

极地邮轮动力技术研究综述

周 晖, 邵朱芸, 童曙康, 吴启航, 余思远

上海海事大学, 上海

收稿日期: 2022年9月7日; 录用日期: 2022年10月10日; 发布日期: 2022年10月17日

摘 要

针对国内首艘极地邮轮的动力系统特点, 整理国内外极地邮轮动力技术和性能研究进展。根据已有极地邮轮及其他极地船只的动力技术特点进行介绍和分析, 介绍各种的特点及各种试验方法, 展望未来极地邮轮动力技术发展方向。

关键词

极地, 动力技术, 性能, 发展方向

The Review of Polar Cruise Power Technology Research

Hui Zhou, Zhuyun Shao, Shukang Tong, Qihang Wu, Siyuan Yu

Shanghai Maritime University, Shanghai

Received: Sep. 7th, 2022; accepted: Oct. 10th, 2022; published: Oct. 17th, 2022

Abstract

Aiming at the characteristics of the power system of the first polar cruise in China, the research progress of the power technology and performance of polar cruise at home and abroad is sorted out. According to the existing polar cruise and other polar ships of the dynamic technology characteristics of the introduction and analysis, this paper introduces various characteristics and various test methods, looking forward to the future development direction of polar cruise power technology.

Keywords

Polar, Power Technology, Performance, Direct Development

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着技术的推进和客户的需求的提升, 邮轮公司迫切需求邮轮能够将游客带到南北极区域, 并能进行一定的探索游玩能力。提高极地船只在有冰海域进行通航的能力, 需要设备制造厂商提供确实有效应对额外的风险的动力设备。动力设备需满足《极地规则》中“在潜在的恶劣环境中增加船舶操作安全和降低对人和环境的影响”的要求, 使得船只可以在结冰的极地水域独立航行。

在上述市场需求和规范要求下, 各大国际动力设备供应商及国内外高校, 针对极地环境特点和需求, 对极地动力技术的系统设备研发和理论基础探索进行了进一步的探索, 本文将从具体机电设备和实验理论研究两个方面针对国内外的发展和研究进行梳理。

2. 国外技术设备及理论研究现状

2.1. 技术设备现状

欧美国家在极地探索和开发上起步较早, 在完成了多方面的实验数据和技术开发后, 现在已经具备了强大的设备制造能力, 在动力技术方面表现的尤为突出。在各项动力技术中, 欧美国家其典型代表就是吊舱式推进器的诞生和发展。

吊舱式推进器在以下几个方面有着其突出的优点: 从原理而言, 推进装置的一体式, 在提高燃油效率的同时, 也可以将电力推进系统的优势发挥至最大; 从环保而言, 电力推进的方式, 有效减少氮化物的排放量, 环境得到大力保护; 从减噪角度而言, 该推进器无艉轴, 优化水动力性能, 有效减少空泡效应, 使得因为螺旋桨的振动而产生的噪音相对应的有所减少; 从设计而言, 推进器的尺寸小于传统规格, 重量更轻, 增加了设计的自由度和灵活性, 为船舱增加了使用体积, 也有助于船舶的轻量化设计; 从建造而言它取代了常规的繁琐复杂的浆舵机模式。集成控制与推进, 可独立制造, 方便安装, 缩短工时; 从操控而言, 通过矢量推进的方式, 可以在转弯时所需要的半径更小, 提高了船舶的机动性, 增加停泊和离开港口的安全性, 也可以增大港口的工作效率, 尤其狭窄水域下船舶密集的港口处, 更能够体现出其操控的优势。

20 世纪 90 年代开始, 欧美国家已经在实践中将吊舱推进器进行技术研究并得到广泛应用, ABB 吊舱式全电力推进系统、Rolls-Royce Meimaid 吊舱式推进器、西门子-肖特尔特吊舱式双螺旋桨推进系统等已成功地在豪华邮轮、专用邮轮、破冰船等众多船型上得到一致认可。

Azipod, SSP 和 Meimaid, 这三种推进装置基本概念相同, 但在吊舱的水动力特性设计、螺旋桨设计、推进电机的形式以及变频方式等方面也各有所不同。相关技术设备及基本特点见表 1。

