

· 学科进展 ·

# 极地船舶核心关键技术现状及我国发展对策\*

朱英富<sup>1</sup> 刘祖源<sup>2</sup> 解德<sup>3</sup> 李万红<sup>4\*\*</sup>

(1 中国船舶重工集团第701研究所, 武汉 430064; 2 武汉理工大学交通学院, 武汉 430063;  
3 华中科技大学船舶与海洋工程学院, 武汉 430074; 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 北京 100085)

**[摘要]** 本文基于第118期“双清论坛”的讨论内容, 简述了极地船舶面临的重大机遇与战略挑战, 从极地航行环境条件与海冰力学特性、极地船舶冰载荷预报技术、极地船舶冰水动力学与结构性能、极地环境下船舶机电系统适应性与可靠性、极地船舶总体关键技术等方面综述了极地船舶核心关键基础技术研究现状及进展。文章还结合本次论坛的讨论总结了极地船舶研究前沿及科学问题, 并建议了未来3—5年相关的科学目标与资助重点。

**[关键词]** 极地船舶; 研究现状; 发展对策

DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2015.03.006

随着全球气候变暖、海冰大量融化, 极地蕴藏的丰富资源和极具价值的北极航道将提升极地的实际价值。目前世界上一些发达国家正掀起极地船舶关键技术研究的热潮, 开始大量建造极地船舶。我国作为一个近北极国家, 北极航道的开通可以减少我国对常规航线的依赖, 降低能源运输的安全风险, 同时开发北极丰富的油气资源也可以为我国油气安全提供战略保障。但是, 我国在极地船舶基础研究和核心技术方面与国外先进技术水平相比还存在很大差距。为了凝炼极地船舶核心关键基础科学问题, 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、地球科学部和政策局于2014年9月20—21日联合举办了“极地船舶核心关键基础技术现状及我国发展对策”的第118期“双清论坛”, 来自国内外18个单位的40余名专家学者应邀参加了本次论坛。与会专家通过充分深入地研讨, 凝炼了该领域的重大关键科学问题, 提出了国家自然科学基金对该领域进行资助的战略。

## 1 极地船舶面临的重大机遇与战略挑战

习近平总书记在2014年2月8日致中国南极泰山站的贺信中指出<sup>[1]</sup>: “极地科学考察, 是人类探索自然奥秘、探求新的发展空间的重要领域, 是一项

功在当代、利在千秋的事业。”而极地船舶是极地考察、极地航运、极地资源开采的关键基础装备。

北极拥有极为丰富的自然资源, 对世界未来经济社会的可持续发展有重要的支撑作用。据美国地质勘探局公布的一份最新评估报告称, 北极拥有全球13%的未探明石油储量, 同时拥有全球30%未开发的天然气储量和9%的世界煤炭资源<sup>[2]</sup>。丰富的北极油气资源, 将为我国油气安全战略提供新的保障, 其潜在价值已显现出现实意义。

与丰富的自然资源相比, 更加诱人的则是400年来人们梦想中的“北方黄金航道”的开辟。一旦北极航道开通, 将形成包括俄罗斯、北美、欧洲、东亚的环北极经济圈。而这一切已经远远超过资源开发的意义, 它无疑将带来国际政治版图的巨大变迁, 其影响绝不亚于新大陆的发现。北极航道是联系亚欧美三大洲的最短航线, 与通常的苏伊士运河和巴拿马运河航线相比, 走北极航道能够缩短数千公里航程。例如, 上海到德国汉堡的距离大约能够缩短6400 km, 上海到纽约也能缩短5500 km。由此将大大降低商业运输成本。

随着全球气温的不断升高, 2005年俄罗斯附近的东北通道曾一度畅通, 然而在之后又被冰块阻塞。直至2008年8月中下旬, 卫星拍摄的照片显示, 西

收稿日期: 2015-01-27; 修回日期: 2015-03-04

\* 本文内容根据第118期“双清论坛”讨论内容整理。

\*\* 通信作者, Email: liwh@nsfc.gov.cn.

北航道和东北航道第一次同时冰融开通,专家将其形容为“具有历史意义的事件”,它代表人类史上首次可绕过北极开展商业航行,由此引发了新一轮东北航道开发热潮。2009年7月,德国布鲁格航运公司的两艘货船“布鲁格友爱”号和“布鲁格远见”号冰区加强船从韩国装货出发,向北航行通过往年因冰封无法通航的北冰洋“东北航道”,抵达荷兰鹿特丹港。此次航行在北极航运史上具有重要意义,在一定程度上宣告了一条新商业航道的诞生。2011年,挪威楚迪航运公司使用冰区加强货轮装载41000吨铁矿石从挪威的希尔科内斯港起程,穿越东北航道,将铁矿石运往中国,开启了具有历史意义的航行。

北极航道对于保障我国海上能源运输安全和降低远洋运输成本具有深远的战略意义。当前,我国依赖常规航线海上运输能源已经突显出问题,主要表现为:(1)苏伊士运河和巴拿马运河通行能力已经饱和,拥塞现象严重,直接影响航运经济性;(2)马六甲海峡、苏伊士运河航线海盗猖獗,已对我国海运安全构成严重威胁;(3)过分依赖马六甲海峡,战时将面临极大威胁和压力。相比之下,北极航线受上述问题影响较小,过往船舶不受吨位限制,航行省时、省力、省钱。此外,北极航线对我国上海以北沿海港口城市的经济繁荣具有较大的推动作用,并能带动相关产业布局调整。2013年中远集团在交通部、外交部、国资委、海洋局的大力支持下,试水北极航道。中远集团所属“永盛”轮满载16740吨钢材和设备8月15日从太仓港出发,8月27号穿过白令海峡,进入北极圈,借助俄罗斯冰区引航员和破冰船,由东向西通过北极东北航道,经过27天的海上航行,于9月10日顺利抵达荷兰鹿特丹,实现了中国商船首次穿越北极东北航道的航行。北极航道开通,有助于我国减少对常规航线的依赖,减少航运成本,降低航运风险,确保能源运输安全,具有重大的战略意义。

