

引用格式: 初秀民, 吴文祥, 柳晨光, 等. 船舶列队协同控制方法研究综述 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 13–28.
CHU X M, WU W X, LIU C G, et al. Survey of ship platoon cooperative control[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(1): 13–28.

船舶列队协同控制方法研究综述



初秀民^{1,2,3}, 吴文祥^{1,4}, 柳晨光^{*1,2,5}, 雷超凡^{1,4}, 贺治卜^{1,4}, 李松龙^{1,4}

- 1 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063
- 2 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063
- 3 闽江学院, 福建 福州 350108
- 4 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063
- 5 武汉理工大学 重庆研究院, 重庆 401120

摘要: 船舶列队是未来水路运输的重要方式。分析船舶列队协同控制的特点和原理; 从船-岸协同交互、列队控制模型、列队运动控制、列队典型应用等 4 个方面分别进行现状分析与梳理。总结当前船舶列队控制技术瓶颈, 包括人机共驾控制、列队控制运动不确定性建模、列队协同控制一致性、通信受限下船舶列队鲁棒控制及一致性控制等。最后, 指出未来的船舶列队协同控制发展, 应重点解决基于数据驱动与机理融合的列队运动建模、基于生物群体机制的船舶列队控制、基于分层控制的船舶列队控制等关键问题。
关键词: 船舶列队; 协同控制; 船-岸协同; 一致性控制; 船舶间距模型
中图分类号: U664.82 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02915

Survey of ship platoon cooperative control

CHU Xiumin^{1,2,3}, WU Wenxiang^{1,4}, LIU Chengguang^{*1,2,5}, LEI Chaofan^{1,4}, HE Zhibo^{1,4}, LI Songlong^{1,4}

- 1 National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China
- 2 Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China
- 3 Minjiang University, Fuzhou 350108, China
- 4 School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of technology, Wuhan 430063, China
- 5 Chongqing Research Institute, Wuhan University of Technology, Chongqing 401120, China

Abstract: The ship platoon will become an important form of water transport in the future. This paper analyzes the characteristics and control principle of ship platoon cooperative control, and analyzes the current situation and methods in the four aspects of ship-shore cooperative platoon, platoon control model, platoon motion control and typical platoon applications. The current bottlenecks of ship platoon control technology are summarized, including human-machine fusion control, platoon motion control uncertainty modeling, platoon cooperative consistency control modeling, robust control under communication constraints and consistency control. In the future development of ship platoons, we should focus on solving the problems of platoon motion modeling based on data-driven and mechanism fusion, ship platoon control based on the biological group mechanism and the application of hierarchical control in ship platoon control.
Key words: ship platoon; cooperative control; ship-shore cooperative; consistency control; ship spacing model

0 引言

随着人工智能、万物互联技术在运输业的广

泛应用, 无人运载系统的相关技术得到了快速发展。近年来, 针对无人潜航器(unmanned underwater vehicle, UUV)、无人机(unmanned aerial vehicle,

收稿日期: 2022-05-20 修回日期: 2022-07-07 网络首发时间: 2023-02-25 10:34
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52001240); 水动力学国家级重点实验室开放基金资助项目(6142203210204); 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2021jcyj-msxmX1220); 武汉理工大学三亚科创园开放基金资助项目(2020KF0041)
作者简介: 初秀民, 男, 1969 年生, 博士, 研究员。研究方向: 水路智能交通与船舶。E-mail: chuxm@whut.edu.cn
吴文祥, 男, 1996 年生, 博士生。研究方向: 船舶编队控制。E-mail: wuwenxiang@whut.edu.cn
柳晨光, 男, 1988 年生, 博士, 副研究员。研究方向: 船舶智能航行控制。E-mail: liuchenguang@whut.edu.cn

*通信作者: 柳晨光

UAV) 和无人车 (unmanned ground vehicle, UGV) 等无人运载系统的研究日益增多。无人船 (unmanned surface vehicle, USV) 作为航运业的主要运载工具, 其智能化水平很大程度上决定了水路运输的经济性和安全性, 因此单船运动控制问题在近几十年间被广泛研究, 但日益复杂的环境和多样性的任务对船舶智能化提出了新的要求, 单船智能控制已无法满足需求, 智能船舶自主化控制技术正在由单一智能船舶控制向多船协同控制 (cooperative control) 迈进^[1-3]。

船舶编队是目前主要的多船协同运动方式, 船舶列队是一种船舶以纵向排列方式组成船队的编队方式, 其最主要的特点是能够大幅降低船队

的航迹宽度, 因此经常被应用于可航行区域较为狭窄的受限水域, 在编队护航、极地运输、渠化航道与船闸水域中具有重要的应用价值^[4]。考虑到提高船舶列队运输的安全性和经济性, 实现精准的列队协同控制, 是当前的研究热点, 本文将对船舶列队协同控制模型与方法进行梳理, 并分析其所面临的挑战和技术瓶颈, 最后对其未来发展予以总结与展望。

1 船舶列队协同控制概述

船舶列队协同控制是一种特殊的编队协同控制方式, 在运河^[5]、极地^[6]、船闸^[7]、峡谷流域等水域具有较好的应用前景, 如图 1 所示。



图 1 船舶列队典型应用场景

Fig. 1 Application scenarios for ship platoon

与单船控制相比, 船舶列队协同控制的研究难点体现在:

1) 需要确定一个安全、高效的船间距 (本文指列队路径上前后船之间的路径长度) 模型。目前, 除列队以外的其他编队控制研究大多数是在开阔水域进行的, 更多地聚焦于如何实现和保持固定队形, 而不会考虑队形设计。列队协同控制的应用场景多为狭窄水域, 用于提高该水域内的通航效率, 故需要设计一个通航效率高的船间距模型 (列队队形), 以实现列队协同控制的目的。在设计过程中, 船间距越小, 对航道资源的占用率越小, 越能够提升航道通航效率。但较小的船间距会导致列队中的前后船存在发生碰撞的隐患。为保障航行安全, 需降低列队船舶的航速, 但较小的航速又会增加其在航道内的通航时间, 降低航道通航效率。可见, 通航时间与航道资源

占用率互相矛盾。因此, 设计的船间距模型应使其能够在保障安全的前提下提高列队航行的高效性, 这是当前的研究难点。

2) 控制目标随控制对象的状态变化而变化, 增加了控制的复杂性。在列队协同控制中, 通常采用领航-跟随控制结构。在编队控制中, 采用领航-跟随结构时, 通常跟随船的控制目标 (期望位置) 只随领航船的位置改变而变化。而在列队控制中, 船间距模型需要保证高效和安全性, 跟随船与领航船期望的相对距离除了取决于领航船的航速与位置外, 还取决于跟随船本身的航速与位置, 在控制对象 (跟随船) 的状态量发生改变时, 控制目标 (期望的相对位置) 也会发生相应改变, 其控制过程相比其他编队控制更为复杂。

3) 列队中船舶间的相对位置与角度受列队航行路径的影响, 增加了控制难度。当列队以弯

曲路径航行时,列队中船舶间不具有固定的相对位置与角度。在列队船舶航行时,前后船间的相对位置与角度受列队航行路径的曲率影响,不固定的几何队形会增加列队控制的难度。

综上所述,亟需研究船舶列队协同控制方法,设计出既可满足任务需求且安全性、经济性较高的列队队形,又能控制多船实现精准的协同列队。

2 船舶列队协同控制方式

船舶列队协同控制主要关键技术涉及船-岸协同交互、期望船间距建模、列队运动建模、列队控制结构设计和列队运动控制方法等,其相互关系如图 2 所示。其中,船-岸协同交互是岸基端与船端进行数据交互,明确列队需求与环境约束;期望船间距建模是根据列队需求以及环境约束规划期望的队列,设置控制器的控制目标;列队运动建模是在船舶水动力模型的基础上构建的,以此为列队控制提供运动约束与状态预测;列队控制结构是指船间协同控制的方式,通过该结构可将列队运动控制问题简化为船舶运动控制问题;列队运动控制方法则是通过算法计算出控制指令作用于列队中的船舶,使船舶实现列队协同航行。

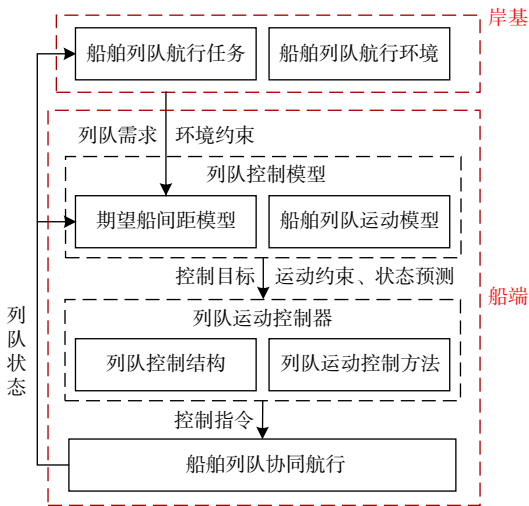


图 2 船舶列队控制原理
Fig. 2 Control principle of ship platoon

在内河等交通环境复杂、航道资源紧张的应用场景下,船舶列队协同控制除了船-船间的相互协同外,还需要船-岸间的协同交互。岸基系统主要负责船-岸通信、岸基监控、数据存储、人机交互等功能。船-岸交互数据主要包括航道状态数据、水流状态信息、列队船舶运动状态信息、航段内非列队船舶运动状态信息等,列队船舶根据岸端所提供的信息以及航行任务进行合理的决策控制。以典型应用场景船闸为例,其