但是, 吊舱推进器也存在着部分缺点: 首先是在噪声方面, 虽然有效降低螺旋桨所引发的声音, 但是在船舱外的电机也引发噪声; 其次, 是电机的位置处于水中, 会在一定程度上增加辐射; 最后, 虽然增加了船舶的操控性, 但是船舶在直线行驶时, 稳定性有所下降, 从而更易产生大幅度的横摇等[1]。

2.1.1. Azipod 吊舱式推进方式

由 ABB 首次引进了吊舱推进器这一概念, 此后全球各国开始推进对于吊舱推进器的研究, Azipod 吊舱式的推进装置利用空气对电动机进行冷却, 即利用空气进行循环的空隙, 采用封闭的冷却系统, 热交换器安放在舱内, 在大型的吊舱内设有通往舱内的通道, 可以不必在干坞时装卸, 轴封和轴承可以由

Table 1. Common pod thruster models and performance tables**表 1.** 常见吊舱式推进器型号及性能表

型号	公司	功率范围 (MW)	主要技术特点
Azipod	ABB	5~28	小功率推进器, 永磁技术, 电动机尺寸缩减, 水冷方式减小电动机直径, 双桨对转。水动力特性、燃油效率、可靠性冗余度更高。
Mermaid	罗尔斯·罗伊斯 - 阿尔斯通联合开发	5~25	利用海水冷却, 减小吊舱体积, 提高推进效率。其螺旋桨和吊舱均可在水下调换。
SSP	西门子、Schottell 联合开发	5~20	电机的定子和转子带动对转的双桨, 永磁电动机, 内外水冷却系统。

潜水员在吊舱外面进行更换。在变频控制技术方面, Azipod 系统一般采用交交变频器和直接转矩控制方法来实现对推进电机的调速。该推进方式在 1990 年正式开始在船上进行使用; 截止到 2018 年累积航行作业时间超过 1500 万小时, 可靠性达 99.8%; 60+艘冰级船只安装了该型号推进器, 共计安装 140+套推进器, 没有出现因冰造成的使用事故。

Azipod 吊舱推进器专为冰区航行及破冰设计, 该推进器针对不同船只大小提供了 2~17 MW 功率的动力性能, 满足航行控制需求。同时 ABB 也能为该系列推进器提供配套控制系统、电力系统及变速及配电系统等, 实现集成化作业。增加了整船设计灵活性, 同时延长了整船及动力系统使用寿命。

相比于常规的浆舵推进器, Azipod 型推进器能够提供多达 150% 的侧向推力, 使得船只在全速状态下减少 38% 的回转半径(相同条件下, 部分实船数据表明常规浆舵推进器回转半径超过 350 m, 而 Azipod 型推进器不超过 250 m), 同时满足全航向控制和紧急制动距离降低 50% (以上数据根据 ABB 官网相关推进器型号数据换算对比所得)。同时电力推进能满足提供合适的扭矩(尤其是厚冰层工况下的全回转扭矩, 机械设计满足更高的能量转换效率), 实现操控动态响应、低冗余和动力定位功能。推进器结构强度满足破冰要求, 同时避免破冰过程中产生共振。

较常规的推进系统来说, 采用 Azipod CRP 系统可将功率的消耗降低 11.4%。Atlar 研究表面通过将吊舱推进器与喷水推进进行结合使用, 此方法可以将两者的优点发货, 也能在高速航行时发挥喷水推进的优势。该型推进器在多个极地邮轮中得到使用, 例如 Scenic Eclipse 号自称世界上第一艘极地探险型游艇, 全长 168 m, 排水量达到 22,498 吨, 最大载客量 228 人, 为保障游艇能够在极地水域中航行, 该艇搭载了 ABB 公司 2015 年推出的 Azipod 系列最新推进器(Crystal Cruise 公司的 Endeavor 系列极地邮轮也同样搭载了该款推进器)(图 1)。

**Figure 1.** Scenic Eclipse and the Azipod type thruster system**图 1.** Scenic Eclipse 号及其使用的 Azipod 推进系统

作为 ABB 公司的旗舰产品, Azipod 型推进器满足极地多种船只的航行需求, 除上述的极地邮轮外, 该系列推进器还在第一艘 LNG 动力破冰船(PC4 级)、中国极地科考船雪龙 2 号(PC3 级)和 Shturman Al-banov 号北极极地油轮等多个极地船型上加以应用, 可见其成熟的产品设计已经满足实际需求。

