

引用格式: 陈如意, 张永林. AUV与拖曳式回收坞站的对接碰撞分析[J]. 中国舰船研究, 2026, 21(2): 226-239.

CHEN R Y, ZHANG Y L. Research on docking and collision dynamics between autonomous underwater vehicles and towed recovery docks[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2026, 21(2): 226-239 (in Chinese).

AUV与拖曳式回收坞站的 对接碰撞分析



扫码阅读全文

陈如意, 张永林*

江苏科技大学 自动化学院, 江苏 镇江 212100

摘要: [目的] 为了提升自主水下航行器(AUV)的综合作业能力, 针对其与拖曳式回收坞站(TRD)对接过程中的碰撞问题展开系统研究。 [方法] 基于动力学分析, 在ADAMS-MATLAB联合仿真平台建立含接触碰撞的仿真模型, 系统分析初始工况对对接碰撞的影响。针对由碰撞引起的姿态扰动, 提出多阶段协调控制策略。 [结果] 仿真结果表明, 偏心角和偏心距的增大会延长对接时间, 对碰撞力峰值影响有限, 而提高相对初始速度则可缩短对接时间, 但会增大碰撞力峰值; 对母船加速度的研究进一步揭示了碰撞力与效率之间的复杂关系; 所提控制策略通过主动姿态调整, 可在保证对接效率的同时使碰撞力峰值降低14%~72.2%, 有效优化了动态对接过程。 [结论] 所做研究可为AUV拖曳回收系统的设计与稳定性控制提供可靠的仿真基础与设计依据。

关键词: 自主水下航行器; 拖曳式回收坞站; 联合仿真; 碰撞分析; 多阶段协调控制策略

中图分类号: U674.941

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04790

0 引言

随着海洋资源勘探与开发活动的日益深入, 自主水下航行器(AUV)已成为执行水下作业的理想工具。为延长作业航时、提升数据回传效率并实现水下长期驻留, AUV与水面母船或水下坞站间的可靠回收对接技术至关重要。其中, 拖曳式回收坞站凭借其良好的机动适应性、较低的综合部署成本以及对复杂海况的鲁棒性, 在支撑AUV作业、构建异构无人系统网络等方面展现出显著优势^[1]。实现AUV与拖曳式坞站间自主、精准、安全的动态对接, 是推动该类系统走向工程应用的关键环节。

当前, 针对AUV对接回收的研究主要聚焦于高精度导引与接触避免。Gutnik等^[2]提出了一种基于电磁方法的精确三维定位技术, 用于提升接近阶段的相对定位精度, 以在很大程度上避免物理接触; 卢有旺等^[3]设计了一种高效的三维鲁棒轨迹跟踪控制器, 可实现精准对接; Gao等^[4]通过优化坞站的设计, 增强了对AUV姿态的矫正能

力, 从而降低了其在复杂流场中的碰撞风险。

然而, 在实际海洋环境中, 受传感器精度的限制^[5]以及外界环境干扰等因素的影响, AUV难以始终沿理想的轨迹运动, 无法完全避免与坞站的接触甚至是碰撞。然而, 此类碰撞有可能导致对接任务失败, 甚至造成设备结构受损^[6], 可见研究对接碰撞对提高系统可靠性与安全性具有重要意义^[7]。

已有的研究在分析对接碰撞时, 通常是对回收坞站进行运动学或动力学简化, 难以充分反映实际对接中的动态交互特性。例如, Diao等^[8]分析了AUV与锥形罩式坞站对接时的碰撞动力学, 将其坞站简化为固定模型, 考察了坞站结构、运动条件和相关参数对碰撞力的影响; Pan等^[9]利用ADAMS/MATLAB联合仿真技术, 研究了AUV与喇叭口导向坞站动态对接过程中的碰撞力, 旨在揭示碰撞机理从而指导设计, 但该研究将坞站动力学模型简化为了与AUV模型完全等同的样式, 未充分考虑两者在动态响应上的本质差异。上述简化模型无法充分反映坞站在实际海洋环境中的动态响应特性, 限制了对AUV与动态坞站

收稿日期: 2025-11-03 修回日期: 2026-02-05 网络首发时间: 2026-03-02 15:01

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(35031102)

作者简介: 陈如意, 女, 1998年生, 硕士生。研究方向: 先进控制理论与应用。E-mail: 231110302101@stu.just.edu.cn

张永林, 男, 1972年生, 博士, 教授。研究方向: 水下机器人控制。E-mail: zhangyonglin@just.edu.cn

*通信作者: 张永林

之间复杂耦合动力学行为的深入理解,且上述研究多依赖于坞站自身结构提供的被动控制,对碰撞发生后基于 AUV 的主动姿态调整与轨迹校正策略研究不足。

针对已有研究在建模与控制策略方面的不足,本文拟以自主水下航行器(AUV)和拖曳式回收坞站(towed recovery dock, TRD)为研究对象,在暂不考虑实际海洋环境中存在的由波浪导致的母船六自由度摇荡、不规则流场扰动、传感器噪声与通信延迟,以及推进器动力学饱和及执行延迟等复杂因素条件下,基于 ADAMS-MATLAB 仿真平台,通过建立动态对接模型,综合考虑 AUV 和 TRD 在对接过程中的运动特性,并在此基础上系统分析不同初始对接工况下动态对接碰撞的影响;然后,设计一种多阶段协调控制策略,完成碰撞后 AUV 的自主位姿调整,提升动态对接的可靠性。

1 对接模型

1.1 AUV 模型

在动态对接阶段, AUV 主要受重力、浮力、黏性类水阻力、惯性类水阻力^[10]、推力以及外界扰动的作用,其中外界扰动主要源于环境干扰与碰撞。在建立动力学模型之前,做如下假设:在对接过程中,重力和浮力相互平衡; AUV 与回收坞站的主体结构为刚体,但在碰撞接触点,采用基于 Hertz 理论的非线性接触模型来模拟局部的弹性变形和接触力。

1.1.1 黏性类水阻力和惯性类水阻力

黏性类水阻力的大小通常与水下航行器的运动速度相关,通过对水阻力进行泰勒展开,经合理简化并舍去耦合项与高阶小量,可获得如下公式:

$$F_D = (X_D Y_D Z_D K_D M_D N_D)^T \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_D = X_{u|u}|u| + X_{wq}wq + X_{qq}q^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 \\ Y_D = Y_{|v|v}|v| + Y_{r|r|r}|r| + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv \\ Z_D = Z_{w|w|w}|w| + Z_{q|q|q}|q| + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + \\ \quad Z_{rq}rq + Z_{uw}uw \\ K_D = K_{p|p|p}|p| \\ M_D = M_{w|w|w}|w| + M_{q|q|q}|q| + M_{uq}uq + M_{vp}vp + \\ \quad M_{rp}rp + M_{uw}uw \\ N_D = N_{v|v|v}|v| + N_{r|r|r}|r| + N_{ur}ur + N_{wp}wp + \\ \quad N_{pq}pq + N_{uv}uv \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_D 为黏性类水阻力矢量; $X_D, Y_D, Z_D, K_D, M_D, N_D$ 为 6 个自由度上的分量; u, v, w 为 $x, y,$

z 方向上的速度; p, q, r 为 x, y, z 方向上的角速度; $X_{u|u|}, X_{wq}, X_{qq}, X_{vr}, X_{rr}, Y_{v|v|}, Y_{r|r|r}, Y_{ur}, Y_{wp}, Y_{pq}, Y_{uv}, Z_{w|w|w}, Z_{q|q|q}, Z_{uq}, Z_{vp}, Z_{rq}, Z_{uw}, K_{p|p|p}, M_{w|w|w}, M_{q|q|q}, M_{uq}, M_{vp}, M_{rp}, M_{uw}, N_{v|v|v}, N_{r|r|r}, N_{ur}, N_{wp}, N_{pq}, N_{uv}$ 为相关阻尼力系数。

考虑水下航行器在六自由度空间运动时,流体类的惯性力共有 36 项,而根据 AUV 模型的对称性以及模型表面的光滑度,可将表达式简化为

$$\begin{bmatrix} F_{mx} \\ F_{my} \\ F_{mz} \\ M_{mx} \\ M_{my} \\ M_{mz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{v}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & Y_{\dot{r}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: F_{mx}, F_{my}, F_{mz} 分别为 x, y, z 方向上由附加质量导致的惯性水阻力; M_{mx}, M_{my}, M_{mz} 分别为 3 个方向上由附加转动惯量导致的惯性水阻力力矩; $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ 和 $\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ 分别为 x, y, z 方向上的加速度与角加速度,可由 ADAMS 实时测得; $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, Z_{\dot{w}}, Z_{\dot{q}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{w}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}, N_{\dot{v}}$ 为相关惯性力系数。

