

· 港 口 ·



一种港口自动系泊系统方案 设计与试验研究^{*}

高 峰^{1,2}, 唐友刚¹, 胡 克^{2,3}, 丁实兴³, 胡传琦²

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 港口水工建筑物国家工程实验室, 天津 300456;

3. 燕山大学机械电子工程系, 河北 秦皇岛 066044)

摘要: 港口自动系泊系统是一个复杂的系统工程, 它涉及船舶运动学、结构力学、自动控制理论和信息化技术等多门学科, 是跨专业融合发展的产物。码头系泊作业自动化主要通过改变系泊方式、实时监控船舶姿态与运动量、合理调节船岸间作用力予以实现。基于并联平台机器人在6自由度运动模拟方面的优势, 设计提出一种港口船舶自动系泊系统方案, 可通过平台各分支的被动阻尼充当恢复力以调节系泊船舶的运动量的方式实现主动控制系泊作业期间的船岸协同, 并针对该方案开展功能样机的水池试验以验证方案可行性与使用效果。

关键词: 港口; 自动系泊; 并联机器人; 船舶运动; 模型试验

中图分类号: U 653.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0050-06

Design and experimental study of a port automatic mooring system

GAO Feng^{1,2}, TANG You-gang¹, HU Ke^{2,3}, DING Shi-xing³, HU Chuan-qi²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. National Engineering Laboratory of Port Hydraulic Structure Technology, Tianjin Research Institute
of Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China;

3. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066044, China)

Abstract: Port automatic mooring system is a complex system engineering, which involves many subjects such as ship kinematics, structural mechanics, automatic control theory and information technology, and is the product of cross-specialty integration development. The automation of dock mooring is mainly realized through the change of mooring mode, the real-time monitoring of ship posture and movement amount, and the reasonable adjustment of ship and shore interaction force. Based on the advantages of the parallel platform robot in six-free motion simulation, an automatic mooring system for port ships is designed and proposed. The passive damping of each branch of the platform acts as the restoring force to adjust the amount of motion of the mooring ship to realize the active control of ship-shore coordination during the mooring operation. In order to verify the feasibility and effect of the scheme, a functional prototype tank test is carried out.

Keywords: port; automatic mooring; parallel robot; ship movement; model test

收稿日期: 2022-02-08

*基金项目: 国家自然科学基金资助联合基金重点支持项目(U21A20123); 中央级科研院所基本科研业务费资助项
目(TKS20200304)

作者简介: 高峰(1978—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事港口航道与海岸工程的科研试验与研究。

随着全球航运事业的快速发展, 港口、码头越来越多, 船舶趋于大型化; 同时随着装卸效率的提升, 频繁的系靠泊作业已成为航运行业中的常态。港口内船舶系泊作业期间, 受水文气象条件、装卸作业导致船舶吃水频繁变化等因素影响, 船员和岸上工人对系泊缆绳的操作是港口作业中最易出现事故风险的任务环节。据美国海岸警卫队的数据统计, 因为系泊缆绳造成重大事故数量占到港口事故的第 2 位, 仅 2006—2014 年的 9 年时间里, 共有 51 名船员发生重大事故^[1]。虽然材料科学在发展、系泊缆绳趋于多样化^[2]、船舶自动化程度空前提升、智慧港口已成为各大港发展目标, 但是上述连接船岸间的传统系泊方式依然没有发生变化^[3-5]。如今, 科技不断推陈出新, 国外对系泊系统的研究已经从最初的单根缆绳监测发展到系统监测, 港口码头自动系泊系统的研究在近年来得到了广泛重视, 并逐步得到应用, 利用自动化技术保证船舶系泊期间的作业安全以代替传统带缆方式也已经成为可能。这一领域以欧洲公司所研发的成果为代表, 如 Moor Master 系泊系统和 ShoreTension® 系泊系统均是已投入应用的自动系泊作业解决方案, 见图 1。根据其系缆布置方式, 可分为有系泊缆的自动化系泊和无系泊缆的自动化系泊两种^[6-7]。港口实现自动系泊的意义在于增加作业可靠性和安全性, 尽量减少靠泊期间人员的参与操作、消除失误与风险隐患。同时, 可提高港口运转效率、减少停机等待时间, 不仅系泊时间缩短了, 也精简了泊位操作程序, 使得中转时间短, 进而提升码头作业效率和吞吐量。



a) ShoreTension® 系统(有系泊缆)



b) MoorMaster™ 400 系统(无系泊缆)

