

# 冰区船舶操纵性研究进展综述

韩阳, 师超, 赵桥生, 王迎晖

(中国船舶科学研究中心 水动力学重点实验室, 无锡, 214000, Email: [hanycssrc@163.com](mailto:hanycssrc@163.com))

**摘要:** 船舶在冰区航行时, 操纵装置提供的操纵力/力矩需克服作用于船上的冰载荷, 才能使得船舶在冰区航道航行或破冰时保持和改变航向, 在设计阶段需要考虑船舶冰区中的操纵性能预报与评估。本文针对冰区航行船舶操纵性领域的研究进展, 给出了船体与冰相互作用过程, 及相应作用力的表达形式; 冰区船舶操纵性数值预报的主要模型和方法; 已开展的实船和模型试验的研究成果。通过归纳、总结, 给出了冰区船舶操纵性的研究方向。

**关键词:** 冰区船舶; 操纵性; 研究进展, 综述

## 1 引言

极地地区蕴藏着大量能源。从南极地区已查明的资源分布来看, 煤、铁和石油的储量为世界第一。北极被称为第二个中东, 拥有全球 13% 的未探明石油储量, 全球 30% 未开发的天然气储量以及 9% 的世界煤炭资源。除石油、天然气、煤炭资源外, 北极地区还有富饶的渔业、淡水、生物以及各类稀有矿产资源。

另一方面, 随着全球变暖, 随着北极地区海冰的消融, 进入北冰洋正变得越来越容易, 北极冰层消融使得北极的战略地位日益凸显, 围绕极地的开发和争夺更多地聚焦在北极。北极航道极大地缩短我国与西欧和北美之间的通航里程, 促使世界航运和贸易格局发生深刻变更。所以, 各国越来越关注冰区船舶与海洋平台的设计、性能预报与评估。

在冰区船舶航行性能研究方面, 多数研究集中于冰区船舶的阻力与结构性能, 关注点多在于单自由度船-冰作用力和局部载荷。但是, 对于破冰船, 操纵装置提供的操纵力/力矩需克服作用于船上的冰载荷, 才能实现船舶在冰区航道航行或破冰时保持和改变航向; 船舶在破冰航道或浮冰水域航行时需具有航向和航迹控制能力, 才能保证船舶的航行安全。所以, 对于冰区船舶, 不仅需要掌握船舶的冰阻力和推进性能, 还需要考虑保持和改变航向、航速和航迹的控制能力等与船舶操纵性能相关的运动性能。

为了解冰区船舶操纵性预报与评估的技术发展现状, 本文从船舶与冰相互作用、冰区船舶操纵性数值预报和试验等几个方面进行归纳和总结。

## 2 船体-冰相互作用

了解并掌握船体与冰的相互作用过程，是研究船体与冰的相互作用力的必要前提。极地船舶在层冰区航行时，借助推进力的作用，利用特殊的艏部结构驶上冰面，利用船体本身的重量压碎冰面，船体与冰的相互作用过程主要包括 3 个阶段：层冰的断裂和破损、破碎冰翻转、破碎冰滑动和排开(图 1)。

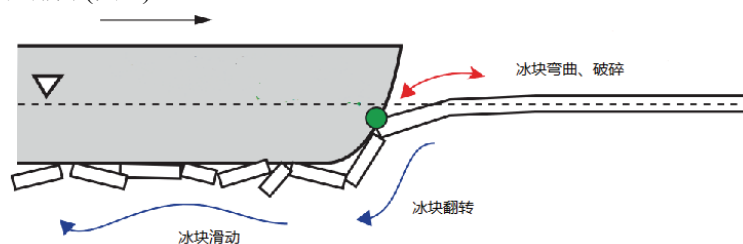


图 1 船体-冰相互作用过程

根据船体与冰相关作用的 3 个阶段，可以将船体与冰的相互作用力分解为：破冰力、碎冰浮力、以及由于碎冰滑动、翻转等运动产生的作用力等。可以采用以下表达式。

$$F_{ice} = F_{br} + F_{cl} + F_{buoy} \quad (1)$$

其中， $F_{ice}$  为船舶在层冰区航行时，作用在船体上总的冰载荷； $F_{br}$  为破冰力，为冰破碎后发生翻转、沿船体滑动、加速等产生的作用力， $F_{buoy}$  为冰浮力产生的碎冰浮力。

