

失控船舶靠泊变节流主动防撞系统设计

郭兆松¹, 刘静^{1,2}, 陈道智³

(1. 南京交通职业技术学院 汽车工程学院, 江苏 南京 211188;

2. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013;

3. 江苏远洋运输有限公司, 江苏 南京 210009)

摘要:针对失控船舶靠泊过程冲击大、回弹难控制的问题,通过变节流主动缓冲方法解决,设计失控船舶靠泊变节流主动缓冲原理。建立该系统的数学模型,基于 AMESIM 搭建该系统的仿真模型,对比被动缓冲系统和主动变节流系统的仿真结果,验证变节流主动缓冲系统的有效性,分析变节流腔压力、船舶靠泊缓冲位移和速度,研究变节流阀开度和溢流阀开启压力对变节流主动缓冲性能的影响规律。结果表明:使用靠泊变节流主动缓冲系统后,船舶靠泊过程减速平缓无回弹、变节流腔无压力冲击和波动;增大变节流开度可延长变节流腔压力响应时间;增大溢流阀开启压力可延长变节流腔压力衰减时间;低速轻载靠泊工况下,船舶靠泊缓冲减速较平缓。

关键词:失控船舶;靠泊;变节流;主动缓冲;回弹;压力衰减

中图分类号:TH137

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.005

Design on the variable throttle active buffer system for the berthing vessels not under command

GUO Zhaosong¹, LIU Jing^{1,2}, CHEN Daozhi³

(1. Department of Automobile Engineering, Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China; 2. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Jiangsu Ocean Shipping Co., Ltd., Nanjing 210009, China)

Abstract: In order to solve the problem of difficult control of rebound and large impact during the berthing process of vessels not under command, a variable throttling active buffer method is proposed. The principle of the variable throttling active buffer for vessels not under command has been designed. A mathematical model of the system is established. A simulation model of the system is built based on AMESim. The simulation results of the passive buffer system and the active variable throttle system are then compared. The effectiveness of the variable throttle active buffer system is verified. The main analysis focuses on the pressure in the variable throttle chamber, the displacement of the ship berthing buffer and the speed. The influence of the opening pressure of the variable throttle valve and the overflow valve on the performance of the active variable throttle buffer is studied. The results show that, when using the berthing variable throttle active buffer system, the vessel decelerates smoothly without rebound during the berthing process and there is no pressure impact or fluctuation in the variable throttle chamber. Increasing the variable throttle opening prolongs the pressure response time of the variable throttle chamber. Increasing the relief valve opening pressure prolongs the pressure attenuation time of the variable throttle chamber. Under low-normal speed or light load berthing conditions, the ship berthing buffer decelerates gently.

收稿日期:2023-10-14

基金项目:江苏高校“青蓝工程”资助项目(苏教师函[2021]11号);教育部国家职业教育教师教学创新团队“汽车运用与维修技术”建设(教师函[2019]7号)

作者简介:郭兆松(1980—),男,副教授,工程师,硕士,研究方向为汽车运用及控制技术。E-mail:794390709@qq.com

引用格式:郭兆松,刘静,陈道智.失控船舶靠泊变节流主动防撞系统设计[J].中国航海,2025,48(2):32-37.

GUO Z S, LIU J, CHEN D Z. Design on the variable throttle active buffer system for the berthing vessels not under command[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 32-37. (in Chinese)

Key words: vessels not under command; berthing; variable throttle; active buffer; rebound; pressure attenuation

船舶作为一种重要的水上运输设备,靠泊码头过程若船速过大或失控,极易发生撞船事故,严重影响船舶的使用寿命^[1-3],因此,为降低撞船风险,对船舶靠泊缓冲方面的研究引起重视。

传统方法中,通过安装木材类和橡胶类护舷装置防止小型失控船舶碰撞码头^[4-5],但难以预防大型失控船舶靠泊碰撞码头。一种柔性吸能防撞设施由高等级钢材和高质量焊接而成,其通过桩头水位变化可有效吸收碰撞冲击,但其成本较高^[6-9]。