随着全球气候变暖,北冰洋海冰大量融化,大规模开发北极资源成为现实可能,北极航道的开发利用也逐渐引起相关国家的高度重视。目前,世界强国正掀起极地开发热潮,并大量建造极地船舶装备。在环北极国家中,除冰岛、丹麦以外,俄罗斯、加拿大、美国、芬兰、瑞典、挪威都拥有一支强大的破冰船队。其中,俄罗斯最多,拥有20艘破冰船,含7艘核动力破冰船;加拿大有6艘;美国有4艘。虽然我国是一个近北极国家和世界造船第一大国,但与国外极地船舶的先进技术水平相比,存在很大差距,特

别是极地船舶设计中的一些核心关键基础问题仍未解决,严重制约了我国极地船舶研发建造能力,成为制约我国极地开发的瓶颈因素。

为此,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、地球科学部和政策局就“极地船舶核心关键基础技术现状及我国的发展对策”,在武汉组织召开了第118期“双清论坛”。我国船舶行业重要的高等院校、科研机构、建造企业和管理部门均有专家学者与会。论坛围绕极地开发面临的重大机遇与战略挑战,重点针对北极船舶核心关键基础技术的研究现状及进展、北极船舶研究前沿及科学问题、未来3—5年科学目标与资助重点等,进行了充分的交流、研讨。

## 2 极地船舶核心关键基础技术研究现状及进展

极地船舶涉及科学技术、规则、操作、经济和环境等多个要素,与众多学科交叉。其核心关键基础技术主要涉及:(1)极地航行环境条件与海冰力学特性;(2)极地船舶冰载荷预报技术;(3)极地船舶冰水动力学与结构性能;(4)极地环境下船舶机电系统适应性与可靠性;(5)极地船舶总体关键基础技术。现就上述五个核心关键基础技术的研究现状及进展进行概述与分析。

### 2.1 极地航行环境条件与海冰力学特性

极地航行气象条件和海况极为恶劣,涉及海冰、低温、风雪、海雾等。北冰洋处于高纬区,得到的太阳辐射少,加上夏季冰雪融化消耗大量热量,所以气温比地球上其他区域低。冬季极夜期长179天,冷月份(1—3月)平均气温约为 $-40^{\circ}\text{C}$ ,近海区为 $-30^{\circ}\text{C}$ ,最低温度为 $-53^{\circ}\text{C}$ ;夏季极昼期长180天,暖月份(7—8月)平均气温在极地附近为 $0^{\circ}\text{C}$ ,沿岸地区为 $7^{\circ}\text{C}$ 。由于四周环绕着欧亚美洲大陆,因此北冰洋的海洋水体变得较为温和,北极地区的海水温度基本维持在 $-2^{\circ}\text{C}$ 以上。北极地区的月平均风速为 $4\text{—}6\text{ m/s}$ ,疾风很少,罕有超过 $25\text{ m/s}$ 的。强风一般会出现在巴芬湾、白令海和楚科奇海等台风活动频繁的区域,风速可达 $7\text{—}12\text{ m/s}$ 。暴风雪容易发生在边缘地区,尤其在冷暖气团交汇处。云雾天多是北冰洋夏季典型的天气,极地地区的海雾以平流冷却雾为主,平流蒸发雾则雾层薄,形似炊烟,在春秋季节与平流冷却雾交替出现,常形成大片浓雾区。总之,北极海域寒冷,天气情况复杂,有时甚至极为恶劣。因此,需要进行极地航行气象条件的分

析研究,从而将上述气象条件数据转换为极地船舶设计的输入参数,这些数据对极地船舶的安全运营也具有指导价值。

和南极洲不同,北冰洋最明显的特征是其表面覆盖着海冰,它的面积夏季末(9月)最小,冬季末(3月)最大。海冰的形态可按发展阶段分为初生冰、尼罗冰、饼冰、初期冰、当年冰和陈年冰六大类<sup>[3]</sup>。初生冰(new ice)是最初形成的海冰,都是针状或薄片状的细小冰晶;尼罗冰(nilas)由初生冰继续增长冻结而成,通常为厚度10 cm左右有弹性的薄冰层,在外力的作用下,尼罗冰易弯折成长方形冰块;饼冰(pancake ice)是由破碎的薄冰片在外力的作用下互相碰撞、挤压、边缘上升而形成,表现为直径30 cm至3 m、厚度10 cm左右的圆形;初期冰(young ice)由尼罗冰或饼冰直接冻结一起而形成的冰层,厚度约10—30 cm,多呈灰白色;当年冰(first-year ice)由初期冰发展而成的厚冰,厚度为30 cm至3 m,时间不超过一个冬季;陈年冰(old ice)是至少经过一个夏季而未融化的冰,表面比当年冰平滑。海冰的厚度变化不大,大多是0—4 m之间。因此,国际上冰区分级主要以海冰的厚度和形态为依据。但是,北极海面通常覆盖大面积的浮冰,海冰密集度(sea ice concentration)也应当在极地船舶航区海冰状态分布研究中予以考虑。

海冰是由海水在低温环境下冻结而成。同时,海冰不同于淡水冰,海冰是固体冰晶、盐泡和少量气泡的混合物。海冰由于各自海域环境的不同,在形成过程中可能受到很多因素的影响,导致海冰拥有许多不同的晶体结构,从而影响其物理特性<sup>[3]</sup>。例如,新形成海冰的密度大致为 $900 \text{ kg/m}^3$ ,其会随盐度增加和空气含量的减少而加大<sup>[4]</sup>。随着冰龄的增加,冰中盐分渗出,一般夏末时海冰密度可降至 $860 \text{ kg/m}^3$ 。因此,需要进行极地海冰物理特性及环境因素影响研究(如考虑温度、盐度等对密度、摩擦系数、孔隙率、晶粒大小、缺陷结构的影响等)。