1.1.2 环境干扰

AUV 在水下运行时,会受到风浪、水流等环境因素的扰动,鉴于深度的增加能有效衰减由风浪引起的扰动,因此在 AUV 回收对接过程中,可通过设置合适的对接深度来降低风浪扰动的影响;虽然水流速度具有随机性,但在非湍急流域,其主要取决于水域环境,且 AUV 在对接阶段运行范围有限。因此,模型中的环境干扰可简化为恒定水流场,该水流场对 AUV 的作用力在力学上可等效为二者间的相对运动。基于上述分析,提出以下假设:水流方向与 AUV 前进方向间的夹角及流速大小均保持恒定,夹角为 180° ,二者的相对速度为

$$u_r = u - v_c \quad (4)$$

式中: u 为航行器在 x 方向上的速度; v_c 为水流速度。

1.1.3 碰撞力

在 ADAMS 仿真环境中,对接过程中 AUV 与拖曳式回收坞站之间的碰撞力通过 IMPACT 函数进行计算,其中力指数 e 的取值可实现对不同接触模型的选择,而接触模型的选取直接影响仿真结果的可靠性。线性接触弹簧阻尼模型虽然能避免无接触模型下出现的刚体穿透现象,但在微小穿透下,接触力趋近于 0,难以准确刻画碰撞初期的瞬态冲击特性,易引起峰值碰撞力的计算偏差。而相比之下,基于 Hertz 理论的非线性接触

模型是基于几何变形理论,即将 AUV 与坞站视为刚体,其接触面积随穿透深度呈非线性变化,能够更真实地反映碰撞过程的物理机制;此外,Hertz 模型的参数具有明确的物理意义,可以直接通过材料属性和几何尺寸确定,而线性模型的刚度系数则依赖经验调整。因此,本文选择将力指数 e 设置为 1.5,采用 Hertz 接触模型进行计算分析。

碰撞力可以分解为 2 个正交分量:垂直于接触面的碰撞力 F_n 和沿着接触面方向的摩擦力 F_s 。其中, F_n 采用 Hertz 接触模型进行求解。

$$F_n = K\delta^e + \lambda\delta^e\dot{\delta} \quad (5)$$

式中: K 为接触刚度系数; δ 为碰撞压缩量; λ 为阻尼系数; $\dot{\delta}$ 为碰撞相对速度。

摩擦力 F_s 的计算如下:

$$F_s = \mu F_n \quad (6)$$

式中, μ 为摩擦系数。

碰撞力大小的计算公式为

$$F = \sqrt{F_n^2 + F_s^2} \quad (7)$$

接触刚度系数 K 取决于碰撞主体的材料属性和几何形状,其数值大小计算如下:

$$K = \frac{4}{3\pi(h_1 + h_2)} \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$h_i = \frac{1 - \nu_i^2}{\pi E_i}; \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

式中: R_i 为 AUV 与坞站接触处的曲率半径; h_i 为材料参数; ν_i 为 AUV 与坞站之间的泊松比; E_i 为弹性模量。

1.2 拖曳式回收坞站模型

1.2.1 坞站建模

在当前对接装置中,应用较为广泛的是喇叭口式引导对接装置^[11],本文将参考文献 [12],将拖曳式回收坞站设计为带喇叭口导向罩的框笼型结构。为提高回收对接成功率,需确保坞站在水流拖曳过程中保持良好的动态稳定性。为此,在设计过程中除了采用框笼型结构来减小水流阻力外,还将通过控制母船保持相对稳定的航速,并采用双缆索对称悬挂的方式拖曳坞站,从而在一定程度上限制坞站的旋转。

根据上述设计,AUV 在与坞站发生碰撞时,由于瞬态碰撞的角速度积累有限,并且在 2 根拖曳缆索产生的恢复力矩与水阻力的作用下,坞站可以保持动态稳定。因此,在对接过程中,可将

坞站简化为仅受重力、水阻力、碰撞力和拖曳力的作用,受力情况可简化为

$$\mathbf{W} + \mathbf{B} + \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_p = \mathbf{F}_c \quad (10)$$

式中: \mathbf{W} 为坞站重力; \mathbf{B} 为坞站所受浮力; \mathbf{F}_p 为坞站所受拖曳力; \mathbf{F}_c 为对接产生的碰撞力; \mathbf{F}_d 为拖曳式回收坞站所受水阻力,根据牛顿阻力定律,拖曳式回收坞站各方向所受的水阻力 \mathbf{F}_d 可采用下式计算:

$$\mathbf{F}_d = \frac{1}{2} \rho v_r^2 C_d \mathbf{A} \quad (11)$$

式中: ρ 为流体密度; v_r 为坞站与水流的相对速度,其计算方式和 AUV 与水流相对速度的计算方式(式(4))相同; C_d 为阻力系数; A 为横截面积。

拖曳式回收坞站的拉力是时变矢量,若要精确建模,需综合考虑缆索形态动力学、流体阻力及系统运动耦合。为平衡模型精度与复杂性,本文未采用显式的拉力数学模型,而是通过 ADAMS 中的缆索建模来直接模拟缆索的物理行为,从而生成与系统运动状态实时匹配的拖曳力。

1.2.2 拖曳缆索建模

为保证拖曳式回收坞站的动态特性,需建立拖曳缆索模型。目前,主流的缆索建模方法主要包括 4 类:离散柔性体模型、连续柔性体模型、分化链模型和点质量模型^[13],本文采用离散柔性体建模方法^[14]。离散柔性体建模采取将缆索离散为有限相互连接的柔性连杆单元,每个连杆单元之间的受力情况如图 1(其中 F_x 和 T_x 分别为相邻连杆间的轴向力与扭转力矩, F_y 和 F_z 为横向剪力, T_y 和 T_z 为弯曲力矩)所示。然后,通过弹簧-阻尼元件进行力学表征,从而精确描述其轴向刚度、扭转刚度及阻尼特性。离散柔性体建模方法因其在计算效率与实体准确性之间良好的平衡性,已在包括 ADAMS 在内的多体动力学软件中得到广泛应用。本文中的缆索模型基于 ADAMS 多体动力学环境构建,通过利用离散柔性体求解器来确保对拖曳系统动态行为的模拟。

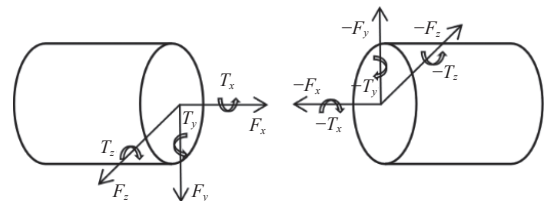


图 1 连杆之间的受力模型图

Fig. 1 Force model diagram between connecting rods

在拖曳式回收坞站仿真模型中,将 2 条拖曳缆索设置为长 10 m,直径 0.01 m;在 ADAMS 仿真

环境中,将每根缆索离散为 50 段柔性连杆。该离散化方案能实现数值准确性与计算效率之间的最佳权衡,可避免因网格过度细化而导致的计算成本增加。

1.3 物理仿真模型

利用 SolidWorks 软件建立 AUV 与拖曳式坞站的物理模型。AUV 模型参考文献 [15], 选用全驱 AUV, 该 AUV 与拖曳式回收坞站的具体参数如表 1 所示。将物理模型导入动力学仿真软件 ADAMS, 并添加拖曳缆绳模型, 设计出的 AUV 与拖曳式回收坞站的对接模型如图 2 所示。

表 1 模型参数
Table 1 Parameters of the AUV and TRD models

参数	数值
AUV 的质量 m/kg	42.5
AUV 的长度 l/m	2.03
AUV 的直径 D/m	0.26
AUV 在 x 方向的转动惯量 $I_{xx}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	19.3
AUV 在 y 方向的转动惯量 $I_{yy}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	19.3
AUV 在 z 方向的转动惯量 $I_{zz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.3
TRD 的质量 M/kg	34.6
TRD 的长度 l_d/m	1.41
TRD 导向罩的直径 D_d/m	0.72
TRD 收纳舱的直径 D_s/m	0.32
TRD 的开口角度 $(^\circ)$	50

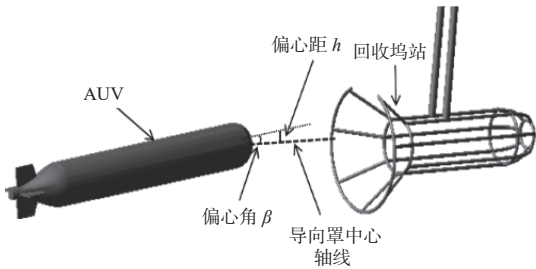


图 2 AUV 与拖曳式回收坞站对接模型
Fig. 2 Docking model of AUV and TRD

在联合仿真中, MATLAB 负责依据当前的运动状态, 通过数学模型实时计算水动力、推进力等载荷, 并将其作为输入传递给 ADAMS 模型; ADAMS 作为高保真多体动力学求解器, 除了进行缆索建模与接触碰撞力计算外, 还将根据输入对接模型进行动力学仿真。在整个仿真过程中, MATLAB 作为主控端设定仿真初始条件, 接收 ADAMS 输出的系统状态量, 计算力/力矩(包括控制力/力矩)并将其发送回 ADAMS, 然后 ADAMS 据此力完成单步动力学解算, 并更新状态量, 如此循环, 形成闭环。本文将只做对接过程的碰撞

研究, 故不考虑艏部锁紧装置及其产生的影响。

一般定义 AUV 的运动方向与导向罩中轴线的夹角 β 为偏角, 撞击点与导向罩中心轴线的距离 h 为偏心距, 根据拖曳式回收坞站的动态特性, 稳定运行的坞站自身存在一定的俯仰角和潜浮方向位置的偏移, 数值相对固定, 为便于分析, 本文中的偏心角与偏心距为相对于坞站模型的初始状态。

