

碎冰区海冰与船舶结构相互作用的离散元分析

季顺迎¹ 李紫麟¹ 李春花² 张林²

(1 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 116023 大连;

2 国家海洋环境预报研究中心 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室 100081 北京)

摘要: 采用离散元模型对碎冰区海冰与船舶结构的相互作用进行了数值模拟。碎冰由三维圆盘单元构成,并考虑了其在海流作用下的浮力、拖曳力、附加质量;采用单元组合的方式构造了船体的简易模型。通过海冰与船体单元间的接触判断和接触力计算确定海冰与船体结构之间的相互作用。采用以上离散单元模型对不同冰速、冰厚、冰块尺寸、密集度条件下海冰与船体的动力作用过程进行了数值计算,并对比分析了不同海冰参数下冰对船体作用力的幅值。结果表明:冰对船体的作用力随冰厚、流速、密集度、冰块尺寸的增加而增大。本文工作可为冰区船舶的安全运行和结构设计提供参考。

关键词: 离散元方法; 碎冰区; 船体; 冰力

中图分类号: U674.21 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11776/cjam.30.04.D032

1 引 言

近年来,随着极区科学考察、油气资源开发、北极夏季通航的可行性研究,冰区船舶结构设计和航运性能分析引起了人们更多的重视^[1-2]。目前,我国对海冰与船舶相互作用的研究还未深入进行。

在海冰和船舶的相互作用中,冰力(冰对船体的作用力)的合理确定对船体的结构设计和安全航运有着重要的作用。船舶在冰区航行中主要遇到以下三种冰况:平整冰、碎冰、冰山。平整冰和船体作用时主要发生挤压破坏^[3-4],对于碎冰则要考虑冰块的堆积和撞击^[5],对于冰山需要考虑其对船体造成的变形和破坏^[6-7]。海冰对船舶的局部撞击和整体阻力是冰区船舶设计和航行中的两个重要问题。文

献[8]通过冰池内的模型试验和现场测量统计来分析海冰压力的尺度效应,研究了海冰对船体挤压中的高压区特征。文献[9]~[10]表明在碎冰区还要考虑海冰的形状、冰块大小、密集度对船舶阻力的影响。对于冰山作用,局部冰力及其对船体结构的损伤是研究的重点内容^[11-12]。此外,对于冰区的船舶,海冰阻力与船舶的航运方式密切相关。船舶在停泊、直行、转向、“之”字形航行中,船体所受的阻力也是不同的。

在海冰与船体的相互作用研究中,大多采用有限元方法计算船舶的海冰阻力^[13-14]。然而,为模拟海冰与船体作用时的破碎特征,近年来离散元方法逐渐得到了更广泛的关注。该方法在细观尺度下可以描述海冰材料的结构特性,在宏观上又能够合理地模拟海冰与船舶结构作用的破碎规

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项经费(2012418007; 201105016); 国家自然科学基金(41176012); 中央高校基本科研业务费专项资助课题(DUT12YQ02)

收稿日期: 2012-09-03

修回日期: 2013-02-03

第一作者简介: 季顺迎,男,1972年生,博士,大连理工大学工程力学系,教授;研究方向——工程海冰数值模型。

E-mail: jisy@dlut.edu.cn

律^[15]。文献[16]~[17]最早采用二维圆盘离散元方法研究了碎冰区海冰对船体的作用力。最近, 文献[5]和文献[15]分别采用二维和三维块体离散元软件(DECICE)对破冰船破冰和船舶操纵性能进行了模拟。此外, 文献[18]采用块体单元对碎冰区的船舶冰力开展了许多有益的探讨, 揭示了船舶在运行过程中的海冰阻力。目前, 文献[19]针对极地深水浮式平台结构, 采用三维非规则离散元模型进行了初步探讨。

由此可见, 离散元模型在海冰与船舶作用研究中的前期工作已开展得较好。然而, 如何合理地构造海冰单元模型一直是海冰离散元模拟的重要内容。后续的研究相继发展了二维圆盘单元^[9,15-16,20]、二维块体单元^[21-22]、三维块体单元^[15,23]、三维圆盘单元^[24-25]等。其中, 三维圆盘单元方法具有模型简单、计算效率高、精度高等优点, 在波浪与海冰相互作用、碎冰对海洋结构作用力等方面取得了良好的计算效果, 并可进一步应用于碎冰与船体相互作用的数值分析中。

