

# 中山站前沿固定冰破冰方案及船舶操纵方法

赵炎平<sup>1</sup>, 张旭德<sup>1</sup>, 周建文<sup>2</sup>

(1. 中国极地研究中心, 上海 200136; 2. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 为了向“雪龙号”提供一条可行的卸货用航行水道, 中国第一艘自主建造的破冰船“雪龙2号”急需在南极大陆的中山站前沿复杂的固定冰中制订一条破冰路线。在“雪龙号”过去多年积累数据和经验基础之上, 通过详细分析破冰水域的航行环境、固定冰区当年冰情、最新气象辅助资料以及可用的先进设备, 制订一条破冰计划路线。采用首尾破冰、进退速度控制、预留距离控制以及操纵船舶辅助破冰等方法, 顺利完成破冰开路任务。实际破冰结果证明, 计划路线既绕开了危险的冰裂缝和冰山, 也为“雪龙号”节省大量的卸货时间。总结“雪龙2号”在固定冰中的破冰能力, 指出相应的困难和急需解决的问题; 为我国破冰船在极区常态化航行、冰区航行的船舶驾驶员、按极地规则要求进行的冰区航行培训以及相应的业务模拟提供参考。

**[关键词]** 雪龙2号; 中山站; 固定冰; 冰区航行

**[中图分类号]** U 675.5+7

## The Analysis of Ice-breaking Plan and Ship Maneuvering in Fast Ice Near the Zhongshan Station

ZHAO Yanping<sup>1</sup>, ZHANG Xude<sup>1</sup>, ZHOU Jianwen<sup>2</sup>

(1. Polar Research Institute of China, Shanghai, 200136, China; 2. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to provide the “XUELONG” with a possible channel to discharge cargo in complex fast-ice-covered water near ZHONGSHAN station in the Antarctic continent, the ice-breaker “XUELONG 2” built by China independently is in an urgent need for an ice-breaking route. Based on the data and experience accumulated over the years, the author and team members analyzed in detail the navigation environment, fast ice-covered water condition, the latest meteorological auxiliary materials and advanced equipment available on board, and made an ice-breaking plan route. After “XUELONG 2” finished ice-breaking, it was proved that the plan route can save much discharging time and avoid the ice crevasses, iceberg etc. The special Ice-Breaking method was adopted for forward and aft-ward performance, control of speed, safe distance for ramming ice during the whole ice breaking, as well as the method of ship maneuvering to help breaking fast-ice smoothly. Some difficulties and problems needed to resolve are listed. This paper provides reference for deck officers on Chinese icebreakers and merchant ships navigating in ice-covered waters or polar waters, and for the training of navigation and the corresponding operation simulation according to the polar code.

**Keywords:** XUELONG 2; zhongshan station; fast ice; navigation in ice water

**[收稿日期]** 2020-06-01

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目资助(51579114)

**[作者简介]** 赵炎平(1982—), 男, 船长, 从事航海技术的研究, E-mail: zhaoyanping@pric.org.cn。通信作者: 周建文(1972—), 男, 大副/副教授, 从事计算机应用技术在航海领域的应用及航海教育的研究。E-mail: Seun2006@jmu.edu.cn

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

## 0 引言

自1994年以来,“雪龙号”极地考察船为中国南极科学考察站——中山站、长城站、昆仑站及泰山站提供物资补给。受限于“雪龙号”的破冰能力,“雪龙号”无法靠近科考站。从“雪龙号”船在固定冰中的停泊位置到科考站的距离短则20多公里,长则达40多公里,考察站物资运输主要依靠直升机、冰上雪撬和水面小艇等。由于路途远,环境气候恶劣,还有危险的冰裂隙,直升机单次加油运输次数和货运量少,多年来极地物质运输一直是困扰人们的问题。

中国自主建造的“雪龙2号”船首次参加南极考察,其中的一项重要使命就是在中山站前沿的固定冰区域为“雪龙号”船开辟一条更近更安全的运输线路。“雪龙2号”是中国第一艘自主建造的破冰船,在试航阶段限于试航水域,无法对其破冰能力和可能出现的情况进行测试,所以此次在固定冰中为“雪龙号”开辟水道也是对其实际破冰能力的试验和测试。