1.4 模型验证

1.4.1 AUV 模型验证

基于所构建的仿真模型, 设定 AUV 的初速度 u 为 0.5 m/s, 俯仰角为 -5° , 并在前进方向施加 10 N 的恒定推力, 在确保无碰撞发生的工况下进行运动仿真。将 ADAMS 输出的轨迹与基于运动学方程计算的理论轨迹进行对比, 结果如图 3 所示。

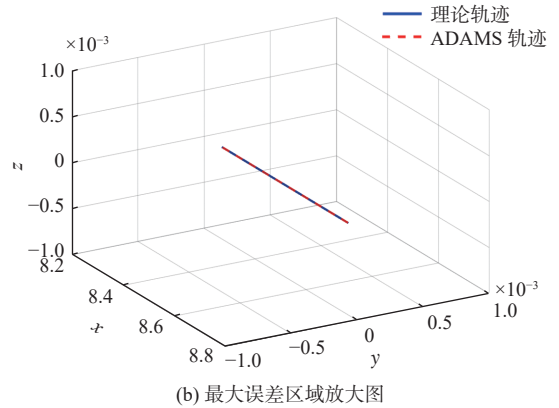
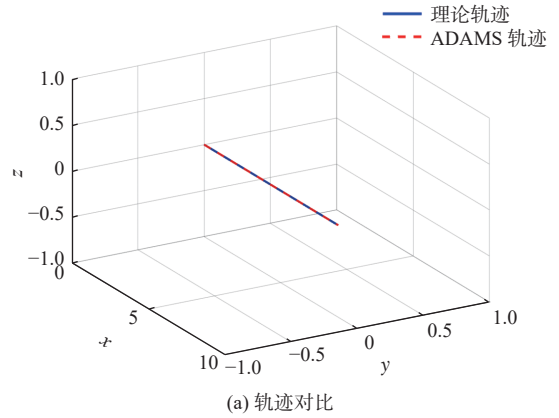


图 3 ADAMS 轨迹与理论轨迹对比

Fig. 3 Comparison between ADAMS and theoretical trajectories

由图 3 可见, ADAMS 仿真轨迹与理论轨迹在三维空间内高度吻合。根据定量计算, 其平均位置偏差为 1.88 mm, 最大偏差不超过 2.46 mm, 误差平均水平远低于 AUV 本体尺寸的千分之一。该结果充分证明了仿真模型的准确性与可靠性, 可为后续研究提供模型基准。

1.4.2 缆索模型验证

为进一步验证模型的准确性, 将匀速拖曳工

况下的缆索静态形态与经典悬链线理论解进行对比。考虑到运动方向及模型对称性的影响, y 方向的位移可以忽略, 因此, 将验证简化为二维垂向平面, 对比曲线如图 4 所示。

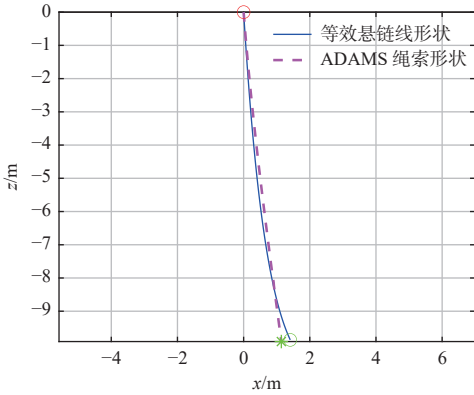


图 4 缆索轮廓验证

Fig. 4 Validation of the towing cable profile

选用决定系数 R^2 和平均绝对误差 e_{MA} 作为验证指标, 计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (z_a - z_i)^2}{\sum (z_a - \bar{z}_i)^2} \quad (12)$$

$$e_{MA} = \frac{1}{n} \sum |z_a - z_i| \quad (13)$$

式中: z_a 为匀速拖曳工况下 ADAMS 缆索连杆质心的垂向坐标; z_i 为相同水平位置处悬链线理论计算坐标。

根据上述 2 项指标的结果可知, 由 ADAMS 仿真获得的缆索静态形态与悬链线理论解吻合良好 ($R^2 = 0.964$), 模型可信度较好; 平均形态误差约为缆索长度的 5%, 处于工程允许范围内, 该误差主要源于两方面: 一是悬链线理论忽略了水流分布阻力及缆索弯曲刚度的影响, 属于理想化假设; 二是仿真模拟为双缆对称拖曳系统, 而理论计算是基于单缆简化模型, 两者的边界条件存在差异。综上所述, 该模型可为后续碰撞仿真分析提供可靠的输入依据。

2 对接碰撞分析

AUV 与拖曳式回收坞站的对接是一个动态过程, 研究对接碰撞行为需兼顾对接效率与安全可靠, 即 AUV 能否顺利进入导向罩并完成对接, 同时, 还需评估碰撞力是否超出结构承载极限以及其对对接过程稳定性的影响程度。

基于建立的物理模型, 利用 ADAMS-MATLAB 联合仿真平台进行碰撞仿真。除上述建模的相关参数外, 初始状态等其他参数初始值的设置如表 2

所示。表中参数主要源于文献 [15] 所建立的参数体系, 并基于 ADAMS 手册以及文献 [16] 中的敏感性分析结论进行了校准, 以确保参数取值的合理性。

表 2 参数初始值

Table 2 Initial values of parameters

参数	数值	参数	数值
推进器初始推力 T/N	30	接触刚度 $K/(N \cdot m^{-1})$	3.6×10^6
AUV 的初速度 $u/(m \cdot s^{-1})$	1	力指数 e	1.5
拖曳母船的初速度 $u'/(m \cdot s^{-1})$	1	阻尼系数 $C/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	3.6×10^4
水流速度 $v_c/(m \cdot s^{-1})$	0.3	穿透深度 d/m	1×10^{-5}
偏心角 $\beta/(\circ)$	-10	静摩擦系数	0.3
偏心距 h/m	0	动摩擦系数	0.1
坞站阻力系数 $C_D/(N \cdot m^{-2})$	0.5	对接距离 d_D/m	1

基于上述模型, 由仿真实验得到的碰撞力变化曲线如图 5 所示。由图可见, 在运行 4.78 s 时, 达到回收对接过程中的最大碰撞力 2 651 N; 在姿态调整过程中, 观察到有多次碰撞, 最终于 7.56 s 时完成对接。

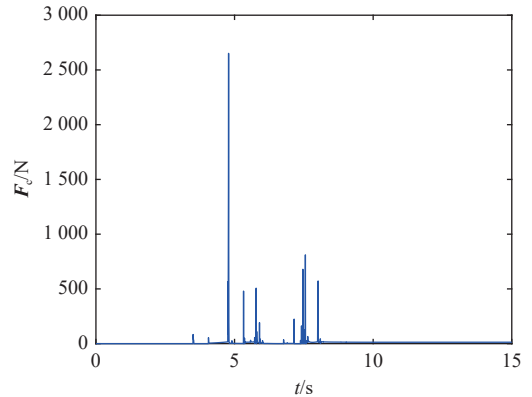


图 5 碰撞力变化图

Fig. 5 Variation curve of collision force

由上述初始情况所得仿真结果, 通过调整不同偏心距、偏心角以及不同对接初始速度等相对初始状态, 即可获取动态对接过程中的最大碰撞力 F_c 和对接完成时间, 从而揭示不同工况的影响机制, 为后续控制策略设计提供理论基础。

2.1 偏心距

考虑到传感器的精度误差和环境干扰等因素, 在进行动态对接时 AUV 可能与拖曳式回收坞站的纵轴线存在一定程度的距离, 但与导向罩发生碰撞后会以惯性滑入收纳舱。基于拖曳缆索的限制以及拖曳式回收坞站的结构特性, 本文将重点研究垂向偏心距, 也即潜浮方向偏心距的影响。虽然导向罩的半径为 0.36 m, 但由于坞站开

口角度和碰撞所产生运动状态的改变,能够完成对接的偏心距将小于该半径。本节设置初始偏心角 $\beta = 0^\circ$, 其余初始值的设定参照表 2, 通过系统地改变偏心距来完成系列仿真, 然后通过仿真实验收集结果, 如图 6 所示。

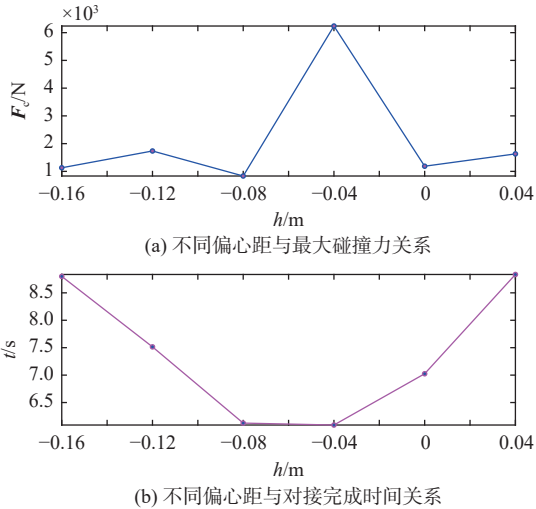


图 6 不同偏心距时的对接结果

Fig. 6 Docking results under different eccentric distances

仿真结果表明, 当偏心距 $h = -0.04$ m 时, AUV 未与导向罩发生碰撞而是直接撞击坞站首部, 产生了较大的瞬时碰撞力; 在其余偏心距情况下, AUV 均是先与导向罩发生碰撞, 然后再进入回收舱, 在发生多次碰撞后完成对接, 其最大碰撞力基本维持在 1 000~2 000 N 范围内; 偏心距越大, AUV 需要完成姿态调整的时间越长, 对接完成时间也越长。