本文针对碎冰区停泊船舶的受力特征, 采用三维圆盘单元建立浮冰模型, 通过圆盘单元的组合排列方式构造船体结构, 并自行研发计算程序和后处理系统。通过海冰单元与船体结构之间的接触力确定船体的总冰力, 进而分析冰速、冰厚、冰块尺寸、密集度等海冰参数对冰力的影响。

2 碎冰与船体的离散元模型

2.1 冰块的离散元模型

在碎冰区, 对离散分布的海冰可通过离散元模型进行描述。这里采用三维圆盘模拟碎冰块的动力过程^[24,26]。三维圆盘单元构建的思想是: 对所需构造的圆形单元进行函数定义, 然后采用无限多个球型颗粒对其填充以构造出所设定单元的形态, 如图1所示。由此, 通过计算颗粒间的相互接触来描述单元点间的作用过程。由于球型颗粒在判断接触和计算作用力方面具有计算简便的特点, 它可对具有复杂结构的离散元动力过程进行有效的数值计算。

碎冰的圆盘单元模型主要由上下两个圆形平面和半球围成的圆周组成, 其主要涉及两个参数, 即 R 和 r (这里: R 为上下两个圆形平面的半径; r 为圆盘弧形表面的弧面半径)。该三维圆盘单元外径 $D = 2(R+r)$, 冰厚 $H_i = 2r$ 。海冰圆盘单元的运动包

含复杂的平动和转动, 此时需要建立圆盘运动的局部坐标和整体坐标。局部坐标用于描述每个圆盘单元的相对姿态, 整体坐标用于确定每个圆盘单元的运动轨迹和相对位置, 如图2所示。这里: x' 轴和 y' 轴在圆盘平面上相互垂直; z' 轴沿着圆盘平面的法线方向。局部与整体坐标系均为笛卡尔坐标系且遵守右手法则, 两个坐标之间的转换采用四元数方法^[26]。

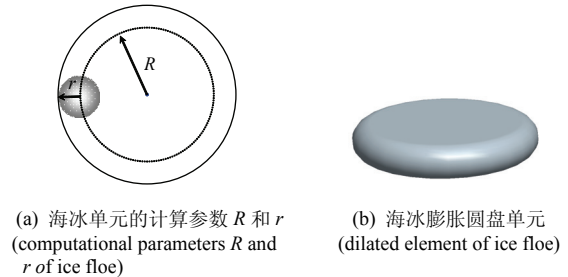


图1 冰块三维离散元模型的构建
Fig.1 Construction of an ice floe with dilated disk in 3D

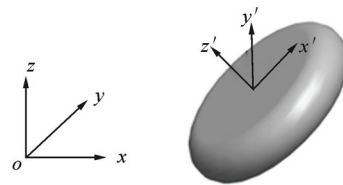


图2 海冰单元的整体、局部坐标
Fig.2 Local and global coordinate systems of an ice floe disk

2.2 碎冰单元间的接触判断

三维圆盘单元之间主要有三种接触形式, 即面-面接触、面-弧接触、弧-弧接触, 如图3所示。由于圆盘模型是由若干虚拟的球体颗粒组成的, 圆盘单元间的接触均是通过判断两个球体颗粒的接触而实现。为确定任意两个圆盘单元内球体颗粒的接触情况, 这里引用弹性带的概念^[26]。假设两个圆盘单元上任意两点相对于圆心的坐标矢量分别为 r'_1 和 r'_2 , 在两个坐标点之间定义一个弹性带矢量 d , 如图4所示。该弹性带具有一定的弹性势能, 可带动两个球体在圆盘周围做无摩擦滑动, 并使其在相对于圆心坐标矢量为 r_1 和 r_2 时弹性势能最小。此时, 由这两个球体颗粒所在的位置可判断两个圆盘单元间的距离矢量 δ , 并依此计算其接触状态和作用力。