冰区船舶操纵性研究方面，多数研究都集中在层冰区，这时大多数的研究重点都集中在求解破冰力  $F_{br}$  上。而对于碎冰浮力  $F_{buoy}$  和排开作用力  $F_{cl}$  大多采用经验公式。对于破冰力  $F_{br}$  满足以下式子。

$$F_{br} = P \cdot A \quad (2)$$

其中， $P$  是船体-冰接触面的平均压力， $A$  是船体-冰接触面的面积。所以，求解破冰力  $F_{br}$  的前提是，确定船体与冰接触面，然后求解作用在接触面上的载荷和面积。

确定船体与冰的接触点或接触面的方式主要有两种：一种是圆盘接触方法。这种方法假定船体和冰的边缘由圆盘组成，当船体和冰接触时，满足以下关系式：

$$(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 = (r_i + r_s)^2 \quad (3)$$

其中， $(x_i, y_i)$  和  $(x_s, y_s)$  分别是冰和船圆盘模型的圆心坐标， $r_i, r_s$  为冰和船圆盘模型的半径，这种接触方式的示意图如图 2 所示。确定船-冰接触点以后，破冰区内的冰圆盘模型在冰盖上消失，船-冰的接触面不断更新。这种接触方式对于两个复杂结构物间的碰撞非常有效，可以很方便地确定两物体间的接触面。这种接触方式的探测精度与圆盘半径有关，圆盘半径越小，接触点的位置精度越高。Sawamra 等 (2010) 通过研究，验证了这

种接触方式的精度和有效性。

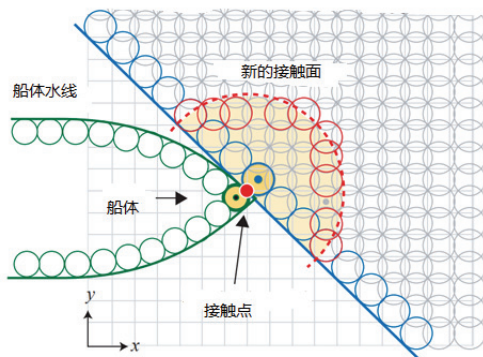


图2 船体与冰圆盘接触点

船体-冰碰撞后的接触方式另一种表达方式是：只考虑船体水线与冰面的接触线，随着船舶前进，船体与冰的接触线不断更新、变化，这种处理方式不同考虑大面积的冰区特性，数据量更少，计算效率更高，示意图如图3所示。Biao Su (2010)，Quan Zhou (2016) 等人的研究工作采用此种方式，建立了水平面内的二维船体-冰相互作用模型，确定船体与冰的接触面，求解作用在船上的冰载荷。

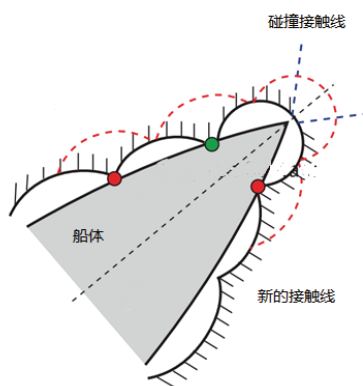


图3 船体与冰边缘的接触线

### 3 冰区船舶操纵性数值预报研究进展

由于冰区船舶操纵性模型试验对于试验水池和试验条件要求非常高。相对来说，数值模拟方法需要的资源少，效率高，可以很方便地获得作用在船体上的冰载荷、局部和全局压力分布等重要信息。数值预报方法已经作为一种重要的研究手段，广泛应用于冰区船舶操纵性研究领域。冰区船舶操纵性研究主要有两方面：①船舶回转运动下的冰区航道预报，及作用在船体的冰载荷。②基于操纵运动数学模型，开展操纵运动仿真模拟。