实验结果显示, 偏心距对碰撞力的影响较小, 其与坞站自身位置偏移相对误差与回收效率呈负相关, 也即相对误差越大, 对接效率越低, 且通过限制偏心距的初始值, 即可保证对接回收的成功率。在实际回收对接过程中, 若要提高对接效率, 可以提高 AUV 的导航精度, 使其艏部在对接时更接近纵轴线从而顺利入坞, 但需考虑由于缺乏多次碰撞过程中的能量耗损机制, AUV 与坞站首部直接碰撞引发的高载荷风险。

2.2 偏心角

根据上述实验, 拖曳式回收坞站在缆索和水流等的影响下, 在偏心角 $\beta \approx -4^\circ$ 时保持相对稳定状态。通过控制变量法, 进一步研究不同偏心角在对接过程中产生的影响。除初始偏心角以外, 其余参数同表 2 所示。对 AUV 施加推力, 完成对接仿真。由实验可知, 随着偏心角增大到一定程度, 会导致对接失败, 仿真结果如图 7 所示。从中可明显看到, 偏心角与坞站自身姿态角间的

相对误差越小, 姿态调整时间越短, 反之, 相对误差越大, 姿态调整时间越长。

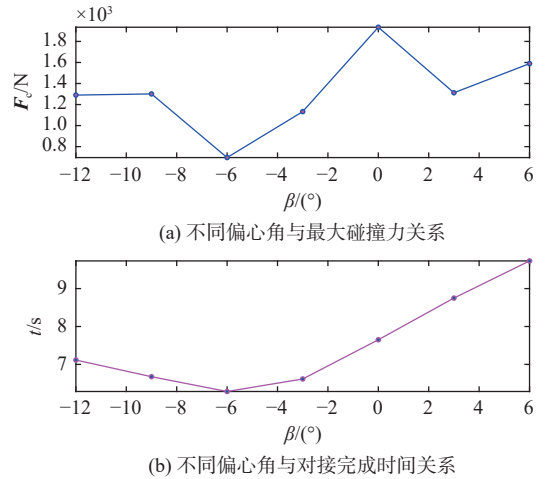


图 7 不同偏心角下的对接结果

Fig. 7 Docking results under different eccentric angles

仿真结果表明, 当偏心角 $\beta = -6^\circ$ 时, AUV 与坞站导向罩-回收舱连接处会发生轻微碰撞, 该碰撞会促使 AUV 的姿态调整, 使其俯仰角与坞站间的差异较小从而顺利进入回收舱, 因此该工况下的最大碰撞力较小; 在其余偏心角情况下, 最大碰撞力均在 1 000~2 000 N 左右, 可见, 偏心角对最大碰撞力的影响有限。

由实验结果可知, 在动态对接阶段偏心角越小, 入坞的效率就越高, 且通过限制偏心角的初始值, 同样可以保证对接成功率。

2.3 相对初速度

与上述实验方法一致, 将偏心角和偏心距均设置为 0, 母船速度保持 1 m/s, 改变 AUV 的初始速度。考虑到 AUV 的初始速度较快, 为确保坞站在对接前达到动态平衡, 设定先以二者当前的速度匀速航行 4.5 s, 随后对 AUV 施加 30 N 的推力使其进入对接状态, 然后同步调整初始相对位置, 使 AUV 与坞站间的对接距离保持为 1 m。研究不同相对初速度即为研究不同的 AUV 初始速度, 观察不同初始速度与碰撞性能和对接效率之间的关系, 实验结果如图 8 所示。

仿真结果表明, AUV 的初始速度与最大碰撞力呈正相关, 虽然碰撞位置不同, 但随着速度的增大, 最大碰撞力相应增加。特别地, 当初始速度为 2.5 m/s 时, 最大碰撞力出现在 AUV 艏部截面突变区与坞站导向罩-回收舱连接处的特殊接触位置, 该异常值经分析确认为局部现象, 不影响对整体变化趋势的判定。同时还发现, 虽然设置较低的 AUV 初始速度有助于减小碰撞力, 但会显著延长入坞时间, 从而降低整体对接效率。

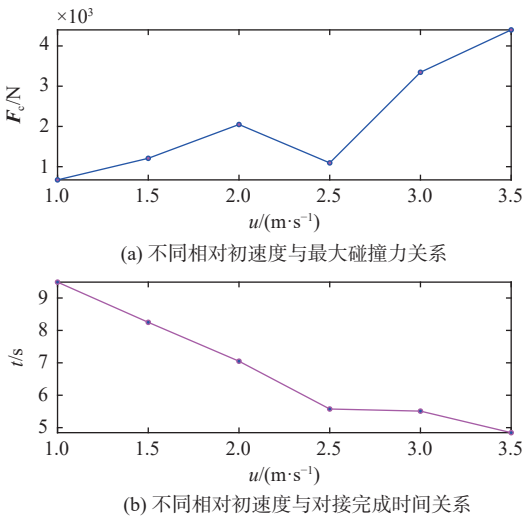


图 8 不同相对初速度时的对接结果

Fig. 8 Docking results under different relative initial velocities

2.4 拖曳母船运动状态

目前,大多对接研究仅针对母船处于悬停和匀速运动状态,且以上实验也是在母船匀速行驶状态下进行的。为全面评估拖曳式回收系统中母船运动状态对末端对接碰撞过程的影响,有必要进一步考虑母船速度处于变化状态时产生的影响。为保证拖曳缆索的安全性和对接过程的稳定性,将拖曳母船设置为匀加速度状态。

假设初始偏角和偏心距均为 0,设置 AUV 的初速度为 1 m/s,并提供 50 N 的推力。当给定母船 1 m/s 的初始速度并以 $0.04 m/s^2$ 的加速度直线行驶时,得出碰撞力曲线如图 9 所示。由图可见,由于加速度 α 较小,在对接过程中观察到 AUV 与拖曳式回收坞站之间有多次碰撞,最大碰撞力可达 1 760 N。

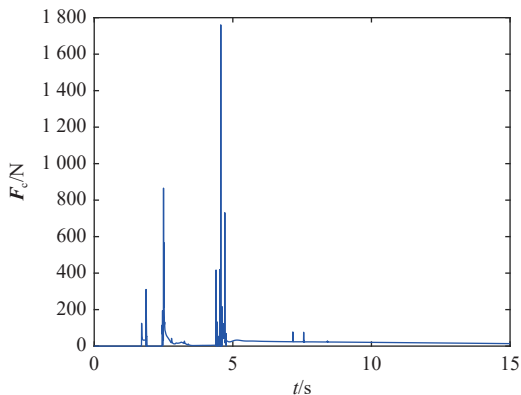


图 9 母船匀加速度行驶时的碰撞力变化

Fig. 9 Variation curve of collision force under uniform acceleration of the mother vessel

根据仿真实验发现,在 30 N 的推力下,随着母船加速度的增加,虽然 AUV 艏部已进入收纳舱,但由于在未完成对接前就动力不足,最终滑

出回收坞站,导致对接失败。为了收集更多的数据,将 AUV 的推力加大至 100 N 进行实验,结果如图 10 所示。

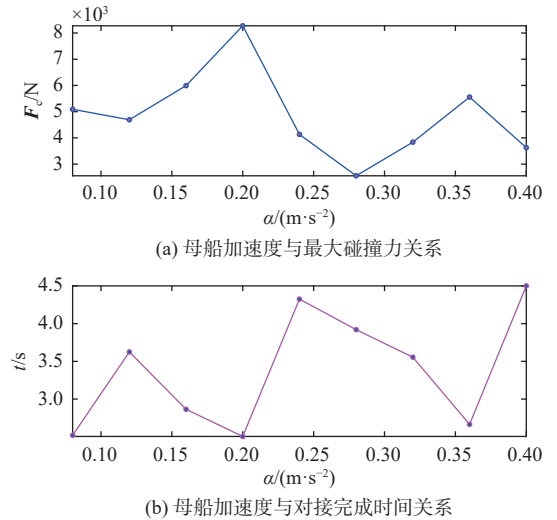


图 10 母船不同加速度时的对接结果

Fig. 10 Docking results under different mother vessel accelerations

仿真结果表明,随着母船加速度的增加,坞站的姿态变化加剧,导致碰撞位置的不确定性增大,最大碰撞力在 $0.2 m/s^2$ 时达到峰值,而对接时间则在 $0.08 m/s^2$ 和 $0.2 m/s^2$ 时出现最小值。根据以上对最大碰撞力的影响分析,不确定的碰撞位置同样体现了二者相对速度的不确定性,因此呈现显著的非单调变化规律。母船加速度对最大碰撞力及对接完成时间的直接影响虽不显著,但仿真结果表明,增强的碰撞力能够激发 AUV 更快的姿态响应,从而缩短姿态调整阶段的持续时间,有利于提升整体对接效率,因此在实际对接过程中,需综合权衡碰撞力与对接效率之间的关系,在保障结构安全的前提下优化动态对接过程。除此外,当母船加速度达到 $0.2 m/s^2$ 时,通过仿真发现, AUV 艏部的截面突变区与导向罩发生了碰撞,这一区域的几何不连续所导致的应力集中可能是造成碰撞力发生突变的原因,在工程中,可以采取结构强化设计或增加缓冲材料等方法解决这一问题。