本文对中山站前沿水域的航行条件、固定冰冰情进行了详细的分析,制订了完整的破冰路线和运输路线,使用首尾破冰和破冰辅助的船舶操纵方法,顺利完成了固定冰破冰任务。总结了“雪龙2号”破冰船在固定冰中的连续破冰能力和中山站前沿水域常态化安全航行急需解决的问题,为船舶在固定冰区安全航行、极地冰区航行培训课程建设以及冰区航行模拟器性能标准提供重要参考。

## 1 破冰路线分析

“雪龙2号”船于20191120T12航行到中山站附近固定冰外缘,船舶位置为 $69^{\circ}08'48''\text{S}$ 、 $76^{\circ}19'54''\text{E}$ ,为制定破冰路线做准备。

### 1.1 水域环境分析

根据中国南极考察队累积的中山站前沿水域航行经验及搜集的海况资料,对中山站前沿水域海底的浅点(或浅滩)、水下礁石、碍航物、水流等航行条件进行分析。

1) 中国南极测绘研究中心于2002年11月出版的1:25 000的“普里茨湾中国考察锚地海图”,范围是 $69^{\circ}10'18''\text{S} \sim 69^{\circ}25'\text{S}$ 、 $76^{\circ}\text{E} \sim 76^{\circ}38'12''\text{E}$ 的水域,可为破冰路线的制定提供初步的参考。

2) 国家海洋环境预报中心提供的可见光影像图,附有考察队员探测的冰面探冰数据和可选的运输路线,冰缝大小、走向及分布,水域中冰山、陆地和固定冰的总体分布等信息,是破冰路线设计的主要参考资料,但因为这种光影像图是位图,只在四周标注了经纬图尺,需要结合现场探冰结果对冰山和冰脊的分布进行人工标注。

3) ECDIS (electronic chart display and information system) 使用的矢量海图AUS270070,是澳大利亚水道测量局于2017年12月11日出版的数据不足的海图,比例尺为1:350 000,图上只标注了稀疏的水深资料,并且在中山站前沿固定冰附近没有水深资料,只能为破冰航行的前期提供参考,如图1所示。

4) 英版纸质海图BA7405及航路指南<sup>[1-3]</sup>,比例尺较小,中山站前沿水域依然没有水深数据,只提供了沿南极大陆西向的南大洋洋流和岛屿的轮廓图,如图2所示。

综合分析以上海图和影像资料,固定冰外沿水域水深资料少,内沿水域则是空白,可靠性低;周边的岛屿资料简单,仅有轮廓图,无高程数据,水下礁石和碍航物资料严重匮乏。根据此处冰山分布及粗略高度估计,中山站前沿水域水深在50 m左右,海图提供的概略图仅能用以查看岛屿间的关系和态势。

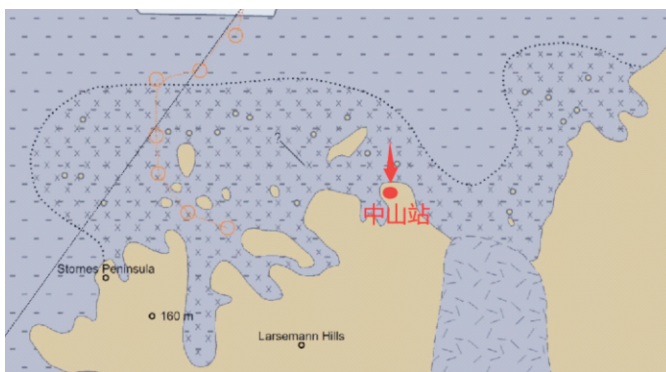


图1 电子海图概略资料

Fig.1 Summary data in ENC

## 1.2 固定冰冰情分析

本次计划破冰的水域为普利茨湾 (Pryz Bay) 中山站 ( $69^{\circ}22'S$ 、 $76^{\circ}22'36''E$ ) 前沿水域, 固定冰范围为东西向 12 n mile, 南北向 14.5 n mile 的范围, 如图 3 所示<sup>[4]</sup>。

中山站前沿的上述水域, 每年 11 月完全被固定冰覆盖, 在固定冰中分布有浮在水面和搁浅的冰山, 还有范围较长而深度不一的冰裂缝, 强度和范围不均的冰脊和冰岩, 并且还有覆盖一定厚度的积雪。

