

船舶在碎冰区航行的离散元模型及冰载荷分析¹⁾李紫麟^{*,†} 刘煜^{**} 孙珊珊[†] 卢云亮[†] 季顺迎^{†,2)}^{*}(中国船舶科学研究中心, 无锡 214082)[†](大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)^{**}(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, 北京 100081)

摘要 采用离散元模型对碎冰区浮冰与船舶结构的相互作用进行了数值研究. 碎冰由三维圆盘单元构成, 并考虑其在海流作用下的浮力、拖曳力和附加质量. 船体结构由一系列三角形单元组合构造. 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况(冰速、冰厚、冰块尺寸和密集度)以及航速条件下, 海冰对船体的动力作用过程进行了数值分析, 对比分析了以上因素对船体冰载荷的影响, 可为冰区船舶的安全运行和结构设计提供一定的借鉴作用.

关键词 离散元模型, 碎冰区, 船体, 冰载荷

中图分类号: U674.21, U661.31+1 文献标识码: A DOI: 10.6052/0459-1879-13-020

引言

目前, 全球气候急剧变暖导致极区冰川不断融化, 北极航道开始夏季通航^[1-2]. 此外, 在寒区资源开发的冰区航行中, 船体结构将经受恶劣的海冰载荷考验. 冰区船舶在设计时需要考虑其结构安全性与航行操作性, 需要对海冰与船舶相互作用特征进行深入理解^[3]. 但是, 我国至今在冰区船舶领域的研究还处于薄弱阶段.

海冰与船舶相互作用是一个复杂的动力过程. 这一方面取决于海冰的类型、强度、速度等海冰参数, 同时也与船舶外形、尺寸、刚度等结构参数以及航行方式密切相关. 在冰区航行中, 碎冰区的浮冰是船舶遇到的一种主要冰类型. 在碎冰区要考虑海冰的形状、冰块大小和密集度^[4-5]. 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. 局部冰载荷是船体安全性能的重要因素, 其对船体结构的损伤是船舶结构设计和安全航行的重要研究内容^[6-7]. 海冰对船体局部压力作用形式复杂, 可通过冰池内的模型试验和现场测量统计分析海冰压力的尺度效应^[8], 并重点关注海冰对船体挤压中的高压区特征^[9-11]. 船体的整体冰阻力与船舶的航运方式密切相关^[12]. 在船舶锚泊^[13-14]、直

行^[15-16]、转向^[17]和之字形^[18]等不同航行状态中, 船体受到的整体阻力是不同的.

目前, 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在不同航行方式下的冰阻力^[19-22]. 为研究海冰与海洋结构的相互作用, 人们从 20 世纪 80 年代发展了海冰的离散单元模型, 并应用于不同尺度下的海冰工程问题^[23]. 该方法在细观上能够合理地描述海冰的离散分布特性, 在宏观上准确地模拟海冰与结构相互作用中的破碎过程^[24]. 特别在碎冰区, 离散分布的海冰可通过离散单元模型进行描述. 在船体结构冰载荷的离散元研究中, Hansen 和 Loset^[25] 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. Karulin 等^[13] 也采用二维圆盘单元模拟了不同流速下锚泊船舶与碎冰的相互作用, 并通过室内模型试验进行了验证. 最近, Zhan^[18] 和 Lau^[24] 分别采用二维和三维块体离散元软件 (DECICE) 对破冰船前进破冰和船舶操纵性能进行了模拟. 此外, 采用块体单元对碎冰区的船舶冰载荷还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^[15,26-27]. 目前, 针对极地深水区域的浮式平台结构, Lubbad 和 Loset^[28] 采用三维非规则离散单元进行了初步探讨. 因此, 在海冰与船体结构相互作用的研究中, 离散元方法取得了良

2013-01-21 收到第 1 稿, 2013-04-13 收到修改稿.

1) 国家海洋公益性行业科研专项经费 (201105016, 2012418007), 国家自然科学基金 (41176012) 和中央高校基本科研业务费专项 (DUT12YQ02) 资助项目.