2.1.2. Mermaid (美人鱼型)吊舱式推进方式

由罗·罗和阿尔斯通公司联合研发的 Mermaid 吊舱推进器, 与 ABB 旗下的 Azipod 吊舱推进器有相类似之处, 船只在使用了这一类推进系统后, 可以增加结构空间或者减少船舶尺寸(相应的提高了经济性); 降低了发电机组总装机容量, 从而减少了燃料总消耗及总排放量, 增加了环保性; 另一大优势为在维修期间, 不影响船舶的正常航行, 维修人员通过特定装备可进入内部进行修理以及日常维护, 与传统的需要进入船坞相比, 大幅增加船舶的运营效率。Mermaid 推进器的电机, 其固定的特殊方式, 可达到利用海水对零部件进行对流冷却, 节省能耗的同时提高效率。

Mermaid 的推进系统采用的是交直交变频器来实现对推进电机的调速, 优点是与大功率异步电动机有着良好的配合, 与采用交交变频器的电力推进系统相比, 更备有高效率、低噪声和小震动的优点。该型推进器采用大侧斜定距螺旋桨, 优化了减振降噪; 桨叶可以为整体式, 亦可单个螺栓固定, 模块化设计, 简化了机械安装过程, 即使出现损坏, 更换也方便。环保型防海水密封, 防止油污进入海水, 并可进行水下安装。针对极地航行要求做了冰区加强设计, 可以满足南北极的恶劣海况, 满足 IACS PC1-6 级要求, 具体参数见表 2。

Table 2. Mermaid (mermaid type) pod thruster system parameter table

表 2. Mermaid (美人鱼型)吊舱推进系统参数表

型号	850	960	1080	1230	1380	1570
最大推力 (KW)	1550 1850	2100 2500	2750 3200	3700 4300	4750 5400	5900 6700
螺旋桨直径 (m)	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4
转速 (rpm)	255 305	220 265	195 230	175 230	160 180	145 165
高度 (mm)	3250	3750	4300	4850	5400	5950
重量 (t)	29	37	50	65	85	110

2.1.3. SSP 吊舱式推进方式

西门子和肖特尔公司联合开发 Siemens Schottel Propulsor 推进装置, 它包括一个可全回转水下装置, 内设一个永磁电机, 直接连接到两个螺旋桨上, 一前一后且朝同一方向转动设计。双螺旋桨的使用通过减少每个单独螺旋桨的负载来提高效率, 同时来自拖拉机螺旋桨的旋转能量作为升力和向前推力回收, 产生从吊舱成角度的一对水翼鳍效率, 见图 2。SSP 吊舱推进器由于最初设计开发永磁式同步电动机是作为潜艇的动力部件, 因此电动机的结构紧凑。和传统的同步电动机相比同样功率的 Permasyn 电动机直径可减少 40%, 重量可减少 15%。