### 1.2.1 固定冰物理特性

采用一定间隔钻取冰样, 对中山站前沿水域的固定冰进行分析。发现该水域固定冰有以下几种物理特性: 1) 固定冰厚在 120 ~ 140 cm; 2) 积雪厚度为 20 ~ 42 cm; 3) 固定冰域内冰雪厚度差异较大; 4) 样冰的硬度达到 700 kPa。



图 2 纸海图概略资料

Fig.2 Summary data on paper chart

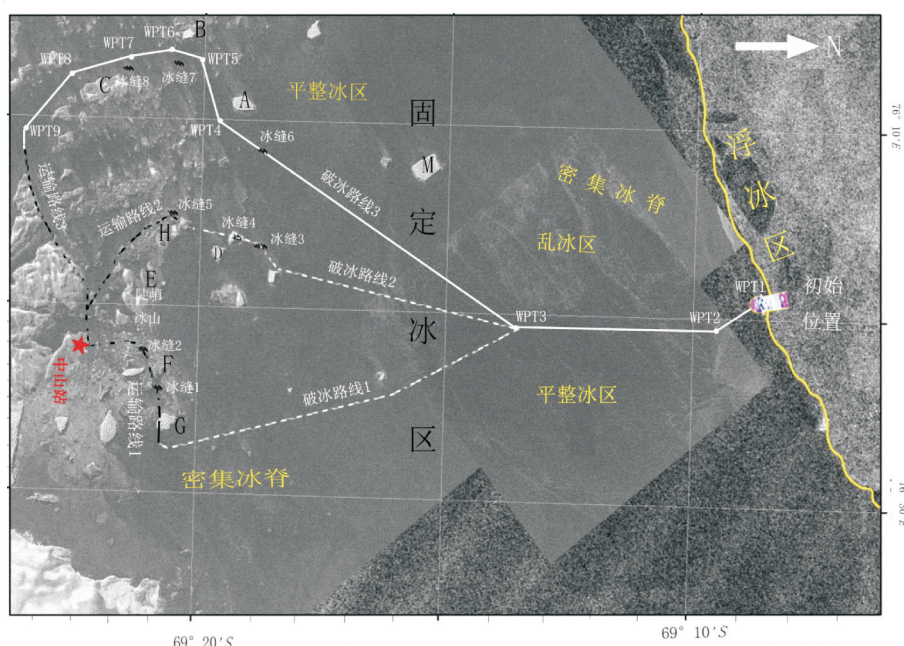


图 3 中山站前沿水域固定冰影像图及标注图

Fig.3 Fast ICE front of Zhongshan station

### 1.2.2 冰山、冰脊和冰缝分布

1) 冰山分布。由图 3 可以看出, 以中山站为基点, 在中山站东北、正北、西北侧分布有密集的冰山, 其中: A, D, G 及外侧水域的冰山嵌在固定冰中并未搁浅; B, E, F 及岸边之间的冰山已座底搁浅。未座底的冰山可能在风流作用和温度升高作用下, 融化“翻身”, 因此, 在制定破冰路线时要充分考虑船与冰山之间的距离、冰山的倾斜程度和融化程度, 并结合直升机现场探冰, 对图 3 中提供的冰山情况进行对比分析, 部分冰脊、冰丘及小冰山在可见光影像上显示不清楚, 破冰路线需要根据现场情况进行优化处理。

2) 冰脊及冰丘分布。冰脊是海冰在风、流、浪等环境动力作用下相互重叠、挤压形成的大小不同、形状各异的冰块, 在大块海冰边缘表面形成的一条冰线或冰墙。冰丘是碎冰因压力推挤向上隆起



形成的点状小丘。冰脊与冰丘镶嵌在固定冰中, 导致阻力增加, 是破冰受阻的主要原因<sup>[5]</sup>。在选择破冰路线时, 需尽量避开这些区域, 无法避开时则需采用冲撞式破冰。

3) 冰缝分布。冰缝是固定冰在涌浪等力的作用下破裂后形成的长度和深度较大的冰间裂缝, 它是冰上运输作业的主要安全隐患, 实难避开时需派专人铺填和看守, 并作好明显标记。从图 3 中可以看出, 国家海洋环境预报中心推荐的 3 条冰面卸货线路, 共分布有 8 条冰缝。推荐运输线路 1 上有 2 条冰缝, 都位于密集冰山之间。推荐运输线路 2 上有 3 条冰缝, 这些冰缝宽度为 1.5 ~ 3.0 m, 北侧两条冰缝附近冰山较少, 南侧一条冰缝位于密集冰山中。推荐运输线路 3 上同样有 3 条冰缝。

