

极地破冰船的破冰技术发展趋势研究

何纤纤, 夏鑫, 刘雨鸣

(武汉理工大学交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 本文对国内和国外目前先进破冰技术和学者们对破冰技术的研究进行归纳和整理, 重点介绍新涌现的极地破冰船的破冰技术, 并对未来破冰船的发展趋势进行研究, 为极地破冰船未来发展的研究方向提供有益参考。

关键词: 破冰技术; 发展趋势; 破冰船

中图分类号: U674.21

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2020) 06—0076—05

全球气候变暖导致北冰洋冰川融化加剧, 北冰洋的冰域面积不断缩小, 这使得北极航道的通航成为可能。北极航道的开通意味着全球航运格局将发生巨大变化。2019年1月, 中国政府发表了《中国的北极政策》白皮书, 以加强北极地区基础设施建设和数字化建设为核心纲领, 以北极航道和能源合作开发作为经济投资重心, 并与多方共同建设“冰上丝绸之路”。

作为担负开辟航道、运输物资、科研考察任务的极地船舶, 在开拓北极航道和发展北极经济圈中扮演着重要角色。目前中国仅有两艘具有破冰能力的极地破冰船, 分别是破冰等级为PC6级的“雪龙”号和PC3级的“雪龙2”号, 无法满足日益增长的极地科学研究和战略发展的需求, 因此发展和提高各类极地船舶的自主设计能力刻不容缓。

3.3 航道安全与舒适度

由于港口区所有航道的基本情况相同, 故航道轴线风流偏角对航道通航效率影响可忽略不计, 仅对船舶平均间距与通航效率关系进行分析, 结果见图4。从图4中可以看到: 船舶平均间距对通航效率的影响与阻抗值对其的影响有些类似, 即在平均间距较小时, 对通航效率的影响较大, 随平均间距的增大而迅速增大, 之后逐渐减小并最终趋于稳定; 当船舶平均航行时间间距为2.2h时, 航道达到最佳的通行状态。

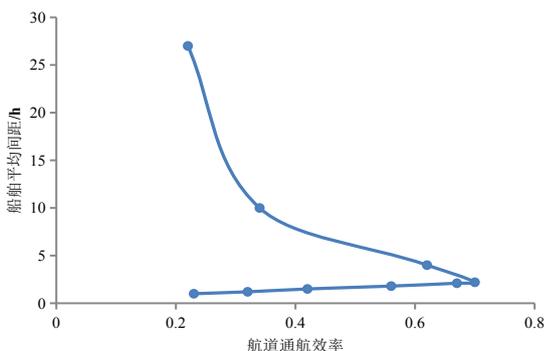


图4 航道安全与舒适度分析

4 结论

(1) 基于DEA分析法, 建立起港口航道通航效率评价指标体系, 该体系包括航道利用情况、航道拥堵情况以及航道安全与舒适度等三个方面共计9个评价指标。

1 国内破冰船技术

1.1 破冰船的特点及破冰等级

破冰船一般依赖船体线型和动力推进破碎冰层, 开辟航道。为获得更大的破冰宽度, 船身長宽比值较小, 首柱较为尖削, 以一定角度前倾。总体强度高, 首尾和水线区具有结构加强。破冰船的推进系统多采用多螺旋桨, 对螺旋桨和舵有防护装置。破冰船以柴油机或核动力为动力推进。总体来说, 船体短而宽, 船体强度高是破冰船的主要特点^[1]。

极地船舶的冰级划分可参考IACS冰级要求, 见表1。

1.2 破冰船的破冰方式

破冰船在破冰作业时, 船舶担任主要的破冰任务, 受到集中载荷的作用; 船体与海冰发生碰撞, 受到冲击载荷的作用。传统的破冰方式主要有连续破冰法和冲撞破冰法^[2]。

(2) 根据航道利用情况分析结果, 得出当航道船舶总吨数达到4030万吨、航道空间占有率达到0.035、航道利用率达到87%时, 航道的通航效率最佳。

(3) 根据航道拥堵情况分析结果, 认为当阻抗值为0.175、阻塞率为77.6%、船舶排队长度为1.6艘以及平均等待时间为5.93h时, 通航状态最佳。

(4) 根据航道安全与舒适度分析结果, 得到船舶平均航行时间间距为2.2h时, 航道达到最佳的通航状态。

参考文献:

- [1] 程升鹏, 阮荣斌, 王锐锋. 提高三峡船闸过闸效率的通航组织模式[J]. 水运工程, 2020(02):57-61.
- [2] 周引平, 侯国佼, 杨佐夫. 应用虚拟化技术提高三峡通航监管指挥工作效率浅探[J]. 中国水运, 2019(12):38-39.
- [3] 周引平, 王士健, 肖圣魁. 基于船舶远程申报系统提高三峡通航效率和安全的实践[J]. 中国水运, 2019(11):50-51.
- [4] 曾石营. 基于交通波理论的吴淞口警戒区通航效率分析[J]. 青岛远洋船员职业学院学报, 2019, 40(02):49-53.
- [5] 杨旭刚, 杨星, 陈蜀喆, 王展, 刘克中. 基于Arena仿真的单线航道通航效率[J]. 中国航海, 2018, 41(03):101-104+118.
- [6] 王伟, 王维印, 问皓. 影响天津大港港区通航安全和效率的因素分析及对策[J]. 天津航海, 2018(02):20-21.

表1 IACS 冰级要求

冰级划分冰级符号	冰级描述
PC1	在所有冰盖水域航行
PC2	在中等厚度多年冰的状况下航行
PC3	在第二年冰且可能包含多年夹冰的状况下航行
PC4	在当年厚冰且可能包含旧夹冰的状况下航行
PC5	在当年中等厚度冰且可能包含旧夹冰的状况下航行
PC6	在夏/秋季当年中等厚度冰且可能包含旧夹冰的状况下航行
PC7	在夏/秋季当年薄冰且可能包含旧夹冰的状况下航行

(1) 连续破冰法：在冰层较薄的冰区，一般冰层厚度低于 1.5 米时，使用连续破冰法。破冰船以一定航速，利用螺旋桨的推力、船体破冰线型直接将冰层破开撞碎。如图 1 所示。

(2) 冲撞破冰法：在冰层更厚的冰区、复杂的堆积冰区或冰脊区，采用冲撞破冰法。首先，破冰船需倒退约两个船长的距离，然后加速向前冲，冲撞式破冰船艏部吃水较浅，船体会冲上冰面将冰层压碎，若冰层未完全破开，可利用左右压载水舱交替注水，使船体左右一定幅度摇晃，以达到开辟航道的目的。如图 2 所示。



图1 连续破冰船



图2 冲撞破冰船

1.3 国内破冰船现状

目前我国带高等级冰级的极地船舶较少，拥有两艘抗 0.8m

以上浮冰的极地船舶，大量的极地船舶能抵抗的浮冰厚度在 0.4m 以下^[3]。这两艘极地破冰船，分别是由乌克兰购进并改造而来的“雪龙”号极地科考船和我国第一艘自主研发的“雪龙 2”号科考船。

“雪龙 2”号是全球第一艘采用双向破冰技术的极地科考船，也是第一艘我国自主研发的高冰级破冰船。能够在 1.5 米厚冰条件下连续破冰航行，填补了我国在极地科考重大装备领域的空白^[4]。“雪龙 2”号的动力系统为全电力推进，尾部的螺旋桨吊舱可 360° 旋转，即桨舵合一，既是螺旋桨也是舵，因此其非常灵活，可实现船体原地调头。推进性能和机动性能更加优越，利用船尾可突破极区 20 米当年冰冰脊。“雪龙 2”号科考船代表了我国极地破冰船的先进制造技术。

1.4 国内破冰技术发展现状

近几年，我国在破冰船设计和技术的发展上取得了不错的成绩，相关科研工作也在积极开展。相较于美俄等拥有先进破冰船制造技术的国家来说，我国的破冰船舶的制造技术还有提升的空间，随着国家极地战略发展的需求，吸引了越来越多的学者展开深入的研究。