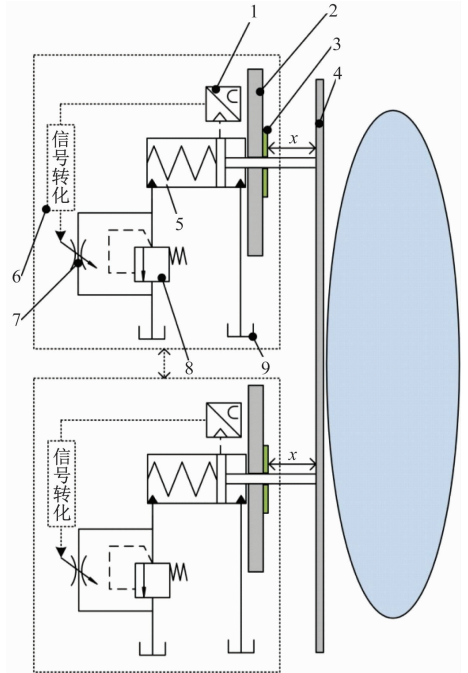
而液压式缓冲技术相对成本低,并在船舶靠泊缓冲中得到应用,且取得一定防撞效果:赵璐等^[10]采用节流阀和蓄能器、液压缓冲油缸组合吸收失控船舶靠泊冲击,有效地解决了失控船舶的冲击问题,但蓄能器储能易导致船舶回弹,造成船舶剧烈晃动;李胜永^[11]对船舶撞击力进行计算并设计被动式缓冲系统元件选型,建立船舶撞击防撞系统数学模型,仿真溢流阀预压缩量和船舶等效质量对系统缓冲性能的影响,但溢流阀为常闭式液压元件,存在开启滞后性,易造成缓冲腔较大的压力冲击。

本文基于失控船舶靠泊过程冲击大、回弹难控制的问题,提出采用主动变节流液压缓冲方法解决,先设计失控船舶靠泊变节流主动缓冲原理,建立靠泊变节流主动缓冲系统数学模型,基于 AMESIM 搭建靠泊变节流主动缓冲系统仿真模型,对比被动缓冲系统和主动变节流系统的仿真结果,验证变节流主动缓冲系统的有效性,研究变节流腔压力、船舶靠泊缓冲位移和速度的动态性能,分析变节流阀开度、溢流阀开启压力和靠泊工况对缓冲性能的影响规律,为实船验证提供参考依据。

1 船舶靠泊变节流主动缓冲系统设计

船舶靠泊变节流主动缓冲系统原理见图 1。其由若干变节流主动缓冲单元(图 1 中虚框)组成,根据靠泊船舶吨位匹配一定数量的变节流主动缓冲单元数量。图 1 中:变节流主动缓冲单元由位移变送器、变节流缓冲缸、信号转化模块、变节流阀和溢流阀组成。其中,变节流缓冲缸活塞杆穿过靠泊终点装置与碰撞板固定连接,靠泊终点装置上敷设一定厚度的橡胶缓冲垫,变节流缓冲缸设计安装位移变送器进行位移采集传输。

船舶靠泊变节流主动缓冲原理为:当船舶以一定速度撞向碰撞板时,碰撞板使变节流缓冲缸活塞收回,压缩无杆腔液压油,无杆腔液压油通过变节流



注:1 为位移变送器;2 为靠泊终点装置;3 为橡胶缓冲垫;
4 为碰撞板;5 为变节流缓冲缸;6 为信号转化模块;
7 为变节流阀;8 为溢流阀;9 为油箱。

图 1 船舶靠泊变节流主动缓冲系统原理
Fig. 1 Schematic diagram of variable throttling active buffer system for vessel berthing

阀流回油箱,变节流阀产生一定节流背压;缓冲过程中信号采集转化模块通过位移变送器实时采集变节流缓冲缸活塞位移并将其位移数字量信号转化成变节流阀的开度模拟量信号,这样变节流阀的过流面积可依据变节流缓冲缸的活塞位移实时变化,使无杆腔压力跟随活塞位移变化主动改变,从而达到船舶靠泊变节流主动缓冲的目的。

靠泊变节流主动缓冲结束后,变节流缓冲缸弹簧腔的弹簧推动活塞复位之后进行下一轮靠泊缓冲。

2 变节流主动缓冲系统数学模型分析

主动缓冲阶段,满足能量守恒定律^[12-13],有

$$Mv_0^2/2 = F(x)x = P_1(x)A_1x \quad (1)$$

式(1)中: M 为船舶总质量; v_0 为靠泊法向初速度; $F(x)$ 为变节流缓冲缸缓冲力; $P_1(x)$ 为变节流腔压力; A_1 为变节流腔面积; x 为靠泊位移。