在制订破冰计划时, 3 个方向可能的情况如表 1 所示。

表 1 3 个方向的破冰及最终运输路线对比

Tab. 1 Ice breaking and transport route

路线 Route	冰缝数 /条	冰缝宽度 Ice crack to transport/m	沿途冰脊 Ridges to	冰厚 Ice thickness /m	雪厚 Snow thickness /m	破冰距离 Distance to break/n mile	冰上运输距离 Distance for cargo transport /n mile	离内陆登陆 点 Distance to landing point
1	2	2	过多 Overmuch	—	—	15.4	2.2	较远 Longer
2	1	2 ~ 3	最少 Minimum	1.1	0.7	14.0	3.7	最远 Fairly long
3	0	0	较少 Acceptable	1.2	0.4	19.7	3.9	最近 Short

1) 路线 1 离中山站最近, 仅 2.2 n mile, 但冰缝都在无法破冰的密集冰山, 船舶只能到达冰山 G 东侧, 最后的运输路线上的冰缝 1 和冰缝 2 无法破冰, 只适合直升机吊运物资, 并且离内陆登陆点较远, 海冰上卸货及重型装备上站存在较大风险;

2) 路线 2 离中山站的距离比线路 1 稍远, 为 3.7 n mile, 船舶能够达到位置 H, 余下一条冰缝 5 无法破冰越过, 适宜直升机吊运物资, 并且离内陆登陆点较远, 海冰卸货及重型装备上站距离较远, 也存在较大风险;

3) 路线 3 的最后破冰位置离中山站最远距离为 3.9 n mile, 但如果能选择好破冰路线进行最大程度的破冰, 可以破除最后的冰缝 8, 到达最南侧的 WP9 点, 而且离内陆登陆点最近, 既适合直升机吊运物资, 又非常适合冰面卸货及重型装备上站。

综上所述, 本次破冰计划从位置 WP1 开始破冰, 避开西侧的密集冰脊到 WP<sub>2</sub>, 再向正南破冰到 WP<sub>3</sub>, 在 WP<sub>3</sub>—WP<sub>5</sub> 段, 由于无水深资料, 建议采用船上万米测深仪, 连续观测水深, 随时掌握海底走势, 如图 4 所示 (图中 A 冰山东侧和南侧的转向点 WP<sub>5</sub> 前后的水域没水深资料), 然后在 WP<sub>5</sub> 位置观测前方的冰山 B 东侧的冰脊严重程度, 适当调整方向进行破冰, 越过冰山 B 东侧的冰缝后向南破冰, 视情况向南越过冰缝 8, 向 WP<sub>8</sub> 位置破冰, 最终到达位置 WP<sub>9</sub>。

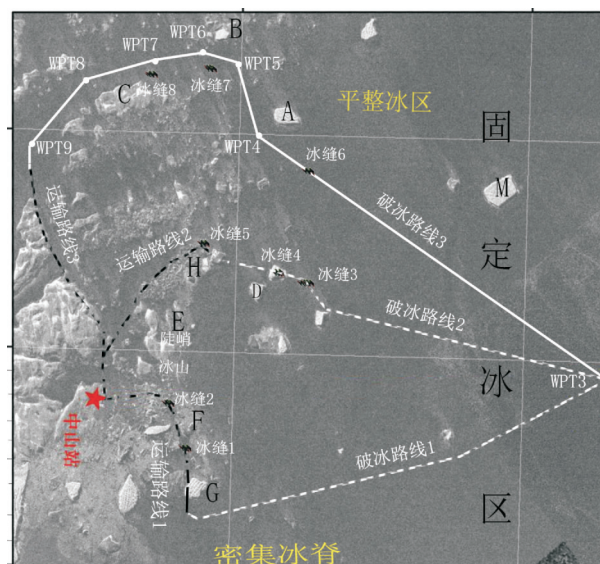


图 4 破冰范围南部放大图

Fig.4 South detail information

## 2 破冰方案及准备

“雪龙 2 号”船第一次在固定冰中为“雪龙号”船开辟水道, 参考历史经验<sup>[5-6]</sup>, 对破冰方法



或可能出现的极端天气进行提前准备,对“雪龙2号”的破冰速度、用车、用舵、冲撞距离、首向和尾向破冰方法、吊舱的使用等方案需事先进行设计,并在实际破冰中进行适当的调整,以安全可行的方案进行破冰作业。