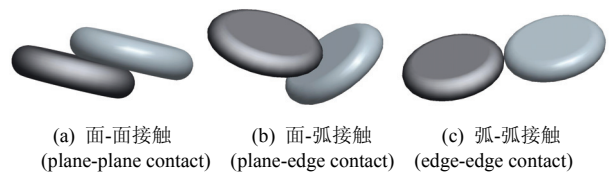


图3 海冰单元间的三种不同接触形式
Fig.3 Three types of contacts during ice floe collisions

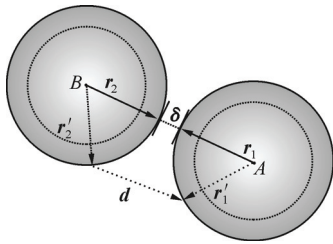


图4 海冰离散单元间的接触判断
Fig.4 Contact detection between two dilated ice floe disks

2.3 冰块单元间的作用力

当两个圆盘发生接触时，单元间的重叠量为

$$|\delta_{ij}| = |\Delta_{ij}| - r_i - r_j \quad (1)$$

式中： δ_{ij} 为*i*、*j*两个圆盘间的重叠量； $|\Delta_{ij}|$ 为圆盘中心面间的距离。

圆盘单元间的法向力为

$$F_n^n = K_n \delta_{ij} - C_n \mathbf{V}_{ij} \cdot \mathbf{n} \quad (2)$$

式中： F_n^n 为*n*时刻两单元间的法向接触力； K_n 为法向接触刚度； C_n 为接触粘滞系数； \mathbf{V}_{ij} 为接触面间的相对速度； \mathbf{n} 为接触面的法向单位向量。

圆盘间的切向接触力为

$$F_t^n = \min \{ [F_t^{n-1} - K_t \Delta t (\mathbf{V}_{ij} \cdot \mathbf{t})], \mu F_n^n \} \quad (3)$$

式中： F_t^n 和 F_t^{n-1} 分别为*n*和*n-1*时刻的切向力； K_t 为颗粒间的切向刚度，可设其为法向刚度的60%； Δt 是数值模拟中的时间步长； \mathbf{t} 为接触面间的切向单位向量； μ 为接触面间的滑动摩擦系数。

在风和流的作用下，海冰会受到浮力和拖曳力的作用，同时还要考虑水的附加质量。冰盘在不同的运动状态下会有不同的浸入深度和角度，因此需要用微元法对不同浸入情况下圆盘单元的浮力进行计算。海水对海冰单元的拖曳力可按下列式计算，即

$$\mathbf{F}_d = \frac{1}{2} C_d \rho_w A (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_i) |\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_w| \quad (4)$$

式中： C_d 为拖曳力系数； A 为物体浸入水中部分的表面积； \mathbf{V}_i 和 \mathbf{V}_w 分别为冰速和流速矢量。

海水对海冰单元的转动具有拖曳力矩，即

$$\mathbf{M}_d = -\frac{1}{2} C_d (r_i^i)^2 \rho_w A \boldsymbol{\omega} |\boldsymbol{\omega}| \quad (5)$$

式中 $\boldsymbol{\omega}$ 是海冰单元的转动角速度。

当海冰在海水中按一定的加速度运动时，其

惯性力会明显增加。这时可通过附加质量法进行处理，即

$$m_a = C_m \rho_w V_{sub} \frac{d(|\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_w|)}{dt} \quad (6)$$

式中： m_a 为海冰单元的附加质量； C_m 为附加质量系数； ρ_w 为海水密度； V_{sub} 为冰盘浸入海水中的体积。

2.4 船体结构模型的构建

对船体结构可采用离散单元按一定的排列方位进行构造，且单元间具有一定的重叠量以相对精确地描述船体的几何结构。该构造方法的最大优势在于可以方便地描述海冰与船体之间的相互作用。将连续状态的船体离散转化成为一系列的圆盘单元，如图5所示。通过对船体单元和海冰单元之间的接触判断和接触力计算以确定海冰与船体之间的相互作用，并由此确定整个船体的冰力。

本文所构造的船体结构由103个 $R=3\text{m}$ 、 $r=4\text{m}$ 的圆盘重叠组合而成。船身尺寸为 $55\text{m} \times 25\text{m} \times 10\text{m}$ ，船头的倾斜角为 52° ，假定船体为刚体结构。



