

研究论文

基于 GPS 的“雪龙”船冲击式破冰模式识别研究

桂大伟¹ 庞小平¹ 沈权² 汪大立² 张洁² 艾松涛¹

(¹ 武汉大学中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉 430079;

² 中国极地研究中心, 上海 200136)

摘要 “雪龙”号破冰船是我国目前唯一的极地考察船, 破冰航行是极地船舶的重要特征之一。以“雪龙”号破冰船的 GPS 数据为基础, 通过建立模型算法识别冲击式破冰这一特殊的航行状态, 在整个中国第 28 次南极考察航次的数据分析中, 整体识别率超过 86.1%, 识别正确率达到 98% 以上。利用此算法, 在中国第 27 次南极考察航次的破冰识别率也超过 85%, 识别正确率达到 93.5%。雪龙船两个航次实测 GPS 数据验证了本文算法的可用性, 而破冰识别统计结果表明, 不同航次的破冰模式具有较大的差异。

关键词 “雪龙”号破冰船 GPS 冲击式破冰 模式识别

doi: 10.13679/j.jdyj.2017.3.414

1 中国南极破冰船概览

自 1984 年中国首次开展南极科考到 2015 年 11 月第 32 次南极科考队出征, 30 余年以来先后有 5 艘船舶参与极地科考, 包括“向阳红 10”、“J121”、“海洋 4”、“极地”和“雪龙”号。其中前 3 艘只承担过一个南极航次, 后 2 艘则多次承担极地考察任务, 为中国极地考察运输、调查研究专用船舶。“雪龙”号原系乌克兰赫尔松船厂 1993 年建造下水的北极供应船, 后经改造成为中国极地科学考察破冰船, 于 1994 年替代“极地”号服役至今, 已先后 26 次赴南极、6 次赴北极执行科学考察与补给运输任务。该船最大航速 17.9 节, 能以 1.5—2 节的速度连续破 1.2 m 厚的冰(含 20 cm 的雪), 并能携带两架直升机^[1]。

“雪龙”号破冰船作为我国目前唯一的极地考察破冰船, 不仅是运送补给与科考人员的重要载体, 也是开展包含海洋生物学、物理海洋学、大气科学、气象科学、海冰与遥感科学等诸多学科数据采集与实验

研究的重要移动平台。在奔赴南极执行远洋科考任务的过程中, “雪龙”号跨越南北半球, 覆盖了热带、亚热带、温带、寒带等所有气候带, 其航行状态也随着洋流、气旋以及海冰等外界环境的变化而随时进行调整。其航行的关键状态可归纳为以下几类: 正常航行、抛锚、靠港、浮冰中停车、大洋中停车和破冰^[2]。

其中, 大洋中停车是指“雪龙”号在远洋航行中由于科考任务需要或其他人为因素而进行的有计划停船; 浮冰中停车往往是由于船舶前方海冰冰情严重, “雪龙”号凭借自身破冰能力无法破冰通过, 或出于安全考虑需要停船等待时机继续前行; 破冰是指在陆缘冰区附近海冰连接成片没有可通行的航道时, “雪龙”号借助自身动能撞击挤压使海冰破碎从而开辟航道继续前进。

2 雪龙船破冰特征分析

2.1 破冰船主要破冰方法

根据海冰厚度的不同, 破冰船的破冰方式一

[收稿日期] 2016 年 4 月收到来稿, 2017 年 6 月收到修改稿

[基金项目] 国家自然科学基金(41531069、41576188、41476162)和南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2016-04-07)资助

[作者简介] 桂大伟, 男, 1992 年生。博士研究生, 研究方向为地图制图学与地理信息工程。E-mail:guidawei@chinare.cn

[通信作者] 艾松涛, E-mail:ast@whu.edu.cn

般可分为两类。当海冰厚度在破冰船设计的破冰能力以内时, 船以 5 节以下的速度在冰区中航行, 其产生的动能足以破开冰面, 保证船平稳连续前进, 这种破冰方法为连续式破冰^[3-4]。