船-岸协同原理如图 3 所示^[8]。岸基系统采用通信方式与过闸船舶列队进行数据交互,向列队船舶提供船闸位置及状态信息,并对过闸船舶进行状态监控,避免异常行为和事故的发生。船载系统根据船闸的状态信息,列队中其他船舶的运动状态信息以及本船的运动状态信息规划期望的船舶间距,并根据规划的控制目标自主控制,通过船-岸协同控制的方式实现船舶自主列队过闸。

3 船舶列队控制建模

3.1 船间距模型

船舶列队航行时,列队船舶应保持合适的间距。过大的船间距会导致列队队形过长,在内河航道和海运航道中占用过多的航道资源;在极地冰区会增加破冰船与跟随船间出现浮冰的风险,影响列队安全。过小的船间距会导致队形过于紧密,增加前后船在列队运动中的碰撞风险。因此,为提高船舶列队在狭窄水域航行的安全性和经济性,许多学者对列队船间距模型展开了研究。

如图 4 所示,影响列队船舶间距的因素有很多。图中, d_t 为期望的船间距, v_t 为前船航速, v_h 为后船航速, a_t 为前船加速度, a_h 为后船加速度, S_t 为前船制动性能, S_h 为后船制动性能, d_c 为稳定通信距离, w_c 为环境干扰, F_R 为后船控制量(推进力)。目前,主要有两种研究方法:一是机理建模,即对船舶运动特性和环境进行理论分析后,根据其运作机理构造列队安全船间距模型;二是经验建模,即基于跟驰模型,结合经验和历史数据,根据经济性或安全性需求对列队船间距进行建模。

在机理建模方法方面,何良德等^[9]基于船舶制动机理,分析了船舶制动距离与船长、航速的相关性,考虑了驾驶员经验对实际制动距离的影响,建立了船舶跟驰安全间距模型。李瀛等^[10]针对长江下游航道条件和船舶特性,基于道路交通工程中停车视距的概念,对船舶制动过程进行理论分析,提出了由反应距离、制动距离以及最小间距 3 部分组成的航道中停船安全间距模型,该研究可以为列队停船时的船间距模型提供参考。明力等^[11]在分析船舶倒车冲程的基础上,应用交通流跟驰理论,研究了超大型船舶纵向间距,建立超大型船舶安全纵向间距计算模型。Lee 等^[12]基于船舶与带土墩的侧壁之间的水动力进行船舶操纵模拟,提出了一种船舶列队航行时的最小安全距离模型,以减小船舶列队在封闭水域航行时

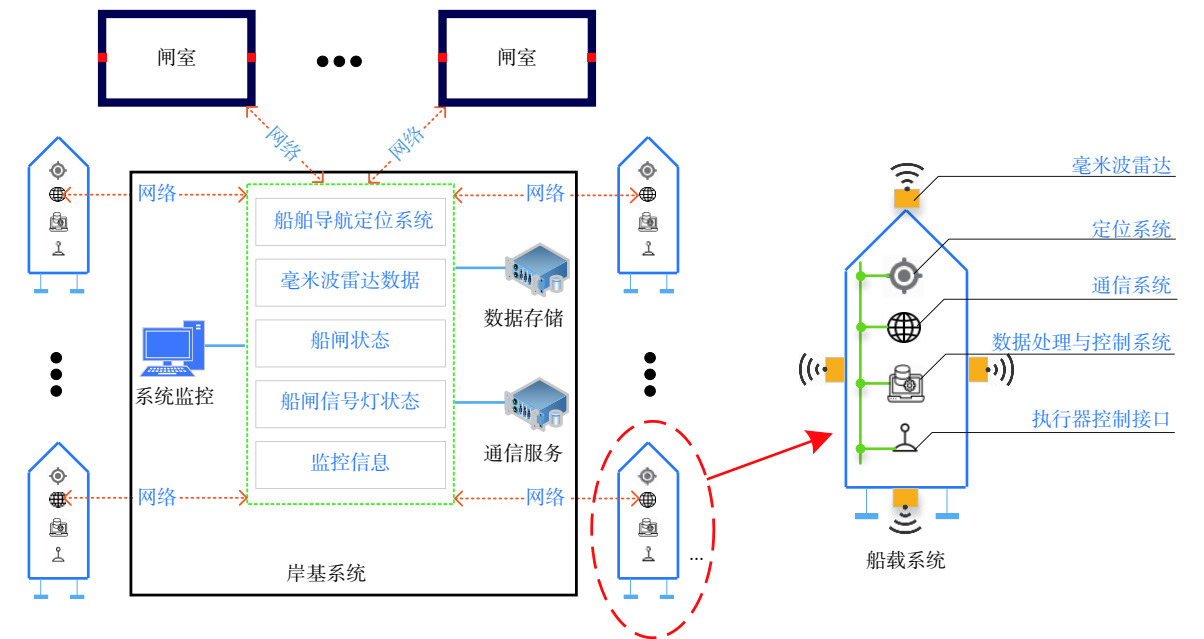


图 3 船-岸协同列队^[8]

Fig. 3 Ship-shore cooperative platoon^[8]

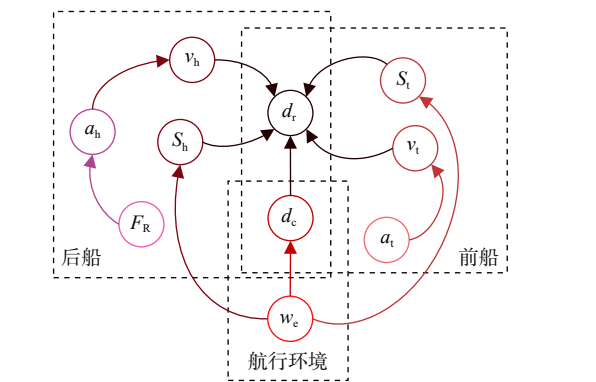


图 4 船舶列队影响因素

Fig. 4 Influence factors of ship queuing

发生碰撞事故的风险。为了保障列队航行的安全,安全船间距模型研究中考虑了船舶操纵特性以及环境干扰等因素,模型的复杂度与非线性度较高,但安全性也较高。

在经验建模方法方面,朱俊等^[13]基于伽赛斯(Gazis)1961年提出的非线性跟驰经验模型,结合最优化原理,建立了航道理想通航时的最优跟驰间距模型,并根据航道的实际状况,验证了航道通过能力与间距模型的相关性。龚非^[14]基于跟驰理论以及跟驰微分方程,提出了一种船舶列队临界速度的计算方法,通过历史数据对跟驰理论的

经验模型进行拟合,得到船舶列队通航间距模型,然后针对鲅鱼圈港航道进行模拟器仿真实验,验证了该模型具有较高的安全性和经济性。Zhang等^[15]针对极地列队航运问题,基于船舶跟驰理论,结合破冰船和被护船舶的运动特性,建立了量化模型来计算不同冰情下列队船舶在可接受碰撞频率下的安全间距。随后,Zhang等^[16]在该模型基础上建立了一种考虑船间通信的冰区航行船舶跟驰模型,并通过稳定性分析验证了模型的可靠性。表1给出了上述两种建模方法的对比分析结果,可根据需求选择合适的方法。鉴于船舶具有较大的惯性和迟滞性,且其航行环境复杂多变,对于列队船舶安全间距的建模所需考虑因素较多,可靠性需求较高,大多数研究采用机理建模方法。而在提升通航经济性方面,需要结合航道交通流特性和最优化理论,灵活易实现的经验建模方法显然更为适用。

3.2 船舶列队运动模型

船舶列队运动模型用于描述编队内船舶螺旋桨转速、舵角与船舶运动状态(位置、航速、艏向等)之间的输入输出关系^[17]。船舶运动包括横荡、纵荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇等6个自由度。对

表 1 船舶列队船间距建模方法的分析

Table 1 Analysis of spacing modeling method for ship platoon

建模方法	建模原理	优点	缺点
机理建模	分析船舶的制动特性以及环境因素,根据牛顿定律构建安全间距模型	可解释性较高,具有较强的适应性	复杂度较高,参数难以获取
经验建模	基于跟驰经验模型,结合最优化理论或历史数据,构建优化间距模型	灵活、易实现,复杂度较低	机理性较差,较难进行可靠性分析

于列队航行控制, 通常只需关注船舶纵荡、横荡和艏摇这 3 个自由度。

船舶列队运动建模主要涉及列队坐标转换和船舶运动建模。在列队航行中通常通过惯性坐标系和附体坐标系来描述列队船舶的运动。通常, 运动学特征依托于惯性坐标系, 记作 $\{\eta\} = (x_n, y_n, z_n)$, x_n, y_n, z_n 分别表示 x 轴坐标、 y 轴坐标和 z 轴坐标; 动力学特征依托于附体坐标系, 对编队中的某船舶 i , 其在附体坐标系中的速度向量记作 $\mathbf{v}_i = (u_{b,i}, v_{b,i}, r_{b,i})$, $u_{b,i}, v_{b,i}, r_{b,i}$ 分别表示船舶 i 的横荡速度、纵荡速度和艏摇角速度。惯性坐标系定义为: 原点 O_n 位于船舶重心, $O_n x_n$ 指向正北, $O_n y_n$ 指向正东, $O_n z_n$ 垂直于水面指向地心; 附体坐标系定义为原点 O_b 位于船舶重心, $O_b x_b$ 沿船舶对称剖面指向船艏, $O_b y_b$ 指向右舷, $O_b z_b$ 指向船底龙骨。对于水面航行器的研究, 通常将横摇角和纵摇角约定为 0° , 同时忽略起伏影响, 即可将水面航行解耦简化为仅用横荡、纵荡和艏摇描述的三自由度运动模型。坐标系间的转换关系为:

$$\dot{\eta} = T(\psi)\mathbf{v}$$

(1)

式中: $T(\psi)$ 为附体坐标系向惯性坐标系的转换矩阵; \mathbf{v} 为船舶速度向量; ψ 为艏摇角。需满足可逆条件, 定义为

$$T(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(2)