图5 船体模型的离散元构建
Fig.5 The ship hull constructed with overlapped 3D disks

3 冰对船体作用力的数值模拟

设定碎冰区计算域长度为200m，宽度为70m，在*x*和*y*方向上均采用周期性边界，*z*轴是竖直方向。海冰单元初始单层排列且均匀分布，密集度为70%。在计算域中间的船体为静止停泊，如图6(a)所示。主要的计算参数见表1。海冰以0.4m/s的流速沿*x*方向从左向右流动。各海冰单元在运动过程中相互碰撞，并在船头发生堆积，同时对船体产生撞击。

对船体和海冰的相互作用进行10min的数值模拟，*t*分别为0s、60s、180s、600s时海冰与船体的分布状况如图6所示。图7给出了不同方向上海冰对船体作用力的时程曲线。由图可见：冰力呈现很强的随机波动现象。在*y*和*z*方向上，冰力均值接近0，且大体成对称分布；而在*x*方向，即海冰流动方向，冰力则均为正值。

表1 碎冰与船体结构相互作用的主要计算参数

Tab.1 Computational parameters in the DEM simulation of ice floe-ship hull interaction

参数 (parameter)	符号(symbol)	数值 (value)
海冰密度(ice density)	ρ_i	970 kg/m ³
冰块大小 (ice floe size)	R	2.2m
冰块厚度 (ice thickness)	r	0.3m
海冰法向刚度 (nomal contact stiffness)	K_n	587 kN/m
海冰切向刚度 (tangential contact stiffness)	K_t	0.6 K_n
拖曳力系数 (drag coefficient)	C_d^n	0.6
冰初始分布密集度 (initial ice concentration)	C_0	0.6
海冰间摩擦系数 (floe surface friction)	μ	0.35
附加质量系数 (added mass coefficient)	C_m	0.15
海冰间黏滞系数 (viscous damping coefficient)	ζ	0.01
莲叶冰数目(ice floe number)	N_p	1600
模拟区长度(domain length)	L_x	600
模拟区宽度(domain width)	L_y	250

为分析冰力幅值的变化规律, 采用统计的方法对冰力进行分析。以 30s 为一个统计单元, 则共有 20 个时间段。若第 i 个时间段内冰力的最大值为 $F_{i\max}$, 则整个模拟时间内的冰力峰值 $F_{\max} = \max(F_{i\max}, i=1, N)$, 各时间单元内冰力峰值的均值 $F'_{\max} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{i\max}$ (这里 N 为统计时间段数)。对于图 7 所示的 x 、 y 、 z 方向的冰力时程, 其冰力幅值 F_{\max} 分别为 155.1kN、138.2kN、31.7kN, 其相应的每 30s 内冰力幅值的均值 F'_{\max} 分别为 87.2kN、91.6kN、19.5kN。可以发现, 船体在 x 和 y 向的冰力幅值大体相等。由于本文主要考虑海冰对船体的总阻力, 因此更多地关注 x 方向的冰力。

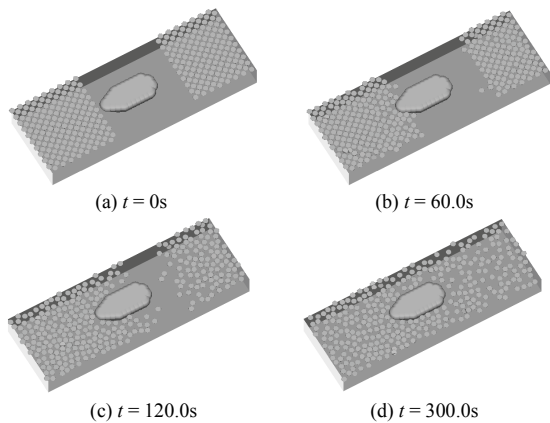


图 6 离散元模拟的碎冰与船体相互作用过程
Fig.6 Snapshots of the interaction between ship hull and ice floes