当海冰厚度超过破冰船连续破冰能力时, 破冰船的破冰方法又可分为旋回式破冰和冲击式破冰两种。

旋回破冰法是当破冰船开始进行破冰时, 船身以一定的角度进入冰区, 当 $1/4$ 船身进入冰区之后开始用舵旋回(图 1), 根据冰情来调整舵角, 以此来控制船身进入冰区的距离。每次旋回后适当调整船首方向和冰区边缘的角度, 保证船舶在整个破冰过程中按照螺旋状前进。这种破冰方式的好处在于船身以一定的角度进入冰区对于船体结构的损害较小, 旋回的方式进出冰区不易被浮冰卡住, 而且能够保持一定的速度连续破冰^[5], 但缺点是有效前进距离较短, 作业所需开阔水域较大。

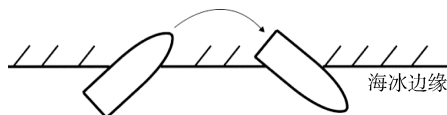


图 1 旋回破冰示意图

Fig.1. Schematic diagram of cycle icebreaking

另一种冲击式破冰法是破冰船以一定的速度冲击并“骑上”冰面, 借助自身重力和动能将船身下海冰压碎, 然后再骑上海冰进行破冰, 起伏式缓慢破冰前进, 当船再次受到海冰阻力大于前进动能时减速, 直到停船后开始倒车后退, 后退到一定距离时加速前进开始第二次冲击, 如图 2 所示。冲击式破冰的过程中, 可能由于左右浮冰

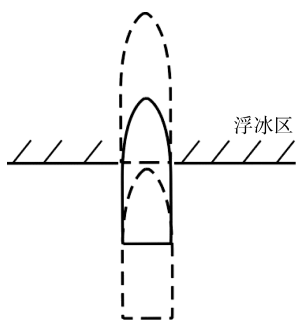


图 2 冲击式破冰示意图

Fig.2. Schematic diagram of crash icebreaking

挤压导致船舶被卡住, 因此还需要在破冰前进的过程中拓宽航道, 这种破冰模式也被称为“徒步破冰”^[5]。

2.2 影响破冰的因素

影响破冰的主要外界因素是冰的状态, 这包括海冰的冰型、厚度、密集度以及范围等。此外还有洋流与风的影响, 洋流与风的共同作用能够将浮冰吹散便于船舶通行, 也能够使浮冰汇聚阻碍通行, 2014 年 1 月雪龙船营救俄罗斯“绍卡利斯基院士号”船上 52 名乘员之后被困即为这种情况。而对于船自身来说破冰的关键因素是船舶的航向和速度。航向决定了破冰船船首以何种角度进入冰区, 速度保证了破冰船具有足够的动量破冰。因此, 针对不同的冰情选择合适的破冰方式对于破冰船安全航行并完成破冰作业至关重要。

2.3 本文研究的破冰状态

每年的南极考察中“雪龙”号都在 11 月左右从国内出发, 抵达南极的时间恰好是南极的夏季。但中山站地处 $69^{\circ}22'24.76''S$, $76^{\circ}22'14.28''E$, 即便是夏季, 中山站附近海域依旧被大量的陆缘冰所覆盖, “雪龙”号必须进行破冰作业才能接近站区完成人员与补给物资的输送^[6-7]。随着纬度的升高, 海冰的厚度与密集度也在不断增大, 这时候在中山站附近的海冰厚度通常会超过雪龙船的设计破冰能力, 这时的破冰模式主要是以冲击式破冰方主。

3 基于 GPS 的破冰模式识别

3.1 破冰模型

冲击式破冰是由多个“后退-前进”动作所构成, 为准确描述冲击式破冰模式, 将破冰中的“后退-前进”定义为一个“破冰周期”, 破冰周期示意图如图 3 所示。

一个破冰周期包含两个阶段: 当破冰船受到冰的阻力无法继续前行, 此时记为点 A_0 ; 破冰船开始后退达到一定距离时停止, 记为 B_1 ; 随后船从 B_1 开始加速前进, 高速航行至 A_0 点, 借助自身重力与动能破开冰面继续前行, 由于再次受到冰的阻力大于动力而停止于 A_1 点。

对于破冰船自身来说, 在一个周期内点 A_0 、 B_1 、 A_1 处的方向变化($direction_chg$)为 $\pm 180^{\circ}$, 瞬时速度(v)为 0, 并且一个有效的破冰动作, 前进