### 2.1 船舶载态调整

“雪龙2号”船总长122.5 m,宽度22.32 m,破冰前的排水量为14 351.8 t,吃水调整为首吃水8.0 m,尾吃水8.1 m,稳性高度为1.19 m,无横倾角,吃水差为0.1 m,基本为平吃水。根据“雪龙2号”配载仪计算,调整后的稳性曲线如图5所示;载荷重力分布如图6所示。

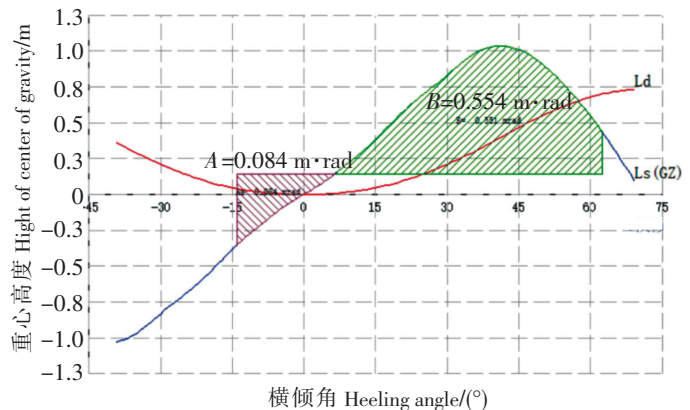


图5 破冰时船舶稳性曲线

Fig.5 Stability diagram

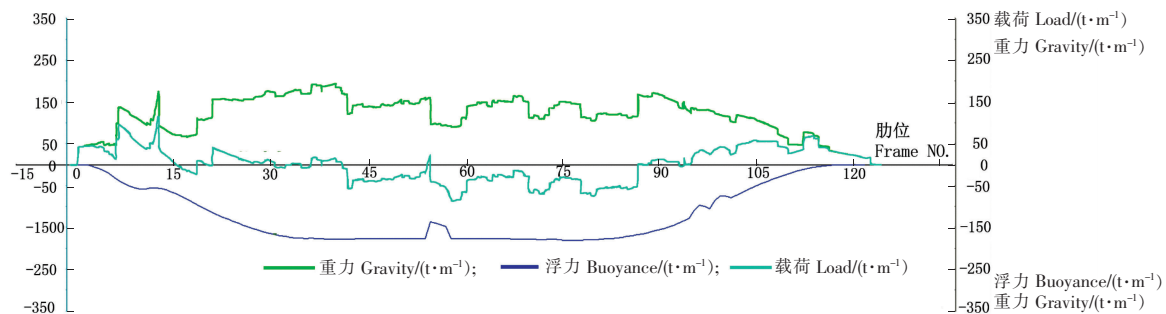


图6 破冰时载荷、浮力和重力分布

Fig.6 Load, buoyance and gravity

### 2.2 辅助设备及措施

1) 极区航行采用两台光纤罗经、一台DGPS罗经以及备用标准罗经,用以指示破冰方向和周围冰山、岛屿方位。2) 科考用万米测深仪,用于监测当前位置水深,判断无水深资料水域的海底走势,记录相应的位置,并及时标注在海图上。3) ECDIS矢量电子海图及搜集到的中山站前沿水域的纸质极区海图,用于查看水域的水下危险物、碍航物以及当前位置相应态势。4) 全方位声纳系统,用以探测前方一定距离内的水下礁石等碍航物标,尤其是航行资料不充足的前方冰区。5) 采用直升机和无人机对破冰路线前方的冰山、冰脊和冰缝进行现场观测,为及时调整破冰路线作保障。6) 探冰人员乘雪地摩托在近岸水域的固定冰上对冰山、冰脊和冰缝进行现场勘测,为破冰航行提供详细的冰情实时资料。7) 常用RADAR和冰RADAR提供冰山和冰脊情况,加载航线后可根据冰山、冰脊回波调整破冰方向。8) 使用船配气象设备和相关数据,预报破冰期间的风、能见度和潮汐情况,为破冰过程提供保障。