变节流腔流量满足:

$$Q(x) = CA(x) \sqrt{\frac{2P(x)}{\rho}} \quad (2)$$

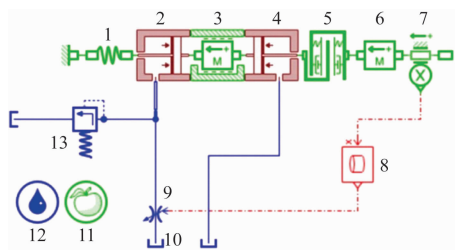
式(2)中: C 为节流系数; $A(x)$ 为有杆腔连接的变节流阀面积; ρ 为液压油密度, $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ 。

变节流腔流量同时满足^[14-15],有

$$Q(x) = A_1 dx/dt \quad (3)$$

3 船舶靠泊变节流主动缓冲系统仿真建模

基于 AMESIM 搭建的船舶靠泊变节流主动缓冲系统仿真建模见图 2。



注:1 为变节流缸弹簧;2 为变节流腔;3 为活塞;4 为补油腔;
5 为碰撞接触模块;6 为船舶;7 为靠泊位移反馈模块;
8 为信号转化模块;9 为变节流阀;10 为油箱;
11 为重力模型;12 为液压油模型;13 为溢流阀。

图 2 船舶靠泊变节流主动缓冲系统仿真建模

Fig. 2 Simulation modeling of active buffer system with variable throttle for vessel berthing

船舶靠泊变节流主动缓冲系统仿真参数见表 1。

靠泊变节流函数见图 3。图 3 中:变节流阀口开度和过流面积分别由最大值 1 和 78.5 mm^2 逐渐减小。

3.1 靠泊变节流主动缓冲系统有效性验证

删除变节流阀和信号转化模块时,若缓冲缸无杆腔油液只连接溢流阀,则构成被动节流式 1 缓冲系统;若缓冲缸无杆腔油液同时连接溢流阀和蓄能器,则构成被动节流式 2 缓冲系统。根据表 1 设置被动节流式 1、被动节流式 2 缓冲系统和变节流主动缓冲系统仿真参数,蓄能器容积选取 10 L,充气

表 1 船舶靠泊变节流主动缓冲系统仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of the variable throttling active buffer system for vessel berthing

参数名称	数值
变节流缸弹簧刚度 $K/(\text{N}/\text{mm})$	100
变节流腔直径 D/mm	100
活塞杆直径 d/mm	75
行程 L/m	1
阻尼 $B/(\text{N}/\text{m}/\text{s})$	50
变节流阀初使开度 x_0	1.0(全开)
船舶质量 M/kg	10^5
靠泊法向速度 $v/(\text{m}/\text{s})$	2
溢流阀压力/ MPa	40
靠泊接触刚度/ (N/m)	10^6
靠泊接触阻尼/ $(\text{N}/\text{m}/\text{s})$	10^4

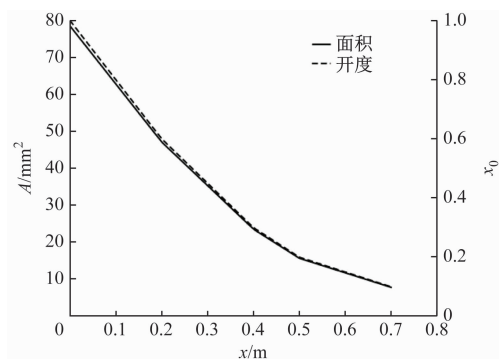
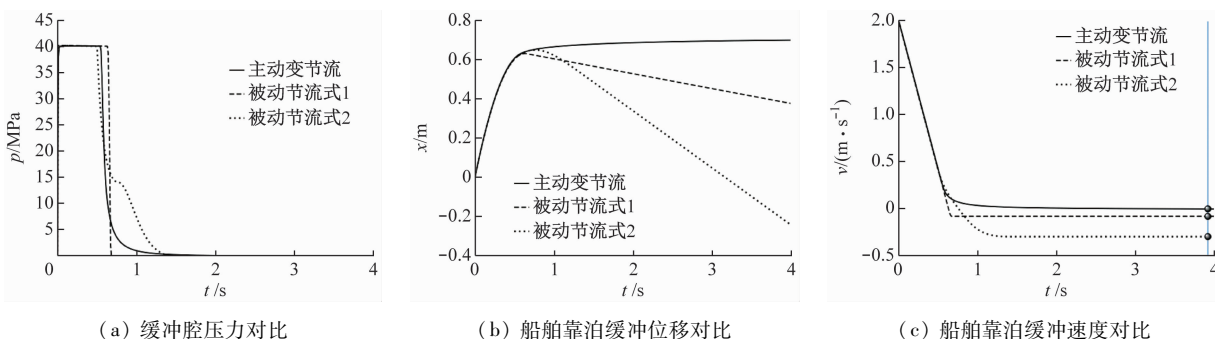