列队运动模型参数定义如图 5 所示。图中: $x_i, y_i, \psi_i, u_{b,i}, v_{b,i}, O_{b,i}$ 分别为船 i 的横坐标、纵坐标、艏摇角、横荡速度、纵荡速度和质心点; $x_m, y_m, \psi_m, u_{b,m}, v_{b,m}, O_{b,m}$ 分别为船 m 的横坐标、纵坐标、艏摇角、横荡速度、纵荡速度和质心点; $x_j, y_j, \psi_j, u_{b,j}, v_{b,j}, O_{b,j}$ 分别为船 j 的横坐标、纵坐标、艏摇角、横荡速度、纵荡速度和质心点。

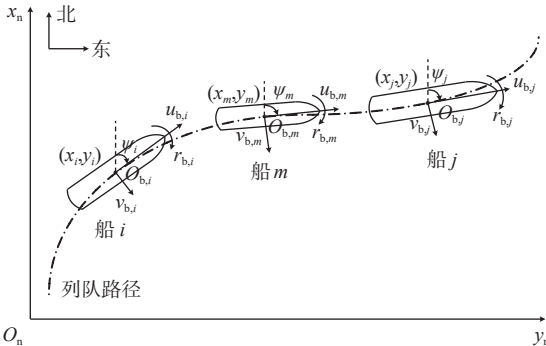


图 5 船舶列队运动模型
Fig. 5 Ship platoon motion model

针对船舶运动建模, 目前主要有 4 种研究方法, 包括机理建模^[18-19]、经验建模^[20-21]、船模试验建模^[22-24]、数值模拟建模^[25-26], 它们的原理如表 2 所示。

表 2 船舶运动建模
Table 2 Ship motion modeling

建模方法	建模原理	优点	缺点
机理建模	分析船舶运动过程中物理或者化学变化规律, 构建输入与输出间的关系模型	可解释性较高, 具有较高的通用性	复杂度较高, 参数难以获取
经验建模	依靠大量的船舶航行训练数据优化模型结构	灵活、易实现, 复杂度较低	对数据集需求大, 易受噪声影响
船模试验建模	通过约束船模试验和自航船模试验, 直接得到船舶操纵性模型	精确度较高	工作量大、成本高、对设备要求高、通用性较差
数值模拟建模	利用CFD等方法进行约束船模和自航船模的模拟试验, 得到船舶操纵性	成本低且效率高	对计算机性能要求较高, 计算时间较长

本文介绍一种由 Fossen^[27] 提出的简化水动力模型, 该模型在船舶运动控制中得到了广泛应用。模型假设船舶在平静水域航行且船体左右对称, 将航行船舶所受合力分为刚体力、流体动力、控制动力和干扰力, 以矩阵形式表示, 推导出了正航速下船舶的操纵模型。三自由度船舶模型表示为式(3)。

$$\begin{cases} \dot{\eta} = T(\psi)\mathbf{v} \\ \mathbf{M}(\mathbf{v})\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_C + \boldsymbol{\tau}_D \end{cases}$$

(3)

式中: $\boldsymbol{\tau}_C = [\tau_u, \tau_d, \tau_r]^T$, 为控制输入的力和力矩; $\boldsymbol{\tau}_D = [f_{du}, f_{dv}, t_{dr}]^T$, 为干扰力和力矩; \mathbf{M} 为惯性矩阵; \mathbf{C} 为科氏向心矩阵; \mathbf{D} 为阻尼矩阵。将惯性矩阵 $\mathbf{M}(\mathbf{v})$ 分为刚体惯性矩阵 \mathbf{M}_{RB} 和附加质量矩阵 \mathbf{M}_A ; 将科氏向心矩阵 $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ 分为向心力矩阵 \mathbf{C}_{RB} 和科氏力矩阵 \mathbf{C}_A , 则式(3)变换为式(4)。

$$\begin{cases} \dot{\eta} = T(\psi)\mathbf{v} \\ \mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{M}_A\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_C + \boldsymbol{\tau}_D \end{cases}$$

(4)

其中,

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_G \\ 0 & mx_G & I_z \end{bmatrix}, \mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -N_{\dot{v}} & -N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_G r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_{\dot{v}}v + \frac{1}{2}(N_{\dot{v}} + Y_{\dot{r}})r \\ 0 & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ -Y_{\dot{v}}v - \frac{1}{2}(N_{\dot{v}} + Y_{\dot{r}})r & X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix}$$

$$D(v)_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} -(X_u + X_{|u|u}|u| + X_{uuu}u^2) & 0 & 0 \\ 0 & -(Y_v + Y_{|v|v}|v| + Y_{rvr}|r|) & -(Y_r + Y_{|v|r}|v| + Y_{rvr}|r|) \\ 0 & -(N_v + N_{|v|v}|v| + N_{rvv}|r|) & -(N_r + N_{|v|r}|v| + N_{rvr}|r|) \end{bmatrix}$$

式中： x_G 为重心在附体坐标系中的 x 轴坐标值； I_z 为船体绕船舶附体坐标系 z 轴的惯性矩； X_u, Y_v, Y_r, N_r 和 N_v 分别为流体加速度（角加速度）项的系数或附加质量（附加惯性矩）项的系数； $X_u, X_{uuu}, Y_v, N_v, Y_r$ 和 N_r 为泰勒展开式系数； $X_{|u|u}, Y_{|v|v}, Y_{|r|r}, Y_{rvr}, Y_{rvr}, N_{|v|v}, N_{rvv}, N_{rvv}$ 和 N_{rvr} 为水动力学系数。

这种水动力模型易于构建，虽然该模型总体精度不及采用整体型和分离型方法建模的精度，但由于其直接描述船舶的运动学和动力学特征，在船舶航行研究中运用得越来越多。

在确定模型结构后，经常面临模型参数难以获取的问题，通常通过参数辨识来解决。参数辨识方法在船舶运动模型辨识中有着广泛的应用，李学忠等^[28]基于最小二乘法对舰船的控制模型进行了拟合，验证了拟合模型的幅相特性、能控性、能观性及稳定性，仿真结果表明了该模型的合理性。Holzhüter^[29]在船舶控制器设计中基于改进最小二乘估计法对船舶运动模型进行了辨识，基于辨识所得的模型实现了精确的船舶运动控制。Abkowitz^[30]基于扩展卡尔曼滤波对船舶运动水动力系数进行了参数辨识，并在船上进行了全面试验，基于辨识参数模拟的运动响应和船舶试航试验之间具备很好的一致性。Yoon 等^[31]利用估计的船舶运动变量、船舶受力及水流速度和方向数据，基于岭回归法对水动力模型进行了参数辨识，采用油轮的航海数据对算法进行了验证。经典参数辨识方法适用性较高，但存在对噪声敏感、参数漂移等问题。

除了上述经典的参数辨识方法外，机器学习辨识方法和各种改进算法也成为了目前研究的热点。Luo 等^[32]基于支持向量机对 Abkowitz 模型的水动力系数进行了识别确定，基于回归模型，对一艘 KVLCC2 船进行了机动仿真，结果与实验结果的对比验证了辨识方法的有效性。谢朔等^[33]将最小二乘支持向量机（LSSVM）与多新息方法相结合，提出了一种新的多新息在线 LSSVM 辨识建模方法，试验证明采用该算法辨识的模型进行预报的拟合误差小于 4.76%。Zhu 等^[34]提出了一种结合人工蜂群算法和支持向量回归算法的参数辨识方法，通过对某大型集装箱船简化动力学模型的辨识仿真研究，验证了优化辨识方法的有效性，同时对初始简化动力学模型的进一步简化提出了思考。虽然机器学习等方法具有不错的辨识效果，但引入的超参数，如初始权重或惩罚因子，

没有直观的物理意义或逻辑解释。

4 船舶列队运动控制方法

4.1 列队控制结构

列队队形是一种结构较为简单的船舶编队队形，通常列队中船舶的运动控制只会受到列队中前后船舶的影响，因此其控制结构一般采用领航—跟随的控制结构^[35-40]。

领航—跟随结构是编队控制中经常使用的一种控制结构。编队中的领航—跟随结构是以编队中某一艘船作为领航者，其他船舶作为跟随者，领航船舶的航行轨迹需要进行规划，跟随船舶则通过特定控制规律以期望的角度以及距离对领航船舶进行轨迹跟踪^[41]。图 6 所示为典型的基于视距导航（line-of-sight, LOS）的领航—跟随结构^[42]。领航船*i*与跟随船*j*的目标跟踪距离 $d_{i,j}$ 和目标跟踪角度 $\phi_{i,j}$ 定义为：

$$\begin{cases} d_{i,j} = \sqrt{x_{b,j}^2 + y_{b,j}^2} \\ \phi_{i,j} = \arctan\left(\frac{y_{b,j}}{x_{b,j}}\right) \end{cases} \tag{5}$$

式中，以领航船中心为原点的附体坐标系定义为 $\{b\} = (x_b, y_b)$ 。 $(x_{b,j}, y_{b,j})$ 为跟随船*j*在坐标系 $\{b\}$ 下的坐标。跟随船*j*和跟随船*j+1*分别通过跟踪目标状态 $(d_{i,j}, \phi_{i,j})$ 和 $(d_{i,j+1}, \phi_{i,j+1})$ 实现编队航行控制，且通过更改目标状态也可实现队形变换。

不同于编队领航—跟随控制结构，列队领航—跟随控制结构中的船舶间不具有固定的几何结构（图 5），且列队中每艘船舶均以自己的前船作为领航者，以自己作为跟随者，除了列队首尾两艘