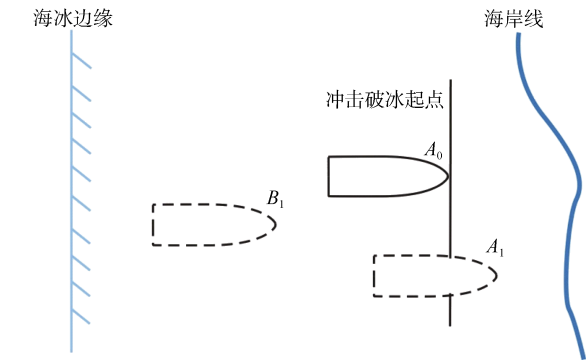


图 3 一个破冰周期
Fig.3. An ice-breaking period

阶段 B_1A_1 的速度最大值(v_max)应大于后退阶段

A_0B_1 , 因此前进距离(B_iA_i)始终大于后退距离($B_iA_i > A_{i-1}B_i, i=1,2,3,\dots$)。海冰的冰情是影响破冰的重要外界因素,只有在特定的纬度区域(*latitude*)才会出现冰情严重的情况,相应地才会有破冰作业。

基于这些特征,可以将冲击式破冰模式的模型整理如下:

$$H = \int_{t_0}^{t_1} (lat, v, direction_chg, v_max, distacne) \quad (1)$$

3.2 样本分析与参数选择

本文采用的数据是“雪龙”号在中国第 28 次南极科学考察整个航程的 GPS 数据,采样频率为 1 min 一次,数据内容包括时间、经纬度、速度和航向信息,如表 1 所示。

表 1 部分实验数据
Table 1. Part of the experimental data

<i>time</i>	<i>lat/(°)</i>	<i>lon/(°)</i>	<i>v/kont</i>	<i>bearing/(°)</i>
2011/11/29 0:35:37	-69.0927867	76.54459333	0.1	196.2
2011/11/29 0:36:37	-69.09263	76.54460833	0.7	16.5
2011/11/29 0:37:37	-69.0923133	76.544825	1.6	15.9
2011/11/29 0:38:37	-69.0918217	76.54520167	2.1	13.2
2011/11/29 0:39:37	-69.0912867	76.54553	1.2	15.1
2011/11/29 0:40:37	-69.0911233	76.54573167	0.6	14.2
2011/11/29 0:41:37	-69.0908733	76.54581	1.0	14.1
2011/11/29 0:42:37	-69.0903867	76.54609333	2.4	13.2
2011/11/29 0:43:37	-69.0895	76.54674333	3.9	13.3
2011/11/29 0:44:37	-69.0885867	76.54738333	2.7	13.0
2011/11/29 0:45:37	-69.0881433	76.547785	0.6	15.2
2011/11/29 0:46:37	-69.08842	76.54755	1.9	195.8
2011/11/29 0:47:37	-69.0894183	76.54682	4.7	194.3
2011/11/29 0:48:37	-69.0909367	76.545785	5.9	194.1
2011/11/29 0:49:37	-69.0926633	76.54453	6.8	195.4
2011/11/29 0:50:37	-69.0943367	76.54315167	6.0	198.0
2011/11/29 0:51:37	-69.0958917	76.54185833	5.8	195.6
2011/11/29 0:52:37	-69.0973533	76.54071333	5.2	194.5
2011/11/29 0:53:37	-69.0984983	76.53998167	3.3	192.8
2011/11/29 0:54:37	-69.0989067	76.53971	0.3	195.7
2011/11/29 0:55:37	-69.0989067	76.539715	0.1	195.9
2011/11/29 0:56:37	-69.098665	76.53989833	1.7	14.2
2011/11/29 0:57:37	-69.097865	76.54047667	3.1	14.1