图 3 靠泊变节流函数

Fig. 3 Berthing variable throttling function

压力选取 15 MPa,仿真步长 0.01 s,仿真 4.00 s,得到被动节流和主动变节流系统的仿真结果对比见图 4。



(a) 缓冲腔压力对比

(b) 船舶靠泊缓冲位移对比

(c) 船舶靠泊缓冲速度对比

图 4 被动节流和主动变节流系统的仿真结果对比

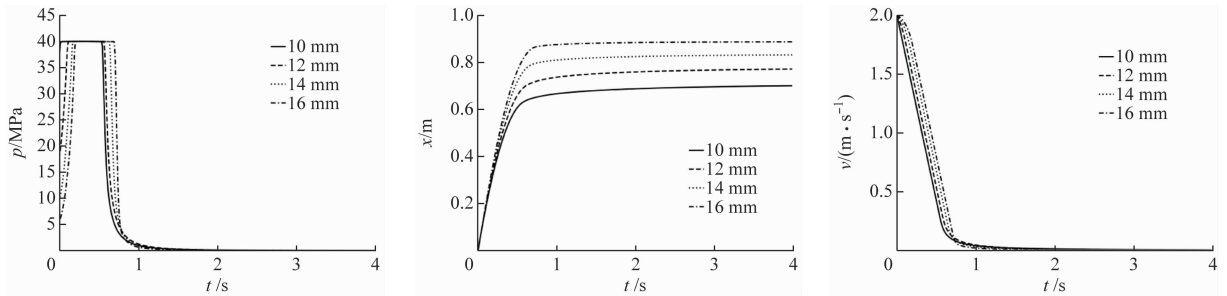
Fig. 4 Comparison of simulation results between passive throttling and active variable throttling systems

由图 4 可知:采用主动变节流缓冲方法后液压缸缓冲腔压力衰减平缓,坡度大,从船舶速度位移曲线看船舶无回弹位移和速度;采用被动节流式 1 缓

冲方法后缓冲腔压力衰减较快,船舶有 0.076 m/s 的回弹速度;采用被动节流式 2 缓冲方法后缓冲腔压力呈“两阶梯”衰减,船舶有 0.291 m/s 的回弹速

度,验证主动变节流缓冲方法的有效性和优越性;主动缓冲和被动缓冲方法相同之处在于溢流阀开启过程中缓冲腔压力、船舶速度位移基本吻合,不同之处在于溢流阀关闭后的状态,主动缓冲实现了缓冲腔压力平缓衰减,很好地控制船舶无回弹。

缓冲腔节流背压作用于缓冲缸活塞上产生的制动力使船舶减速,显然影响主动缓冲系统缓冲性能



(a) 变节流阀开度对变节流腔压力的影响 (b) 变节流阀开度对缓冲位移的影响 (c) 变节流阀开度对缓冲速度的影响

图5 变节流阀开度对系统缓冲性能影响

Fig. 5 Influence of variable throttle valve opening on system buffering performance