2) 季顺迎, 教授, 主要研究方向: 工程海冰数值模型及应用. E-mail: jisy@dlut.edu.cn

好的应用.

在海冰的离散单元模型中, 海冰单元可设为球体、圆盘和块体等不同形态 [29-34]. 然而, 对于碎冰区的浮冰, 三维圆盘方法具有模型简单、计算效率高和精度高等优点 [35-37]. 对于船体结构, 采用圆盘单元间的组合排列也可构造, 但船体模型相对简易 [38]. 本文采用三角形单元构造船体结构, 其不仅使船体模型更加真实, 而且对船体冰载荷的计算也更加合理. 此外, 对冰块初始位置、海冰尺寸等参数的随机化处理, 可更加真实地模拟碎冰区浮冰在自然条件下的分布特征.

为此, 本文采用离散元方法对碎冰区船舶航行中的冰载荷进行数值分析. 通过三维圆盘单元模拟碎冰区浮冰, 采用三角形单元构造船体结构, 并通过海冰单元与船体结构之间的接触力计算船体总冰力, 进而分析不同航速及冰况 (冰速、冰厚、冰块尺寸和密集度) 对船体冰载荷的影响.

1 碎冰与船体结构相互作用的离散元模型

1.1 碎冰区海冰单元的构造

在自然条件下, 碎冰区的海冰呈现出很强的离散分布特性. 无论是在极区, 还是在渤海、波罗的海、波弗特海等诸多海域, 块状浮冰均普遍存在 (如图 1 所示). 采用扩展单元方法构造的三维圆盘单元可有效地描述碎冰区的浮冰几何形态 [35-36].

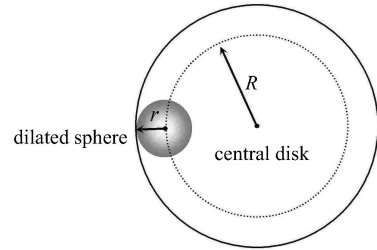


图 1 渤海碎冰区的海冰分布 (2002 年 1 月 27 日)

Fig. 1 Distribution of pancake ice in broken ice field of the Bohai Sea (January 27, 2002)

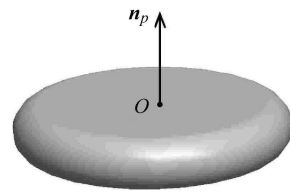
碎冰的三维圆盘单元是由一个中心圆面和无数个扩展球体构成, 其半径分别为 R 和 r , 如图 2(a) 和图 2 (b) 所示. 在圆型平面上每一点用半径为 r 的球体进行扩展, 从而在一个圆形平面构造出一个外径 $D = 2(R + r)$ 、冰厚 $H_i = 2r$ 的三维圆盘单元. 这样圆盘单元间的相互作用则转变为球体单元的接触判断

和作用力计算. 圆盘单元的局部和整体坐标均采用笛卡尔坐标系, 如图 2(c) 所示. 单元作用力及运动参量在两个坐标系之间的相互转换采用四元数方法 [35].