Sawamura 等基于流固耦合有限元方法破冰力，假设船体与冰的接触面是圆弧面，得到了固定航速，不同回转半径下的冰航道的预报结果（图 4）。

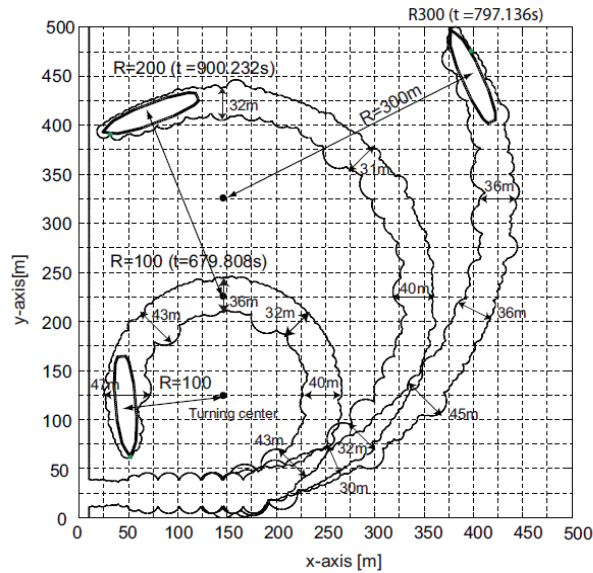


图 4 不同回转半径下的冰航道模拟结果

Lau.M 等应用加拿大海洋科技研究所(IOT)开发的，基于离散元方法的商业软件“DECICE”，研究破冰船“TERRY FOX”号在层冰中的作直航和回转运动时的破冰过程和相应的作用力，包括破冰阻力和作用在船体上的首摇力矩。直航和定常回转运动下的冰航道预报结果如图 5 所示。

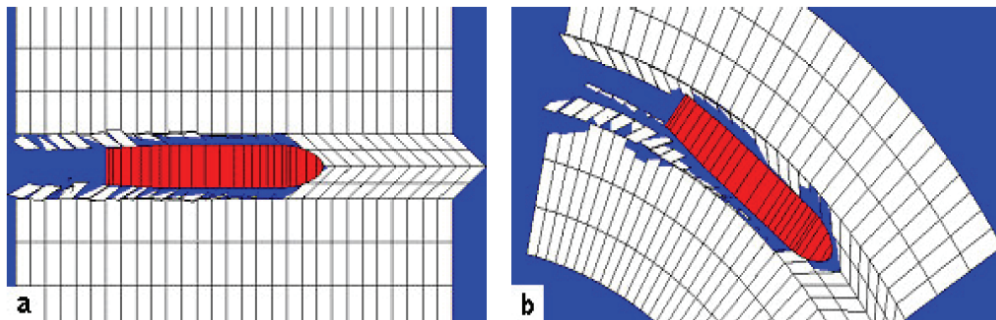


图 5 基于离散元方法的数值模拟结果

基于操纵运动数学模型，进行操纵运动仿真模拟的主要研究思路是：基于敞水 MMG 操纵运动数学模型，将冰载荷作为外力，直接加入数学运动方程的右端，形成 3 自由度冰

区船舶操纵运动数学模型。

Biao Su 采用一般线性耦合微分控制方程：取代标准操纵运动方程，阻尼项和修正项取 0，附加质量系数由边界元法得到，忽略了桨舵与冰的作用力。

$$(M+A)r'(t)+Br'(t)+Cr(t)=F(t) \quad (4)$$

其中， $F(t)$  表达形式如下：

$$\begin{aligned} F_1 &= F_1^i + F_1^P + F_1^r + F_1^{ow} + mvr \\ F_2 &= F_2^i + F_2^P + F_2^r + F_2^{ow} - mur \\ F_6 &= F_6^i + F_6^P + F_6^r + F_6^{ow} \end{aligned} \quad (5)$$