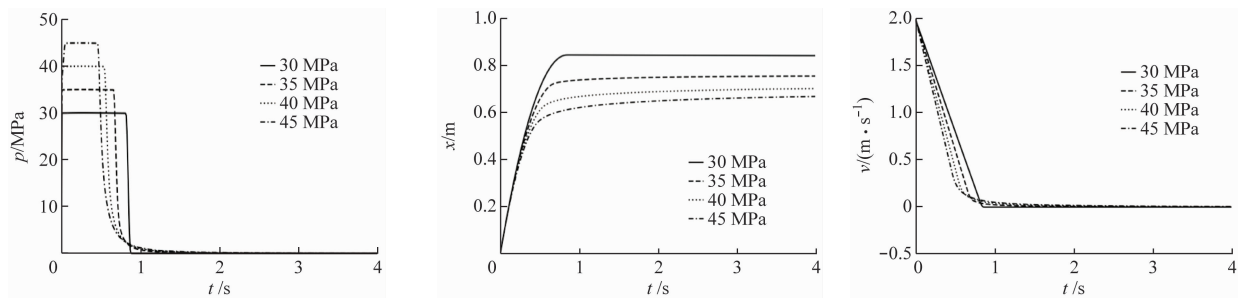
3.2.1 变节流阀开度的影响

由图5可知:当变节流阀开度由10 mm间隔2 mm增大至16 mm,缓冲初期变节流腔压力缓慢增加至溢流阀开启压力值40 MPa,保压0.5 s后缓慢减小;船舶靠泊缓冲位移由0.7 m增大至0.9 m;船舶缓冲速度逐渐呈三阶段变化,缓冲初期和后期缓

慢减速,中期为匀减速。结果表明:增大开度,变节流腔压力响应时间延长。

3.2.2 溢流阀开启压力的影响

设定溢流阀开启压力为30 MPa、35 MPa、40 MPa和45 MPa进行仿真,得到变溢流阀开启压力对系统缓冲性能的影响见图6。



(a) 变溢流阀开启压力对变节流腔压力的影响 (b) 变溢流阀开启压力对缓冲位移的影响 (c) 变溢流阀开启压力对缓冲速度的影响

图6 变溢流阀开启压力对系统缓冲性能的影响

Fig. 6 Influence of the opening pressure of the relief valve on buffering performance of the system

由图6可知:当溢流阀开启压力设定30 MPa时,变节流腔压力衰减时间约为0.1 s;当溢流阀开启压力设定45 MPa时,变节流腔压力衰减时间约为1.0 s,结果表明:增大溢流阀开启压力,变节流腔压力衰减时间延长,船舶靠泊更平缓。

由于实际工况下,船舶载重和靠泊速度具有一定的不确定性,故有必要开展不同靠泊工况的系统缓冲性能研究。

3.3 不同靠泊工况的系统缓冲性能

3.3.1 不同船舶质量

设定船舶质量为 6.0×10^4 kg、 8.0×10^4 kg、 1.0×10^5 kg和 1.2×10^5 kg进行仿真,得到不同船舶质量的系统缓冲性能曲线见图7。

由图7可知:当船舶质量由 6.0×10^4 kg增大至 1.2×10^5 kg时,船舶靠泊冲击总能量翻倍,变节流腔保压时间增大至4倍,船舶缓冲位移由0.55 m增