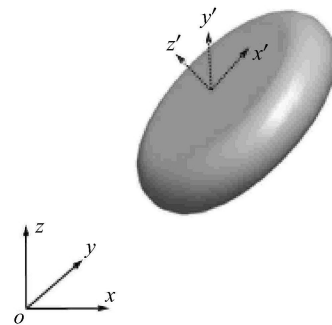
(a) 海冰单元的计算参数 R 和 r

(a) Computational parameters R and r of ice floe element



(b) 海冰扩展圆盘单元

(b) Dilated disk element of ice floe



(c) 海冰单元的整体和局部坐标

(c) Local and global coordinates of an ice floe element

图 2 冰块三维离散单元模型的构建

Fig. 2 Construction of an ice floe in 3D discrete element model

1.2 船体结构的构造

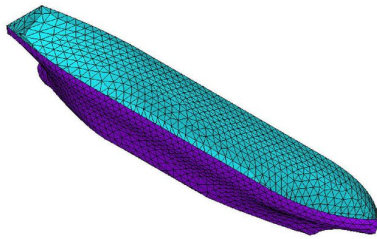
本文以中国“雪龙号”破冰船为研究对象, 如图 3(a) 所示. 首先将船体离散转化成为一系列的三角形单元. 依据“雪龙号”的结构尺寸构造出相应的船体结构, 如图 3(b) 所示, 船体结构的主要参数列于表 1 中. 对于海冰与水线处船体结构的接触区域, 采用精细网格划分; 而对于远离接触区的其他部位, 适当放大船体单元尺寸以提高计算效率. 该破冰船的结构模型共由 763 个节点和 1 630 个三角形单元构成. 通过海冰离散单元和船体三角形单元之间的接触判断计

算海冰与船体之间的相互作用. 本文主要考虑碎冰块对船体结构的冲击力, 为简化计算而不考虑船体的变形.



(a) “雪龙”号极地考察破冰船

(a) The “Xuelong” icebreaker in polar regions



(b) 船体结构模型

(b) The ship hull model

图3 “雪龙”号破冰船及船体结构模型

Fig. 3 The “Xuelong” icebreaker and the ship hull model

表 1 船体结构的主要计算参数

Table 1 Major computational parameters of the ship hull

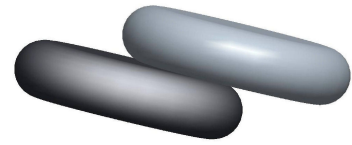
Definition	Symbol	Value
length	L	160 m
width	B	27 m
height	H	14 m
draught	D	9 m

1.3 海冰单元间的接触判断

海冰单元之间的接触主要有 3 种不同方式, 即面-面接触、面-弧接触和弧-弧接触, 如图 4 所示. 这里以弧-弧接触为例, 对海冰单元间的接触进行详细说明. 由于圆盘模型在中心圆面上由球体扩展而成, 圆盘单元间的接触和作用力通过判断两个球体颗粒的接触而实现. 首先, 在 2 个海冰单元的中心圆形平面外缘上任取两点, 其距离矢量为 Δ (如图 5(a) 所示), 即

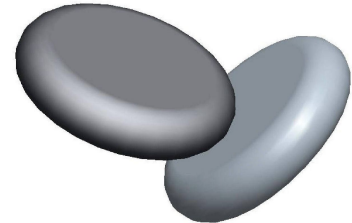
$$\Delta = d + R_2 - R_1 \quad (1)$$

式中, d 是 2 个单元中心之间的距离矢量, R_1 和 R_2 分别为 2 个海冰单元的外径矢量.



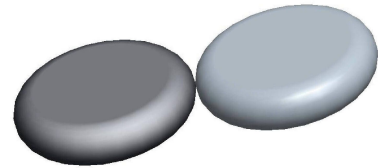
(a) 面-面接触

(a) Plane-plane contact



(b) 面-弧接触

(b) Plane-edge contact

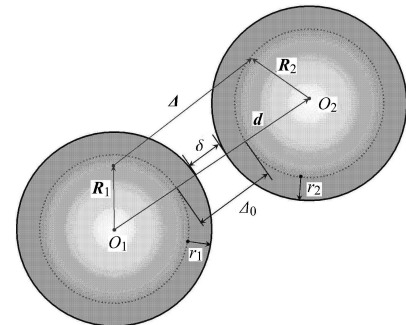


(c) 弧-弧接触

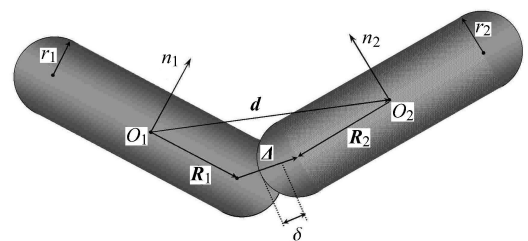
(c) Edge-edge contact

图 4 海冰单元间的 3 种不同接触形式

Fig. 4 Three contact types in ice floe collisions



(a)



(b)