### 2.3 动力及操纵设备

“雪龙2号”船总装机功率为23.2 MW,两台7.5 MW破冰型吊舱推进器(全回转固定螺距螺旋桨),可实现首向和尾向双向破冰,并在船首两侧配备2台2 000 kW的槽道式侧推器,采用全回转吊舱推进器进行首向破冰,尾向破冰辅助大幅度转向或掉头,而首部侧推器由于布置在船舶的碎冰区位置及其横向推进的操作特点,仅用于清水区的海洋调查。全回转破冰型吊舱推进器有三种操作模式<sup>[8-9]</sup>。

1) Lever模式。操作旋回手柄,控制船速和航向,需要注意的是手柄和船头旋转的方向相反,手柄可在左右180°范围内旋转,在冰区航行时两套手柄均向内旋转,避免桨叶向外旋转击打碎冰。这种模式下可直接操作旋转手柄进行首向和速度的人工控制,但注意和传统的轴推式船桨的操作方向相反。

2) Autopilot模式。可使用RADAR或ECDIS上的船首向、转向点、航向和航迹控制模式进行航向

的控制, 旋回手柄速度钮调整船速, 这种模式适合自动导航水域时使用。

3) Manual 模式。可使用迷你 (MINI) 舵轮控制船首向, 旋回手柄控制船速, 这种模式与传统的操舵方法一致, 但由于两套吊舱可直接转向  $180^\circ$ , 舵角显示器显示范围也设置为左右  $180^\circ$  舵角, 使得驾驶员要求的舵令在 MINI 模式下舵角显示较小。

综合考虑航行安全、操作习惯及可靠性, 破冰时拟采用 Lever 模式直接操作旋回手柄, 以控制速度和航向, 但要时刻注意与“雪龙号”上的操作习惯相反, 不要操反“舵”, 也尽量不要外旋用“舵”, 在旋回手柄转向船尾方向时, 注意舵令的左右正确方向。

## 2.4 冲撞速度设置

根据“雪龙 2 号”冰区操作手册<sup>[10-11]</sup>, 在固定冰破冰过程中遇冰脊受阻后, 可用 10 kn 左右的速度多次冲撞冰脊进行破冰, 如表 2 所示。

表 2 在各种冰情下建议速度  
Tab. 2 Design speed/ice condition

冰情 Ice condition	冰中艏向直线航行 Ramming ice foreword/kn	冰中艉向直线航行 Broken ice astern/kn
层冰 Thickness < 1.6 m	无限制 Unlimited	8
层冰 Thickness > 1.6 m	10	3
冰道中 Ice leads	10	6 ~ 8
浮冰脊 Floes ice ridges	10(不停的冲撞 Ramming the ice continually)	6(偶然的撞击 Ramming the ice occasionally)
坐底冰脊 Ground ridges	不允许 Not allow	2 ~ 3
任何形式多年冰 Any multiyear ice	6 ~ 7(不停的冲撞 Ramming the ice continually)	2 ~ 3
严重的冰情区域 Seriouscompact pack ice	5	不允许 Not allow

## 3 破冰及船舶操纵

### 3.1 操作设置

1) 破冰前开启三台发电机 (总共四台发电机, 总功率 23.3 MW);

2) 取消 Cruise mode 的高速舵角限制的“巡航模式”, 切换到 Power mode 的主机功率智能跟踪调整的“固定功率”模式;

3) 设置操舵模式为 lever 模式, 两套吊舱开启联动模式, 直接操作左侧或右侧旋回手柄, 同时控制航向和速度, 冲撞破冰时取消联动, 两套系统采取独立向内旋回的方式进行倒车, 以分别操作两套螺旋桨的后退方向, 控制船舶的倒退方向;

4) 控制船速, 以速度 9 ~ 10 kn 接近固定冰, 接触后适当增加船速进行连续破冰, 根据前方路线上冰脊的实际分布, 适当操作手柄, 提前小幅度转向, 避开冰脊;