其中，下标 1, 2, 6 分别代表纵荡、横荡、艏摇，上标  $i$  冰、 $p$  为桨、 $r$  为舵， $ow$  为敞水域水动力项。

Biao Su 等人 (2011) 以破冰船 AHTS/IB Tor Viking II 为研究对象，基于建立的 3 自由度操纵运动数学模型，研究破冰船在不同冰厚中的回转运动，并将预报结果与模型试验结果进行比对，吻合较好。数值预报结果如图 6 和图 7 所示。

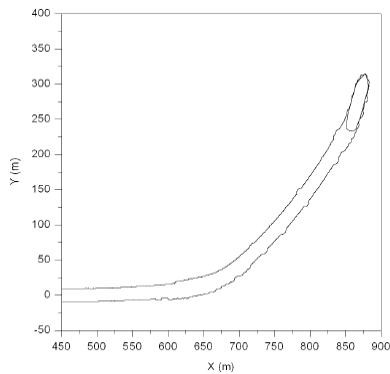


图 6 0.7m 冰厚的回转运动模拟

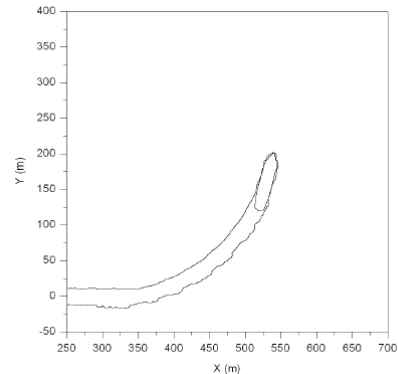


图 7 0.9m 冰厚的回转运动模拟

Dexin Zhan 等基于 DECIDE 软件，采用离散元方法模拟船舶在浮冰区航行时的冰载荷。船舶在在浮冰区航行时，作者只考虑了船体排开冰时的作用力，并将冰载荷作为外力叠加到敞水操纵运动模型中，建立 3 自由度操纵运动数学模型，运动数学模型表达式如公式 (6) 所示。基于该操纵运动数学模型，开展了船舶在浮冰区作回转运动和 Z 形运动数值预报，回转运动模拟结果如图 8 所示。

$$\begin{aligned}\frac{dU}{dt} &= \frac{F_x + \sum F_x^I}{m + m_x} \cos \psi - \frac{F_y + \sum F_y^I}{m + m_y} \sin \psi - Vr \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{F_x + \sum F_x^I}{m + m_x} \sin \psi + \frac{F_y + \sum F_y^I}{m + m_y} \cos \psi + Ur \\ \frac{dr}{dt} &= \frac{N + \sum N^I}{I + I_z}\end{aligned}\quad (6)$$