随着有限元技术在工程设计和科研领域的逐步成熟，众多学者利用非线性有限元软件做了大量的研究。

关于冰-船碰撞结构响应和冰载荷计算方面，杨亮等利用有限元软件 LS-DYNA 进行了船舶与海洋平台之间在海冰为介质的作用下的仿真分析^[5]，分析海冰对海洋平台碰撞的影响。王凯民基于经验公式和 LS-DYNA 中的 ALE 流固耦合算法对船舶破冰阻力预报研究^[6]，同时也对水介质中破冰船艏部结构响应及极端应力进行了研究。冯卫永等基于瞬态动力学分析法对破冰船冲撞式破冰过程进行有限元数值仿真研究^[7]，并建立计算破冰船冲撞式破冰过程船体应力的方法。任奕舟等介绍一种破冰船在冰层中连续破冰的冰材料数值模型并进行验证^[8]，并对破冰船的破冰阻力进行计算。苏干利用 LS-DYNA 软件结合 ISO 推荐压强-面积理论曲线验证数值模型可靠性^[9]。杨征基于多年海冰的力学特性与数值仿真模型对极地重型破冰船冰载荷计算方法和冰带典型结构区域极限承载能力进行研究^[10]。周峰等通过数值模拟为冰区船舶预报破冰载荷提供技术参考^[11]。

关于破冰船结构、线型研究以及新型破冰设计方面，哈尔滨工程大学的王川使用 MSC.Dytran 软件对破冰船首柱倾角对破冰速度的敏感性进行分析^[12]。上海交通大学的王健伟使用 LS-DYNA 软件对楔形首和勺形首对船舶破冰时冰层的变形损伤和破冰阻力的影响进行分析^[13]。哈尔滨工业大学的史江海比较了前倾首、飞剪首、直立首、球鼻首和破冰首的破冰能力^[14]，发现在相同情况下破冰首的破冰能力最好。丁悦等开发 PC6 冰级的阿芙拉油船线型并探究破冰船破冰线型的基本特点^[15]。朱彬研究了破冰结构和船体船艏线型形状对破冰效率的影响^[16]，并提出了破冰船的破冰冰刀设计方法。刘林伟设计研发了一种具有破冰功能的全回转拖船^[17]。白旭等通

过数值模拟得到破冰结构角度对整冰失效模式的影响^[18]。高嵩分析了极地气垫破冰和运输平台破冰机理以及关键技术^[19]。

关于破冰船推进动力以及辅助破冰方式方面，翟燕对舰船混合动力系统的优化配置与控制进行了仿真研究^[20]。吴文翔分析吊舱推进器艏部型线特征，即艏部较宽^[21]，型深和干舷较大，剖面呈V型等。黄嵘通过突变负载的仿真实验，验证了“雪龙2”号吊舱推进器控制系统对转速控制的可靠性^[22]。王平团等介绍几种主要的压载水调驳技术^[23]，并对比分析其优缺点。

可以看出，对破冰船技术的研究热点在于冰载荷作用下破冰船的结构响应、冰载荷计算以及海冰结构研究，相关学者提出多种数值模拟计算方法和仿真模型。目前解决冰载荷计算问题的方法趋于将有限元模型和离散元模型结合起来，建立离散元-有限元耦合模型（DEM-FEM）逐步发展并完善^[24]。对于新型破冰船设计理念、破冰船优化线性以及破冰船推进动力方面的研究相对较少。另外，由于我国尚未拥有能够开展破冰实验的冰池实验场所，不便于学者通过实际实验论证数值模拟的结果。

2 国外破冰技术

2.1 国外破冰先进技术

近些年，涌现出许多新型的破冰方式与破冰技术，如专业不对称破冰船、双向破冰船、半潜式破冰船、撬冰式破冰船等，前两者已成功设计建造，并表现出显著的优于传统破冰船的破冰能力，后两种还处于概念设计阶段。另外也有一些新的技术应用在破冰船上，如吊舱式推进器、电力推进系统、双动力装置等。破冰船技术的发展主要体现在破冰方式、抗冰涂料、推进系统及辅助破冰系统等方面^[25]。