极地海冰微观结构特征与宏观力学特性研究是一个多尺度的基础科学问题,主要关注海冰的形成过程和对应产生的微观结构之间的关系,以及微观结构随所施加载荷而变化的过程。从微观层面看,海冰的分子结构以水分子的四面体形状为基础,四面体中心处的氧原子通过氢键与另外4个氧原子相连接,而分子之间通过氢键连接<sup>[5]</sup>;微观特征可用晶粒尺寸、晶体取向、孔隙率、含盐量、缺陷结构、成核和运动等来描述。从宏观层面看,海冰是一个非均

匀、各向异性的粘性材料,在短期载荷作用下通常表现为脆性行为,在长期载荷作用下通常表现为韧性行为,宏观力学特性通常有弹性模量<sup>[6-8]</sup>、泊松比<sup>[9]</sup>、压缩强度<sup>[10,11]</sup>、拉伸强度、弯曲强度<sup>[12]</sup>、剪切强度<sup>[13,14]</sup>、粘合强度以及断裂韧性等。极地海冰微观结构特征在很大程度上影响其宏观力学特性,宏观力学特性是其微观结构特征的外在表现。例如:海冰的弹性模量受海冰的孔隙率的影响较大;海冰的压缩强度随着含盐度或孔隙率的增加而减小<sup>[15,16]</sup>,但晶粒尺寸的变化对冰的压缩强度的影响很小<sup>[17]</sup>,等等。开展此方面的研究工作,有助于清楚认识实际现象背后的物理过程和力学机理,从而为极地船舶设计时冰载荷准确预测提供理论依据。

试验方法是进行冰载荷预报的主要手段之一。研究海冰对结构物作用力的试验方法主要有原型观测和模型试验两种。由于原型观测所需经济投入较大且具有不可重复验证性,因而目前国际上主要采用冰水池(ice tank)来开展模型试验。另一方面,海冰在不同尺度下表现出很强的离散分布特性,其强度呈现出明显的尺度效应<sup>[18-20]</sup>。因此,在进行模型试验时,为了提高模型预报的准确性,进行极地海冰尺度效应及相似理论研究是必要的。

## 2.2 极地船舶冰载荷预报技术

冰载荷(ice load)即冰与结构物的相互作用(ice-structure interaction)<sup>[21,22]</sup>。在极地船舶设计中,冰载荷预报技术是最为关键的核心基础问题。环北极八国(加拿大、丹麦、芬兰、冰岛、挪威、瑞典、俄罗斯、美国)都针对冰载荷开展了大量的研究,其中加拿大 APOA (the Arctic Petroleum Operators Association),美国 CRREL (US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory)的研究工作尤为值得关注。

冰载荷预报是否合理、准确,直接关系到所设计的极地船舶能否达到预定的设计目标。冰载荷不仅与船舶的尺度、型线和结构形式相关,而且与海冰的物理特性、力学行为及其破坏模式相关。目前,国际上对冰载荷进行预报的主要方法有:理论分析法、经验公式估算法、实验测试法和数值仿真法。与波浪载荷相比,冰载荷的研究历史尚短,理论还不成熟,急需系统开展冰载荷理论与方法研究。

冰载荷数值预报方法是合理准确预报极地船舶冰载荷的基础,是建立“数字冰水池”的前提条件。在对冰载荷进行数值预报时,涉及以下三大核心技术:

(1) 建立准确描述海冰真实力学性能的本构关系。海冰的力学特征十分复杂,随着试样的选取地点和选取方式的不同,含盐量、含杂质的程度、温度以及冰结晶的方位取向不同,将得到不同的应力应变关系。所以无法用简单唯一的本构模型来完全描述海冰的力学性能。为此,国内外研究人员先后建立了弹性模型、弹塑性模型<sup>[23]</sup>、蠕变模型<sup>[24]</sup>、粘弹性模型<sup>[25]</sup>及损伤模型<sup>[26,27]</sup>等。但是,每种模型都有各自的应用范围,不具有普适性。

(2) 建立精确再现海冰真实破损场景的仿真手段。海冰的破损过程极其复杂,但可归结为四种主要模式,即压碎(crushing)、屈起(buckling)、弯折(bending)和劈裂(splitting)。随着近些年来数值仿真技术的长足发展,国内外研究人员基于连续元和离散元两类方法,采用单元弱化和节点分离技术,开展了海冰破损场景的仿真研究<sup>[28,29]</sup>,取得了一些研究成果。但对于海冰的碎化与堆积等复杂场景仍然难以再现。

(3) 建立有效模拟海冰结构相互作用的数值技术。海冰与结构的相互作用形态多样,大致可以分为大面积冰原挤压作用、浮冰的冲击与摩擦作用、冰盖层的膨胀作用与拖曳作用,是一个强非线性多体接触(multi-body contact)问题,涉及到几何不稳定性(geometric instability)、大位移与大变形(large displacement and deformation)。目前,这方面的相关研究缺乏系统性,数值计算的收敛性仍然无法得到保障。

冰载荷试验技术研究的主要设施是冰水池(ice tank)。俄罗斯克雷洛夫中央造船研究院拥有两座冰水池(长35 m,宽6 m,深1.8 m;长80 m,宽10 m,深2—4.6 m);日本海上技术安全研究所(NMRI)拥有一座冰水池(长30 m,宽6 m,深1.8 m);美国寒区研究与工程实验室(CRREL)拥有一座冰水池(长37 m,宽9 m,深2.4 m);加拿大水力学中心(CHC)拥有一座冰水池(长21 m,宽7 m,深1.2 m)。我国只有天津大学拥有一座冰水池(长5.45 m,宽1.91 m,深0.76 m),且其主尺度较小,难以满足日益增长的需求。除建设基础设施——冰水池外,还需要研究相应的试验技术、开发特殊的试验测试平台和相应的测试系统。