其中， $(\sum F_x^I, \sum F_y^I, \sum N^I)$  为作用在船体上的冰力和力矩。

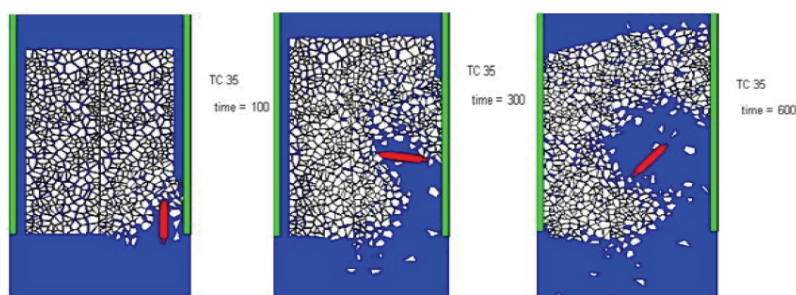


图 8 浮冰中船舶回转运动数值模拟结果

## 4 冰区船舶操纵性试验研究进展

### 4.1 实船试验

实船试验是研究船-冰相互作用、评估冰区船舶操纵性能最可靠的手段，并且为模型试验结果提供可靠的验证数据。但是，开展实船操纵性试验，需要大面积、满足试验要求的冰区，需做大量的测试和准备工作，所需的代价高昂。另外，实船试验很难测试船-冰间的相互作用载荷，不能深入分析船-冰相互作用机理。

Menon 等给出了 USCGC Polar Star 破冰船一系列实船试验结果。实船试验包括不同航速、冰厚、舵角、推进功率下的回转试验结果，并根据试验结果总结了不同冰厚、不同舵角、不同航速下的回转直径，没有得到很明显的规律。Devinder S. 等以 USCGC Healy 为对象，在巴芬湾开展了不同航速、不同冰厚下的实船操纵性试验研究。由于冰区的限制，只完成了两组完整的回转试验，其他八组试验只完成部分回转试验，后期通过数据处理获得相应的回转运动参数。通过本次实船试验获得了 USCGC Healy 船在不同冰厚下的操纵运动特性。Göran Wilkman 等以油轮“MT Mastera”为对象，开展不同舵角，不同冰厚下的实船试验，通过实船试验，预报与评估了在不同冰厚下船舶的破冰和回转性能。

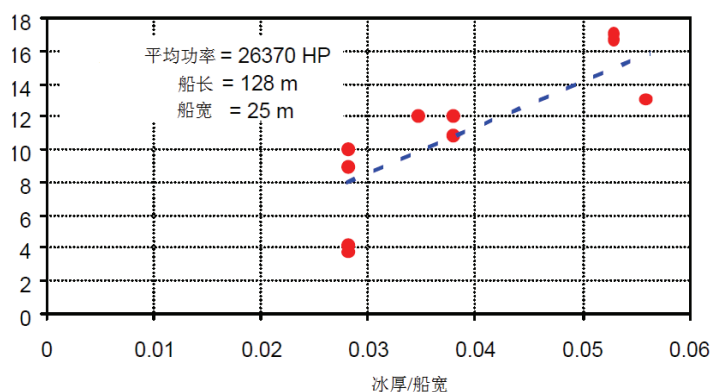


图9 不同冰厚下的回转直径

Riska 等以 Tor Viking II 号为对象, 开展了冰区实船试验。本次试验进行了层冰、碎冰航道和冰脊 3 种冰况下的操纵性试验 (图 10)。通过试验获得了不同冰厚下的航速, 正浮状态和带横倾状态下的回转运动直径, 以及船舶在冰脊中的航行特性。



图 10 Tor Viking II 实船试验

#### 4.2 模型试验

模型试验相对于实船试验, 代价低、效率高, 可以较为准确的测试船-冰间的相互作用力, 精确地模拟船-冰相互作用过程, 获得船-冰相互作用机理, 为冰区操纵性能提供了有效研究手段。模型试验的缺点是对冰特性的模拟要求较高, 以及模型/实船存在的尺度效应问题。对于模型/实船尺度效应问题, Jones 等给出了尺度效应修正。

冰区船舶模型试验可以分为两类: 操纵性自航模试验和约束模试验。自航模试验可直接获得船模在冰区中航行时的操纵性能, 但是对于水池的试验区域大小要求较高。约束试验可以按照预先设定的运动形式进行试验, 通过试验, 可以获得船模在冰区作操纵运动时的船-冰相互作用力, 及相互作用机理。

