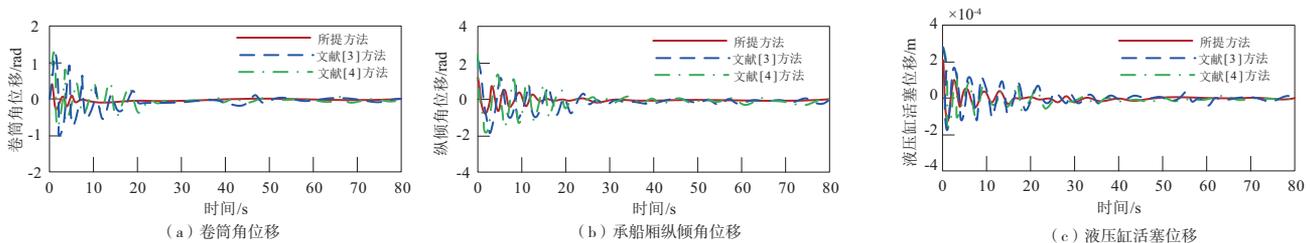


图8 吊点中心距为18.5m时的均衡性控制结果

分析图8可知,吊点中心距为18.5m时,所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法的均衡性控制效果优于吊点中心距为19.0m时的均衡性控

制效果。所提方法对钢丝绳卷扬提升式垂直升船机展开控制时,升船机的卷筒角、承船厢纵倾角和液压缸活塞位移处于稳定状态,文献[3]方法和

文献[4]方法的控制效果虽然得到了优化,但仍然存在波动,控制效果不理想。

通过以上受力均衡性控制测试可知,所提方法具有良好的控制效果,因为所提方法在动力学模型的基础上对升船机展开整体动力学分析,以此获取升船机各子系统之间的耦合关系,通过设计三闭环控制器,实现升船机受力均衡的控制,具有良好的控制效果。

3 结语

由于制造误差等因素的影响,钢丝绳卷扬提升式垂直升船机的受力出现不均衡的现象,导致承船厢出现微量纵倾。为了提高升船机系统的稳定性,提出钢丝绳卷扬提升式垂直升船机受力均衡性控制技术。所提方法在升船机系统动力学模型的基础上对系统展开耦合分析,以此为依据,设计三闭环控制器,通过转矩环控制器、速度环控制器和位置环控制器对钢丝绳卷扬提升式垂直升船机展开受力均衡控制。实验结果表明,所提方法提高了升船机系统整体的稳定性和均衡性,可有效保证钢丝绳卷扬提升式垂直升船机的稳定性。

参考文献:

- [1] 蒙文巩,王笑语,佟明,等. 基于船舶运动数据分析的预报方法[J]. 船舶工程,2021,43(增刊2):106-108,116.
- [2] 汤伟毕,李然,韩伟,等. 三峡升船机平衡重滑轮结构拓扑优化设计[J]. 水力发电,2021,47(1):99-102.
- [3] 桂远乾,曹阳,唐勇. 大型垂直升船机智能传动控制体系关键技术及应用[J]. 人民长江,2022,53(2):105-110.
- [4] 李红章. 船舶动力机械钢丝绳减振控制研究[J]. 舰船科学技术,2021,43(14):28-30.
- [5] 赵亚萍,党梦帆,冯建军,等. 自由液面及水体重力对

贯流水轮机叶片应力应变的影响[J]. 农业工程学报,2022,38(6):52-60.

- [6] 刘进,王志伟,沈琪,等. 加肋透声窗水动力自噪声的数值/解析混合计算方法研究[J]. 船舶力学,2022,26(2):282-290.
- [7] 丁恩宝,常晟铭,孙聪,等. 斜流角对半浸桨叶剖面入水的水动力特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2022,43(4):472-480.
- [8] 殷虎,徐越,何震. 基于自抗扰控制技术的某舰船机械装置液压系统改进研究[J]. 机床与液压,2021,49(20):59-63.
- [9] 郑天平,王内,毋迪,等. 船用舵机两种液压驱动方式振动噪声对比试验[J]. 液压与气动,2021,45(6):63-68.
- [10] 张博,肖宝玉. 基于 LTCC 工艺的低通滤波器设计与实现[J]. 电子器件,2021,44(2):278-281.
- [11] 苏秀健,吴国强,周文雅,等. 基于 L_1 输出反馈自适应方法的火箭姿态控制[J]. 计算机仿真,2021,38(12):33-38.
- [12] 许文波,焦玮玮,潘龙. 基于极点配置的 PMSM 电流环 PI 控制器设计[J]. 航天控制,2021,39(1):74-80.
- [13] 苏锦智,张继鹏,安群涛. 基于频率自适应复矢量 PI 控制器的 PMSM 电流谐波抑制策略[J]. 电机与控制应用,2021,48(12):30-36.
- [14] 万军,贾宇明. 基于现场可编程序模拟阵列的 PI 控制器的直流伺服系统研究[J]. 机床与液压,2021,49(2):124-127.
- [15] 许文波,魏泽宇,孔伟,等. PMSM 伺服系统线性自抗扰控制器的参数整定[J]. 控制理论与应用,2022,39(1):165-178.

收稿日期:2023-05-26

(上接第 269 页)

- [9] KORTIŠ J, DANIEL L', ŠKARUPA M, et al. Experimental modal test of the laboratory model of steel truss structure [J]. Civil and Environmental Engineering,2016,12(2):116-121.
- [10] 田晶,路闯,艾延廷,等. 边界条件模拟方法对模态分析影响的研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(34):10417-10420.
- [11] 李光胜,徐传燕,陈美宏,等. 不同支撑条件对钢板模态分析结果的影响[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(12):12-16.

[12] 秦杰,周福庚. 不同约束条件下的变速器箱体振动模态试验分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2009,32(S1):142-145.

- [13] 苏宏杰,崔红梅,李飞宇. 气吹式深松铲自由模态试验与分析[J]. 农机化研究,2021,43(5):212-216,262.
- [14] 孙鑫晖,郝木明,王淮维. PolyMAX 模态参数识别算法的快速实现[J]. 振动与冲击,2011,30(10):6-8,18.

收稿日期:2023-06-07