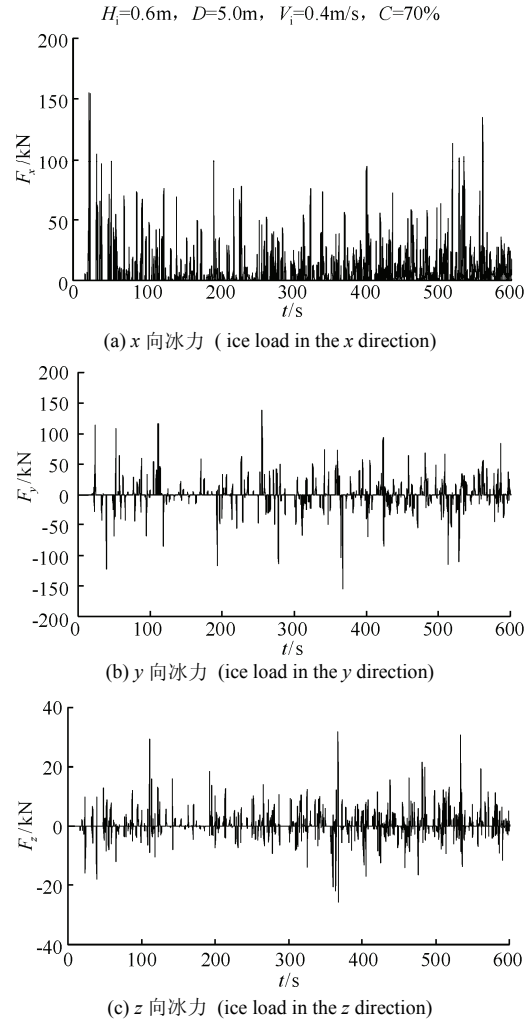


图 7 离散元模拟的碎冰对船体的冰力时程
Fig.7 Dynamic ice loads on the ship hull simulated with DEM

4 不同冰况下冰对船体作用力的分析

在碎冰区, 冰厚、流速、密集度、冰块尺寸等都是影响冰力的重要因素。本文采用离散单元模型分别对不同参数条件下的冰力进行数值分析。首先选用参考冰况: 冰厚 $H_i=0.6m$; 冰速 $V_i=0.4m/s$ 、密集度 $C=70%$; 冰块尺寸 $D=5m$ 。在此基础上分别改变不同的海冰参数进行 10min 的数值计算, 由此确定不同冰况下的冰力幅值和以 30s 为时间段的各段冰力幅值的平均值。考虑海冰对船舶的总阻力主要在海冰流动方向, 因此这里主要分析 x 方向的冰力。

当冰厚 H_i 分别为 0.4m、0.6m、0.8m、1.0m 时, 船体冰力的计算结果如图 8(a)所示。可以发现, 冰力均值和峰值随着冰厚的增加呈指数增加。这主要

是因为冰厚的增加会导致冰块质量增大,从而引起冰块对船体冲击动量的增大。

当冰速 V_i 分别为 0.2m/s、0.4m/s、0.6m/s、0.8m/s 时,冰力计算结果如图 8(b)所示。可见,冰力随冰速的增加大体呈线性增长,即冰速越快,冰力越大。一方面由于流速的增加会导致海冰与船体碰撞频率增大;另外,海冰与船体碰撞时的动量也会明显增加。

密集度是影响碎冰覆盖面积的主要参数,在冰块尺寸不变的情况下,它会直接影响计算域中的碎冰数目。图 8(c)给出了密集度 C 分别为 50%、60%、70%、80% 时,冰力峰值的分布情况。可见,随着密集度的增加,冰力大体呈线性增加,但变化量不太显著。

当冰块尺寸 D 分别为 5m、6m、7m、8m 时,冰力分布如图 8(d)所示。结果表明,随着冰块尺寸的增加,冰力不断增大,且增长速度也急剧上升。这主要是由于冰块尺寸的增大会导致单个冰块撞击船体动量的增加,因此最大冰力幅值 F_{\max} 变化显著;然而,在海冰密集度保持不变的情况下,冰块尺寸的增大会使冰块个数减少,从而使碰撞频率降低。由此,多个时间段内冰力峰值的平均值 F'_{\max} 变化并不显著。