通过绘制历史航行轨迹并结合当时发布的“雪龙”号破冰时间的新闻信息,缩小数据搜索范围,锁定了“雪龙”号破冰的主要时间段并着手分

析数据特征。通过人工对数据的判读发现,在破冰阶段“航向(*bearing*)”字段的数据反映出较为显著的规律:航行过程中航向发生 180° 变化且呈

现周期性的变化趋势,与前文所定义的破冰周期模型相吻合。结合“速度(v)”字段可以推测出在一个破冰周期内所对应的“后退”与“前进”阶段。为了更加直观地反映这一特征,将相邻两时刻的航向进行减法运算处理,得到当前时刻相对于上一时刻的“方向变化($direction_chg$)”。为了统一顺时针和逆时针转向的方位计算,避免出现前后方位差大于实际转向的情况,在计算后进行了相应的判断,根据处理后的数据绘制航向变化折线图,如图4所示。

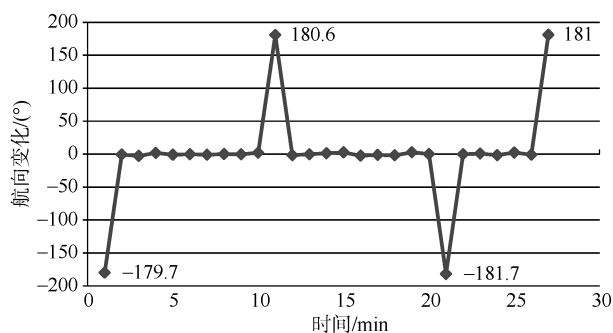


图4 破冰阶段航向变化示意图

Fig.4. Schematic diagram of direction change in icebreaking

根据破冰周期模型,结合以上样本分析选择的特征参数,构建了冲击式破冰模式识别算法。本文选择了“时间($time$)”、“经纬度(lat, lon)”、“速度(v)”、“航向($bearing$)”四个基本参数,以及“方向变化($direction_chg$)”、“航行距离($distance$)”参数。实验中发现,“雪龙”号在锚地抛锚后随洋流运动的过程中也会出现方向发生 180° 变化且瞬时速度接近 0 值的情况,容易对破冰模式的识别结果造成干扰。但是抛锚后“随波逐流”的运动状态一个突出的特点是由于受洋流作用速度始终在 1 节以下,因此引入“速度均值(v_avg)”、“速度最大值(v_max)”来排除这种情况。

算法通过寻找数据中符合破冰周期模型的记录来实现破冰模式的识别,在南纬 60° 以南地区当破冰船瞬时速度为 0 且航向发生 180° 变化时,可以假设此时船开始破冰,以此作为算法识别的“入口”(图3中 A_0);当船再次发生 180° 方向变化和瞬时速度为 0 的情况时假设此时破冰船由后退转为前进状态(图3中 B_1),并计算后退阶段破冰船的航行距离(A_0B_1)、速度均值以及速度最大

值;继续遍历数据,当破冰船再次发生 180° 转向和减速为 0 的情况时(图3中 A_1),可以认为破冰船已完成一次破冰并进入下一次破冰的后退过程,此时计算前进阶段航行距离(B_1A_1)、速度均值和速度最大值。最后通过比较前进距离是否大于后退距离($B_1A_1 > A_0B_1$)以及前进阶段速度最大值是否大于后退阶段来确定破冰周期是否识别正确。