（1）破冰方式：双向破冰技术。早在2007年，阿克尔北北极技术公司设计的拥有双动力的破冰穿梭油船“Vasily Dinkov”号问世，随着技术的不断进步，在双动力技术的基础上，诞生了双向破冰技术。双向破冰船的尾部利用螺旋桨高速旋转产生的水流，能够从下端掏空冰层，进而达到破冰的目的。传统破冰船的首部主要采用楔形破冰首，首部底部与水线夹角由原来的27°左右逐步优化，近年来，发现在相同条件下20°左右的夹角破冰性能更优良，另外也发展有梅尔维尔首、绞刀型勺型首、脊型半勺型首等其他破冰船线型。在舷侧结构方面，为了满足运输需求与破冰的经济效益，俄罗斯设计了新型非对称舷侧的斜破冰船，既能提高破冰的宽度又能利用其舷侧结构实现溢油回收等作业。

（2）抗冰涂料：处于极地严寒气候，普通的防护涂料会受损而丧失对破冰船的保护能力，因此极地破冰船通常在水线附近的船壳上使用特殊的抗冰漆，既能保护船体结构，又能减少壳体与浮冰之间的摩擦。

（3）推进系统：核动力推进系统、双动力推进技术、电

力推进系统。俄罗斯是掌握先进破冰船制造技术的国家，其近几年建造的高冰级破冰船几乎全都采用了核动力推进和全向吊舱技术，使得破冰船获得更强的推进动力，且提高破冰船在极地作业的效率 and 安全性。双动力推进技术，顾名思义就是船舶的前后向均能航行的动力系统设计技术，能够提高极地作业船舶的安全性和操作性。该项技术目前已在多种破冰运输船上应用，并展现出优越的破冰性能。电力推进系统的推进器与电气发电机直接相连，与传统的机械推进方式相比，具有更好的经济性、操控性和安全性。辅助破冰系统：包括喷水系统、气泡发生系统、舷侧绞刀系统等。喷水系统和气泡发生系统可以隔离船体周围的碎冰，保护船体免于受到碎冰的碰撞，也有效避免了船身被周围的冰雪冻结；舷侧绞刀系统在提高破冰效率的同时，拓宽破冰航路，具有较高的实际应用价值。

2.2 国外破冰研究趋势

在破冰技术研究方面，Sawanira等利用ABAQUS软件做了数值仿真研究，分析了在动力约束下的浮冰层动力学弯曲现象^[26]。Liu研究了船舶和冰山碰撞的机理，冰山被设定为塑性材料，其裂纹的产生用单元的侵蚀来模拟^[27]。Donghyeong Kop研究了极地航行船舶在冰区中转向的能力，模拟了三种不同的极地航行船舶模型在冰区转向运动并验证其可靠性^[28]。Hu利用CFD软件计算了船的破冰阻力和冰的浸没力^[29]，并将“USCGC Mobile Bay”号和“MT Uikku”号两艘极地船舶的实测数据进行了对比，证明数值计算的结果与实测值相比偏安全。Mochamad Raditya Pradana等用离散元方法对圆锥结构的冰载荷进行了预测^[30]。Se-Jin Ahn等用弯曲船壳结构和冰样品进行冲击试验分析冰载荷中间峰的发生以及与持续时间的关系^[31]。Chery Bertoia等开发出ARKTOS(Advanced Reasoning using Knowledge for Typing of Sea ice)海冰识别系统^[32]，对海冰进行分类并在美国国家海冰中心应用。Fu等对船舶在东北航道夏季航行中被冰困的影响因素进行分析，并建立多因素耦合模型^[33]。

国内外学者们对船舶破冰模式和冰载荷进行深入研究，学者们建立的许多数值方法，并趋向于使用有限元和离散元方法相结合的方法解决冰载荷计算问题，进而得到船舶的动力响应，并且通过模型实验对数值模拟的结果进行验证。另外，在卫星遥感海冰监测、冰池实验、极地航行风险评估等方面都取得了一定研究成果，许多研究都聚焦于极地船舶航行的风险评估和海冰建模与破冰数值模拟仿真，对卫星遥感海冰监测也有一定成果，对于极地航行能效的研究较少。