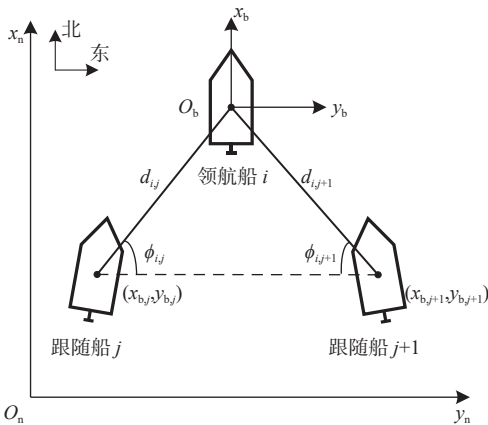


图 6 领航—跟随船舶编队结构

Fig. 6 Leader-follower based ship formation structure

船舶, 列队中其他船舶同时扮演着领航者与跟随者这两种角色。由于后者与前者间的固定结构不确定, 列队船舶无法再通过跟踪目标式(5)来实现列队航行。跟随船的期望位置需要根据前船的航行路径以及期望的路径距离来确定, 如图 7 所示。图中, d_t 为期望的船间距, (x_d, y_d) 为期望的目标点坐标(根据期望的路径和期望的船间距计算得到), ψ_B 为期望的船艏向。

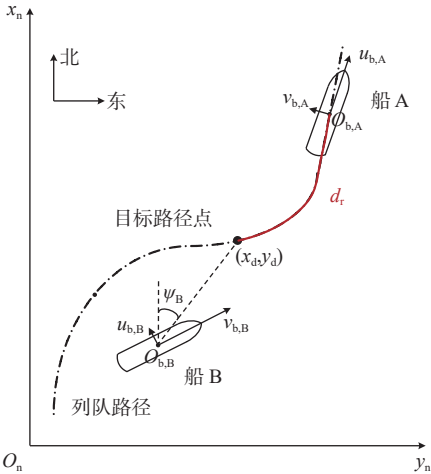


图 7 领航-跟随船舶列队结构
Fig. 7 Leader-follower based ship platoon structure

由于列队几何结构简单明了, 列队船舶只需对自己前方船进行跟踪便能保持队形, 因此简单易实现的领航-跟随控制结构成为了列队控制应用的主流。但领航-跟随结构的决策过程缺少对跟随者反馈信息的参考, 可能会造成安全隐患, 因此也产生了改进的领航-跟随控制结构和其他控制结构, Liu 等^[43] 基于图论控制结构开发了一种结合协作路径跟踪控制器的编队控制器, 能够使协同船舶稳定地进行列队航行。Liu 等^[8] 结合领航-跟随和行为算法设计了一种船闸水域的列队控制结构, 使三峡河段船舶能以列队队形安全、高效地协同过闸。Wu 等^[44] 设计了一种保障安全的协同控制结构, 该结构能实现各种集群行为, 并通过理论分析证明了控制系统的所有跟踪误差最终一致有界, 列队船舶能保证航行安全。目前, 其他类型的列队控制结构较为复杂, 不易实现, 且相关研究较少, 列队控制结构的研究仍具有较大的发展空间。

4.2 列队运动控制方法

国内外学者对列队运动控制方法进行了探讨, 研究的学者主要分为两类, 一类学者侧重于研究如何实现和保持纵向排列, 其中会考虑航向以及航速的控制; 另一类学者侧重于研究如何保持期望的船间距以实现航行任务, 且只考虑对纵

向航速的控制而不考虑航向的控制。第 1 类学者主要是基于李雅普诺夫理论通过设计控制律来实现船舶列队航行的控制, 包括动态表面控制技术、障碍李雅普诺夫函数、反步法等。例如, Dai 等^[35] 结合预设性能控制方法、动态表面控制技术, 提出了一种自适应列队运动控制方法, 该方法可以保证闭环系统在预设性能的情况下保持内部稳定。Liang 等^[36] 通过结合障碍李雅普诺夫函数和自适应神经网络来实现对船舶列队运动的控制, 设计的控制器可以处理模型的不确定性和未知的外部干扰, 并且在输入饱和的情况下, 列队中前后船舶的间距不会触发碰撞风险。此外, 该团队在后续研究中考虑了机制和通信造成的时间延迟而引起输入控制滞后的问题, 通过设计反步法控制律, 使分布式协同控制在有限时间内完成, 并且通过严格的稳定性分析保证了整个系统的最终约束性^[37]。Wang 等^[38] 基于 Liang 等的研究提出了考虑避碰和通信距离等各种约束条件的列队运动控制方法, 通过设计重建模块来估计领航者的速度, 减小通信负担, 实现了船舶列队运动控制。Liu 等^[43] 基于视线制导方案、跟踪微分器和路径变量包容方法, 设计了协同路径机动控制器模块, 其中路径变更包容方法用于确保自主水面无人船 (autonomous surface vehicle, ASV) 在沿路径移动的两个虚拟引线之间均匀分布。Wu 等^[44] 通过结合所设计的李雅普诺夫函数、微分跟踪器和状态观测器实现了船舶列队协同避障控制。基于李雅普诺夫稳定性理论设计控制律的控制器能在理论上进行稳定性证明, 控制器鲁棒性较强, 但存在李雅普诺夫函数设计困难或者控制律设计困难的问题。除了基于李雅普诺夫设计控制律以外, Chen 等^[39] 通过模型预测控制方法也实现了船舶列队航行运动控制, 并采用基于交替方向乘子法的分布式公式, 利用单层串行迭代结构, 减小对通信的依赖性, 提高了系统的稳定性。此外, 该研究团队通过动力和推进系统中的全电动直流配置确定了列队中所有船舶的最有效速度^[40], 但该方法的控制实时性有待提升。第 1 类学者的研究大多数并未引入船间距模型, 而是以固定船间距为控制目标, 使船舶沿着领航船决定的期望轨迹运动, 因此大部分船舶运动控制算法可以在列队船舶协同控制中得以应用, 包括 PID^[45]、滑模控制^[46]、反步法^[47]、智能控制^[48]、鲁棒控制^[49]、模糊控制^[50]、自抗扰控制^[51]、反馈线性化^[52]、有限时间控制^[53-54]、最优控制^[55]、模型预测控制法^[56-59] 等。对这些算法的对比分析结果如表 3 所示。

表 3 船舶运动控制算法分析

Table 3 Analysis of ship motion control algorithms

方法	优 点	缺 点
PID	设计简单，不依赖于模型，具有普适性	对非线性系统自适应能力差，抗干扰能力弱
滑模控制	响应性好，对外界扰动和模型参数变化不灵敏	抖振问题难以消除
反步法	能保证系统全局渐近稳定	存在计算量激增问题以及李雅普诺夫函数设计困难问题
智能控制	能处理复杂的非线性、干扰、不确定性、时变等控制问题	难以定义控制目标以及从理论上分析控制鲁棒性和稳定性
鲁棒控制	控制系统稳定性与可靠性较好	控制系统的稳态精度较差，控制器的阶数偏高
模糊控制	能充分发挥专家经验在控制中的作用，通过控制规则描述系统变量的关系，处理非线性、时变问题	控制目标定义不明确
自抗扰控制	不依赖系统模型，通过设置过渡过程能有效解决超调与快速性之间的矛盾	对控制器参数敏感，且不太适用于解决多输入多输出控制问题
反馈线性化	简化控制，可以利用线性控制理论解决非线性系统控制	对模型精度要求高，控制律设计复杂
有限时间控制	能从理论上保证系统控制的快速收敛性	难以构造李雅普诺夫函数
最优控制	可以处理约束问题，目标函数中可以明确控制目标	对模型精度要求高，求解复杂
模型预测控制	控制平滑，处理多约束的非线性最优优化问题极具优势	非线性优化问题求解速率较慢，有时难以满足实时性需求

上述运动控制算法大致可以根据是否依赖模型分为 2 种类型：一种是不依赖模型的运动控制算法，其能使控制问题简化，加快问题的求解，但存在难以构造控制函数或控制鲁棒性不好等问题；另一种是依赖模型的运动控制算法，其能很好地处理控制约束并定义控制目标函数，但对模型精度要求较高，在模型失配时会产生较大的控制偏差。

第 2 类学者研究船舶列队运动控制方法时，首先根据船舶列队安全、高效的航行目标以及任务需求设计船间距模型，然后设计列队运动控制方法，其最主要的特点在于期望的船间距不仅受领航船运动状态的影响，同时也一直随着跟随船的运动而改变，列队运动控制方法便是要将列队船舶的实际船间距（实际队形）与期望的船间距（期望队形）相互靠拢，如图 8 所示。图中， e_d 为船间距误差， d_a 为实际船间距。当实际船间距小于期望船间距时，控制跟随船速度减小，期望船间距会减小，实际船间距会增大，从而使二者间的误差收敛。当后者实际船间距大于期望船间距时，控制跟随船速度增大，期望船间距会增大，实际船间距会减小，误差同样会逐渐收敛，其原理类似于反馈控制。因此，Liu 等^[8]基于 PID 算法提出了一种针对船闸水域列队停船的运动控制方法，该方法还设置了距离保持控制模式、速度控制模式、停止控制模式、停船完成模式和紧急停船模式，通过控制船舶航速实现了船闸水域船舶列队停船。除了 PID 算法外，模型预测控制法也得到了广泛的应用。吴文祥等^[56]基于分布式控制策略和模型预测控制方法，提出了一种列队协同运动控制的方法，该方法基于变时距策略确定了

运动控制目标，基于船舶运动数学模型构建了控制预测模型，最后利用模型预测控制中的滚动优化求解实现了船舶列队协同运动控制。雷超凡等^[57]针对船舶列队协同停船控制需求，提出了一种基于集中式模型预测控制的船舶列队协同停船控制方法，该方法通过结合停船经济性和平顺性设计了船舶列队停船控制目标函数，并以船舶纵向间距保持、输入为约束，利用模型预测控制实现了对停船多约束优化问题的求解。目前，对于列队运动控制方法，第 2 类学者的研究较少，但其结合了船间距模型与运动控制算法的特性，能实现安全、高效的列队协同控制，具有较好的应用前景。