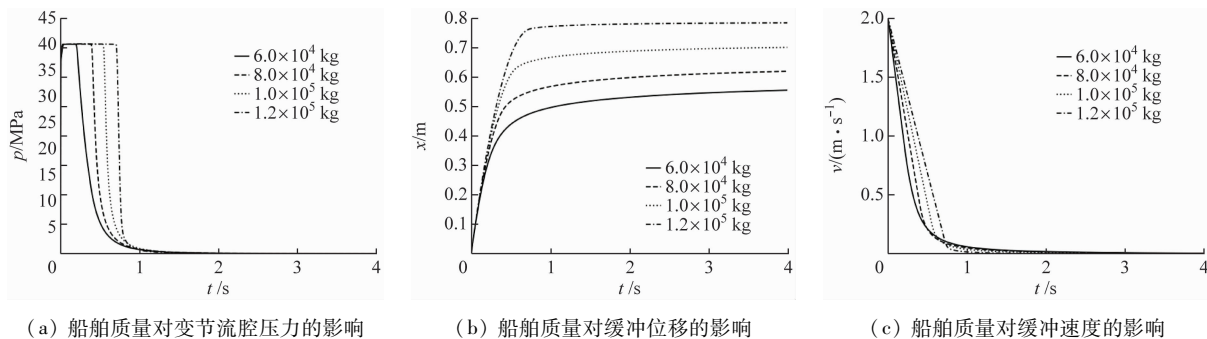


图7 不同船舶质量的系统缓冲性能曲线

Fig. 7 System cushioning performance curves for different vessel masses

加至 0.78 m;从速度曲线看,船舶轻载靠泊减速更平缓,船舶质量为 6.0×10^4 kg 时,船舶缓减速时间约有 2.7 s。

3.3.2 不同的船舶靠泊法向初速度

设定船舶靠泊法向初速度为 1.6 m/s、1.8 m/s、2.0 m/s 和 2.2 m/s 进行仿真,得到不同的靠泊法向

初速度下的系统缓冲性能曲线见图 8。

由图 8 可知:当船舶靠泊法向初速度由 1.6 m/s 增大至 2.2 m/s 时,靠泊缓冲总能量增大至 1.9 倍,变节流腔保压时间增大至 3 倍,船舶靠泊缓冲位移由 0.60 m 增加至 0.78 m;从速度曲线看,船舶低速靠泊减速更平缓,逐渐呈三阶段减速。

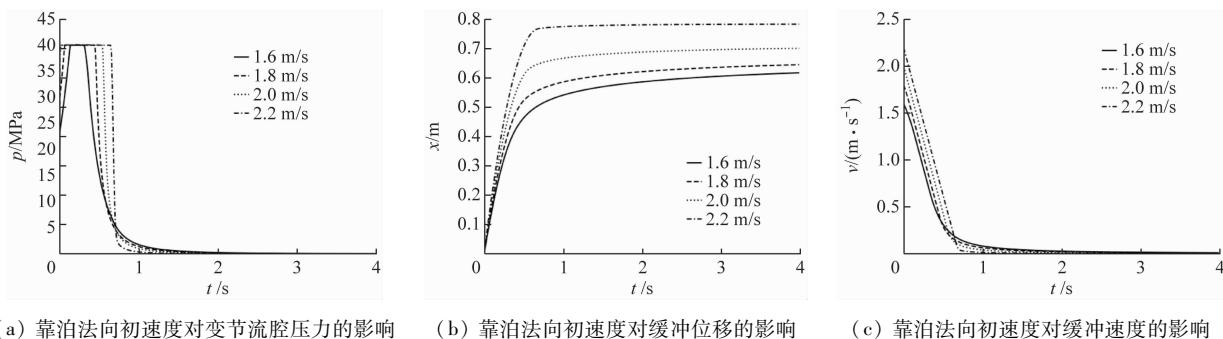


图8 不同的靠泊法向初速度下的系统缓冲性能曲线

Fig. 8 Buffering performance curve of the system under different initial berthing normal speeds

4 系统实际应用可行性分析

系统实际应用关键点为靠泊变节流函数控制,即变节流阀开度随缓冲位移增大而逐渐减小,可采用 CAN 总线控制器 IMCT3240 和 CoDeSysV3SP2 编程实现,配套使用高频响位移变送器,实时采集缓冲缸动态位移,缓冲缸可选恒立国产缸,变节流阀可选用布赫比例阀(24 V 电磁铁,开度控制电流 0 ~ 1 500 mA),船舶靠泊冲击可用配重块施加速度(配重块自重下落或借用外部作用力产生速度)进行试验模拟,后续重点是 CoDeSysV3SP2 程序设计和编制,通过程序实现比例阀随缓冲位移增大而逐渐关闭,在进行一定试验后即可在整船上进行验证和应用。

5 结束语

主动变节流缓冲方法有效解决船舶回弹难控制

的问题,可控制缓冲腔压力冲击过大。本文开展被动节流缓冲和主动变节流缓冲系统性能的对比研究,验证主动变节流缓冲系统的优势,并分析其系统缓冲性能的影响因素,最后研究不同工况下的系统缓冲性能,并进行系统实际应用可行性分析,主要结论如下。

1) 采用被动节流式 1 缓冲方法后缓冲腔压力衰减较快,船舶有 0.076 m/s 的回弹速度;采用被动节流式 2 缓冲方法后缓冲腔压力呈“两阶梯”衰减;船舶有 0.291 m/s 的回弹速度,而采用主动变节流缓冲系统后船舶零回弹,且靠泊减速更平缓。