图 5 海冰单元间弧-弧接触的判断

Fig. 5 Contact detection between two ice elements with edge-edge contact

设定这 2 个点之间以一个弹性带连接, 且在弹性带作用下于 2 个圆盘外缘上自由滑动, 直至其距离达到最小值 Δ_0 . 由此, 可判断 2 个圆盘单元间的距离 δ , 即

$$\delta = \Delta_0 - r_1 - r_2 \quad (2)$$

式中, δ 是两个圆盘单元间的距离, Δ_0 是海冰单元的中心圆盘间的最短距离, r_1 和 r_2 分别为 2 个海冰单元的填充颗粒半径. 当 $\delta < 0$ 时, 2 个单元发生接触, 其重叠量即为 $|\delta|$, 如图 5(b) 所示.

1.4 海冰单元与船体结构的接触判断

海冰单元与三角形船体单元的接触也主要有 3 种不同的方式, 即面-面接触、弧-面接触、弧-棱接触, 如图 6 所示. 由于船体为连续弧面结构, 海冰单元与船体三角形单元主要发生面-面接触和弧-面接触. 然而, 在船体几何形状变化显著的区域, 特别是当 2 个相临三角形单元不在同一个平面内, 且海冰

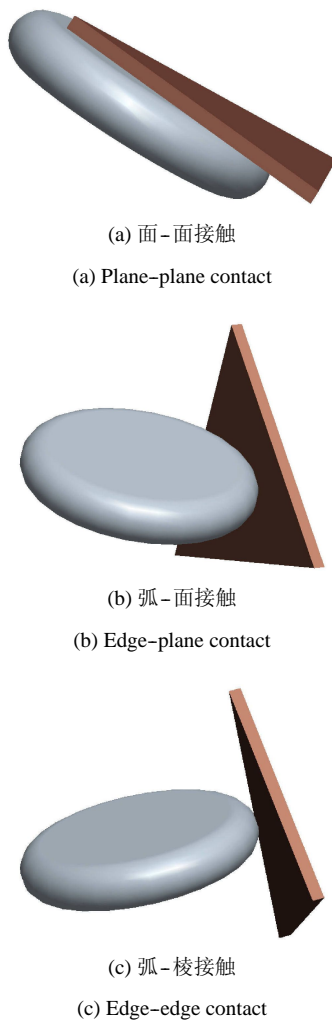


图 6 海冰单元与船体单元间的接触形式

Fig. 6 Contact types between ice element and ship hull element

单元又作用于 2 个三角形单元的交界处时, 则会发生弧-棱接触.

这里以弧-面接触为例分析海冰单元与船体三角形单元间的接触情况, 如图 7 所示. 海冰单元与船体单元的距离 δ 为

$$\delta = d - |\mathbf{R} \cdot \mathbf{n}_w| - r \quad (3)$$

式中, d 为单元中心到三角形单元 abc 所在平面的距离, \mathbf{R} 和 \mathbf{n}_w 分别为海冰单元中心圆面的半径矢量和三角形单元所在平面的单位法向矢量, P_1 为圆盘单元上到平面距离最短的点, P_2 为 P_1 在平面上的投影. 当 P_2 在三角形单元 abc 内, 且 δ 小于等于 0 时, 圆盘单元与三角形单元所在平面接触. 此时, 海冰圆盘单元与船体三角形单元间的重叠量即为 $|\delta|$.

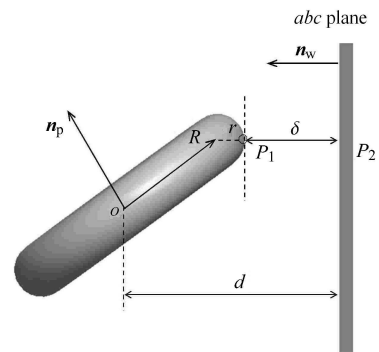


图 7 海冰单元与船体单元的接触判断

Fig. 7 Contact detection between sea ice element and ship hull element

1.5 单元间的作用力计算

无论是海冰单元之间, 还是海冰单元与船体单元之间的接触, 其相互作用均可基于离散元模型计算. 单元之间可视为在法向上由弹簧与阻尼器并联, 在切向上由弹簧、阻尼器和滑动摩擦器连接. 在颗粒相互作用过程中, 一般考虑单元间因相对速度和弹性变形而引起的黏弹性作用力, 并采用 Mohr-Coulomb 摩擦定律计算剪切力.