3 破冰技术发展趋势

3.1 破冰动力系统：核动力技术

俄罗斯自1959年突破核动力破冰技术，设计出了第1艘核动力破冰船后，在此技术上遥遥领先，仍是世界上唯一拥有核动力破冰船制造技术的国家，现已开始第4代核动力破



图3 破冰船“Baltika”号

冰船“领袖”级的研发工作。破冰船在极地破冰作业对推进能力要求极高，同时极地港口较少，难以获得燃料补给，因此破冰船需要储藏大量能量以保证长时间的航行和工作。核动力推进系统能够同时满足以上两点具有巨大优势。在经济性方面，美国海军研究表明，核动力破冰船的制造与营运费用与常规动力破冰船基本相当^[34]。基于以上优势，核动力技术的研发和优化是破冰船动力系统发展的必然趋势。

3.2 破冰方式：双向破冰

双向破冰船能够克服破冰航行和敞水航行对船体线性不同要求所产生的问题，虽然以船尾破冰的速度较船艏破冰低，但能够有效保障破冰船作业安全性以及敞水航行效率，通过改善尾部线型或增加特殊设计，或能提高尾部破冰的效率。例如我国不久前开始服役的第一艘自主研发与制造的“雪龙2”号，拥有双向破冰能力，这也标志着我国的破冰船制造技术迈入新的阶段。

3.3 破冰船型设计：开放式船尾、不对称化

近几年，破冰船建造中逐渐开始使用模块化技术。俄罗斯“领袖”级破冰船采用了“开放式船尾”的设计理念。开放式船尾可依据任务要求自由搭载不同作业模块，例如装载有导弹、反潜装置、通信导航系统或潜水设备的模块，使得破冰船可以快速完成不同功能的切换，使破冰船的实用价值和经济效益更佳。

2015年，第一艘不对称破冰船“Baltika”号建成并成功完成全面破冰实验，展现了其优秀的破冰能力与操作性能，见图3。由于船舶功率有限，破冰船尺寸被限制，尤其是船宽。

然而，随着船舶运输和开辟航道的需求，需要引航破冰船能够拥有尽量宽的破除海冰的能力。不对称专业破冰船很好地兼顾了对两者的需求，同时也是全回转推进技术和新型破冰船型技术的融合^[35]，具有广阔的发展和前景。

4 结语

随着国内和国外破冰船设计和制造的水平不断提高，对目前国内外的先进破冰技术进行整理，重点介绍新涌现的破冰技术，并对未来破冰船的发展趋势进行研究：破冰船具有重要的战略发展意义，未来或将更加趋向于对核动力技术、双向破冰技术的优化、开放式船尾以及不对称专业破冰船型的研究。为破冰船未来的发展方向提供有益参考。

参考文献：

- [1] 刘林伟等. 带破冰功能全回转拖船的设计 [J]. 江苏船舶, 2017, 34(6): 13-14.
- [2] 刘庭华等. 破冰船与破冰原理 [J]. 物理教学, 2014, 36(5): 80-81.
- [3] 寿建敏等. 我国极地航运能力建设和高冰级船队发展对策分析 [J]. 极地研究, 2018, 30(4): 419-428.
- [4] 工信部. “雪龙2”号极地科考破冰船交付使用 [J]. 船舶工程, 2019: 73.
- [5] 杨亮, 马骏. 冰介质下的船舶与海洋平台碰撞的数值仿真分析 [J]. 中国海洋平台, 2008, (2): 29-33.
- [6] 王凯民. 考虑流固耦合作用的船舶破冰阻力预报及结构响应研究 [D]. 江苏: 江苏科技大学, 2019.