根据上述实验,在母船速度发生变化这种复杂的工况下,通过回收坞站自身结构完成被动控制的局限性就表现出来了,它无法满足控制对接碰撞力和对接回收效率的双重需求,此时,主动调节 AUV 推力对确保回收任务的成功展现出必要的作用。因此,考虑实际回收过程中出现的这种情况,设计 AUV 根据母船运动情况动态调整推力的能力,对于优化对接和在可变动态环境下实现可靠性能具有重要意义。

3 姿态控制与仿真分析

3.1 控制流程

为确保 AUV 在与拖曳式回收坞站发生碰撞后能对接成功,同时满足安全性和对接效率的双重需求,对 AUV 进行了主动控制,并实时进行位姿调整,直至完成对接,对接回收流程如图 11 所示。

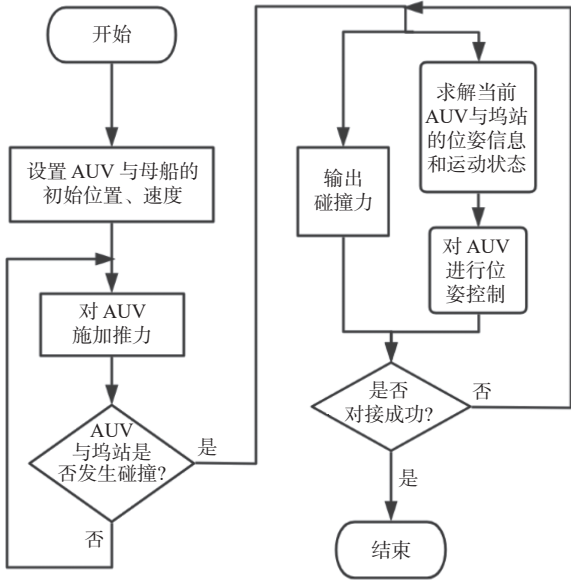


图 11 回收流程图

Fig. 11 Flow chart of docking and recovery process

在以往的研究中,控制方案常采用基于 PID 控制的速度和相对位置闭环控制方案^[7]。根据上述不同工况下的研究和实验条件,在既保证对接效率,同时又能降低碰撞力影响的情况下,本文设计了一种基于 PID 控制的多阶段协调控制策略,通过在不同任务阶段切换控制模式来优化对接过程,具体如图 12 所示。

在对接初始阶段,AUV 在恒定推力的作用下接近回收坞站,并由碰撞检测信号触发主动控制机制。在碰撞初期,控制系统结合导向罩的被动导引,仅对 AUV 的姿态进行微调,以避免因碰撞引发姿态变化而导致对接失败,提高对接成功率。当 AUV 进入回收舱后,为减少与舱体的持续碰撞,控制器切换至快速姿态校正与前进协同模式;在对接末端,为避免因相对速度过大而与坞站首部发生剧烈碰撞,控制模式进一步切换为速度跟踪控制,完成对接,同时使 AUV 与坞站保持速度同步。控制参数均采用 Ziegler-Nichols 方法进行整定。使用多阶段协调控制策略,可在保证对接效率的同时抑制对接过程中的碰撞力峰值,提升系统鲁棒性与安全性。

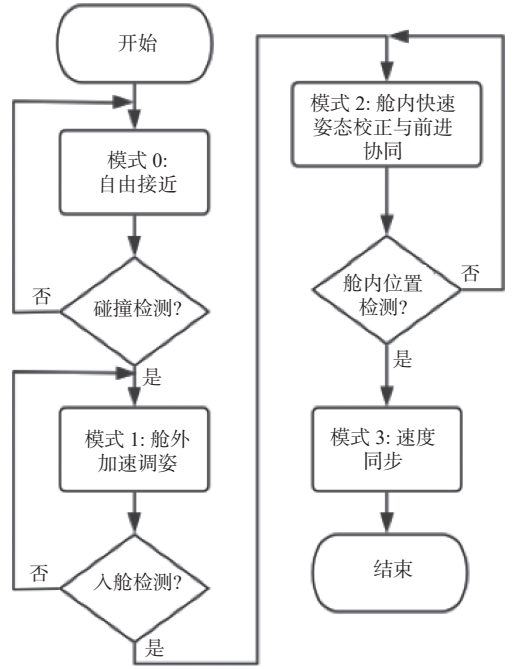


图 12 多阶段协调控制流程图

Fig. 12 Flow chart of the multi-stage coordinated control strategy

3.2 仿真与分析

3.2.1 母船匀速行驶

本文取实际物理模型中 AUV 的艏部与回收坞站首部计算两者间的距离 d ,如图 13 所示,对接成功时两者间的距离稳定在 0 m 处。在初次发生碰撞后,对 AUV 进行位姿控制,调整其姿态以继续对接。经对比可知,未进行控制时,完成对接回收约需 7.56 s,而采用基于 PID 控制的多阶段协调切换控制策略后,完成对接回收约需 6.53 s,保证了对接回收效率。

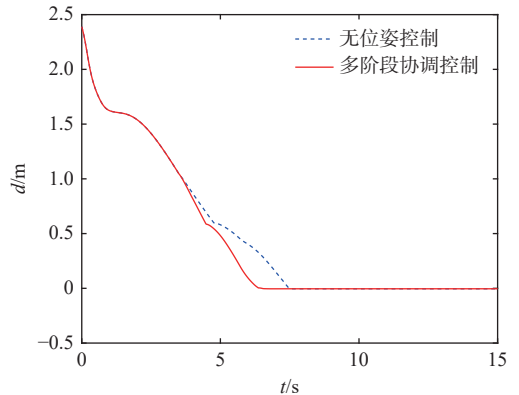


图 13 母船匀速行驶时 AUV 艏部与回收坞站首部间距离

Fig. 13 Relative distance between the bow of AUV and the bow of TRD under uniform motion of the mother vessel

图 14 所示为加入控制后 AUV 与拖曳式回收坞站的碰撞力变化曲线。通过控制 AUV 的位姿变化,发现最大碰撞力为 1 333 N,通过对比图 5 可以明显看出,对接碰撞力的降幅达 72.2% 以上,能尽量避免因过大碰撞力带来的机械损耗。结果

显示,采用该控制策略在有效减小碰撞力影响的同时还能保证对接效率。

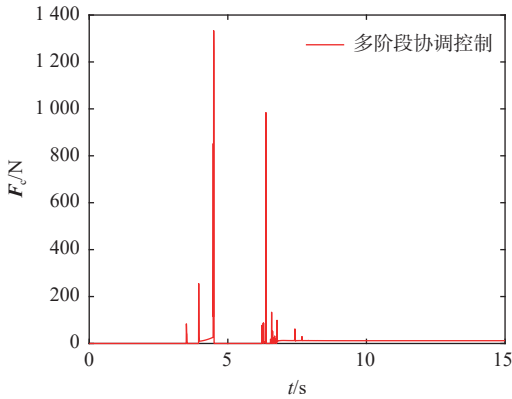


图 14 母船匀速行驶时姿态控制后的碰撞力变化

Fig. 14 Variation curve of collision force after attitude control under uniform motion of the mother vessel

图 15 所示为各方向上速度的控制效果。从中可以看出,控制器开始作用后,AUV 的速度变化更加稳定,同时,速度控制还有效避免了 AUV 在进入回收坞站后由于前进速度过快直接撞击回收舱而产生的较大碰撞力。

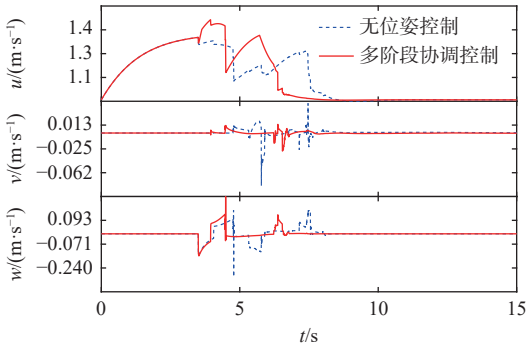


图 15 母船匀速行驶时的速度控制效果

Fig. 15 Velocity control effect under uniform motion of mother vessel

图 16 所示为各方向的姿态控制效果,其中 ϕ , θ , ψ 分别为 AUV 的横滚角、俯仰角和偏航角。图 17 所示为各方向角速度的控制效果。从中可以发现,俯仰角和偏航角的变化可能会使 AUV 偏离对接位置,而横滚角的过度变化则会影响 AUV 的安全和任务执行。可以看出,控制器的加入使得碰撞后的 AUV 能及时调整姿态角,保证安全且顺利地完成任务,同时,角速度的变化并不剧烈。

图 18 所示为多阶段协调切换控制策略下各方向的控制输入。图中: X, Y, Z 为 x, y, z 方向上的力; K, M, N 为 3 个方向的力矩。控制器输出不为 0,以确保每个自由度都表现出强大的稳定性和动态响应特性。