海冰单元间的法向力为

$$F_n^n = K_n \delta - C_n \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} \quad (4)$$

式中, F_n^n 表示 n 时刻两单元间的法向接触力; δ 是海冰单元间的重叠量; \mathbf{V} 是海冰单元间的相对速度矢量, \mathbf{n} 是接触单元的法向单位矢量; K_n 是海冰单元间的法向刚度, 其为海冰弹性模量和厚度的函数; C_n 是海冰单元间的法向黏滞系数, 其与海冰法向接

触刚度、质量和回弹系数相关. 在采用线黏弹性模型计算单元间的作用力时, 有

$$K_n = EH_i \quad (5)$$

$$C_n = 2\xi_n \sqrt{mK_n} \quad (6)$$

式中, E 为海冰的弹性模量, H_i 为海冰单元厚度, ξ_n 为海冰单元的无量纲法向阻尼系数, m 为两个接触海冰单元的平均质量. 对于海冰单元间的面-面接触, 则需要考虑两单元间的接触面积以对接触刚度进行调整.

海冰圆盘间的切向接触力为

$$F_t^n = \min\{(F_t^{n-1} - K_t \Delta t (\mathbf{V} \cdot \mathbf{t})), \mu F_n^n\} \quad (7)$$

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, 可设为法向刚度的 60% [39]; Δt 为时间步长; \mathbf{t} 为接触单元的切向单位矢量; μ 为滑动摩擦系数. 由于本文将船体简化为刚体, 海冰与其作用时的刚度为海冰单元之间相互作用的 2 倍.

在风和流的作用下, 海冰受到浮力和拖曳力的共同作用, 同时还要考虑水的附加质量. 海冰在运动中会有不同的浸入深度和角度, 这里采用微元法对不同浸入情况下海冰单元的浮力进行计算. 海水对海冰单元的拖曳力为

$$\mathbf{F}_d = \frac{1}{2} C_d \rho_w A (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_i) |\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_w| \quad (8)$$

式中, C_d 是拖曳力系数, A 是海冰单元浸入水里部分的表面积, \mathbf{V}_i 和 \mathbf{V}_w 分别为冰速和流速矢量.

对于海冰单元的转动, 海水对其也有相应的拖曳力矩, 即

$$\mathbf{M}_d = -\frac{1}{2} C_d (r_i^i)^2 \rho_w A \boldsymbol{\omega} |\boldsymbol{\omega}| \quad (9)$$

式中, $\boldsymbol{\omega}$ 是海冰的转动角速度.

海冰单元在加速度运动时会带动周围的部分流体一块加速运动, 从而导致其惯性力明显增加, 其可由附加质量进行处理. 该附加质量与海冰单元浸入海水中的体积和加速度成正比, 即

$$M_a = C_m \rho_w V_{\text{sub}} \frac{d|\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_w|}{dt} \quad (10)$$

式中, M_a 为海冰单元的附加质量, C_m 附加质量系数, ρ_w 是海水密度, V_{sub} 是海冰浸入水中的体积.

2 船舶在碎冰区航行的离散元模拟

2.1 船体结构冰载荷的离散元分析

碎冰区的计算域长度为 L (x 方向) 和宽度为 B (y 方向), z 轴方向冰水面垂直; 在计算域的水平方向采用周期性边界条件. 数值模拟过程中的主要计算参数列于表 2 中.