图 1 自动化系泊系统

实现系泊作业的自动化主要通过改变传统系泊方式、实时监控船舶姿态与运动量、合理调节船-岸间作用力来实现。笔者基于 6 轴并联平台机器人在运动模拟方面的优势^[8], 提出一种港口船舶自动系泊系统方案, 可通过平台各分支的被动阻尼充当恢复力, 以调节系泊船舶的运动量的方式实现主动控制系泊作业期间的船岸协同, 并针对该方案开展功能样机的水池试验, 验证方案可行性与使用效果。

1 系泊主要控制任务

1.1 船舶运动量的控制

一般在系泊状态下的船舶运动量同时包含纵荡、横荡、垂荡、纵摇、横摇和艏摇, 这是反映系泊状态与衡量码头泊稳条件的重要指标。通过码头系泊操作, 即是要求系泊船舶的运动量能够收敛到期望的安全作业范围内。1995 年 PIANC (国际航运协会) 对船舶安全作业所允许的船舶运动量给出了推荐值; 美国 UFC (Unified Facilities Criteria) 中关于系泊设计的相关规定则采用上述推荐值作为标准^[9]; 英标 BS 6349-1-21 (2013) 在上述推荐值的基础上进一步明确后, 给出了参考标准^[10](表 1)。之前我国规范一直仅用泊位处波高来判定泊稳条件, 在通过一系列专题研究之后, 于 2014 年通过的 JTS 165—2013《海港总体设计规范》明确制订了以船舶运动量表示的作业标准^[11]。

表 1 英标采用的安全系泊最大运动量指导标准

船型	装卸设备	纵移 [*] /m	横移 [*] /m	升沉 [*] /m	回转 [*] /(°)	纵摇 [*] /(°)	横摇 [*] /(°)
渔船	起重机	0.15	0.15				
	提升设备	1.0	1.0	0.4	3	3	3
	吸泵	2.0	1.0				
近海货船	船机	1.0	1.2	0.6	1	1	2
	码头起重机	1.0	1.2	0.8	2	1	3
杂货船	-	2.0	1.5	1.0	3	2	5
散船	抓斗卸船机	2.0	1.0	1.0	2	2	6
	连续卸船机	1.0	0.5	1.0	2	2	2
	装船机	5.0	2.5	-	3	-	-
油船	装卸臂	0.5~2.0 ^{**}	0.5~2.0 ^{**}	-	-	-	-
液化气船	装卸臂	0.5~1.0 ^{**}	0.5~1.0 ^{**}	-	-	-	-

注：*指的是峰—峰值(摇摆除外)；**表示这些值是由 PIANC 修改的，尽管加载臂可能被设计成可接受离开码头更大的纵荡、横荡或艏摇运动量，但作业臂的安全操作范围可能更小，限位开关可能在较低的运动时触发紧急关闭系统。

1.2 船舶、码头荷载的控制

系泊船舶与码头之间的荷载主要包含缆力与撞击力，均要求安全可控。国际上普遍根据石油公司国际海事论坛(OCIMF)或者英国标准(BS 6349)所推荐的风荷载、水流力或撞击能量等计算公式得到码头前船舶受力，并针对不同材质缆绳规定了所受拉力的上限要求，即系泊船舶在风、浪、流综合作用下，能够保证系缆力不超过缆绳材料自身的破坏强度是船舶安全系泊重要因素之一^[12]。