这些结果证明了控制器在不同工况下保持稳

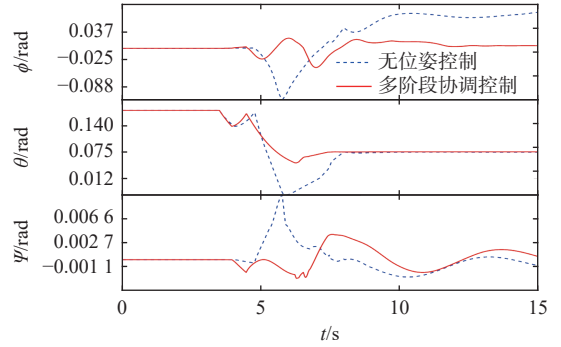


图 16 母船匀速行驶时的姿态控制效果

Fig. 16 Attitude control effect under uniform motion of the mother vessel

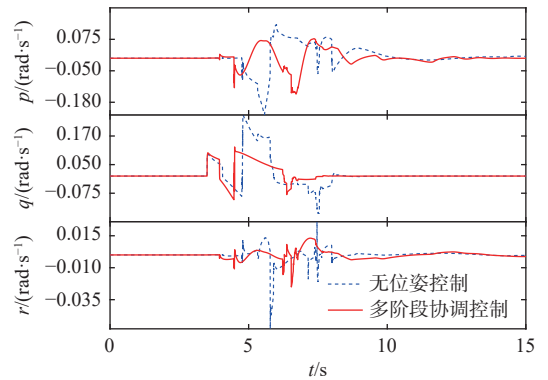


图 17 母船匀速行驶时的角速度控制效果

Fig. 17 Angular velocity control effect under uniform motion of the mother vessel

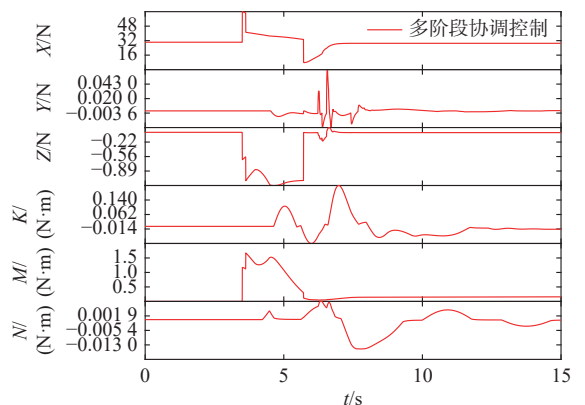


图 18 母船匀速行驶时的控制力/力矩输入曲线

Fig. 18 Output curves of control force and torque under uniform motion of the mother vessel

定和动态响应时力/力矩输出的能力,验证了控制策略在实现理想性能指标方面的有效性。

3.2.2 母船匀加速行驶

采用与上述相同的控制方法对母船处于匀加速情况下的模型进行控制,设置 AUV 的初速度为 1 m/s,施加 50 N 的推力;母船初始速度为 1 m/s,加速度为 0.04 m/s²,对比碰撞结果如图 9 和图 19 所示。加入控制流程后,最大碰撞力从 1 760 N 降至 1 414 N,如图 20 所示,完成对接回收的时间从 4.60 s 减少到 3.83 s。与母船匀速情况下的相同,

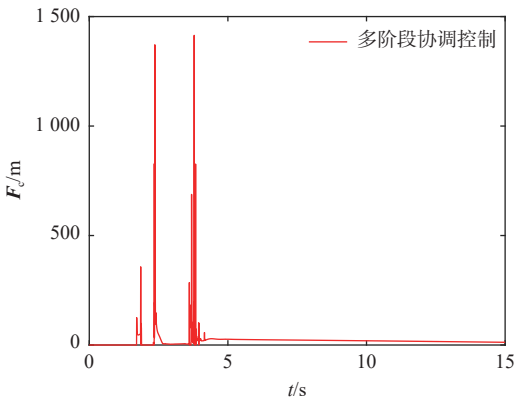


图 19 母船匀加速度行驶时位姿控制后的碰撞力变化

Fig. 19 Variation curve of collision force after attitude control under uniform acceleration of the mother vessel

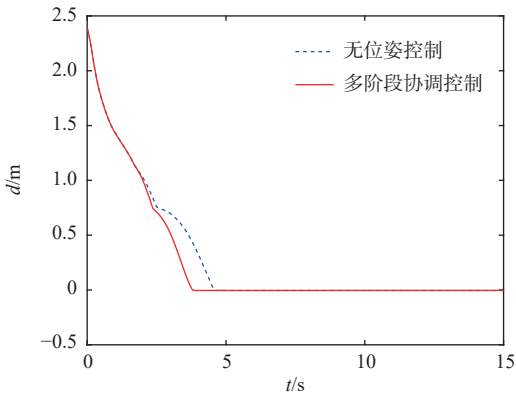


图 20 母船匀加速度行驶时 AUV 艏部与回收坞站首部间距离

Fig. 20 Relative distance between the bow of AUV and the bow of TRD under uniform acceleration of the mother vessel

采用多阶段协调控制策略后不仅减小了碰撞力, 避免了因碰撞力过大而导致的机械损伤, 同时还提高了回收效率。

图 21 和图 22 显示, 控制器能够有效调节 AUV 的运动状态, 确保其平稳运行从而完成对接; 且图 23 表明, 控制后的角速度波动幅度减小了。图 24 完整展示了控制器的输出特性, 其最大控制力/力矩始终维持在推进器饱和上限内, 可为动态对接提供可靠保障。这些结果共同验证了控制系

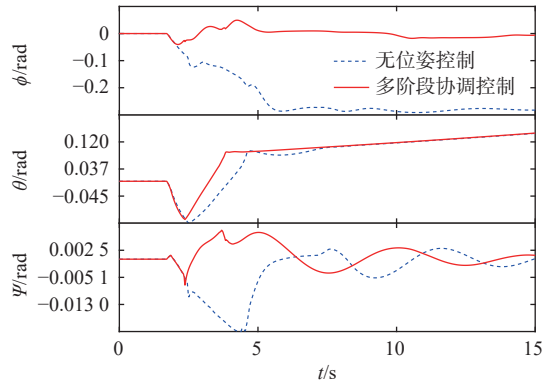


图 22 母船匀加速度行驶时的姿态控制效果

Fig. 22 Attitude control effect under uniform acceleration of the mother vessel

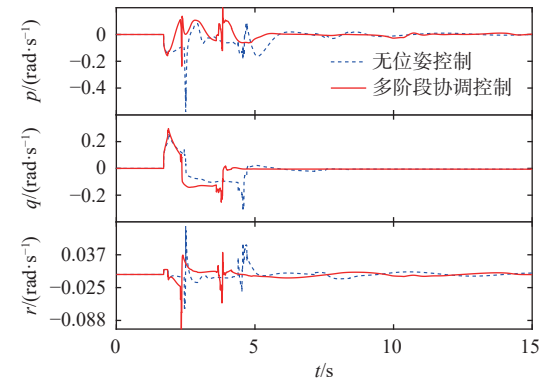


图 23 母船匀加速度行驶时的角速度控制效果

Fig. 23 Angular velocity control effect under uniform acceleration of host vessel

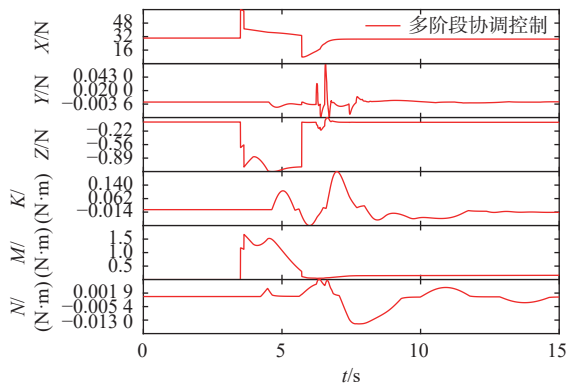


图 24 母船匀加速度行驶时的控制力/力矩输出

Fig. 24 Output curves of control force and torque under uniform acceleration of the mother vessel

统在复杂动态对接任务中保持 AUV 稳定性和完整性的性能。

3.2.3 综合对比与性能评估

为进一步验证控制方案的有效性, 在无主动控制、基于 PID 控制的传统位置跟踪控制以及多阶段协调控制这 3 种策略下, 分别针对表 3 所示工况进行对接仿真实验, 具体工况参数如表所示, 相应的实验结果如图 25 和图 26 所示。

综合上述实验结果, 显示所提多阶段协调控制策略在碰撞安全与对接效率这 2 个维度均展现出稳定的性能效益。首先, 在碰撞安全性方面,

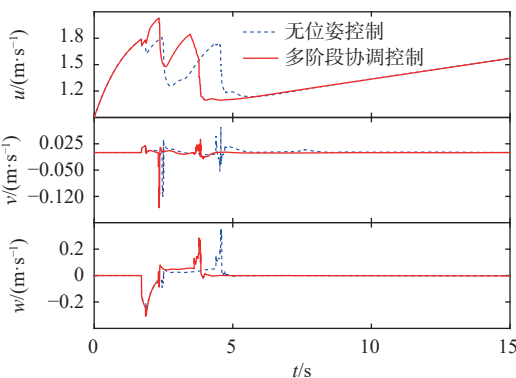


图 21 母船匀加速度行驶时的速度控制效果

Fig. 21 Velocity control effect under uniform acceleration of the mother vessel

表3 初始工况参数值

Table 3 Parameters of initial operating conditions

实验组别	偏心角 /($^{\circ}$)	偏心距 /m	初速度 /($m \cdot s^{-1}$)	母船加速度 /($m \cdot s^{-2}$)	推力 /N
1	-10	0	1.0	0	30
2	0	-0.10	1.0	0	30
3	0	0	1.5	0	30
4	-10	0.10	1.0	0	30
5	5	-0.10	1.5	0	30
6	0	0	1.0	0.04	50
7	0	-0.05	1.0	0.08	50
8	-8	-0.10	1.0	0.1	50