- [7] 冯卫永. 破冰船冲撞式破冰结构强度数值仿真方法研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(6):28-32.
- [8] 任奕舟. 破冰船在冰层中连续破冰过程的数值模拟[J]. 振动与冲击, 2016, 35(18):211-213.
- [9] 苏干. 极地运输船舶冰载荷及破冰结构研究[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2016.
- [10] 杨征. 极地重型破冰船冰载荷计算方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [11] 周利. 基于环向裂纹法的冰区船舶破冰载荷数值模拟[C]. 中国海洋工程学会. 第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 中国海洋工程学会: 中国海洋学会海洋工程分会, 2019:197-202.
- [12] 王川. 极地航行船舶载荷计算分析及破冰能力评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [13] 王健伟. 基于非线性有限元方法的船舶-冰层碰撞数值研究[D]. 上海交通大学, 2015.
- [14] 史江海, 桂洪斌, 李丹. 船首形状对船-冰碰撞性能的影响研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(1): 8-13.
- [15] 丁悦, 郭世奎. 极地破冰型阿芙拉油船的线型设计[J]. 船海工程, 2019, 48(2),122-126.
- [16] 朱彬. 极地海域撬冰式破冰拖船关键技术应用研究[J]. 江苏船舶, 2019,36(4):12-14.
- [17] 刘林伟. 带破冰功能全回转拖船的设计[J]. 江苏船舶, 2017,34(06):13-14.
- [18] 白旭, 周利等. 破冰结构角度对整冰失效模式的影响分析[J]. 极地研究, 2018,30(4):406-410.
- [19] 高嵩, 张俊, 张进. 极地气垫破冰/运输平台破冰机理和关键技术[J]. 船舶, 2018, 29(6):117-122.
- [20] 翟燕. 舰船混合动力系统优化配置与控制策略仿真研究[D]. 北京交通大学, 2016.
- [21] 吴文翔. 吊舱推进破冰船的艏部型线初步设计[J]. 船舶工程, 2017,39(4):21-23.
- [22] 黄嵘, 李文明, 袁东方. 极地考察破冰船吊舱推进系统分析及其控制性能仿真研究[J]. 极地研究, 2019,31(04):441-446.
- [23] 王平团, 房玉吉, 吕君. 破冰船压载水调驳辅助破冰技术[J]. 船海工程, 2016,45(2):34-36.
- [24] HOSSEIN B, DAVID W, RICHARD B. Verification and validation of an in-ice oil spill trajectory model based on satellite-derived ice drift data[C]. The 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions(POAC2017), Busan, Korea: POAC, 2017.
- [25] 黄金星, 等. 美俄破冰船技术发展研究[J]. 舰船科学技术, 41(8): 154-157.
- [26] Sawamura J., Riska k., Moan T.. Finite Element Analysis of Fluid-ice Interaction during Ice Bending[C]. Proceedings of IAHR 2008, Nanjing, China, 2008: 191-202.
- [27] Liu Z. Analytical and Numerical Analysis of Iceberg Collisions with Ship Structures[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [28] Donghyeong Kop, Kyung-Duk Park. Time domain simulation for icebreaking and turning capability of bow-first icebreaking models in level ice[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016,53(8): 228-234.
- [29] Hu J, Zhou L. Farther study on level ice resistance and channel resistance for an icebreaking vessel[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016 8(2): 169-176.
- [30] Mochamad Raditya Pradana, Xudong Qian. Bridging local parameters with global mechanical properties in bonded discrete elements for ice load prediction on conical structures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019.
- [31] Se-Jin Ahn, Tak-Kee Lee. An experimental study on occurrence of intermediate peaks in ice load signals[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2019.
- [32] Oriol Jou, Miguel Angel Celigueta, Salvador Latorre, Ferrán Arrufat, Eugenio Oñate. A bonded discrete element method for modeling ship-ice interactions in broken and unbroken sea ice fields[J]. Computational Particle Mechanics, 2019, (6):739-765.
- [33] FU S S, ZHANG D, MONTEWKA J, etc. Towards a probabilistic model for predicting ship be setting in ice in arctic waters[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 155:124-136.
- [34] 于新伟, 陈林等. 破冰船技术发展现状分析[J]. 造船技术, 2017,337(3): 1-4.
- [35] 吴刚, 张东江. 极地船舶技术最新动向[J]. 中国船检, 2015(03):97-101.

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划资助(编号: S201910497013)