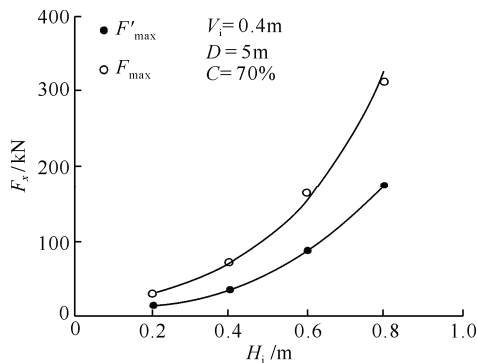


图 8(a) 冰厚影响
(influence of ice thickness)

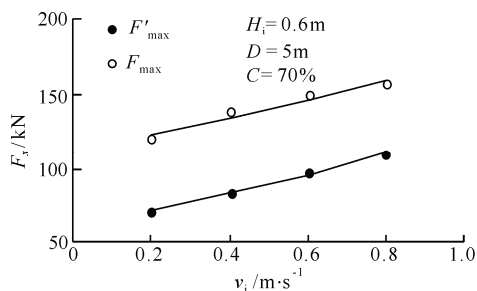


图 8(b) 流速影响
(influence of current velocity)

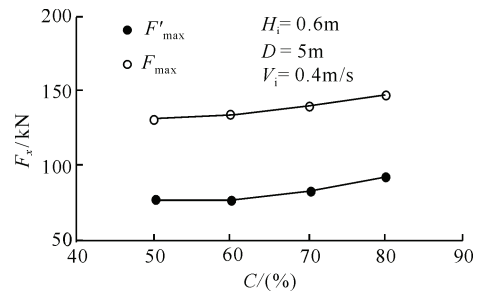


图 8(c) 海冰密集度影响
(influence of ice concentration)

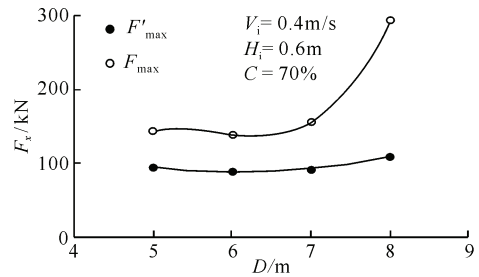


图 8(d) 海冰尺寸影响
(influence of floe size)

图 8 不同冰况对船体冰力的影响
Fig.8 Influence of ice conditions on ice loads on ship hull

通过不同海冰参数条件下对碎冰和船体结构相互作用的离散元数值模拟,可以看出:海冰的尺寸、厚度、密集度、流速是影响船体冰力的重要因素。船体冰力随冰块尺寸、冰厚、密集度、流速的增加而增大。

5 结束语

本文采用离散单元模型对碎冰区冰块和船体结构相互作用的动力过程进行了数值分析。首先建立了碎冰和船体的离散元数值模型,研究了碎冰对船舶的冲击过程,并对密集度、流速、尺寸、冰厚等参数对冰力的影响进行了对比分析。结果表明:冰力随冰块尺寸、冰厚、冰速、密集度的增加而增大。这主要是因为以上海冰参数的增加均会导致海冰对船体冲击动量或频率的增大,并由此导致冰力的增大。尽管本文在浮冰形态、船体性能、流体动力学等方面进行了诸多假设,但计算结果能够很好地反映碎冰区海冰与船体结构的作用形式以及冰力的变化规律。