JTS 144-1—2010《港工荷载规范》^[13]规定，系缆力的标准值不应大于缆绳的破断力，缆绳破断力应按缆绳材质和规格确定。船舶作用在系船柱、系船环上的系缆力标准值不应小于规范所列出的系缆力标准值。挤压力应考虑风和水流产生的横向分力总和；撞击力则根据有效撞击能量确定，与船舶质量和法向靠岸速度有关。

2 系统主体结构设计

2.1 系统工作原理与流程

自动系泊系统通过磁性吸盘产生的吸附力来代替传统的缆绳拉力，并由6轴并联机器人技术实现对系泊船舶运动量的主动控制。吸盘的吸附力应根据不同的设计计划分来适应不同类型和大小的船舶，吸盘可以保证船舶紧紧地“贴”在码头上，并联机构则可以保证有足够的自由度实现船

舶三维运动姿态的调整以更适应系泊作业要求。因压排水、装卸货物、潮汐而使船舶产生的运动力大于并联平台运动缸限定的力时，吸盘可沿着各自的方向轴进行阻尼运动，当船舶受到外力有离开码头的运动趋势并且这种力大于吸盘设定的吸力时，系统可调节吸力来保证船舶的安全系泊^[14]。同时，自动系泊系统可再配置监视与遥控技术，作业过程中可远程、实时监控系泊状态，有效提高船舶停泊期间系泊作业的安全保障能力^[15]。

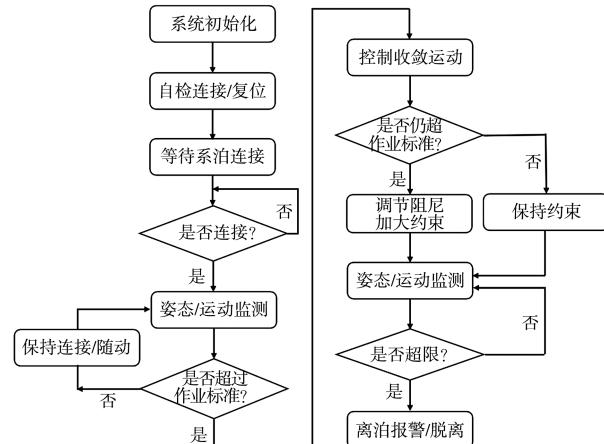


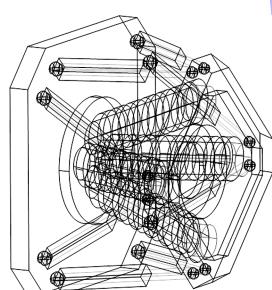
图2 自动系泊系统工作原理

系统工作流程见图2。当泊位处的泊稳条件较好时，船舶的姿态与运动量符合安全作业要求，此时自动系泊系统仅处于与船身连接状态，并一起随动；当水文条件变得复杂时，船舶的运动量超出设定安全范围，系泊系统通过阻尼效应进行主动调整，使其恢复，在满足要求的范围内运动。

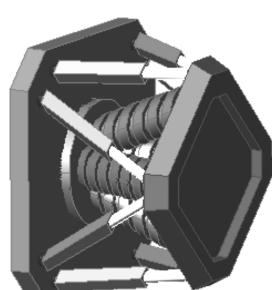
船舶运动的速度越快, 系统的阻尼力越大, 做负功所消耗的能量就越大, 船体的摇晃能量被不断消耗, 其晃动的程度也就随之减缓, 以此达到减摇的目的。与此同时系统也将产生反向的压力, 不断纠正船体的位置, 使船体的位置在系统随动时保持在预定的范围内。