冰载荷现场测试技术研究可从两个方面入手:一是建立室外试验场,并配备完整的冰载荷测量系统,对原型结构进行长期的现场冰载测量。例如,瑞典利用Norstromsgrund灯塔进行直立结构的冰载

荷现场测试<sup>[30-32]</sup>,还有一些国家修建海上孤立建筑进行冰载荷现场测试。二是利用已有的服役结构进行冰载荷现场测试,这种方法不仅可以节约投资,还可以同时对运营结构进行健康监测。

## 2.3 极地船舶冰水动力学与结构性能

按运动状态,海冰可分为固定冰和流冰两大类。固定冰(fast ice)是与海岸、岛屿或海底冻结在一起的冰,当潮位变化时,它能随之发生升降运动,且多存在于沿岸或岛屿附近,其宽度可从海岸向外延伸数米甚至数百公里。海面以上高于2 m的固定冰称为冰架(ice shelf);而附在海岸上狭窄的固定冰带,不能随潮汐升降,是固定冰流走的残留部分,称为底冰(anchor ice)。流冰(ice floe)是自由飘浮在海面上、能随风流漂移的冰,由大小不一、厚度各异的冰块形成。在某些条件下,例如流冰搁浅相互挤压形成的冰脊(ice ridge)或冰丘(ice hummock),高度可达20余米。另一方面,破冰过程或螺旋桨切削冰层,将产生碎冰。流冰和碎冰将会影响极地船舶的航行性能和安全性。冰水动力学理论与方法研究,着重于建立流冰/碎冰(固体)水(液体)固液两相流动的基本理论框架,提出有效解决此类问题的方法。与一般的固液两相流动不同,冰水动力学有两个显著特点:一是流冰/碎冰体积较大,不能简单简化为质点模型,需要考虑其自身的刚体运动与转动惯量;二是流冰/碎冰密度通常小于海水,漂浮于海面,使得自由液面变成约束液面。冰水动力学的这些特点也是它的难点,应采用理论分析、原型观测、模型试验和数值模拟相结合的方式加以研究。

冰水混合流场中船舶运动响应研究<sup>[33-36]</sup>以冰水动力学的研究成果为基础,为极地船舶航行性能的评估提供理论支撑。一般而言,船舶综合航行性能主要包含浮性、稳性、抗沉性、快速性和操纵性。由于极地环境特殊,极地船舶的航行性能与通常敞水区域的船舶相比有明显的区别,极地船舶在冰水混合流场中的综合航行性能则主要表现为破冰能力和操纵性。破冰过程中,船舶与冰的相互作用会对船舶的运动状态产生影响,进而影响船舶的操纵性。芬兰-瑞典冰级规范(FSICR)和国际船级社协会(IACS)都对船舶在冰区航行的破冰能力和操纵性提出了要求。

破冰过程本质上是非线性动力学问题。2013年,挪威研究人员就破冰过程中船舶与平整冰的相互作用提出了一种新的六自由度数值模型。该数值

模型通过考虑船舶的六个自由度运动来研究破冰过程中船舶与海冰之间复杂的相互作用过程。研究表明,受冰阻力、装载率、非对称水线面、船舶垂向运动及船舶倾角等因素的影响,船舶在平整冰中航行时左右舷并不对称,通常会产生额外的横向力和偏航力矩,从而引起船舶偏移。当海冰厚度超过0.5米时,数值模拟得出的回转半径与实船得出的回转半径会出现偏差,这可能是由尾肩区域海冰的压碎和屈起引起的。船舶在冰区航行时不仅会受到水动力载荷的作用,也会受到冰载荷的作用,难以避免如厚冰夹船、肩部受损、转向、掉头困难等问题的出现,所以冰区船舶对操纵性提出了更高的要求。因此,必须提出船舶航向控制方案来保证船舶操纵性。挪威研究人员对Tor Viking II破冰船进行了数值模拟,并将结果与实船数据进行了对比,结果表明:船舶破冰过程中,海冰越厚,海冰的阻力越大,船舶能达到的速度越低;船舶破冰能力通过冰阻力与推进器净推力的平衡匹配获得。冰阻力的确定过程十分复杂,其大小与船体运动情况、船舶破冰方式和冰层情况等因素相关。在实际设计中,破冰能力主要采用经验理论模型和模型试验进行预报,而我国目前尚不具备有效的基础试验支撑。总之,冰水混合流场中船舶运动响应相当复杂,有待进一步深入研究。

破冰或航行过程中,碎冰会随着流体向艏部行进,由此必然导致船舶推进器与海冰的相互作用。推进器与冰的相互作用研究目前主要着眼于冰对推进器的影响,其影响有二:(1)推进器前方的冰会扰乱推进器前方水的流动从而影响推进器产生的推力;(2)冰与推进器叶片直接接触会对叶片产生冲击,也会影响推进器的推进性能。加拿大研究人员采用三维非定常面元法建立了螺旋桨靠近冰时的水动力载荷脉动预报方法,可预报冰的加速运动及冰区对螺旋桨性能及轴系的影响。针对新型的推进器,如吊舱推进,美国和英国的研究人员第一次在空泡试验筒中进行了一系列试验,探索吊舱推进器和冰的相互作用,结果表明推进器与桨的相互作用与工况和空泡作用密切相关,同时,对于新一代吊舱推进的冰区船舶,推进器与冰相互作用过程中空泡的影响需引起足够重视。

极地低温环境对极地船舶最直接的危害是使承受动载的船舶结构与相关船用设备容易产生低温脆断。为了避免极地船舶在破冰和航行过程中受到冰载冲击时产生结构失效,必须开展结构低温失效理论与准则研究。低温环境下的结构失效与破坏机理

研究主要涉及船用材料在低温下的力学性能、船体结构在低温下的结构特性以及相关设备构件在低温下的力学特性,应当特别关注低温下的止裂试验,开发适用于低温环境下的止裂钢(例如日本已开发了HIREST止裂钢)。