5) 密切关注破冰时负荷是否处于峰值之下, 如负荷处在阈值的时间超过 30 s, 系统会自动启动余下的待命发电机。

### 3.2 连续破冰方法

“雪龙 2 号”破冰船采用“大功率推进、重力压碎”的方式进行连续破冰, 有如下 5 个过程。

1) 船首触冰受阻后在主机推力作用下, 倾斜的船首向上略微抬升。

2) 船舶在固定冰上前进一小段距离, 阻力和抬升高度逐渐增大。

3) 固定冰到达船舶的碎冰区附近时, 在船舶重力和“冰刀”的作用下, 压碎并“裁开”固定冰, 冰的支撑作用力开始减小, 船首下沉。破碎后的冰向后、向下移动到船尾, 被船尾的强大尾流推排到船尾的水道。

4) 下沉后的船首在主机推力和固定冰支撑作用下,沿首部固定冰斜面又继续抬升,同时船身向前推进一小段距离,实现连续破冰。

5) 重复过程1)~4),船舶就在这一升降过程中完成连续的破冰。当冰况在船的破冰范围内时,冰雪越厚、硬度越大,则抬升越明显,冰薄,则在船舶推力作用下直接破碎,升降现象不明显,当冰况超出船舶的破冰能力(如遇厚冰脊或厚冰时)时,船首下沉后不会再抬升,这时阻力和推力相当,无法再前进。整个连续破冰的船舶升沉运动<sup>[2]</sup>,如图7所示。来自船首的固定冰经历接触区、碎冰区、翻转区和碎冰翻高区被推到船尾方向,如图8所示。

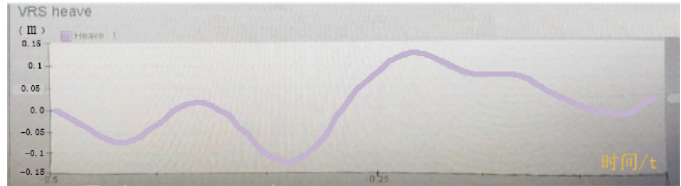


图7 连续破冰船舶升沉运动规律

Fig.7 Vessel's heave diagram



图8 破冰过程中碎冰4个运动区域

Fig.8 Four kinds of Ice's status during breaking

### 3.3 冲撞破冰操纵方法

冰山和冰脊会中断连续破冰,此时,采用的冲撞模式破冰有如下5种方法和步骤。

1) 降低转速,当全速进车破冰受阻时,操作旋回手柄,逐级降低转速。

2) 辅助破冰操作,两个吊舱旋转手柄向内逐渐旋转到180°,期间做短暂停留,利用螺旋桨的强大排水作用,冲刷挤压在两侧的碎冰和固定冰上的积雪,减小固定冰对船体的阻力,辅助破冰。

3) 倒退至冲撞距离,旋转手柄开始倒车,倒退距离控制在2~3倍船长,并控制倒车速度在3 kn左右,如果速度过大可向内、向前调整旋回手柄,并逐渐内旋到0°,如果倒车过程中船舶有明显的振动,立即正舵,如果倒车困难,可操作旋回手柄,使船舶左右小幅度摆动,从不同的角度向后倒车,当倒退距离已达到2~3倍船长时,不用调整速度,只内旋手柄到90°,向两侧排水、清理和润滑水道两侧,如果速度过大,则直接将手柄旋到0度,进车降低倒退速度。

4) 增速冲撞,操作手柄逐级增加船速,当前进距离达一个船长时,船速控制在5 kn左右,如果过小可适当增速,近半个船长时最好达到最大转速,以便以设计最大速度冲撞前方的冰脊进行破冰,如果倒退的距离比较小,加速的距离减小,可加快增速,如果倒退的距离过大,加速的距离较长,可放慢加速操作节奏,但不管倒退距离过大或过小,当余下半个船长时速度加速到6 kn,余一个船长时速度控制在4 kn左右,这样能较好地控制冲撞速度在9~10 kn之间。

5) 调整航向,在加速冲撞的过程中,如果船舶偏离水道,或者要调整破冰的方向,可以操作手柄转舵,以调整撞击的方向,但不要在加速的中途转向,以免减小冲撞速度,因本船的舵效和增速效果好,反应时间短,最好是在增速的最后半个船长阶段接近撞击时选择合适的舵角转向,在其后过程中把定即可,但要注意反弹减小转向效果的现象。