算法流程图如图5所示。

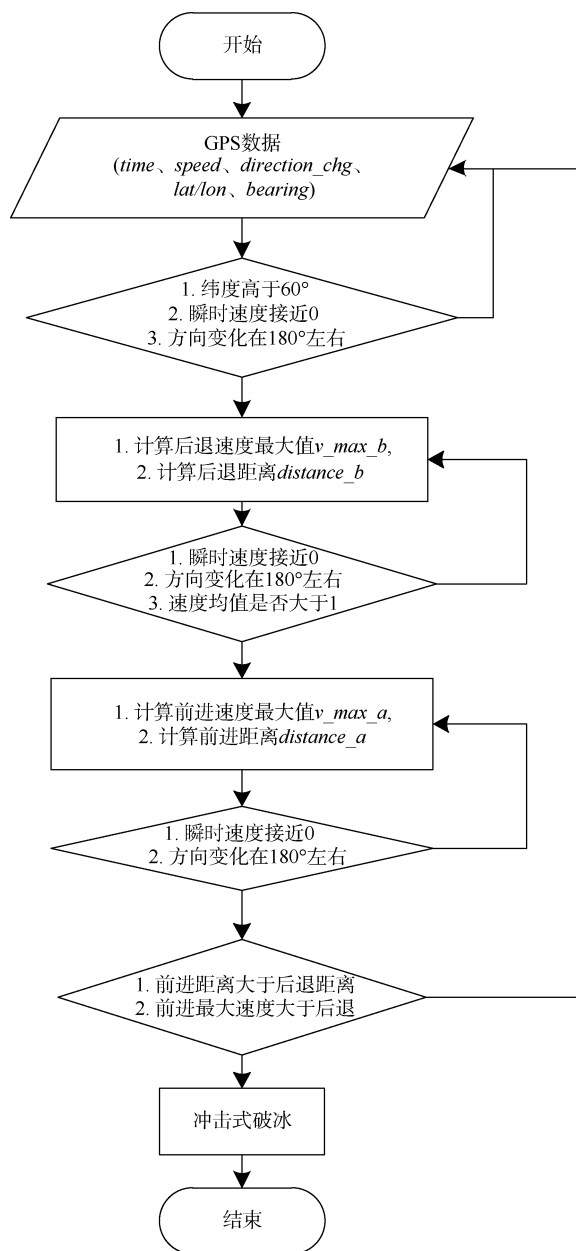


图5 算法流程图

Fig.5. Algorithm flow chart

4 破冰结果分析

4.1 识别率与正确率

根据上述算法编写程序对实验数据进行识别,并将识别结果通过人工判读的方式进行检验,识别结果如表 2 所示。

表 2 S28 识别结果
Table 2. Recognition results of S28

日期	实际破冰次数	识别次数 (正确次数)	识别率/%	正确率/%
2011/11/28	3	3(3)	100	100
2011/11/29	25	22(22)	88	100
2011/11/30	37	33(32)	89.2	97
2011/12/05	3	1(1)	33	100
2011/12/16	24	20(20)	87	100
2011/12/17	41	38(38)	92.7	100
2012/2/21	0	1(0)	0	0
2012/2/25	4	2(2)	50	100
总计	137	120(118)	86.1	98.3

第 28 航次“雪龙”号共完成冲击式破冰作业 137 次,由算法识别出的破冰 120 次,正确识别次数为 118 次,能够识别整个航次中 86.1%的冲击

式破冰动作,识别正确率为 98.3%。识别正确率能充分地说明该算法对于冲击式破冰模式具有较好的识别能力。由于算法是基于“后退-前进”模型而设计的,一个破冰周期的终点是下一周期的起点,但是实际航行中船在完成破冰后可能正常航行或者停止,这样的情况会导致漏掉最后一个周期。虽然前文提到过通过判断速度最大值与速度平均值来剔除船抛锚后“随波逐流”的情况,但只是对这两个参数进行阈值设定并不能从根本上解决误识别的问题,这就造成了破冰的错误识别。在后续的研究中会针对这两个问题进行算法改进。

此外,还针对“南纬 60 度”条件的废存问题进行了试验。去掉“南纬 60 度”这一条件后,对第 28 航次(S28)破冰模式的识别正确率降低为 97.5%。试验结果显示,在 2012 年 1 月 13 日也识别出了“破冰模式”,而实际情况是此时“雪龙”号在南纬 54 度的位置,在南极夏季这一区域是不可能存在海冰的。

4.2 不同航次破冰统计

将该算法应用到中国第 27 次南极科学考察航次(S27)数据,针对 27、28 两个南极航次进行了冲击式破冰作业的模式识别,并对单次破冰时耗与距离等特征参数加以统计,结果如表 3 所示。

表 3 S27 与 S28 破冰统计结果
Table 3. Statistical results of ice-breaking in S27 and S28

航次	实际破冰次数	单次破冰平均耗时/min	单次破冰平均距离/m	首次破冰与中山站距离/km	识别次数(正确)	识别率/%	正确率/%
S27	84	11.9	105	23.8	77(72)	85.7	93.5
S28	137	14	146.9	39.5	120(118)	86.1	98.3

结果显示 S27 航程中首次破冰地点与中山站的距离比 S28 要近,且单次破冰平均耗时比 S28 短,破冰距离也相对较近。因此可以推测,“雪龙”号在执行第 28 次南极科考任务过程中,遭遇的海冰冰情与前一年不一样,至少破冰航线上的浮冰有较大的差别。