2.2 系统框架设计与总体布局

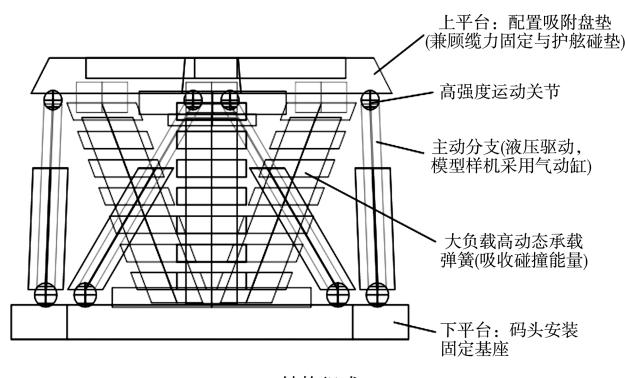
系泊机构需要满足运动量的要求, 又需要具有抗拉和耐冲击特性, 因此采用 6UPS/3UPS 双并联平台 (U 代表万向铰、P 代表移动副、S 代表球铰), 即两个 3UPS/6UPS 并联单元为一组, 包含 6 驱动、3 助力的结构形式。为了避免初始位置的奇异, 系泊机构一个并联单元的驱动分支交叉布置, 另一个并联单元的驱动分支呈正三角布置。每个并联单元除了驱动分支位置不同以外, 其他结构完全一致。单个并联单元由下平台、双层上平台、驱动分支、辅助分支以及上下铰链等构成。其中, 上平台布置有磁性吸盘, 用于和船身的吸附连接; 下平台为系统的基座, 与码头岸壁固定。单个机组的结构设计方案与总体布置见图 3。在整体布置上, 各独立单元沿水平方向可以根据系泊船舶的吸附位置和间距要求调整, 沿垂直方向可以根据水位、船舶型深和吃水沿轨道调整。



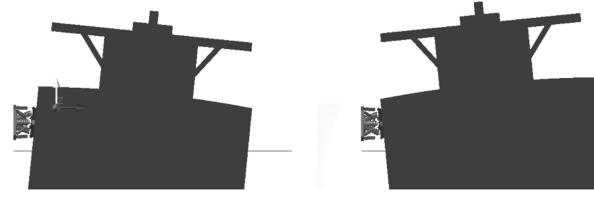
a) 结构



b) 立体图



c) 结构组成



d) 工作场景

图 3 并联平台单元构型设计方案与样机实物

2.3 分系统组成

自动系泊系统是基于双并联 6 自由度机构构型的机电气一体化系统, 其整体系统主要由机械本体、传感检测部分、气动(或液压)系统及电控系统等组成。在整体设计方案确定后, 针对搭建小比例测试执行样机进行具体组件的选型: 可根据荷载要求自由组合的钕铁硼磁铁吸附单元结构, 综合行程和出力大小等内在因素并带有内置传感器的 SMC 气缸, 可以承受上平台的自重并为系统提供约束力的辅助分支(包含弹簧分支和直线位移传感器), 用于电控系统的模块化的 NI 控制器和扩展模块等。

3 方案验证分析

3.1 模型设计与工况设置

为了验证方案设计的可行性以及优化控制策略, 开展相应比例尺的船模水池测试研究。模型试验与港工系泊试验方法基本一致, 按照重力相似准则设计, 满足几何相似、静力相似与动力相似等相似条件, 比尺为 1:60。对于研究船舶系泊运动最有意义的是重力与惯性力之间的部分相似条件, 即傅汝德数(Froude Number)相等; 船舶系泊下的摇荡是一非定常运动, 所以还应满足非定

常流动的相似条件，即斯特洛哈尔数 (Strouhal Number) 相等^[16]。基于上述要求，船舶的重心、横摇及纵摇周期均经过校准验证。

试验主要验证在波浪作用下的效果，试验波浪条件包括规则波与不规则波，波向以横向浪 (90°) 为主，其中不规则波波谱采用 Jonswap 谱。试验水深为 30 cm，按照比尺相当于原型水深 18 m。试验测试期间的场景见图 4。