Lau.M 等在加拿大海洋科技研究所(IOT)的冰水池,以加拿大海岸警卫队的破冰船“Terry Fox”号为对象,开展了层冰中船模作 PMM 试验。模拟的冰盖厚度为 40mm,目标抗弯强度 35kPa,试验过程中记录冰盖的弯曲、压缩和剪切强度,以及船模的运动和船-冰相互作用力/力矩。对于回转运动试验,开展了两种回转半径(10m 和 50m)下的定常回转试验,给出了不同回转半径下的船-冰相互作用力/力矩,模型试验结果可以为数值模拟结果提供宝贵的验证数据。Leiviska 等为了研究层冰中船舶操纵性能,在冰水池中开展了大量操纵性自航模试验。通过模型试验评估了船舶的破冰能力、破冰航道的形式、冰区中的倒航能力,以及不同冰厚下的回转性能。结合数值模拟方法,评估了模型尺度与实船尺度模拟结果存在的偏差。

## 5 结论

冰区船舶航行性能研究已经开展了很多研究工作。但是,在冰区船舶操纵性研究方面开展的研究工作较少,且多数研究都集中在操纵工况下船体与冰的局部载荷和全局载荷预报方面。在操纵运动预报、航向保持与控制等方面研究较少,尚未形成一套成熟的数值预报方面。

(1) 实船试验或模型试验是预报与评估船舶操纵性能的最可靠方法,通过模型试验可以深入研究船体与冰相互作用机理,指导数值建模,并为数值预报提供可靠的验证数据。但是其成本高、准备周期长,对场地和环境要求较高,国际上只有少数水池可以开展相关的模型试验研究,需要更多的模型试验或实船试验数据,用于验证数值预报结果。

(2) 船体与冰碰撞接触时的冰载荷呈现出离散性、不规则性,而且远大于水动力,所以,操纵运动模拟难度较大。现有研究,大多将冰载荷直接作为外载荷叠加到基于 MMG 方法的操纵运动数学模型中进行冰区船舶操纵运动预报。

(3) 冰区航行船舶的航向、航迹控制,以及破冰船的航向保持与控制对于船舶的航行安全至关重要,但是相关研究较少。

## 参 考 文 献

- 1 Cai K, Shun-ying Ji. Analysis of interaction between level ice and ship hull based on discrete element method[J]. Naval Architecture & Ocean Engineering, 2016.
- 2 Derradji-Aouata, Wang J. Ship performance in broken ice floes - preliminary numerical simulations[J]. Aouat, 2010.
- 3 Göran Wilkman., Kimmo Juurmaa. Full-scale experience of double acting tankers MASTERA and TEMPERA. 17th International Symposium on Ice Saint Petersburg, Russia, 21 - 25 June 2004.