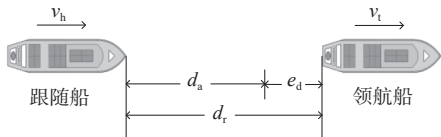


图 8 船舶期望的间距控制原理

Fig. 8 Control principle of desired ship spacing

4.3 列队避碰控制方法

船舶航行水域通常存在障碍物，为保障航行安全性，需要控制航向和航速以规避障碍物。由于涉及到航向控制，列队避碰控制研究是在以实现和保持纵向列队队形为控制目标的前提下进行的，本质上与其他编队避碰控制相似。目前，对于列队避碰控制的研究较少，本文将对当前编队避碰控制的研究基础进行梳理以提供参考。

编队避碰使用最广泛的方法是基于势函数的避碰方法^[60]。例如，Peng 等^[61]结合人工势场函数和反步法设计编队航行控制律，并通过微分跟踪器对控制律进行简化，从而实现了船舶编队对静

态和动态障碍物的避碰。Yan 等^[62]将虚拟结构和人工势场相结合,在考虑无人艇运动能力的情况下对参考点采用改进的动态窗口算法,以避免编队船舶与障碍物发生碰撞。虽然基于势函数的方法计算简单,应用实时性较好,但通常不能保证避障过程中控制输入的有界性。除了基于势函数以外,Sun 等^[63]基于有限控制集模型预测控制,将编队船舶与障碍物的距离作为代价函数的一部分在模型优化求解过程中予以考虑,并通过有限控制集的设置来提高模型预测控制优化求解的速度,实现了船舶编队的自主避碰,但该方法仍需要较高的计算成本,每个时刻都需要解决有限水平的优化控制问题。He 等^[64]对编队中船舶轨迹跟踪的偏差进行约束设置,然后结合预设性能控制、自适应控制技术和反步法实现了船舶编队控制与编队中船舶之间的相互避碰,但该方法难以对控制输入和速度设置约束。Fan 等^[65]基于零空间行为法,实现了编队船舶在完成目标跟踪、队形保持的同时能对障碍物进行避碰的功能,但该方法不能明确地定义群体行为,并且不能保证队形的稳定性。Fu 等^[60]基于障碍函数设置了编队避碰所需满足的约束条件,并结合其他速度和输入障碍函数约束形成二次规划问题,通过求解该问题实现编队的避碰,但该控制器无法保障在任何初始条件下都实现避碰控制。目前,船舶领域的编队避碰研究相比无人机、机器人等领域还不够成熟,仍处于探索阶段,但避碰是船舶编队安全航行中的关键核心技术,如何结合船舶编队的运动特性和运动环境实现编队避碰方法的设计和应用会成为未来很长一段时间的研究热点。

5 船舶列队协同控制应用

目前列队协同控制方法已被应用于各种场景。

1) NOVIMAR 项目。

2017 年欧盟 NOVIMAR 编队运输项目正式启动,该项目参与者来自 9 个国家的 22 个单位,项目中引入了船舶列车(vessel train, VT)的概念,其原理是通过船舶列队协同运输的方式大幅提高水上运输的经济性,如图 9 所示。由于大型船舶在狭窄水域的运动受限,该项目通过列队协同控制,让小型船舶替代大型船舶在狭窄水域完成多种资源运输成为可能,同时将减小跟随船的人力控制成本^[66]。

该项目中的控制系统采用领航-跟随控制策略,通过领航船控制跟随船,跟随船沿着由领航船定义的航迹航行,并且在控制模式中设置了辅助引导和自动引导。在辅助引导中,列队中跟随



图 9 船舶列车协同运输概念^[66]

Fig. 9 Vessel train concept of coordinated transportation^[66]

船沿着领航船的路径,从而使操作员可以自由地手动引导船舶列队绕过静止物体(图 10(a));在自动引导中,列队作为一个整体遵循一条运动轨迹,领航船中的操纵者可以调控轨迹线的横向偏移(图 10(b)),该轨迹线立即应用于所有跟随船^[66]。图中, LV 表示领航船, FV 表示跟随船。

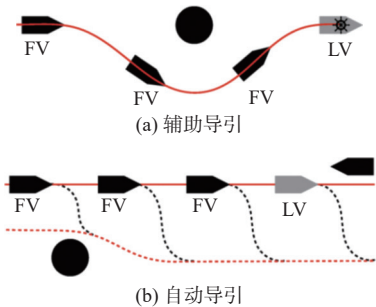
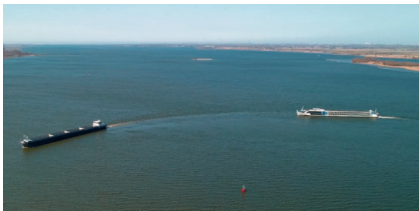


图 10 船舶列车控制策略图^[66]

Fig. 10 Vessel train control strategy^[66]

领航船与跟随船之间的船间距由船舶特性决定,跟随船通过开发的 TrackPilot VT 软件实现对领航船的轨迹追踪。研发团队对其研发的列队协同控制系统进行了实船应用测试,以一艘货船(M/V Oxford)为领航船,一艘客船(M/S Viva Moments)为跟随船,对船舶列车进行了全尺寸演示,演示场景如图 11 所示。通过实船测试证实了列队协同控制技术在内河运输的可行性。



(a) 左视图



(b) 后视图

图 11 船舶列车协同控制系统实验^[66]

Fig. 11 Cooperative control system experiment of vessel train^[66]

2) 多船舶协同系统。

Chen 等^[39] 针对船舶列车问题, 提出了由多艘协调自治船舶组成的多船舶协同系统的概念。该系统的控制结构如图 12 所示。系统中采用了模型预测控制(MPC)方法, 并通过单层串行迭代体

系结构, 减少了通信需求和增强了对故障的鲁棒性。最后, 对一艘从鹿特丹港不同码头驶往内河航道的多船协同 (cooperative multi-vessel, CMV) 系统下的船舶进行了仿真实验, 控制效果如图 13 所示, 仿真试验结果验证了该系统的可行性。

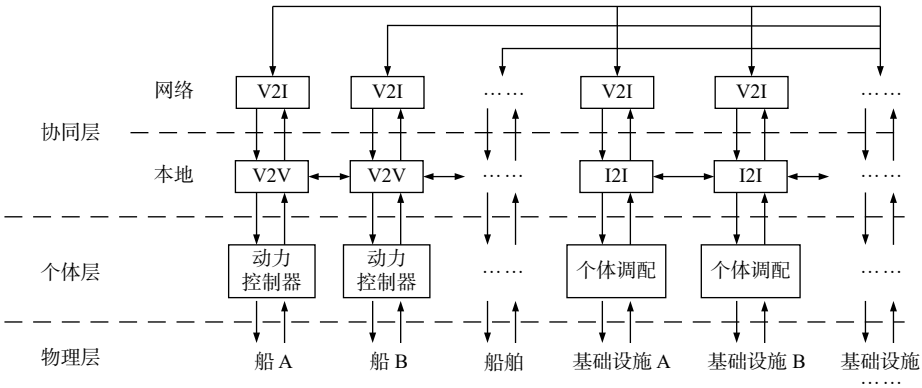


图 12 多船舶协同系统结构^[39]

Fig. 12 Cooperative multi-vessel system structure^[39]

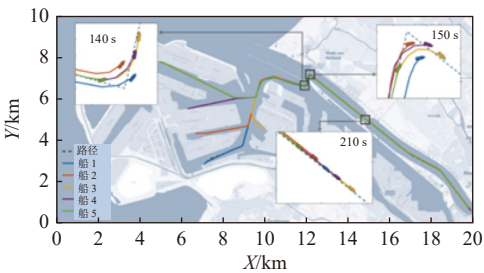


图 13 多船舶协同系统仿真结果^[39]

Fig. 13 Simulation results of cooperative multi-vessel system^[39]

3) 列队协同过闸。

雷超凡等^[67] 将船舶列队协同控制方法应用于船舶自主过闸, 提出了一种考虑个体异质性差异的船舶过闸编队控制方法, 并开发了三维实时仿真平台, 可为未来船闸和其他场景列队协同控制方法的研究提供虚拟仿真验证平台。控制效果和三维实时仿真效果分别如图 14 和图 15 所示。

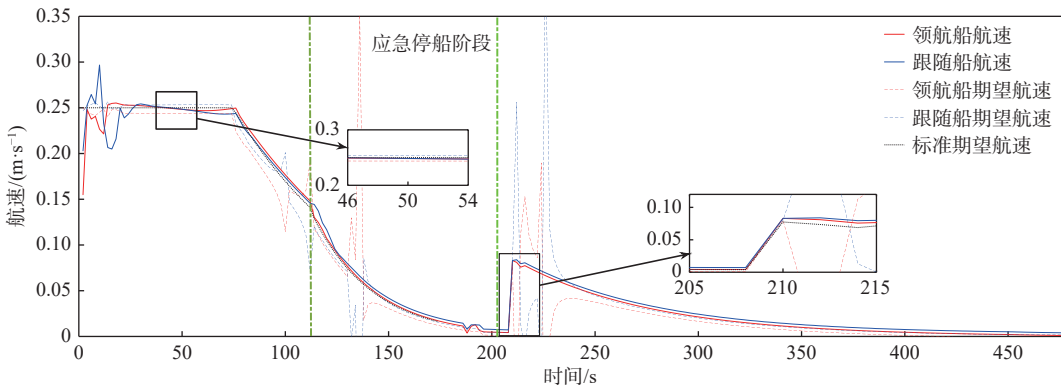


图 14 列队停船仿真结果

Fig. 14 Results of ship platoon stopping



图 15 船闸列队航行三维实时仿真

Fig. 15 3D real-time simulation of ship platoon in the lock

除了列队协同过闸的仿真研究外,由长江三峡通航管理局、长江勘测规划设计研究有限责任公司、武汉理工大学等单位合作开展的三峡-葛洲坝梯级通航运行关键技术与应用项目中,将船舶列队协同控制技术应用于船舶自主过闸的实