以极地海冰宏观力学特性为基础,以冰载荷预报技术为手段,开展破冰过程中船体结构静动态响应研究。在破冰过程中,由于破冰船与冰的相对速度的不同,破冰船在受到冰载荷作用时的响应可以分为静态响应与动态响应。冰载荷为随机载荷,当不考虑冰载荷随时间变化的特性时,海冰为静载荷,此时,破冰船的响应为静态响应。当考虑冰载荷的历时过程时,破冰船的响应为动态响应。破冰船的动态响应包括受到动态冰载荷时的强度问题与振动问题,现有的设计规范无法准确预报极地船舶对动态冰载荷的响应。早在1982年,芬兰研究人员就开展了结构物与冰相互作用的动态响应的理论与实验研究,并提出了细长结构与冰相互作用的数值仿真模型。1989年,芬兰研究人员根据细长结构在冰力作用下的稳态振动试验结果,提出了另外一种计算模型,并在此基础上开发了宽体结构非线性动态响应的计算程序(PSSII)。在随后的十年里,相继有研究人员对冰-结构相互作用时的结构响应进行实验研究,并对“PSSII”计算程序进行改进。1998年,日本学者联合芬兰学者,对不同宽度的结构与海冰相互作用时的动态响应进行了实验和仿真研究。

极地航行区域环境恶劣,极地船舶会与航道上分布的浮动冰山、平整冰等产生碰撞,而且经常会遭受浮冰、碎冰、冰排等的撞击、挤压作用。因此需开展流动冰载荷下船-冰碰撞动态响应研究<sup>[37-39]</sup>。极地船舶需要进行船-冰碰撞的动态响应分析,包括船体结构在碰撞后的损伤与受到流动冰载冲击后产生的振动响应。船-冰碰撞研究要对极地船舶的结构设计与碰撞情景进行综合考虑,按可能的情况,对船-冰碰撞的相对位置,相对速度进行设计。在进行动态响应分析时应考虑冰的类型,船与冰碰撞后的瞬态响应及碰撞过程中船与冰的运动动态响应等因素。在加拿大政府的支持下,加拿大研究人员在1994年对船与多年冰及冰山碰撞时的动态响应进行了研究,提出了考虑流固耦合的非线性船-冰碰撞计算模型。

#### 2.4 极地环境下船舶机电系统适应性与可靠性

与现代工业其他领域的设备一样,船舶设备的正常运转也十分依赖于正确的润滑技术。一直以

来,由于润滑技术带来的经济效益以及未正确使用润滑技术带来的损失难以量化,很多设备管理人员往往将设备故障和运行效率低下归结于零部件的损坏,而忽略了润滑的重要性。因而,对船舶机械设备的润滑机理进行深入的研究对提高船舶设备的运行效率,降低维修费用而言具有重要的意义。极地船舶由于其工作环境的特殊性,设备的润滑需要充分考虑低温带来的影响。国外针对低温下机械设备润滑机理展开了大量研究,而我国在这一方面的研究与国外先进水平还存在很大差距,急需开展极地船舶机械设备低温润滑机理研究,为保证我国极地船舶机械设备的正常运转提供理论支撑。

系统可靠性理论最先就是从电子产品的可靠性理论发展起来的。由于电子系统分布类型简单,试验比较容易,因此电子产品的系统可靠性理论发展迅速,现在已经趋于成熟,结构可靠性理论在近些年也有较快的发展。相对而言,机械产品的系统可靠性理论既不同于电子系统,也不同于结构系统,由于其得到的可靠性信息数据少,且通用性差,破坏机制呈多样性,对环境因素依赖性强,因此机械产品的可靠性设计理论发展缓慢,可以说还处于摇篮期。极地地区有着难以想象的低温天气,极地船舶机械设备可靠性的研究资料少之又少,亟待进行极地船舶机械设备低温控制可靠性研究。

极地船舶的航行环境恶劣,极低的环境温度会影响船舶电气设备及其器部件的运行性能,降低可靠性,影响船舶的正常航行、作业与生活。对于具有破冰能力的极地船舶,如极地科考船等,它们在破冰过程中,由于冰载荷的随机波动性,船舶电力推进系统将处于随机性、冲击性负载作用的极端运行工况,这对电力推进系统的设计与变频控制提出了极高的要求。电路板及波导中易出现水汽凝聚和结露现象,可能造成元器件和电路板的腐蚀、短路,雷达发射功率下降等问题。因此,我国需要深入开展极地船舶电气设备低温运行可靠性研究。

近年来,船舶电力推进系统被广泛应用于科考船、破冰船、海洋工程船、钻井平台、豪华游轮、液化天然气运输船等各种高新船舶,全球市场需求逐年攀升。国外研究起步较早,ABB、西门子、通用电气公司是船舶电力推进设备的主要供应商与系统集成商,占据着全球90%以上的市场份额,处于垄断地位。“十五”以来,我国开始自主研发船舶电力推进系统,目前已经掌握了船舶电力推进系统的绝大部分核心关键技术,完成了设备样机研制与系统联调

试验,验证了系统的功能和技术性能。虽然从技术层面上讲,我国船舶电力推进系统的电制形式、功率密度、运行效率等优于国外,但在工程应用方面与国外相比还有较大差距,极端气候条件及运行工况下电力推进系统的适应性还有待进一步研究与验证。我国必须高度重视极地船舶特别是高等级极地船舶冰区航行电力推进系统适应性研究,为我国在北极地区破冰航行提供装备保障。