母船匀速运行时碰撞力峰值的降幅均超过 20%，最高达 58.8%，即使在母船存在变速运动的复杂工况下也能使降幅达 14.1%~72.2%；尤其值得注意的是，相比位置跟踪控制在部分工况下碰撞力增大的不稳定表现，多阶段协调控制策略实现了稳定、一致的碰撞力降低，说明本策略通过主动调整 AUV 的位姿及速度，适配各阶段的差异化控制需求，可有效缓冲碰撞能量，减轻对机械结构的瞬时冲击。其次，在对接效率方面，对接完

成时间实现了一致性的缩短，降幅介于 4.7%与 28.6%之间，且与位置跟踪策略相比，二者的平均降幅差距在 3%以内。需要说明的是，由于无位姿控制下的对接过程本身历时较短，时间缩短的绝对秒数有限，故时间缩短的百分比意义更大。

图 27~图 30 所示为 1 号实验工况下 3 种控制策略的仿真结果。结合前述研究关于相对速度对碰撞力的影响更为显著的分析可知，相较于传统位置跟踪控制，多阶段协调控制策略在适当的时机切换为速度主导控制模式，可有效抑制碰撞力峰值，同时，该策略的能源消耗还低于传统位置跟踪控制。

上述仿真结果表明，采用多阶段协调控制策略可实现多种工况下“碰撞抑制”与“效率维持”的协同优化，克服传统位置跟踪控制在二者兼顾上的不足，且鲁棒性强，能有效提升动态对接过程的综合性能与可靠性。

4 结语

本文针对 AUV 和拖曳回收坞站在动态对接

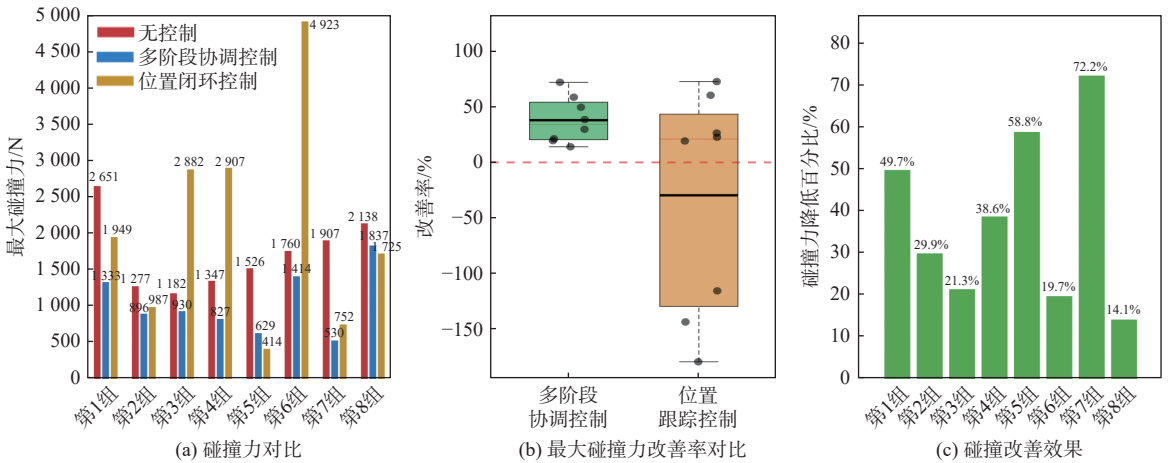


图 25 碰撞力实验结果

Fig. 25 Experimental results of collision force

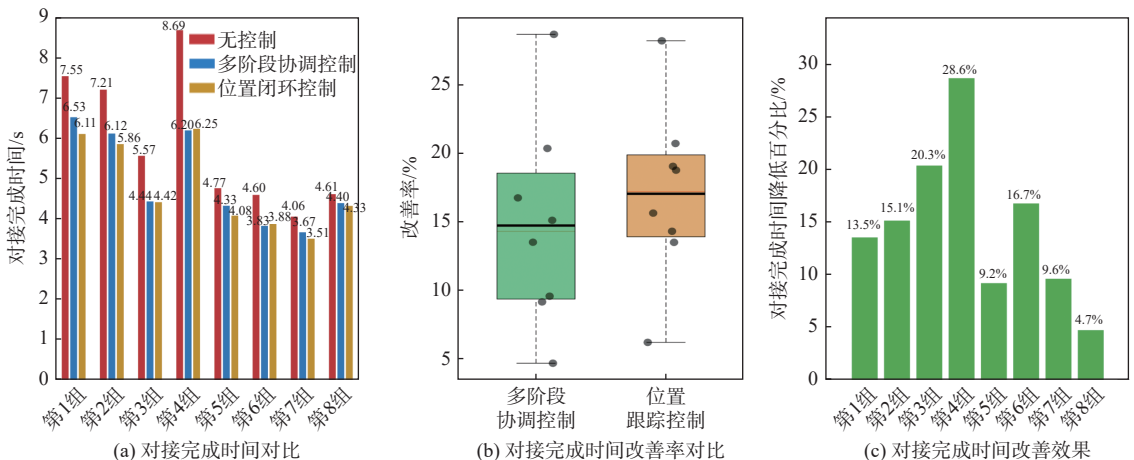


图 26 对接完成时间实验结果

Fig. 26 Experimental results of docking completion time

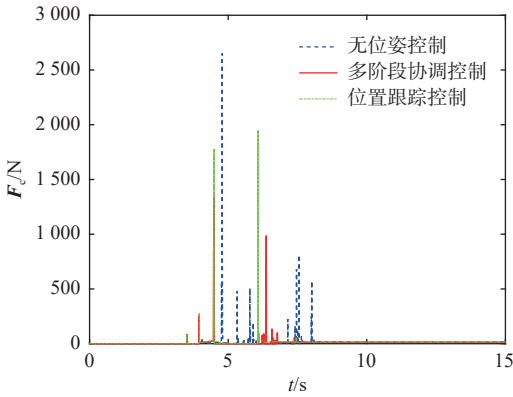


图 27 最大碰撞力对比

Fig. 27 Comparison of maximum collision force

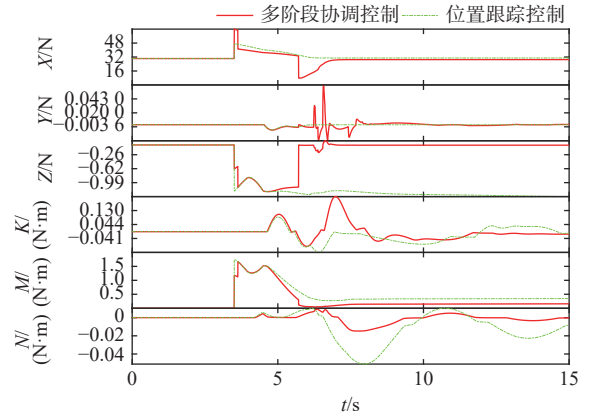


图 30 控制力/力矩对比

Fig. 30 Comparison of control force and torque curves

上,设计了一种多阶段协调控制策略,该策略在维持对接效率的同时能将最大碰撞力降低 14% 以上,可显著增强系统动态稳定性,并且与传统位置跟踪控制策略相比鲁棒性更强。

未来的研究可以从以下 3 个方面深入展开:一是在模型中引入复杂的海洋环境因素,如不规则波等,进一步提高模型的真实性和鲁棒性;二是深入探究由碰撞力矢量形成的机理、状态演变规律以及对成功率的影响分析;三是通过水池试验或实艇数据对仿真模型进行校验与修正,增强预测的可靠性,推动 AUV 与拖曳式回收坞站对接回收技术的快速进步,从而在一定程度上降低开发与测试成本,为 AUV 的海洋应用提供更全面的支持。

参考文献:

- [1] DAHN N, GAUDIG C, LEHR T, et al. Autonomous docking between a mobile subsea docking station and an AUV while in motion[C]//OCEANS 2024-Halifax. Halifax: IEEE, 2024: 1-9. DOI: 10.1109/OCEANS55160.2024.10754460.
- [2] GUTNIK Y, GROPER M. Terminal phase navigation for AUV docking: an innovative electromagnetic approach [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(1): 192.
- [3] 卢有旺,夏英凯,徐国华,等.面向 UUV 对接的视觉引导三维轨迹跟踪控制研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 290-304.
- [4] LU Y W, XIA Y K, XU G H, et al. Study on vision-guided 3D tracking control for UUV docking[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 290-304 (in Chinese).
- [4] GAO Y, LI X H, MEI J W, et al. Hydrodynamic numerical analysis of AUV underwater docking with conical docking bay[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(9): 1645.