际场景,对葛洲坝自主列队协同过闸进行了实船应用测试。开发的列队协同控制系统,系统控制结构如图 16 所示,其测试场景如图 17 所示。测试结果验证了船舶列队协同控制技术在提高船闸通航效率上的可行性。

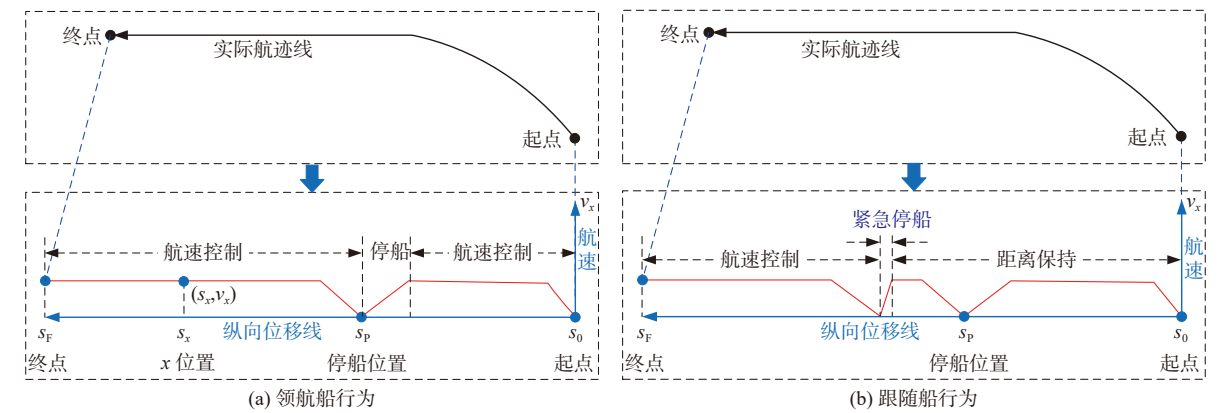


图 16 改进的船舶列队运动控制结构^[8]
Fig. 16 Improved ship platoon motion control structure^[8]

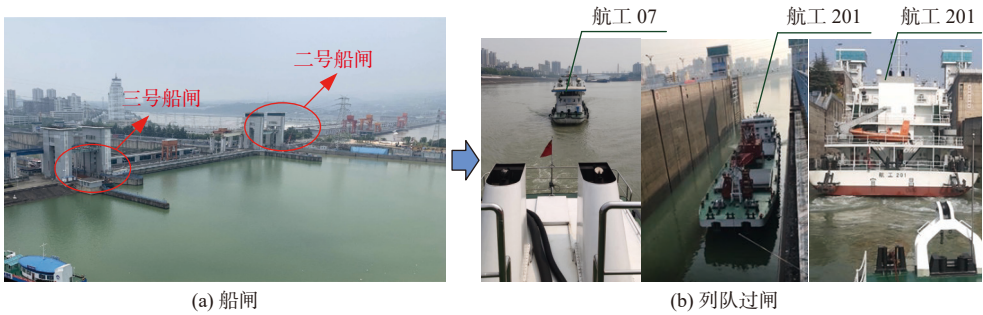


图 17 船舶列队协同控制系统测试场景^[8]
Fig. 17 Test scenarios for ship platoon cooperative system^[8]

6 关键问题分析

纵观国内外研究成果,目前对于船舶列队协同控制的研究大多数具有偏向性,一类是侧重于研究安全、高效的列队船间距模型,另一类是侧重于研究列队船舶的运动控制,很少有研究将两类目标相结合,形成一套系统的列队协同控制方法。其中,涉及的主要问题有人机共驾、系统建模、控制一致性、通信受限等。具体表现在以下几个方面。

1) 人机共驾控制问题。

人机共驾的控制问题,很早便出现在了船舶驾控的研究中,考虑到技术、规范发展历程以及现有的船舶基数,船舶想要完全实现自主无人化还需要很长一段时间^[68]。船舶列队人机共驾中,与人相比,机器在感知与计算方面具有巨大优势,但在列队航行决策、列队状态监督、列队风险评估等决策评估问题方面,无人化技术的可靠性有待验证,人在决策层的智能性高于机器,人、机

的参与度很大程度决定了列队的安全性与经济性,如何合理地分配人与机器在驾控中的角色与权重,利用人机的差异性和互补性提升列队航行的技术效能,是需要解决的关键问题。

2) 列队控制运动不确定性建模问题。

列队协同控制通常出现于内河狭窄河段、船闸、港口和极地冰区等受限水域,水域内的航行环境较为复杂,难以建立精确的列队控制运动数学模型。狭窄河段、船闸以及港口水域通常存在岸壁效应^[69]、浅水效应^[70]等,而极地冰区除了考虑静水阻力外还需考虑冰阻力^[71]等,这些因素均会增加列队船舶运动数学模型建模的难度,同时风、浪、流等外界干扰往往也难以精确建模。此外,列队船舶在高速航行时,前船产生的尾流也会对后船的水动力产生影响;在低速航行时,尚无精确的船舶低速域数学模型。综上,建立精确的列队控制运动模型是当下亟需突破的一个技术难点。

3) 列队协同控制一致性问题。

一致性问题经常出现在多智能体的群体控制

中,通常需要设计各个个体间的局部规则,使整个群体向某种特定的形式或行为演变^[72-73]。针对船舶列队协同控制研究,列队中的船舶通常类型及大小不统一,而不同类型、大小的船舶会存在较大的操纵性差异,当列队船舶在急弯转向或紧急停船时,这种差异可能会造成部分操纵性较差的船舶无法跟上列队队形,导致队形紊乱并发生碰撞风险,大幅增加了一致性控制的难度。因此,如何解决异质船舶列队中的一致性控制问题是未来研究的难点问题。

4) 通信受限下船舶列队鲁棒控制问题。

船舶列队协同航行时,在内河部分航段和极地冰区无法使用移动通信网络,只能通过卫星进行数据传输,可能会出现通信带宽窄、时延大甚至通信中断等情况。根据中国船级社《自主货物运输船舶指南》规定:自主船遥控控制过程中,如通信无法满足遥控要求时,船舶自动回到自主航行状态^[74],会使列队中的跟随船无法对领航船规划的航迹进行跟踪,且无法综合考虑列队中异质性船舶的问题,导致列队队形发生紊乱,甚至产生碰撞的风险。

7 技术展望

针对船舶列队研究中现存的一些问题以及相关领域的新技术和发展趋势,本文对船舶列队协同控制未来的发展方向作出以下展望。

1) 数据与机理驱动融合的列队间距建模。

随着大数据时代的发展,基于数据驱动的建模方法已应用于各个领域^[75-77],其具有灵活、易实现的优点,能降低模型的复杂度,在船舶列队船间距建模方面有着较好的应用前景。当前列队船间距机理建模的复杂度和非线性程度较高,经验模型缺少可靠性分析,均难以应用于实际船舶列队协同控制。未来可对机理模型与经验模型进行融合处理,将机理模型中较高非线性项进行简化,并通过数据进行拟合,构建非线性较低的基于数据驱动和机理融合的列队间距模型,使其能更好地服务于列队协同控制。

2) 基于分层控制的船舶列队协同控制。

车辆的列队协同控制通常采用分布式控制策略将列队协同控制问题转换为车辆跟驰问题,通过分层控制实现车辆的运动控制^[78]。分层控制的优点在于各模块控制目标明确,有利于控制器参数的调整以及系统整体的调试,将分层控制应用于船舶列队协同控制系统,可以对列队协同控制中不同的部分设计各自相适应的控制算法,从而

融合它们的优点,实现更为精确的列队协同控制。例如,船舶的船间距模型和几何运动模型精度较高且复杂程度较低,可采用基于模型的控制算法计算得到期望的船舶加速度;船舶的动力学模型通常较为复杂且不确定因素较多,难以精确建模,可采用不基于模型的控制算法计算得到船舶控制指令,通过分层控制的方式发挥它们各自的优势,从而实现更加精确的列队协同控制,其控制原理如图 18 所示。但分层控制同样存在一定的缺陷,例如下层控制器通常存在一定的时滞性,因此,如何对其进行估测补偿也是未来的研究方向之一。

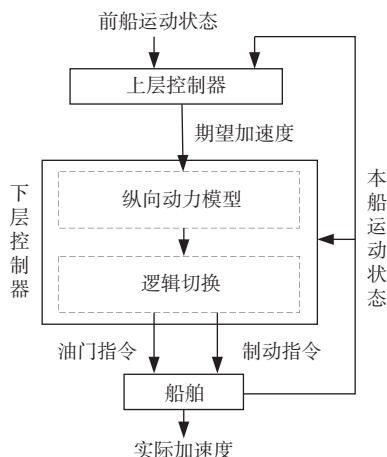


图 18 船舶列队分层控制原理

Fig. 18 Hierarchical control principle of ship platoon

3) 基于生物群体机制的船舶列队控制。

仿生群体智能在交通领域的应用已成为当下一大研究热点,有部分学者将其应用于智能体编队研究中。例如,周子为等^[79]研究了雁群编队飞行的上洗气流节约体力的原理,将其应用于无人机编队,降低了飞行器集群飞行的能耗。杨之元等^[80]利用莱维飞行鸽群优化算法,使无人机编队控制具有更强的快速性和稳定性。列队作为编队的一种特殊形式,其同样可进行仿生算法的应用研究,例如,田大新等^[81]将鱼群集群行为机制引入车辆群体列队顶层控制中,提高了车辆列队效率。

8 结 语

本文针对船舶列队协同控制方法进行了研究。首先,从船-岸协同交互、列队控制模型、列队运动控制、列队典型应用等 4 个方面进行了详细综述。然后,对船舶列队协同控制方法所面临的挑战进行了分析与梳理,认为其仍具有人机共驾控制、列队控制运动不确定性建模、列队协同控制一致性、通信受限下的船舶列队鲁棒控制及一致性控制等问题亟待解决。最后,对船舶列队

协同控制方法未来的发展进行了技术展望, 可结合数据驱动与机理融合建模、分层控制、仿生控制等先进技术进行更深的研究拓展。

参考文献:

[1] 柳晨光, 初秀民, 吴青, 等. USV 发展现状及展望 [J]. 中国造船, 2014, 55(4): 194–205.
LIU C G, CHU X M, WU Q, et al. A review and prospect of USV research[J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(4): 194–205 (in Chinese).