表 2 碎冰与船体结构相互作用的主要计算参数

Table 2 Computational parameters in the DEM simulation of ice floe-ship hull interaction

Definition	Symbol	Value	Definition	Symbol	Value
water density	ρ_w	1 010 kg/m ³	ice density	ρ	900 kg/m ³
ice floe size parameter	R	4 m~6 m	ice thickness parameter	r	0.3 m
initial ice concentration	C	0.5	ice elasticity modulus	E	0.8 GPa
normal drag coefficient	C_d^n	0.6	tangential drag coefficient	C_d^t	0.06
added mass coefficient	C_m	0.15	floe surface friction	μ_{pp}	0.35
viscous damping coefficient	ξ_n	0.4	time step	Δt	0.005 s
domain length	L	600 m	domain width	B	150 m
flow velocity	V_{water}	0.4 m/s	navigational speed	V_{ship}	4.0 m/s

海冰单元直径在 4.0 ~ 6.0 m 间均匀分布, 并以 50% 的密集度随机分布在计算域内, 共有 1 380 个海冰单元. 船体和浮冰的初始分布如图 8(a) 所示. 船舶以 4.0 m/s 的速度沿 x 方向行进, 海水以 0.4 m/s 的流速沿 x 反方向流动. 采用以上离散单元模型对

船体和海冰相互作用的动力过程进行 60 s 数值模拟. 图 8(b) ~ 图 8(d) 给出了 $t = 10$ s, 30 s 和 60 s 时浮冰与船体相互作用的状态. 在航行过程中, 海冰单元与船体相互接触碰撞, 并在船头发生重叠, 如图 9 所示.

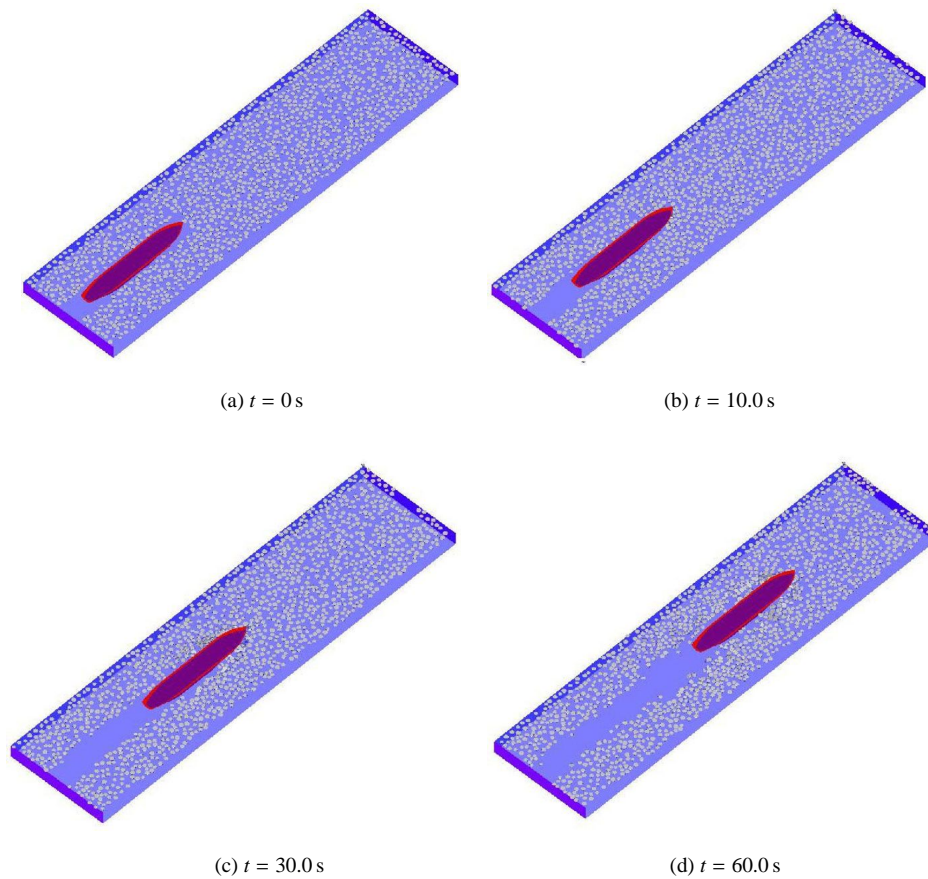


图 8 离散元模拟的碎冰与船体相互作用过程

Fig. 8 Snapshots of the interaction between ship hull and ice floes at different times