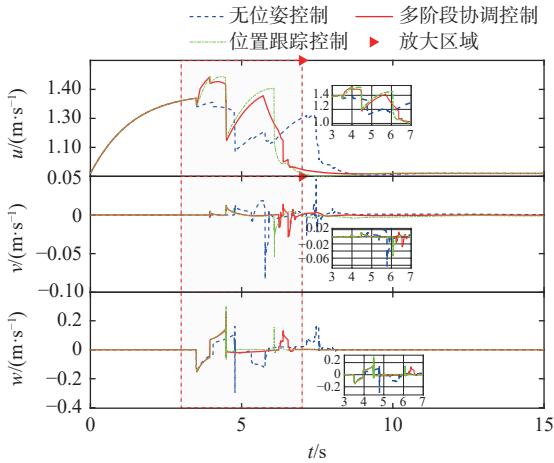


图 28 速度对比

Fig. 28 Comparison of velocity curves

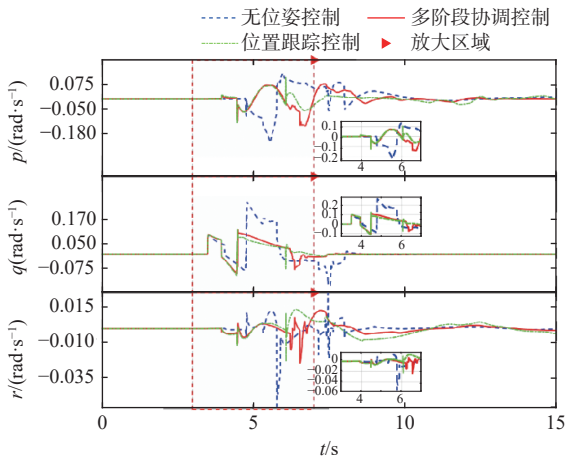


图 29 角速度对比

Fig. 29 Comparison of angular velocity curves

过程中的碰撞问题,基于 ADAMS-MATLAB 联合仿真平台完成了对接碰撞仿真与分析,揭示了偏心角、偏心距、相对速度及母船运动状态对碰撞力峰值与对接完成时间的影响规律。研究发现,对接完成时间随偏心角与偏心距的增大而延长,但二者对最大碰撞力的影响不大;最大碰撞力随相对速度的增大而升高,对接完成时间则随之缩短;母船运动状态的影响较为间接。在此基础

- [5] LV F T, XU H X, SHI K, et al. Estimation of positions and poses of autonomous underwater vehicle relative to docking station based on adaptive extraction of visual guidance features[J]. *Machines*, 2022, 10(7): 571.
- [6] PAGE B R, MAHMOUDIAN N. Simulation-driven optimization of underwater docking station design[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2020, 45(2): 404–413.
- [7] MENG L S, LIN Y, GU H T, et al. Study on dynamic docking process and collision problems of captured-rod docking method[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 193: 106624.
- [8] DIAO J Y, GAO Z L, YUAN X Q. Collision dynamics in AUV docking with conical hood type dock: influencing factors and performance analysis[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2024, 19(12): 2130–2136.
- [9] PAN W, ZHANG Y L. Research on dynamic docking process and collision problems of AUV based on joint control simulation[C]//2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu: IEEE, 2021: 1057–1061.
- [10] VU M T, CHOI H S, NHAT T Q M, et al. Docking assessment algorithm for autonomous underwater vehicles [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 100: 102180.
- [11] 郑荣, 宋涛, 孙庆刚, 等. 自主式水下机器人水下对接技术综述 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(6): 43–49, 65.
ZHENG R, SONG T, SUN Q G, et al. Review on underwater docking technology of AUV[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(6): 43–49, 65 (in both Chinese and English).
- [12] 杜俊, 谷海涛, 孟令帅, 等. 面向 USV 的 AUV 自主回收装置设计及其水动力分析 [J]. *工程设计学报*, 2018, 25(1): 35–42.
DU J, GU H T, MENG L S, et al. Design and hydrodynamic analysis of AUV self-recovery device for USV[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2018, 25(1): 35–42 (in Chinese).
- [13] 田聪. 海洋拖曳系统运动仿真及控制方法研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2025. DOI: 10.27075/d.cnki.ghzdc.2025.000216.
TIAN C. Research on motion simulation and control methods of ocean towing systems[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2025. DOI: 10.27075/d.cnki.ghzdc.2025.000216 (in Chinese).
- [14] 高东勇. 基于无人艇的 AUV 布放回收装置设计及拖曳动力学研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2022.000647.
GAO D Y. Design and towing dynamics research of AUV deployment and recovery device based on unmanned vehicle[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2022.000647 (in Chinese).
- [15] 潘薇, 张永林, 刘妮. 水下机器人动态对接中的碰撞与稳定控制 [J]. *舰船科学技术*, 2023, 45(2): 86–90.
PAN W, ZHANG Y L, LIU N. Collision and stability control in dynamic docking of autonomous underwater vehicle[J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(2): 86–90 (in Chinese).
- [16] 史剑光. 基于海底观测网络的 AUV 非接触接驳技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
SHI J G. Research on non-contact docking system for autonomous underwater vehicles on cabled ocean observatory networks[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese).
- [17] 辛传龙, 郑荣, 杨博. AUV 水下对接系统设计及接驳控制方案研究 [J]. *工程设计学报*, 2021, 28(5): 633–645.
XIN C L, ZHENG R, YANG B. Research on the design and connection control scheme of AUV underwater docking system[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2021, 28(5): 633–645 (in Chinese).

Research on docking and collision dynamics between autonomous underwater vehicles and towed recovery docks

CHEN Ruyi, ZHANG Yonglin*

College of Automation, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China

Abstract: [**Objective**] To improve the overall operational capability of autonomous underwater vehicles (AUVs) and address the critical issue of collision risks during the dynamic docking process with towed recovery docks (TRDs), this study conducts a systematic investigation into the collision mechanisms and control strategies of the docking system. Reliable docking and recovery technology is essential for extending AUV operational endurance, enhancing data transmission efficiency, and enabling long-term underwater deployment. However, in real marine environments, limitations in sensor accuracy, external disturbances, and the dynamic response of the docking system often lead to unavoidable contact or collision between AUVs and TRDs, which may result in mission failure or structural damage to the equipment. Therefore, this study aims to clarify the influence of key initial operating conditions on docking-induced collisions and to propose an effective control strategy for optimizing the dynamic docking process, thereby providing theoretical and technical support for the engineering application of AUV towed recovery systems. [**Methods**] Based on dynamic analysis, a simulation model incorporating contact and collision dynamics was developed using the ADAMS-MATLAB co-simulation platform. First, rigid body dynamic models of AUV and TRD were constructed. The AUV model accounts for gravity, buoyancy, viscous hydrodynamic drag, inertial hydrodynamic drag, thrust, and environmental disturbances. The TRD model adopts a frame-cage structure with a bell-mouth guiding cover, and a discrete flexible body method is used to model the towing cable. Subsequently, a nonlinear contact model based on Hertz theory was employed to calculate the collision forces between AUV and TRD, which more accurately captures the transient impact characteristics of the collision process compared with the linear contact model. On this basis, the effects of initial operating conditions including eccentric angle, eccentric distance, relative initial velocity, and mother vessel acceleration on docking collisions were systematically analyzed using the control variable method. To mitigate attitude disturbances induced by collisions, a multi-stage coordinated control strategy based on PID control was proposed, which realizes active attitude adjustment of AUV by switching control modes across different docking phases. [**Results**] The simulation results indicate that increases in eccentric angle and eccentric distance primarily prolong the docking time while exerting only a limited influence on the peak collision force, which remains within the range of 1 000–2 000 N under most working conditions. In contrast, increasing the relative initial velocity can shorten the docking time but significantly amplifies the peak collision force, showing a positive correlation between them. Further analysis of mother vessel acceleration reveals the complex, non-monotonic relationship between collision force and docking efficiency. As the mother vessel's acceleration increases, the amplitude of the TRD attitude variations intensifies, leading to greater uncertainty in the collision position, and the peak collision force reaches its maximum value when the acceleration is 0.2 m/s^2 . Moreover, the proposed multi-stage coordinated control strategy enables effective post-collision attitude adjustment of the AUV. In the case of uniform motion of the mother vessel, the strategy reduces the peak collision force by up to 74.5% and shortens the docking time from 7.56 s to 5.93 s. Even under the complex working condition of uniform acceleration of the mother vessel, the peak collision force is reduced by 19.6%, and the docking time is shortened by 16.7%, effectively optimizing the dynamic docking process and ensuring both docking safety and efficiency. [**Conclusion**] This study systematically clarifies the effects of key initial operating conditions on the docking collision between AUV and TRD. The research findings indicate that controlling the initial eccentric angle and eccentric distance can improve docking efficiency, whereas adjustments to the relative initial velocity and mother vessel acceleration require a careful balance between collision risk and docking speed. The proposed multi-stage coordinated control strategy can significantly reduce the peak collision force while maintaining docking efficiency, achieving reductions of 14%–74.5% under different working conditions. This strategy exhibits superior robustness and stability compared with the traditional position tracking control strategy, effectively addressing the limitations of passive control methods that rely solely on the dock structure. Overall, this study provides a reliable simulation basis and design reference for the design and stability control of AUV towed recovery systems. In addition, the research framework and methods provide guidance for the collision analysis and control in similar underwater docking systems.

Key words: autonomous underwater vehicles; towed recovery docks (TRD); co-simulation; collision analysis; multi-stage coordinated control strategy