[2] 侯瑞超, 唐智诚, 王博, 等. 水面无人艇智能化技术的发展现状和趋势 [J]. 中国造船, 2020, 61(增刊 1): 211–220.
HOU R C, TANG Z C, WANG B, et al. Development status and trend of intelligent technology for unmanned surface vehicles[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61 (Supp 1): 211–220 (in Chinese).

[3] 彭周华, 吴文涛, 王丹, 等. 多无人艇集群协同控制研究进展与未来趋势 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 51–64, 82.
PENG Z H, WU W T, WANG D, et al. Coordinated control of multiple unmanned surface vehicles: recent advances and future trends[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 51–64, 82 (in Chinese).

[4] COLLING A, HEKKENBERG R. Waterborne platooning in the short sea shipping sector[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 120: 102778.

[5] 百度百科. 苏伊士运河 [EB/OL]. [2022-06-15]. <https://baike.baidu.com/item/%E8%8B%8F%E4%BC%8A%E5%A3%AB%E8%BF%90%E6%B2%B3/312602?fr=aladdin>.
Baidu Encyclopedia. Suez canal[EB/OL]. [2022-06-15]. <https://baike.baidu.com/item/%E8%8B%8F%E4%BC%8A%E5%A3%AB%E8%BF%90%E6%B2%B3/312602?fr=aladdin> (in Chinese).

[6] 大西北. 盘点世界最强破冰船 (高清组图)[EB/OL]. (2014-01-07)[2022-06-15]. <http://www.dxbei.com/photo/shishi/20140107/108451.html>.
Great Northwest. Inventory of the world strongest icebreaker[EB/OL]. (2014-01-07)[2022-06-15]. <http://www.dxbei.com/photo/shishi/20140107/108451.html> (in Chinese).

[7] 江苏省交通运输厅. 张家港船闸单日船舶放行量连创新高 [EB/OL]. (2021-08-15)[2022-06-15]. http://jtyst.jiangsu.gov.cn/art/2021/8/5/art_41987_9963113.html.
Jiangsu Provincial Department of Transportation. The single-day ship release volume of Zhangjiagang Ship Lock has reached a new high[EB/OL]. (2021-08-15) [2022-06-15]. http://jtyst.jiangsu.gov.cn/art/2021/8/5/art_41987_9963113.html (in Chinese).

[8] LIU C G, QI J L, CHU X M, et al. Cooperative ship formation system and control methods in the ship lock waterway[J]. Ocean Engineering, 2021, 226: 108826.

[9] 何良德, 姜晔, 殷兆进, 等. 内河船舶跟驰间距模型 [J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 55–62, 86.
HE L D, JIANG Y, YIN Z J, et al. Following distance model of inland ship[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 55–62, 86 (in Chinese).

[10] 李瀛, 张玮. 基于停船视距的船舶领域模型研究 [J]. 水运工程, 2014(1): 36–40.
LI Y, ZHANG W. On model about ship domain based on stopping sight distance[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(1): 36–40 (in Chinese).

[11] 明力, 刘敬贤, 王先锋. 超大型船舶安全纵向间距计算模型 [J]. 中国航海, 2014, 37(4): 40–43.
MING L, LIU J X, WANG X F. Calculation model of safe longitudinal distance for very large vessels[J]. Navigation of China, 2014, 37(4): 40–43 (in Chinese).

[12] LEE C K, LEE S G. Investigation of ship maneuvering with hydrodynamic effects between ship and bank[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(6): 1230–1236.

[13] 朱俊, 张玮. 基于跟驰理论的内河航道通过能力计算模型 [J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(5): 83–87.
ZHU J, ZHANG W. Calculation model of inland waterway transit capacity based on ship-following theory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(5): 83–87 (in Chinese).

[14] 龚非. 基于跟驰理论的单向编队通航研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
GONG F. The study of single direction ships formation based on ship-following theory[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018 (in Chinese).

[15] ZHANG M Y, ZHANG D, FU S S, et al. Safety distance modeling for ship escort operations in Arctic ice-covered waters[J]. Ocean Engineering, 2017, 146: 202–216.

[16] ZHANG W B, ZOU Z Y, WANG J, et al. Multi-ship following operation in ice-covered waters with consideration of inter-ship communication[J]. Ocean Engineering, 2020, 210: 107545.

[17] 张伟, 王乃新, 魏世琳, 等. 水下无人潜航器集群发展现状及关键技术综述 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 289–297.
ZHANG W, WANG N X, WEI S L, et al. Overview of unmanned underwater vehicle swarm development status and key technologies[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(2): 289–297 (in Chinese).

[18] NOMOTO K, TAGUCHI K, HONDA K, et al. On the steering qualities of ships[J]. Journal of Zosen Kiokai, 1956(99): 75–82.

[19] NORRBIN N H. Theory and observations on the use of a mathematical model for ship manoeuvring in deep and confined waters[C]//Proceedings of the 8th Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena: ONR, 1970.

[20] BAI W W, REN J S, LI T S. Modified genetic optimization-based locally weighted learning identification mod-

- eling of ship maneuvering with full scale trial[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2019, 93: 1036–1045.
- [21] WANG Z H, XU H T, XIA L, et al. Kernel-based support vector regression for nonparametric modeling of ship maneuvering motion[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 216: 107994.
- [22] UENO M, YOSHIMURA Y, TSUKADA Y, et al. Circular motion tests and uncertainty analysis for ship maneuverability[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2009, 14(4): 469–484.
- [23] YASUKAWA H. Maneuvering hydrodynamic derivatives and course stability of a ship close to a bank[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 188: 106149.
- [24] YASUKAWA H, HASNAN M A A, MATSUDA A. Validation of 6-DOF motion simulations for ship turning in regular waves[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2021, 26(4): 1096–1111.
- [25] 王建华, 万德成. 船舶操纵运动 CFD 数值模拟研究进展[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(5): 813–824.
- WANG J H, WAN D C. CFD simulations of ship maneuvering motion[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(5): 813–824 (in Chinese).
- [26] 冀楠, 钱志鹏, 李浩然, 等. 实尺度船舶 Z 形操纵运动及流场特性模拟[J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(3): 93–101.
- JI N, QIAN Z P, LI H R, et al. Simulation of zigzag maneuver and flow field characteristics for full-scale ship[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(3): 93–101 (in Chinese).
- [27] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. [S.L.]: John Wiley & Sons, 2011.
- [28] 李学忠, 张冰, 李文秀. 船舶控制模型的建立及仿真[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 1996, 17(4): 14–19.
- LI X Z, ZHANG B, LI W X. Modeling and simulation of ship control system[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 1996, 17(4): 14–19 (in Chinese).
- [29] HOLZHÜTER T. Robust identification scheme in an adaptive track-controller for ships[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 1990, 23(1): 461–466.
- [30] ABKOWITZ M A. Measurement of hydrodynamic characteristics from ship maneuvering trials by system identification[M]. Washington: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1980.
- [31] YOON H K, RHEE K P. Identification of hydrodynamic coefficients in ship maneuvering equations of motion by estimation-before-modeling technique[J]. *Ocean Engineering*, 2003, 30(18): 2379–2404.
- [32] LUO W L, LI X Y. Measures to diminish the parameter drift in the modeling of ship manoeuvring using system identification[J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 67: 9–20.
- [33] 谢朔, 初秀民, 柳晨光, 等. 基于改进 LSSVM 的船舶操纵运动模型在线参数辨识方法[J]. *中国造船*, 2018, 59(2): 178–189.
- XIE S, CHU X M, LIU C G, et al. Online parameter identification method for ship maneuvering models based on improved LSSVM[J]. *Shipbuilding of China*, 2018, 59(2): 178–189 (in Chinese).
- [34] ZHU M, HAHN A, WEN Y Q, et al. Optimized support vector regression algorithm-based modeling of ship dynamics[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 90: 101842.
- [35] DAI S L, HE S D, LIN H, et al. Platoon formation control with prescribed performance guarantees for USVs[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(5): 4237–4246.
- [36] LIANG X L, XU C, WANG D S, et al. Adaptive neural network control for marine surface vehicles platoon with input saturation and output constraints[J]. *AIMS Mathematics*, 2020, 5(1): 587–602.
- [37] LIANG X L, ZHANG Y X, YANG G T. Platoon control design for unmanned surface vehicles subject to input delay[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1481.
- [38] WANG D S, FU M Y, GE S S, et al. Velocity free platoon formation control for unmanned surface vehicles with output constraints and model uncertainties[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(3): 1118.
- [39] CHEN L Y, HOPMAN H, NEGENBORN R R. Distributed model predictive control for vessel train formations of cooperative multi-vessel systems[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 92: 101–118.
- [40] CHEN L Y, HASELTALAB A, GAROFANO V, et al. Eco-VTF: fuel-efficient vessel train formations for all-electric autonomous ships[C]//2019 18th European Control Conference (ECC 2019). Naples, Italy: IEEE, 2019: 2543–2550.
- [41] HUANG C F, ZHANG X K, ZHANG G Q, et al. Robust practical fixed-time leader-follower formation control for underactuated autonomous surface vessels using event-triggered mechanism[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 233: 109026.
- [42] SUN Z J, ZHANG G Q, LU Y, et al. Leader-follower formation control of underactuated surface vehicles based on sliding mode control and parameter estimation[J]. *ISA Transactions*, 2018, 72: 15–24.
- [43] LIU L, WANG D, PENG Z H, et al. Modular adaptive control for LOS-based cooperative path maneuvering of multiple underactuated autonomous surface vehicles[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(7): 1613–1624.
- [44] WU W T, PENG Z H, LIU L, et al. A general safety-certified cooperative control architecture for interconnected intelligent surface vehicles with applications to vessel train[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022. doi: 10.1109/TIV.2022.3168974.
- [45] 田勇, 王丹, 彭周华, 等. 无人水面艇直线航迹跟踪控制器的设计与验证[J]. *大连海事大学学报*, 2015, 41(4):