极地船舶机械设备防冻除冰机理研究是极地船舶完成其预定功能的保障条件。在极地工况下,船舶甲板机械存在众多问题:大负荷下结构件容易因材料的低温脆性而损坏,铸钢(铁)件易冻裂;钢丝绳冻硬,难于缠绕甚至出现断股现象;低温下机械设备内外部结冰,发动机启动困难,液压系统卡死,无法正常工作;在北极极低温度下,齿轮箱中电机、齿轮线等机械传动部件中的润滑油会过于粘稠导致阻力升高,甚至出现齿轮箱或天线因冰冻而无法工作的情况。研究极地工况下机械设备适应性的关键在于寻找经济合理、合乎标准的防冻除冰机理。

## 2.5 极地船舶总体关键基础技术

极地圈层是地球上人类尚未完全开发的主要区域,其环境极为脆弱。一旦极地环境遭到破坏,不仅地球上最后一块净土不复存在,而且其造成的后果将是不可设想的。目前对北极环境保护的重视度越来越高,船舶严格的排放要求对总体设计的影响不亚于冰层和恶劣天气的影响。因此,在绿色船舶发展大背景下,开展极地船舶绿色设计理论基础研究,发展绿色极地船舶技术将显得更为重要。在考虑EEDI时,破冰船存在着特殊问题,即对于作业于冰区的船舶,EEDI要求在不增加装机功率的情况下提高性能。而破冰船一般都需要较大的动力以支持破冰作业,能满足EEDI要求的比较现实的方法包括使用辅助装置(垂直船首冲刷系统、空泡润滑、方位电力驱动等)和LNG燃料。不过EEDI并不适用于所有船型,例如电力推进船舶,而对于一些冰级较高的船型如芬兰-瑞典1A Super冰级船舶,要求也有所降低,因为由于这些船的特殊性,基本无法完全符合EEDI标准。到目前为止,依旧没有一个解读1A Super冰级以上船舶EEDI的明确指导。绿色船舶将是有效提升我国船舶工业能力的技术突破口,针对极地船舶,结合实际使用需求,应重点关注和发展极地绿色船舶评价技术、极地绿色船型设计技术、极地船舶无压载水技术和极地船舶新能源动力技术<sup>[40]</sup>。



传统的破冰船均具有典型的破冰首和舷侧倾斜特征,破冰船的首部线型有:直艏柱契形首、怀特凹形首、梅尔维尔首、绞刀型勺形首、山脊型半勺形首、平式系列、蒂森瓦斯首等。近年来,又发展了双向破冰船型、斜向破冰船型、三体破冰船型等新船型。开展极地船舶新型破冰船型几何构型理论与方法研究,形成主尺度等参数综合论证优化技术和极地船型几何重构技术,建立船型曲面的参数驱动方法,有助于获得航行性能优良的极地船型。

极地船舶的总体设计不仅要考虑敞水区航行性能,而且还要兼顾冰区的破冰性能和操控性能等。这些因素相互影响,在设计中还可能是相互矛盾的。随着北极通航,北极航道的运力将稳步上升,越来越多的船只将往返于极地冰区和敞水区域。如对于跨北极货运型船型,既追求敞水区域的经济性,又必须考虑冰区航行性能。因此,需要开展冰水混合流场中船舶性能均衡设计理论与准则研究。要实现敞水及冰区航行性能的平衡优化设计,建立敞水及冰区航行性能的快速预报模型。其难点在于极地航行船舶破冰过程及机理、极地破冰船型优化技术和极地船舶冰区航行性能预报方法的研究和突破。

地球磁场形如漏斗,尖端对着南北两个磁极。太阳发出的带电粒子沿着地磁场这个漏斗下降,进入地球两极地区。因此,在北极地区受到自然电磁干扰的程度要远远高于中低纬地区。频发的太阳磁暴和极光,严重影响着无线电导航系统的正常工作,使船舶在极区航行时存在着很大的危险和不确定性,对保障航行安全的船用导航雷达提出了新的挑战。目前的测冰导航雷达舱外设备低温环境适应性、小冰山和冰山断裂块很难被探测、海冰类型的鉴别能力弱。因此,需要开展极地环境下通信导航新理论与新方法研究。

从前面分析中可以看出,极地船舶设计涉及多个学科,难度大。在基本需求论证基础上,依托经验模型或数据库,建立船型尺度及参数与敞水及冰区船型性能的关系,可实现主尺度及参数的综合优选。人们已通过研究得到一些定性和定量的规律,例如极地船舶主尺度及船型参数(船舶船宽、艏柱倾角,纵剖面倾角等)对冰区航行性能影响巨大;双向破冰船型配合吊舱推进器后可艏艉破冰,使船型设计可兼顾冰区航行性能和敞水性能等。国外学者基于回归模型开展了较为系统的参数对破冰性能的影响分析,其研究成果可有效指导船型设计及优化。开展极地船舶多学科设计优化理论与方法研究,有助于

集成我国极地船舶核心关键基础技术,实现船舶设计流程再造,为设计建造具有我国自主知识产权的极地船舶奠定坚实基础。

### 3 极地船舶研究前沿及科学问题

经过两天的大会报告和与会专家的充分研讨,凝炼出以上五个方面的极地船舶核心关键基础技术,其中的研究前沿及科学问题归纳如下:

在“极地航行环境条件与海冰力学特性”方面,需要开展以下科学问题的研究:(1) 极地船舶航行气象条件分析;(2) 极地船舶航区海冰状态分布;(3) 极地海冰物理特性及环境因素影响;(4) 极地海冰微观结构特征与宏观力学特性;(5) 极地海冰尺度效应及相似理论。

在“极地船舶冰载荷预报技术”方面,需要开展以下科学问题的研究:(1) 冰载荷理论与方法;(2) 冰载荷数值预报方法;(3) 冰载荷试验技术;(4) 冰载荷现场测试技术。

在“极地船舶冰水动力学与结构性能”方面,需要开展以下科学问题的研究:(1) 冰水动力学理论与方法;(2) 冰水混合流场中船舶运动响应;(3) 冰水混合流场与推进器相互作用;(4) 结构低温失效理论与准则;(5) 破冰过程中船体结构静动态响应;(6) 流动冰载荷下船-冰碰撞动态响应。