## 4 结束语

本次中山站前沿固定冰的整个破冰过程,总耗时 19.5 h,破冰距离 14 n mile,冰的实际厚度在 0.8 ~ 1.8 m,积雪厚度 10 ~ 45 cm,冰的硬度在 700 kPa 左右。在破冰路线中遇到了三次严重的冰脊,经 4 ~ 5 次冲撞后才通过,最后在 WP9 位置的冰缝南侧停止破冰。破冰期间,后面航行的“雪龙号”船受阻于弯曲水道,“雪龙 2 号”返回去施助一次。总体上顺利地完成了中山站前沿固定冰运输水道的开辟任务,解决了多年以来困扰“雪龙号”船远距离运输物质的问题,为“雪龙 2 号”常态化破冰、冰区航行和极区考察作业积累了宝贵经验。以后需要解决和重视以下几个方面的问题。

1) “雪龙 2 号”船要顺利完成在中山站前沿固定冰的破冰任务,前沿水域关键位置和水道的水深、礁石等主要海图要素资料必须规范标准,以消除船舶搁浅、触礁的安全隐患。

2) 本次是“雪龙 2 号”船首次破冰,在破冰过程中,在冰情分析、破冰路线规划、破冰环节中的船舶操纵、主机系统参数调整、船舶载态调整、核心辅助设备的使用等方面积累了宝贵的经验,应该总结汇总,形成书面的操作规范。同时,对极区航行的驾驶员(包括北极东北航道的航行<sup>[12]</sup>)、轮机员和管理团队进行正规培训,并对外公开推广,消除因口述、个人理解和重塑经验带来的错误,最终消除因之带来的安全隐患。

3) “雪龙 2 号”船是一艘智能化破冰船,在破冰过程中形成了海量数据,如船舶姿态仪数据、现场冰情数据、破冰过程中船舶强度与应力变化数据、破冰过程中的推进系统变化数据等,需要对这些数据进行立项分析研究,这些研究对“雪龙 2 号”船的进一步优化、后续破冰船的建造、极区船舶操纵培训、固定冰破冰、国内破冰船数学模型建模、极区培训的仿真模拟环境建设以及相应行业的辅助支持等具有重要而深远的意义。

文中仅从操作层面对“雪龙 2 号”船的首次连续破冰任务做了详细地分析,着重从船舶操纵的角度对破冰环节进行了经验性的总结,并没有深入从定量的角度对船舶操纵作深入分析。

## [ 参考文献 ]

- [1] UK HYDROGRAPHIC OFFICE. Admiralty sailing directions NP9, antarctic pilot, 9th edition [M]. Somerset: UKO, 2019.
- [2] UK HYDROGRAPHIC OFFICE. Admiralty sailing directions NP10, antarctic pilot, 9th edition [M]. Somerset: UKO, 2016.
- [3] UK HYDROGRAPHIC OFFICE. Admiralty sailing directions NP12, antarctic pilot, 10th edition [M]. Somerset: UKO, 2018.
- [4] 国家海洋环境预报中心. 第 36 次南极科考海冰服务专题,第 2-5 期 [R]. 北京:国家海洋环境预报中心, 2019.
- [5] 沈权,赵炎平. 破冰船技术及几种破冰方法 [J]. 航海技术, 2010. 01: 5-7.
- [6] 赵炎平等. 能见度不良条件下极地冰山的识别与避让 [J]. 航海技术, 2019. 7: 3-5.
- [7] UK HYDROGRAPHIC OFFICE. Admiralty the mariners handbook 11th edition [M]. Somerset: UKO, 2016: 125-161.
- [8] KONGSBERG. Kongsberg k-master operation manual [M]. Kongsberg: Kongsberg Maritime AS, 2015: 16-25.
- [9] KONGSBERG. Kongsberg k-pos DP system [M]. Kongsberg: Kongsberg Maritime AS, 2018: 143-150.
- [10] 中国极地研究中心. 极地操作手册 (PWOM) [R]. 上海:中国极地中心, 2019: 3-6.
- [11] IMO. Guidelines for ships operation in polar water [M]. London: CPI Books Limited, 2010.
- [12] 中华人民共和国交通部. 北极东北航道航路指南 [M]. 北京:人民交通出版社, 2014: 66-74.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)