在本文工作基础上,将进一步对船体结构的计算模型进行完善,以更加合理地计算海冰与船体的相互作用;此外,还将考虑冰块间的冻结效应,研

究平整冰与船体作用时发生屈曲、挤压、弯曲等不同形式的破碎模式, 进而更全面地分析海冰与船体结构的冰力。

致谢: 本文工作得到美国 Clarkson 大学 Hayley H Shen 教授的指导; 美国陆军寒区研究与工程实验室 (CREEL) Mark A Hopkins 博士对海冰离散元程序给予了大力支持; 与挪威科技大学苏彪博士进行了有益的讨论, 在此一并深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 苏洁, 徐栋, 赵进平, 等. 北极加速变暖条件下西北航道的海冰分布变化特征[J]. 极地研究, 2010, 22(2): 104-124. (Su Jie, Xu Dong, Zhao Jinping, et al. Features of Northwest Passage sea ice's distribution and variation under arctic rapidly warming condition[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2010, 22(2): 104-124. (in Chinese))
- [2] Chircop A. Climate change and the prospects of increased navigation in the Canadian arctic[J]. Journal of Maritime Affairs, 2007, 6(2): 193-205.
- [3] Su Biao, Riska K, Moan T. A numerical method for the prediction of ship performance in level ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(3): 177-188.
- [4] Kujala P, Arughadhoss S. Statistical analysis of ice crushing pressures on a ship's hull during hull-ice interaction[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 70: 1-11.
- [5] Zhan D, Agar D, He M, et al. Numerical simulation of ship maneuvering in pack ice[C]//Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai, China; ASME, 2010; OMAE 2010-21109.
- [6] Liu Zhenhui, Amdahl J, Løset S. Plasticity based material modelling of ice and its application to ship-iceberg impacts[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(3): 326-334.
- [7] Liu Zhenhui, Amdahl J. A new formulation of the impact mechanics of ship collisions and its application to a ship-iceberg collision[J]. Marine Structures, 2010, 23 (3): 360-384.
- [8] Wells J, Jordaan I, Derradji-Aouat A, et al. Small-scale laboratory experiments on the indentation failure of polycrystalline ice in compression: Main results and pressure distribution[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65: 314-325.
- [9] Konno A. Resistance evaluation of ship navigation in brash ice channels with physically based modeling[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Luleå, Sweden: [s.n.], 2009; POAC09-105.
- [10] Wang J, Derradji-Aouat A. Numerical assessment for stationary structure(kulluk) in moving broken ice[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Montréal, Canada: [s.n.], 2011; POAC 11-172.
- [11] Liu Zhenhui, Amdahl J, Løset S. Integrated numerical analysis of an iceberg collision with a foreship structure[J]. Marine Structures, 2011, 24: 377-395.
- [12] Daley C, Kim H. Ice collision forces considering structural deformation[C]//Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai, China; ASME, 2010; OMAE 2010-20657.
- [13] Aksnes V. A simplified interaction model for moored ships in level ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 63: 29-39.
- [14] Zhou Li, Su Biao, Riska K, et al. Numerical simulation of moored structure station keeping in level ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 71: 54-66.
- [15] Lau M, Lawrence K P, Rothenburg L. Discrete element analysis of ice load on ships and structures[J]. Ships and Offshore Structure, 2011, 6(3): 211-221.
- [16] Hansen E H, Løset S. Modelling floating offshore units moored in broken ice: model description[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29: 97-106.
- [17] Hansen E H, Løset S. Modelling floating offshore units moored in broken ice: comparing simulations with ice tank tests[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29: 107-119.
- [18] Konno A, Saitoh O, Watanabe Y. Numerical investigation of effect of channel condition against ship resistance in brash ice channels[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Montréal, Canada: [s.n.], 2011.
- [19] Lubbad R, Løset S. A numerical model for real-time simulation of ship-ice interaction[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65: 111-127.
- [20] Shen H H, Hibler W D, Lepparanta M. The role of floe collisions in sea ice rheology[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(C7): 7085-7096.
- [21] Hopkins M A. Onshore ice pile-up: a comparison between

- experiments and simulations[J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 26(3): 205-214.
- [22] 李春花, 王永学, 李志军, 等. 半圆型防波堤前海冰堆积模拟[J]. 海洋学报, 2006, 28(4): 172-177. (Li Chunhua, Wang Yongxue, Li Zhijun, et al. The simulation sea-ice climb-up and pile-up process on semicircle breakwater[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(4): 172-177. (in Chinese))
- [23] Polojarvi A, Tuhkuri J. 3D discrete numerical modelling of ridge keek punch through tests[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 56: 18-29.
- [24] Hopkins M A, Shen H H. Simulation of pancake-ice dynamics in wave field[J]. Annals of Glaciology, 2001, 33: 355-360.
- [25] Sun Shanshan, Shen H H. Simulation of pancake ice load on a circular cylinder in a wave and current field[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 78: 31-39.
- [26] Hopkins M A. Discrete element modeling with dilated particles[J]. Engineering Computations, 2004, 21: 422-430.