2) 通过增大变节流开度,可延长变节流腔压力响应时间;通过增大溢流阀开启压力,可延长变节流腔压力衰减时间。

3) 增大船舶质量或靠泊法向速度,变节流腔保压时间延长;低速轻载工况下,船舶靠泊减速更平缓。

参 考 文 献

- [1] 李飞镒,潘国华. 负角度靠泊在船舶靠泊操纵中的应用[J]. 天津理工大学学报, 2020, 36(5): 55-59.
LI F D, PAN G H. Application of negative angle berthing in vessel berthing operation [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2020, 36(5): 55-59. (in Chinese)
- [2] 代产树. 船舶靠泊过程中系缆作业仿真[J]. 上海海事大学学报, 2019, 40(4): 17-21.
DAI G S. Simulation on tethering operation in process of ship berthing [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2019, 40(4): 17-21. (in Chinese)
- [3] 李雪野,付超. 中英码头船舶靠泊撞击能设计规范对比分析[J]. 水运工程, 2015(11): 72-74.
LI X Y, FU C. Comparative analysis of codes for vessel berthing energy design of harbor between China and Britain[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(11): 72-74. (in Chinese)
- [4] 田玉芹. 船舶靠泊防撞装置结构设计[J]. 造船技术, 2017(3): 64-66.
TIAN Y Q. Structure design on anti-collision device of ship berthing[J]. Marine Technology, 2017(3): 64-66. (in Chinese)
- [5] 朱斌. 结构简化弹塑性撞击分析模型及新型防撞吸能器初步试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 13-17.
ZHU B. Elasto-plastic impact model and experimental study of new absorber for structural collision protection [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 13-17. (in Chinese)
- [6] 曹映泓,左智飞,罗林闾. 湛江海湾大桥柔性吸能防撞装置研究[J]. 中外公路, 2006, 26(5): 72-75.
CAO Y H, ZUO Z F, LUO L Y. Research on flexible energy absorbing anti-collision device for Zhanjiang Bay Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highways, 2006, 26(5): 72-75. (in Chinese)
- [7] 李子强. 船舶靠泊防撞减震装置: CN201720231618. 8[P]. 2017-03-10.
LI Z Q. Anti collision damping device for ship berthing: CN201720231618. 8[P]. 2017-03-10. (in Chinese)
- [8] 姜华,耿波,张锡祥. 桥墩新型防船撞装置防撞性能研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(17): 154-160.
JIANG H, GENG B, ZHANG X X. A new fender system for bridge pier protection against vessel collision [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(17): 154-160. (in Chinese)
- [9] 冒一锋,刘伟庆,方海,等. 乌龙江大桥船撞力及复合材料防撞系统研究[J]. 公路工程, 2015(4): 28-32.
MAO Y F, LIU W Q, FANG H. Study of ship collision force and composite anti-collision system of wu long jiang bridge [J]. Highway Engineering, 2015(4): 28-32. (in Chinese)
- [10] 赵璐,黄国富,季越红. 船舶靠泊液压缓冲系统设计[J]. 船海工程, 2019, 48(6): 36-39.
ZHAO L, HUANG G F, JI Y H. Design of hydraulic buffer system for ship berthing [J]. Ship & Ocean Engineering, 2019, 48(6): 36-39. (in Chinese)
- [11] 李胜永. 船舶靠泊防撞液压缓冲系统研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(2): 54-58.
LI S Y. Research on anti-collision hydraulic buffer system for ship berthing [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(2): 54-58. (in Chinese)
- [12] 孙驰,王家顺,安琦. 液压缓冲滑车碰撞试验力学建模及数值分析[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2019, 45(1): 163-170.
SUN C, WANG J S, AN Q. Mechanical modeling and numerical analysis on the vehicle collision test with hydraulic buffer [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2019, 45(1): 163-170. (in Chinese)
- [13] 赵则利,许锋,刘向尧. 计及舰面共振影响的舰载直升机起落架液压缓冲器性能分析[J]. 液压与气动, 2020(4): 183-188.
ZHAO Z L, XU F, LIU X Y. Performance analysis of hydraulic shock absorber for shipboard helicopter landing gear considering ship resonance [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(4): 183-188. (in Chinese)
- [14] 成志锋,陈攀. 下运带断带抓捕液压缓冲系统优化及仿真研究[J]. 机电工程, 2020, 37(1): 69-72.
CHENG Z F, CHEN P. Optimize and characteristic simulation for downward belt broken-belt catch of hydraulic buffer system [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(1): 69-72. (in Chinese)
- [15] 方永寿,陈轶杰,张亚峰,等. 液压缓冲器阻尼与冲击特性仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7820-7825.
FANG Y S, CHEN Y J, ZHANG Y F, et al. Simulation analysis on damping and impact characteristics of hydraulic buffer [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7820-7825. (in Chinese)