图 4 波浪试验水池测试

3.2 试验结果分析

试验过程中系统开机后完成初始化。完成与船模吸附后，首先进行随动检验，即系统未介入工作，仅是吸附在船模干舷上，以较低阻尼的随动模式随船体运动，此过程采集对港口系泊作业影响比较大的水平面上的 3 个运动量(横荡、纵荡与艏摇)，随后开启系统的使能模式进行主动干预，以较大阻尼抑制船模的大幅度运动。在模型值 $H_s = 2.4 \text{ cm}$ 、 $\bar{T} = 1.16 \text{ s}$ 规则波作用时的运动量监视过程见图 5，当自动系泊系统在第 200 s 开启工作后，系泊船模的运动量幅值受到主动干预的影响而有所降低，改善效果比较明显。

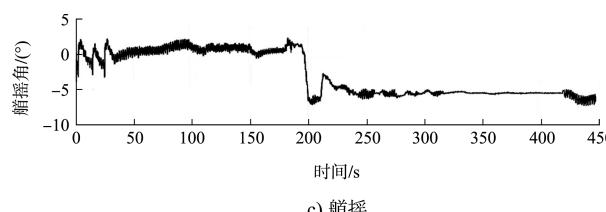
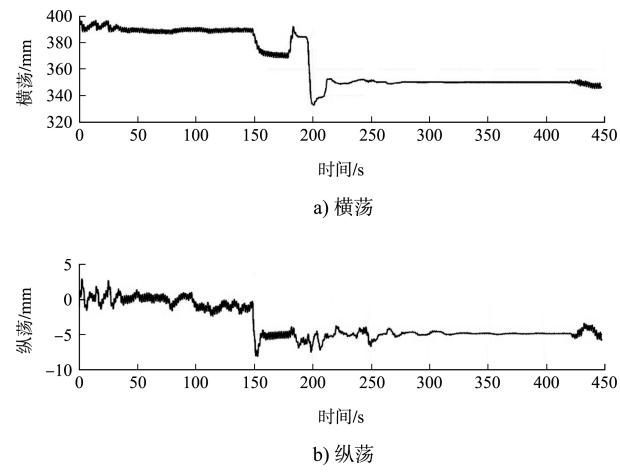


图 5 规则波作用时系统干预前后的运动量测试结果

在模型值 $H_s = 2.4 \text{ cm}$ 、 $\bar{T} = 1.16 \text{ s}$ 不规则波作用时，分别采用全程未加干预和全程施加干预两种情况进行对比，见图 6。自动系泊系统干预后，各运动量的最大值和平均值均得到不同程度的改善，但改善幅度与效果相对于规则波略差一些。

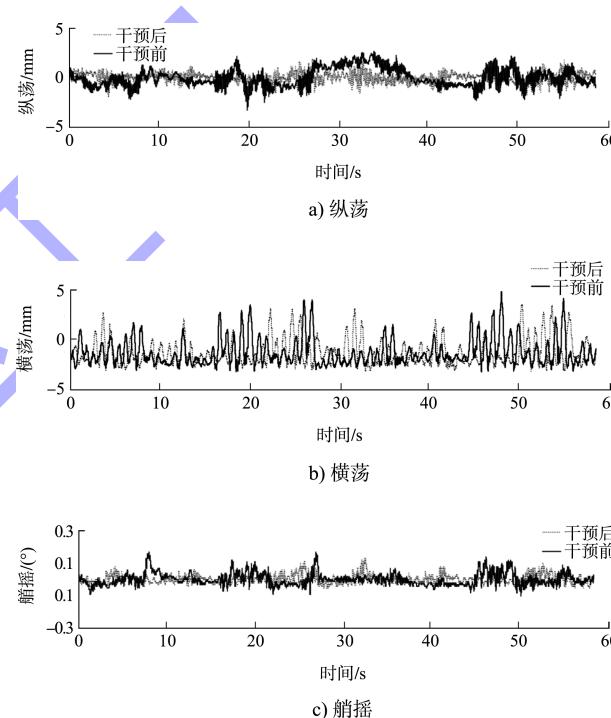


图 6 不规则波作用时系统干预前后的运动量测试结果

4 结论

1) 基于并联平台机构的运动适应性优势，提出了一种具备主动控制能力的港口船舶自动系泊系统设计方案，其工作原理是通过阻尼效应进行主动调整、不断纠正船体位置使之保持在预定的范围内。