2.2. 试验及理论研究现状

欧美国家在动力设备上的技术优势来源于其对理论和实验的长期研究准备, 全球各国也成立学术机构为探索新推进器的各项性能建立测试系统[2]。

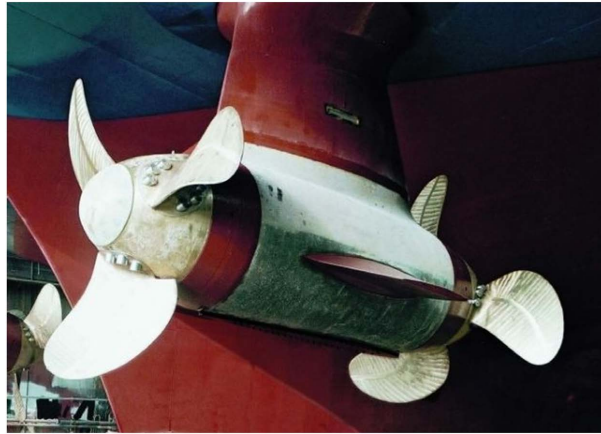


Figure 2. SSP system equipment diagram
图 2. SSP 系统设备图

芬兰技术与研究中心与荷兰 MARIN, 在试验池中对转螺旋桨吊舱式混合动力推进系统进行大量的船舶试验, 并进行压力波动试验和气穴试验。进行以下的研究项目: 船舶的推进效率所受功率分配的影响、船体的压力波动和水动力特性、不同情况下桨叶和吊舱式推进器的空泡气蚀等。2004 年, Newcastle 大学的 Friesch J [3] 等人, 研究吊舱压力在不同转角下的变化, 得到吊舱推进器的空泡特性与叶片的载荷以及螺旋桨的选择方向有关联。2004 年之后, MIT 的 Stettler [4] 分成稳态和非稳态两种情况下, 分别对吊舱推进器在操纵方面的动力特性进行研究, 获得操纵力对于小型船舶的影响。2006 年, 加拿大的 Islam [5] 针对不同形式的吊舱在固定转角的敞水性能进行了研究。通过实际测量吊舱和实验船的力和力矩, 指出位移、轴向力和测量力均为方位角复杂函数。

除了大量的实验研究外, 国外也进行了很多的数值计算研究。Krasilnikov [6] 回顾前人所研究的方法以及结论, 指出大多的研究方法主要是为了得到吊舱推进器的推进特性。Knnas [7] 为模拟吊舱螺旋桨的空泡, 采用边界单元法进行模拟, 并采用有限体积法进一步获取螺旋桨在尾流处的流场情况。Hassan [5] 设想一种计算方法以预测得到推进器的水动力特性, 并且通过 Azipod 实例进行验证, 预测效果也非常接近实际模拟。Islam [5] 等人分析吊舱推进器的推进性能所几何形状的影响, 通过大量实验筛选得到五个关键参数, 并将参数进行组合优化实验, 使参数最优化。瑞典查尔莫斯理工大学的 Bergh L [8] 通过研究 Azipod 和 Mermaid 推进器, 总结电力系统在吊舱中的发展现况和设计, 为相关技术的发展做出了有效总结。

3. 国内技术研究现状

相比于国外的大量动力设备及实际应用, 在动力技术方面国内对船舶动力优化主要集中先进行数值计算和实验模拟, 之后优化线型和通过增加附加体的方式来提高水动力性能。

3.1. 水动力性能研究

吊舱水动力性能方面的研究包括了试验方法和数值模拟, 通过试验和模拟得到一系列良好的型线数据, 再利用这些数据进行阻力和性能的改善。水动力性能研究方法归纳, 见图 3。

曹梅亮[9]等人通过大量实验验证得到, 吊舱推进器由于吊舱的作用可以将螺旋桨的敞水效率大幅上升。对于附体阻力较大的双桨船而言更有优势; 韩芸[10]等人采用 CFD 与模型混合的试验比较, 分析吊舱推进器在单元桨与整体单元方面的敞水性, 得出吊舱推进器舱体、支架等对敞水性能的影响, 所得