5 总结与展望

本文通过分析 GPS 数据,建立模式识别算法,尝试对“雪龙”号的一个特定的航行状态加以研究,在分析了冲击式破冰模式特征的基础上,结合“雪龙”号回传的 GPS 数据特点设计并实现了以经纬

度、速度、航向变化等特征参数为基础的破冰模式识别算法。以“雪龙”号第 28 次南极科考中的 GPS 数据为试验数据进行识别,通过人工判读和随船队员检验结果,基于该算法能够识别 86.1%的冲击式破冰动作且识别正确率在 98%以上,引入第 27 次的航迹数据进行对比试验,该算法的识别率仍然在 85%以上且正确率为 93.5%。说明该算法符合冲击式破冰模式的实际运行机理,且识别结果较为可靠。由于该算法是根据破冰周期中后退-前进阶段所反映的不同速度以及航行距离等参数特征进行的判断,所以识别到的后退与前进过程是一个相对结果,还需要其他数据如“雪龙”号的机舱数据以及外界环境数据(冰情、气象数据)进行验证。

在后续研究中考虑结合以上数据对识别结果进行验证, 在提高识别精度的基础上可以考虑将该算法移植到“雪龙在线”信息平台^[8], 为中国极地考察管理信息系统提供破冰船实时航行状态识别服务。进一步对数据进行联合分析, 深入挖

掘破冰运行模式与海冰冰情之间的关系^[9], 能够对破冰能力进行客观评估; 此外, 根据不同冰情寻找相应破冰模式下最佳航行速度与航向等航行参数, 从而为“雪龙”号的安全航行和高效破冰提供合理建议, 为破冰船的研制提供数据支持。

参考文献

- 1 罗卫东. 极地科考破冰船概貌[J]. 中国工程咨询, 2014, (4): 46—49.
- 2 Ai S, Zhang J, E D. Design & realization of interactive management system for M/V XUELONG[C]//Proceedings of the 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC). Dengleng: IEEE, 2011: 2020—2023.
- 3 石磊. 现代破冰船和破冰技术[J]. 知识就是力量, 2003, (10): 52—54.
- 4 李国定. 船舶破冰航行中避免冰卡的方法[J]. 大连海事大学学报, 2011, (3): 21—23, 30.
- 5 沈权, 赵炎平. 破冰船技术及几种破冰方法[J]. 航海技术, 2010, (1): 5—7.
- 6 郑少军, 史久新. 南极普里兹湾邻近海域海冰生消发展特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(7): 9—16.
- 7 雷瑞波, 李志军, 张占海, 等. 南极中山站附近海域固定冰的夏季变化[J]. 极地研究, 2007, 19(4): 275—284.
- 8 艾松涛, 鄂栋臣, 朱建钢, 等. 雪龙在线网络信息平台的研发与展望[J]. 极地研究, 2011, 23(1): 56—61.
- 9 Kim H S, Lee C J, Choi K S, et al. Study on icebreaking performance of the Korea icebreaker ARAON in the arctic sea[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2011, 3(3): 208—215.

RESEARCH ON CRASH ICEBREAKING PATTERN RECOGNITION OF *XUE LONG* FROM GPS DATA

Gui Dawei¹, Pang Xiaoping¹, Shen Quan², Wang Dali², Zhang Jie², Ai Songtao¹

(¹Chinese Antarctic Center of Surveying & Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

²Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China)

Abstract

The *XUE LONG* is the only icebreaker currently deployed in Chinese polar research. The icebreaking status is an important feature of vessels sailing in polar regions. Based on GPS data of the *XUE LONG*, we designed an algorithm to recognize its crash icebreaking status. In the analysis of data obtained during the entirety of the Chinese 28th Antarctic Expedition, the recognition rate was >86.1% and the accuracy of recognition was >98.0%. Using the developed algorithm to analyze the data obtained during the Chinese 27th Antarctic Expedition produced a recognition rate of 85.0%, and accuracy of recognition up to 93.5%. The GPS data of these two voyages verified the applicability of the algorithm, and the differences between the statistical results showed the different icebreaking states.

Key words *XUE LONG* icebreaker, GPS, crash icebreaking, pattern recognition