2) 通过船模波浪水池试验，进行规则波与不规则波条件下的试验测试。3 个水平面主要运动量的测试结果表明：自动系泊系统开启干预后的船模运动数值均小于未干预时的船舶运动量，且系

统对规则波作用时效果更好。验证了该系统方案的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 信德海事网. 周四晚, 一拖轮船员整条手臂被缆绳“扯断” [EB/OL]. (2017-04-15) [2022-01-01] https://www.sohu.com/a/134270607_175033.
- [2] 向溢. 码头自动系泊系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
- [3] 齐立平. 码头自动化系泊系统及其适用性分析[J]. 天津航海, 2012(2): 3-5.
- [4] 郭伟明, 郭晓晓, 丁驿帆. 实现船舶自动靠离码头的磁力系泊装置[J]. 中国舰船研究, 2006(2): 42-44.
- [5] 郭伟明, 丁驿帆. 如何实现船舶自动靠离码头[J]. 中国水运, 2006(5): 46-47.
- [6] 高峰, 胡克, 赵铁石, 等. 港口船舶智能化系泊技术的研究现状与发展[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(5): 86-87, 90.
- [7] 高峰, 赵旭, 胡克, 等. 从应对疫情看加快水运科技发展的趋势与需求[J]. 中国水运, 2020(4): 16-18.
- [8] 李晓冬. 并联机器人的特点及应用分析[J]. 黑龙江科技信息, 2008(10): 36-37.
- [9] Unified Facilities Criteria(UFC). Design: Moorings: UFC 4-159-03 [S]. Vicksburg: UFC, 2005.

(上接第 36 页)

- [7] 王颖. 弧形防浪墙波浪力的试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [8] 于龙基, 杨森, 张华昌, 等. 弧形防浪墙的迎浪面波压力数值模拟[J]. 水运工程, 2017(11): 29-35.
- [9] LI X Y, REN B, WANG G Y, et al. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics on an arc crown wall using Volume of fluid method based on BFC [J]. Journal of hydrodynamics(B), 2011, 23(6): 767-776.
- [10] 夏曦, 张可新, 桂劲松. 基于 OpenFOAM 的桩基透空堤结构尺度其透射系数的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(2): 338-344.
- [11] 王东旭, 孙家文, 桂劲松, 等. 基于 InterDyMFoam 的潜

- [10] BS. Maritime works-Part 1-1: General-Code of practice for planning and design for operations: BS 6349-1-21: 2013 [S]. London: BSI, 2013.
- [11] 中交水运规划设计有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165-2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [12] 吴林键, 吴丙贵, 舒丹, 等. 外海固定式泊位船舶系缆力评估方法论述[J]. 水道港口, 2014(35)5: 489-496.
- [13] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [14] EBERLE C, HARMS H H, VEMMER F. Examples of simulating multibody systems and hydraulic system in the field of mobile machines [C]//12th European ADAMS User's Conference. Nashville: MSC Software, 1997.
- [15] Hemami A, Daneshmend L. Force analysis for automation of the loading operation in an LHD-loader[C]//Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington: IEEE Computer Society, 1992: 645-650.
- [16] 李积德. 船舶耐波性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 78-79.

(本文编辑 武亚庆)

礁孤立波传播数值模拟[J]. 海洋工程, 2018, 36(2): 47-55.

- [12] 田康, 张尧, 李金龙, 等. 基于 OpenFOAM 几何流体体积方法的波浪数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(1): 1-10.
- [13] 李雪艳, 任冰, 王国玉, 等. 基于 BFC-VOF 方法的弧形防浪墙水动力数值模拟[J]. 水道港口, 2011, 32(4): 270-275.
- [14] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

(本文编辑 王传瑜)