- 14–18.
- TIAN Y, WANG D, PENG Z H, et al. Design and validation of path tracking controller for USV along straight-lines[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2015, 41(4): 14–18 (in Chinese).
- [46] LI T S, ZHAO R, CHEN C L P, et al. Finite-time formation control of under-actuated ships using nonlinear sliding mode control[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(11): 3243–3253.
- [47] DO K D. Practical formation control of multiple under-actuated ships with limited sensing ranges[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, 59(6): 457–471.
- [48] SHOJAEI K. Leader-follower formation control of under-actuated autonomous marine surface vehicles with limited torque[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 105: 196–205.
- [49] WANG N, QIAN C J, SUN J C, et al. Adaptive robust finite-time trajectory tracking control of fully actuated marine surface vehicles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(4): 1454–1462.
- [50] 王巍, 王丹, 彭周华. 不确定非线性多智能体系统的分布式容错协同控制[J]. *控制与决策*, 2015, 30(7): 1303–1308.
- WANG W, WANG D, PENG Z H. Fault-tolerant control for synchronization of uncertain nonlinear multi-agent systems[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(7): 1303–1308 (in Chinese).
- [51] 周卫东, 刘一萌, 查羊羊. 抗时滞无人艇编队队形控制及变换[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2019, 40(11): 1865–1869.
- ZHOU W D, LIU Y M, ZHA Y Y. Anti-time-delay unmanned surface vehicle formation control and transformation[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2019, 40(11): 1865–1869 (in Chinese).
- [52] MAHMOOD A, KIM Y. Decentralized formation flight control of quadcopters using robust feedback linearization[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2017, 354(2): 852–871.
- [53] HUANG C F, ZHANG X K, ZHANG G Q. Adaptive neural finite-time formation control for multiple under-actuated vessels with actuator faults[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 222: 108556.
- [54] HUANG C F, ZHANG X K, ZHANG G Q. Improved decentralized finite-time formation control of underactuated USVs via a novel disturbance observer[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 174: 117–124.
- [55] 张浩. 多智能体系统分布式编队及其最优控制算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- ZHANG H. Research on the distributed formation control and optimization of multi-agent system[D]. Xi'an: Xidian University, 2019 (in Chinese).
- [56] 吴文祥, 初秀民, 柳晨光, 等. 基于模型预测控制的船舶纵向航速协同控制方法[J]. *交通信息与安全*, 2021, 39(1): 52–63.
- WU W X, CHU X M, LIU C G, et al. A coordinated control method of longitudinal ship speed based on model predictive control[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2021, 39(1): 52–63 (in Chinese).
- [57] 雷超凡, 初秀民, 柳晨光, 等. 船闸水域船舶列队协同停船预测控制器[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(4): 421–431.
- LEI C F, CHU X M, LIU C G, et al. Predictive controller of cooperative docking for ship platoon in lock waterway[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(4): 421–431 (in Chinese).
- [58] NEGENBORN R R, MAESTRE J M. Distributed model predictive control: an overview and roadmap of future research opportunities[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2014, 34(4): 87–97.
- [59] GAO Y L, XIA Y Q, DAI L. Cooperative distributed model predictive control of multiple coupled linear systems[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(17): 2561–2567.
- [60] FU J J, WEN G H, YU X H, et al. Distributed formation navigation of constrained second-order multiagent systems with collision avoidance and connectivity maintenance[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(4): 2149–2162.
- [61] PENG Z H, WANG D, LI T S, et al. Output-feedback cooperative formation maneuvering of autonomous surface vehicles with connectivity preservation and collision avoidance[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 50(6): 2527–2535.
- [62] YAN X, JIANG D P, MIAO R L, et al. Formation control and obstacle avoidance algorithm of a multi-USV system based on virtual structure and artificial potential field[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(2): 161.
- [63] SUN X J, WANG G F, FAN Y S, et al. A formation collision avoidance system for unmanned surface vehicles with leader-follower structure[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 24691–24702.
- [64] HE S D, WANG M, DAI S L, et al. Leader-follower formation control of USVs with prescribed performance and collision avoidance[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(1): 572–581.
- [65] FAN J J, LIAO Y L, LI Y, et al. Formation control of multiple unmanned surface vehicles using the adaptive null-space-based behavioral method[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 87647–87657.
- [66] NOVIMAR VESSELTRAIN, NOVIMAR video showcase[EB/OL]. [2022-06-15]. <https://vimeo.com/showcase/novimar>.
- [67] 雷超凡. 异质船舶编队过闸协同控制方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
- LEI C F. Research on cooperative control method of heterogeneous ship formation passing through lock[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.

- [68] 王远渊, 刘佳仑, 马枫, 等. 智能船舶远程驾驶控制技术研究现状与趋势[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 18–31.
WANG Y Y, LIU J L, MA F, et al. Review and prospect of remote control intelligent ships[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 18–31 (in Chinese).
- [69] 杨韵. 考虑岸壁效应的船舶操纵运动数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
YANG Y. Numerical simulation of ship maneuvering considering riverside effect[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018 (in Chinese).
- [70] 童思陈, 唐小娅, 张欢. 基于非均匀流浅水效应的船舶操纵建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(3): 866–872.
TONG S C, TANG X Y, ZHANG H. Modeling and simulation of ship maneuvering motion based on non-uniform flow and shallow water effect[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(3): 866–872 (in Chinese).
- [71] 陈锐, 黄武刚, 陈晓璐, 等. 破冰船连续破冰的冰阻力预报[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(5): 101–108, 120.
CHEN R, HUANG W G, CHEN X L, et al. Prediction of ice resistance of icebreaker during continuous icebreaking[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(5): 101–108, 120 (in Chinese).
- [72] 徐利伟. 智能网联汽车队列成形控制及队列稳定性研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
XU L W. Formation control and stability analysis of connected and automated vehicle platoon[D]. Nanjing: Southeast University, 2019 (in Chinese).
- [73] 王祥科, 李迅, 郑志强. 多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J]. *控制与决策*, 2013, 28(11): 1601–1613.
WANG X K, LI X, ZHENG Z Q. Survey of developments on multi-agent formation control related problems[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(11): 1601–1613 (in Chinese).
- [74] 中国船级社. 自主货物运输船舶指南2018[R/OL] (2018-08-30)[2022-06-15]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/specialDetail?id=201900001000008786>.
China Classification Society. Guidelines for autonomous cargo ships[R/OL]. (2018-08-30)[2022-06-15]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/specialDetail?id=201900001000008786>. (in Chinese)
- [75] 甘少君. 数据驱动的内河限制性单向航道船舶调度模型及方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
GAN S J. Study on data-driven vessel scheduling model and method for restricted one-way inland waterway transportation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017 (in Chinese).
- [76] 鲁斌. 基于数据驱动方法的车辆跟驰行为建模与分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
LU B. Modeling and analysis of car-following behavior using data-driven methods[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese).
- [77] 曾贲, 房霄, 孔德帅, 等. 一种数据驱动的对抗博弈智能体建模方法[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(12): 2838–2845.
ZENG B, FANG X, KONG D S, et al. A data-driven modeling method for game adversity agent[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(12): 2838–2845 (in Chinese).
- [78] 杨龙海, 张春, 仇晓赟, 等. 车辆跟驰模型研究进展[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(5): 125–138.
YANG L H, ZHANG C, QIU X Y, et al. Research progress on car-following models[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(5): 125–138 (in Chinese).
- [79] 周子为, 段海滨, 范彦铭. 仿雁群行为机制的多无人机紧密编队[J]. *中国科学: 技术科学*, 2017, 47(3): 230–238.
ZHOU Z W, DUAN H B, FAN Y M. Unmanned aerial vehicle close formation control based on the behavior mechanism in wild geese[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, 47(3): 230–238 (in Chinese).
- [80] 杨之元, 段海滨, 范彦铭. 基于莱维飞行鸽群优化的仿雁群无人机编队控制器设计[J]. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48(2): 161–169.
YANG Z Y, DUAN H B, FAN Y M. Unmanned aerial vehicle formation controller design via the behavior mechanism in wild geese based on Levy flight pigeon-inspired optimization[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2018, 48(2): 161–169 (in Chinese).
- [81] 田大新, 康璐. 基于鱼群效应的无人驾驶车辆编队算法研究[J]. *无人系统技术*, 2018, 1(4): 62–67.
TIAN D X, KANG L. Research on algorithm of unmanned vehicle formation based on fish school[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2018, 1(4): 62–67 (in Chinese).