在“极地环境下船舶机电系统适应性与可靠性”方面,需要开展以下科学问题的研究:(1) 极地船舶机械设备低温润滑机理;(2) 极地船舶机械设备低温控制可靠性;(3) 极地船舶电气设备低温运行可靠性;(4) 极地船舶冰区航行电力推进系统适应性;(5) 极地船舶机械设备防冻除冰机理。

在“极地船舶总体关键基础技术”方面,需要开展以下科学问题的研究:(1) 极地船舶绿色设计理论基础;(2) 极地船舶新型破冰船型几何构型理论与方法;(3) 冰水混合流场中船舶性能均衡设计理论与准则;(4) 极地环境下通信导航新理论与新方法;(5) 极地船舶多学科设计优化理论与方法。

### 4 未来3—5年科学目标与资助重点

极地船舶包括破冰船、冰区加强船和冰区航行船。我国极地船舶的发展思路应结合我国基本国情,在深入分析我国经济社会和船舶行业发展现状的基础上,着重关注基础性和前瞻性科学问题,实现极地船舶总体设计流程再造,为我国极地船舶设计研发提供理论基础和分析手段。

分析认为“极地船舶冰载荷预报技术”、“极地船舶冰水动力学与结构性能”和“极地船舶总体关键技术”是关键难点和瓶颈技术,建议作为未来3—5年的资助重点,力求在“冰载荷直接计算法”、“冰水动力学的理论基础”和“船舶性能均衡设计”等方面取得突破。

## 5 结语

随着北极航线开通率的逐渐提高和极地资源加速开发,极地航行船舶将迎来蓬勃发展机遇,除航运主力船型外,极地多功能船舶、海洋工程船舶等的需求量将持续增加,破冰船也将保持稳步发展,极地船舶及海工市场将在今后保持持续增长的态势。

极地资源开发利用和东北航道通航对保障我国经济持续稳步发展、保障能源运输安全有重要的战略意义。我国已成为北极理事会永久观察员,同时我国就极地相关事宜也一直与俄罗斯等北极国家保持良好的沟通和交流,为合理有效利用北极提供了基础。无论从船舶市场经济,还是支撑国家发展战略层面,极地船舶都有极大的发展空间。

建议从政策、行业和技术层面加紧谋划和研究,形成“产学研用”有机链,推动我国极地船舶的快速发展。

在政策层面,首先应尽早明确国家极地发展战略,制定相关发展规划和纲要,牵引极地装备发展。其次,应持续加大极地船舶基础研究相关的经费投入,必要时组建国家级研发团队和技术中心,有效缩短与国外差距,提高核心竞争力。再者,国家或地方政府应加大扶植极地船舶及相关领域发展的力度,通过科学合理的产业布局,促进产业资源的深度整合和区域经济的发展。

在行业层面,航运业、能源开发相关行业应尽早规划极地相关事宜,开展综合论证分析,制定行业发展规划,从需求角度牵引极地船舶等相关装备的发展。我国极地科考应从支撑实际应用角度出发,加大可有效支撑极地装备研制的关键基础技术的攻关工作。船舶行业应预先筹划,提前启动相关装备研究,同时进一步做好在建产品的知识资产管理和积累,形成相关标准体系,利用现有技术和资源不断延伸和扩展,同时加强国外引进成果的消化和吸收。

在技术层面,加强对冰载荷等关键技术的理论研究和试验研究,突破极地船舶总体设计的关键难点和瓶颈技术。同时借助绿色船舶发展大势深耕极地绿色船舶技术,抢抓技术制高点。此外,要注重基础技术向实际产品的转化和应用。

## 参 考 文 献

- [1] 习近平致中国南极泰山站的贺信. [http://news.xinhuanet.com/politics/2014-02/08/c\\_119245226.htm](http://news.xinhuanet.com/politics/2014-02/08/c_119245226.htm)
- [2] Bird KJ, Charpentier RR, Gautier DL, Houseknecht DW, Klett TR, Pitman JK, Moore TE, Schenk CJ, Tennyson ME, and Wandrey CJ. Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle. U. S. Geological Survey Fact Sheet 2008—3049.
- [3] Michel B. Ice Mechanics. Québec: Les Presses de l'Université Laval, 1978.
- [4] Hobbs PV. Ice Physics. Oxford: Clarendon Press, 1974.
- [5] Pauling L. The structure and entropy of ice and other crystals with some randomness of atomic arrangement. J Am Chem Soc, 1935, 57: 2680—2684.
- [6] Cammaert AB, Mugeridge DB. Ice Interaction with Offshore Structures. New York: Van Nostrand Reinholdt, 1988.
- [7] Sanderson TJ. Ice Mechanics—risks to offshore Structures. London: Graham & Trotman, 1988.
- [8] Cox GFN, Richter-Menge JA, Weeks WF, Melor M. A summary of strength and modulus of ice samples from multi-year pressure ridges. Proceedings of International OMAE Symposium, New Orleans. 1984: 126—153
- [9] Sinha N K. Elasticity of natural types of polycrystalline ice. Cold Region Science and Technology, 1989, 17: 127—135
- [10] Timco GW, Frederking RMW. Confined compression tests: Outlining the failure envelope of granular/discontinuous columnar sea ice. Cold Region Science and Technology, 1986, 12: 13—28
- [11] Timco GW, Frederking RMW. Compressive strength of sea ice sheets. Cold Region Science and Technology, 1990, 17: 227—240
- [12] Nadrau, J. P., Michel, B. Ice properties in relation to ice forces. Proceedings of the Second State-of-the-Art Report IAHR Working Group on Ice. 1984, 4: 1—53
- [13] Inoue M, Yamauchi Y, Ebinuma T. Mechanical properties of Antarctic sea ice. Proceedings of the 9th IAHR Symposium on Ice. Sapporo, Japan. 1988, 1: 162—176
- [14] Frederking RMW, Timco GW. Field measurements of shear strength of columnar-grained sea ice. Proceedings of the 8th IAHR Symposium on Ice, Iowa City, USA, 1986, 1: 279—292
- [15] Weeks WF, Assur A. Mechanical properties of ice. CRREL Monograph II-C3. Hanover, New Hampshire, USA, 1967.
- [16] Schwarz J, Weeks WF. Engineering properties of ice. Journal of Glaciology, 1977, 19(81): 499—531
- [17] Cole DM. Effect of grain size on the internal fracturing of polycrystalline ice. Rep. 86—5, U. S. Army Cold Regions Research Engineering Laboratory, Hanover, N. H. 1986
- [18] Cole DM, Dempsey JP. Influence of scale on the constitutive behavior of sea ice. Proc IUTAM Symp. on Scaling Laws in Ice Mechanics and Ice Dynamics. Solid Mechanics and its Applications. Kluwer Academic, Boston. 2001, 94: 251—264.
- [19] Dempsey JP. Scale effects on the fracture of ice. The Johannes Weertman Symposium. The Minerals, Metals and Materials Society, 1996: 351—361
- [20] Bařant ZP, Xiang Y. Size effect in compression fracture: Splitting crack band propagation. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123: 162—172.