- 4 Izumiya K, Wako D, Shimada H, Uto S. Ice load measurement on a model ship hull[C]// Proceedings of the 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Potsdam, USA, 2005, Vol. 2: 635-646.
- 5 Jones, J., and Lau, M. Propulsion and manoeuvring model tests of the USCGC Healy in ice and correlation with full-scale. International Conference and Exhibition on Performance of Ships and Structures in Ice (ICETECH'06), Banff, Canada, 2006.
- 6 Liu J, LAU M, WILLIAMS F M. Mathematical modeling of ice-hull interaction for ship maneuvering in ice simulations[R]. 2006.
- 7 Liu J. Mathematical modeling ice-hull interaction for real time simulations of ship manoeuvring in level ice[J]. 2009.
- 8 Lau, M, DERRADJI-AOUAT A. Preliminary modeling of ship maneuvering in ice[C]// 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, St. John's, CANADA, 2004.
- 9 Lau M. Discrete element modeling of ship manoeuvring in ice[J]. 2006.
- 10 Lau M. Ship manoeuvring-in-ice modeling software OSIS-IHI[R]. 2011.
- 11 Lau M, LAWRENCE K P, ROTHENBURG L. Discrete element analysis of ice loads on ships and structures[J]. Ships and Offshore Structures, 2011, 6(3): 211-221.
- 12 Leiviska, T. Performance and dp tests in ice with civarctic vessel. Technical report AARC Report A454, Aker Arctic, 2011.
- 13 Lubbad R, LØSET S. A numerical model for real-time simulation of ship - ice interaction[J]. Cold Regions Science & Technology, 2011, 65(2):111-127.
- 14 Michael Lau, Jian Chen Liu, Ahmed Derradji-Aouat, F. Mary Williams. Preliminary results of ship maneuvering in ice experiments using a planar motion mechanism. 17th International Symposium on Ice Saint Petersburg, Russia, 21 - 25 June 2004.
- 15 Menon, B, Edgecombe M, Tue-feek, Glen I. Maneuvering tests in ice aboard USCGC Polar Star in Antarctica. Arctec Canada Limited, 1986, FR1723C-2.
- 16 Martio J. Numerical simulation of vessel's maneuvering performance in uniform ice[R]. Report No. M-301, Ship Laboratory, Helsinki University of Technology, Finland. 2007.
- 17 Nguyen D T, SØRBØ A H, SØRENSEN J. Modeling and control for dynamic positioned vessels in level ice[C]// Proceedings of 8th Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Guarujá, Brazil, 2009.
- 18 Quinton B, Lau M. Manoeuvring in ice - test/trial database[R]. 2005.
- 19 Quinton B. DECICE implementation of ship performance in ice: a summary report[R]. Student Report, 2006.
- 20 Riska K. Ship-ice interaction in ship design: theory and practice[M]. Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK, 2010b.
- 21 Riska K, LEIVISKÄ T, NYMAN T, FRANSSON L, LEHTONEN J, ERONEN H, BACKMAN A. Ice performance of the Swedish multi-purpose icebreaker Tor Viking II[C]// Proceedings of 16th International

- Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Ottawa, Canada, 2001.
- 22 Sawamura J, TSUCHIYA H, TACHIBANAT, OSAWA N. Numerical modeling for ship maneuvering in level ice[C]// Proceedings of 20th International Symposium on Ice (IAHR), Lahti, Finland, 2010.
- 23 Su B, RISKA K, MOAN T. Numerical simulation of ship turning in level ice[J]. AmerSoc Mechanical Engineers,2010:751-758.
- 24 Su B. Numerical predictions of global and local ice loads on ships[R]. Department of Marine Technology, 2011.
- 25 Su B, RISKA K, MOAN T. Numerical simulation of local ice loads in uniform and randomly varying ice conditions[J].Cold Regions Science and Technology, 2011 (65): 145-159.
- 26 Sodhi D S, Griggs D B, Tucker W B. Iceperformance tests of USCGC HEALY[C]// Proceedings of the 18thInternational Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions,2001.
- 27 Zhou Q, PENG H, QIU W. Numerical investigations of ship - ice interaction and maneuvering performance in level ice[J].Cold Regions Science & Technology, 2016, 122:36-49.
- 28 Zhan D, AGAR D, HE M, et al. Numerical simulation of ship maneuvering in pack ice[C]// ASME 2010, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2010:855-862.
- 29 Zhan D, MOLYNEUX D. 3-Dimensional numerical simulation of ship motion in pack ice[C]// ASME 2012, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2012:407-414.

## **Review of ship maneuverability in ice**

HAN Yang, SHi Chao, ZHAO Qiao-sheng, WANG Ying-hui

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi, 214082.Email: [hanycssrc@163.com](mailto:hanycssrc@163.com))

**Abstract:** In this paper, Ship maneuverability in ice is reviewed. The ship-ice interaction progress was analyzed, and full-scale and model tests together with numerical methods for ship-ice interaction are reviewed. The validation for the numerical method need more realiable benchmark model test data. The course-keeping and station-keeping in ice need to be considered.

**Key words:** Ship maneuvering, Ship-ice interaction, Numerical and model tests, Review