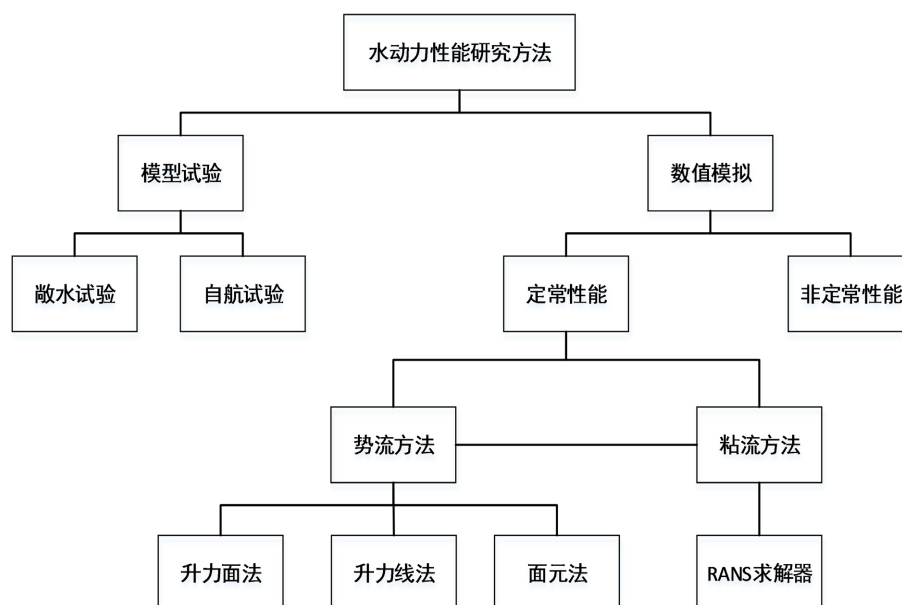


Figure 3. Classification of hydrodynamic performance research methods

图3. 水动力性能研究方法归纳

结论为吊舱推进器的后期发展奠定基础；董小倩[11]等人针对拖式吊舱推进器，用 RANS 方程求解相关函数，得出桨毂间隙在水动力性能中的影响，应用滑移网格技术处理桨叶与吊舱的非定常相互作用。分别计算了具有不同间隙宽度的模型，以考察有无间隙以及间隙宽度变化对推进器各部分水动力的影响；孙瑜[12]选用 RNG $k-\varepsilon$ 作为湍流模型，在 Fluent 中模拟仿真吊舱推进器的定常水动力性能；邢健[13]选取 SST $k-\varepsilon$ 模型作为湍流模型，分析双桨式吊舱推进器的水动力特性，使用涡粘模型得到螺旋桨敞水推进性能，并分别计算推力、转矩和敞水推进效率；贺伟[14]等人对双桨串联式推进器在直航和操舵工况下的水动力性能进行模型实验研究，得出后桨相比前桨和舱体所受影响较大；吊舱推进器推力与舵角成反比，侧向力及转舵力矩与舵角成正比；王展智[15]等人将计算与进行全结构的网格离散化，基于 RANS 方法结合 SST $k-\omega$ 湍流模型和滑移网格技术计算了吊舱推进器在直航和回转工况下的水动力性能；郭春雨[16]等人利用 CFD 法分析力在推进器上的分布并比较推进器各向力学系数；刘登成[17]等人结合 UG、GAMBIT 和 FLUENT 等软件的批处理命令，开发自动化平台对水动力性能进行数值预报，该平台已进行大量的试验，误差均在可控制范围内；黄红波[18]等人利用大型循环水槽进行 RORO 吊舱推进器空泡性能实验，并对实验数据与 Marin 试验结果比较，证明循环水槽对模型试验有很大帮助，并比较了两种试验方法的优劣性。

综上所述，相较于单纯试验的研究方法，应用 CFD 模拟并结合试验来对吊舱推进器进行相关研究更加方便快捷，但是数值模拟对于条件和物理模型的建立要求较高，湍流模型及离散格式的选择、网格的划分需要大量的研究，国内相关研究也是由此入手，目前的研究方法主要是两类：基于势流理论的计算方法和粘流方法。前者运算效率高但是粘性修正项的引入需要依靠经验支撑，后者考虑真实流体的粘性，但使网格质量、模型以及边界条件对处理结果的影响大大增加。

3.2. 水动力性能优化设计

同时部分研究人员通过对型线的优化设计，提高动力系统的推进效率。章新智[19]等人对豪华邮轮球艏做优化设计，并试验其对阻力的影响关系，不过其研究内容并没有针对极地航行做特别的研究，主要

针对台湾海峡和东南亚航区的风浪情况；王杉[20]等人利用 CFD 法对溪流球鼻艏线型进行总阻力和兴波阻力评估，获得对阻力影响最大的参数，优化线型；王艳霞[21]等人将目标船型锁定为中型豪华邮轮，加装不同参数的尾板进行实验研究，比较是否加装尾板和在纵倾姿态下加装尾板对船舶阻力的影响，并对尾板参数的确定提供了一定帮助；交大万德成[22]团队对邮轮在多航速的兴波阻力进行船型优化研究，证明其自主研发开发的 OPTShip-SJTU 可优化邮轮船型的阻力性能优化，减阻效果可达 0.65%~0.98%。