- [21] Lubbad R, Løset S. A numerical model for real-time simulation of ship-ice interaction. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65:111—127
- [22] Jordaan J. Mechanics of ice-structure interaction. *Engineering Fracture mechanics*, 2001,68:1923—1960
- [23] Zeng LF, Andersen R. Modeling ductile behavior of columnar ice using computational plasticity. *Proceedings of the 12th IAHR Symposium on Ice*, 1994,(1): 282—291
- [24] Sinha NK. Rheology of Columnar-Grained. *Ice Experimental Mechanics*, 1978,18(12): 464—470
- [25] Sjöland SG. A constitutive model for ice as a damage visco-elastic material. *Cold Regions Science and Technology*, 1987, 41:247—262
- [26] Pulkkinen E. Rate sensitive damage and cracking model for ice. *Proceedings of 7th International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, 1989,4: 47—54
- [27] Choi K, Hwang OJ. Continuum damage modeling for the estimation of ice load under indentation. *Proceedings of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference Montreal, Canada*. 1998, 2: 468—475
- [28] Li WJ, Lubbad R, Løset S. Simulating ice-sloping structure interactions with the cohesive element method. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2014, 136: 031501.
- [29] Paavilainen J, Tuhkuri J, Polojärvi A. 2D numerical simulations of ice rubble formation process against an inclined structure. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 68: 20—34
- [30] Joehmann P, Scharz J. Ice force measurements at Lighthouse Norstromsgrund, Winter1999. Loleif Report No5, EU Contract MAS-CT- 97- 0098. 48P + Appendix. Hamburg, Germany, 2000.
- [31] Joehmann P, Scharz J. Ice Force measurements at Lighthouse Norstromsgrund, Winter 2000. LOLEIF Report No5, EU Contract MAS-CT- 97- 0098. 170p + Appendix. Hmaburg, Germany, 2001.
- [32] Joeuntann P, Sehwarz J. The influence of individual parameters on the effective pressure on level ice against lighthouse “Norstromsgund”. *Proc 18th International Conference on Port and ocean Engineering under Arctic Conditions*. Clarkson University, Potsdam, NY, USA. June26—30, 2005, 3: 1155—1164
- [33] Sawamura J, Tachibana T. Development of a numerical simulation for rotating and sliding of the ice floes along a ship hull. In: *Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. Montreal, Canada, 2011
- [34] Su B, Riska K, Moan T. A numerical method for the prediction of ship performance in level ice. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 60(3):177—188
- [35] Su B, Riska K, Moan T. Numerical study of ice—induced loads on ship hulls. *Marine Structures*, 2011, 24(2): 132—152
- [36] Zhan D, Agar D, He M, et al. Numerical simulation of ship maneuvering in pack ice. In: *Proceedings of the 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2010, 4: 855—862
- [37] Gagnon RE. Results of numerical simulations of growler impact tests. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 49: 206—214.
- [38] Liu Z, Amdahl J, Løset S. Integrated numerical analysis of an iceberg collision with a fore ship structure. *Marine Structures*, 2011, 24(4): 377—395
- [39] Gagnon RE, Derradji AA. First results of numerical simulations of berry bit collisions with the CCGS Terry Fox Icebreaker. *Proceedings of IAHR 2006*, Sapporo, Japan.
- [40] Riska K. Design of icebreaker ships. *Cold Regions Science and Marine Technology*, *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, 2012.

## Advancements of the core fundamental technologies and strategies of China regarding the research and development on polar ships

Zhu Yingfu<sup>1</sup> Liu Zuyuan<sup>2</sup> Xie De<sup>3</sup> Li Wanhong<sup>4</sup>

<sup>1</sup> China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064;

<sup>2</sup> School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063;

<sup>3</sup> School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;

<sup>4</sup> Department of Engineering and Material Science, National Natural Science Foundation, Beijing 100085)

**Abstract** Based on presentations and discussions at the 118<sup>th</sup> “ShuangQing Forum”, the great opportunities and strategy challenges regarding polar ships are described briefly in this paper. A comprehensive review is made over the advancements in core fundamental technologies of polar ships from aspects such as polar navigation environmental conditions and mechanical properties of sea ice, prediction methodologies of ice loads on polar ships, polar ship dynamics in ice-infested waters and its structural performances, fitness-to-service and reliability of marine mechanical and electrical equipment in polar environment, and key basic technologies regarding general design of polar ships. As conclusions achieved in the Forum, the research fronts and scientific problems were drawn and the scientific goal and the priority funding suggestions in the future 3—5 years were proposed to NSFC.

**Key words** polar ships; research and development; strategies and policies