4. 结论

本文讨论综述了针对极地航行条件下针对极地邮轮动力技术的设备发展和实验及理论研究现状，介绍了多个不同设备在实船中的应用及适用性，同时针对国内外科研人员对相关设备及优化过程进行了梳理，通过对比总结可以发现我国与国外之间在设备研发的模块仍存在较大的距离，为满足船级社及船东需求，国内极地邮轮建造厂商短时间内仍需大量订购国外设备，国内在实验设施和研发平台建设方面仍需要继续加强，为动力设备的进一步发展提供理论和技术依据，为国产设备的创新和进步做更多的努力。

参考文献

- [1] 高宜朋, 曾凡明, 张晓锋. 吊舱推进器在舰船推进系统中的发展现状及关键技术分析[J]. 中国舰船研究, 2011, 6(1): 90-96.
- [2] Pego, J. (2005) Construction of a Test Facility for the Research of Ship Propulsion System. *Emirates Journal for Engineering Research*, **10**, 1-8.
- [3] Frisch, J. (2004) Cavitation and Vibration Investigation for Podded Drives. *T-POD Conference Papers*, England, 387-399.
- [4] Stettler, J.W. (2004) Steady and Unsteady Dynamics of an Azimuthing Podded Propulsor Related to Vehicle Maneuvering. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. <https://doi.org/10.5957/SMC-2005-D11>
- [5] Islam, M.F. (2007) Effects of Geometry Variations on the Performance of Podded Propulsors. *Transactions—Society of Naval Architects and Marine Engineers*, **115**, 140-162.
- [6] Veitch, I.M., Bose, N., et al. (2006) Numerical Study of Hub Taper Angle on Podded Propeller Performance. *Journal of Marine Technology*, **43**, 1-10. <https://doi.org/10.5957/mt1.2006.43.1.1>
- [7] Ghassenmi, H. (2008) Computational Hydrodynamics Analysis of the Propeller-Rudder and the Azipod System. *Ocean Engineering*, **35**, 117-130. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.07.008>
- [8] Bergh, L. (2007) Electrical System in Pod Propulsion. Chalmers University of Technology, Goteborg.
- [9] 曹梅亮, 王根禄, 朱鸣. 吊舱式推进装置水动力性能试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2003(8): 1198-1200.
- [10] 韩芸, 沈兴荣, 张峥. 吊舱式推进器敞水性能研究[C]//中国船舶水动力学会学术会议暨中国船舶学术界进入 ITTC30 周年纪念会. 杭州: 中国造船工程学会, 2008: 146-153.
- [11] 董小倩, 杨晨俊. 吊舱推进器桨毂间隙影响的数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(6): 938-942.
- [12] 孙瑜. 舱体下方带有鳍的吊舱推进器水动力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [13] 邢健. 吊舱推进器敞水推进性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [14] 贺伟, 陈克强, 李子如. 串列式吊舱推进器操舵工况水动力试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 107-111.
- [15] 王展智, 熊鹰, 孙海涛, 王睿. 直航和回转工况下吊舱推进器水动力性能数值计算方法研究[J]. 推进技术, 2016, 37(3): 593-600.
- [16] Guo, C., et al. (2016) Simulation of Hydrodynamic Performance of Drag and Double Reverse Propeller Podded Propulsors. *Journal of Marine Science and Application*, **15**, 16-27. <https://doi.org/10.1007/s11804-016-1337-y>
- [17] 刘登成, 韦喜忠, 洪方文, 唐登海. 推进器水动力性能数值预报自动化平台 PreFluP 开发[J]. 船舶力学, 2016, 20(7): 816-823.
- [18] 黄红波, 吴颖昕, 王建芳, 樊晓冰. 大型循环水槽吊舱推进器空泡性能试验研究[J]. 船舶力学, 2017, 21(4): 396-406.
- [19] 章新智, 王驰明, 郭昂. 豪华邮轮球艏的新型设计[J]. 船舶工程, 2014, 36(S1): 12-15.

-
- [20] 王杉, 王艳霞, 赵强, 魏锦芳, 陈京普. 参数化方法的中型豪华游船特殊球艏线型优化[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(5): 646-649.
- [21] 王艳霞, 彭必业, 赵强, 等. 尾板对中型豪华邮轮阻力影响的试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2017, 32(6): 725-731.
- [22] 刘鑫旺, 万德成. 豪华邮轮多航速兴波阻力的船型优化[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(5): 1-10+40.