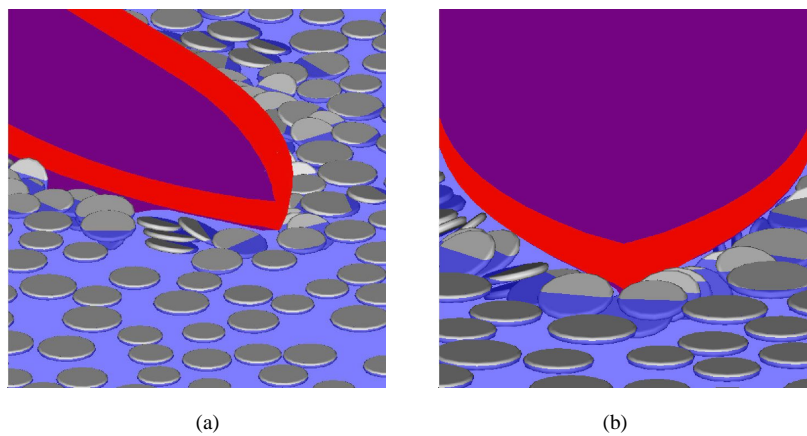


图 9 碎冰与船体结构作用过程中的碰撞现象

Fig. 9 Snapshots of the collision of ice floe with ship hull

海冰对船体总阻力时程曲线如图 10 所示. 可以发现, 冰载荷呈现出很强的随机波动现象. 在 x 方向, 即船舶航行方向, 冰载荷均为正值; 而在 y 方向上, 冰载荷均值接近 0, 且大体成对称分布. 在 x, y

不同方向上的最大冰力幅值 F_{\max} 分别为 815 kN 和 201 N, 其均值 F_{mean} 分别为 166 kN, -4.16 kN. 由此可见, 浮冰对船体结构的总阻力主要集中在船舶航行方向, 而对船体侧向的总阻力可以忽略.

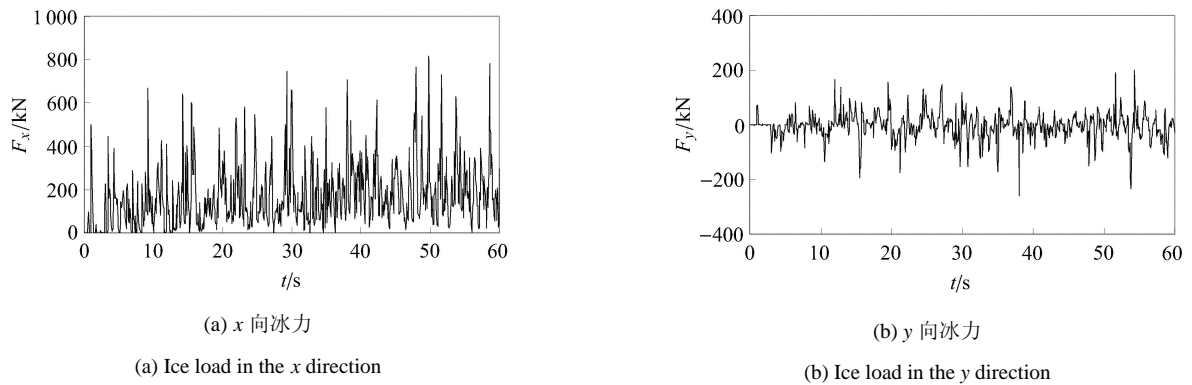


图 10 离散元模拟的碎冰对船体的冰力历程

Fig. 10 Dynamic ice loads on the ship hull based on DEM simulations

2.2 航速对船体冰载荷的影响

为分析航速对船体结构冰载荷的影响,在不同航速下对海冰与船体结构的作用过程进行离散元分析.主要计算参数选用表 2 所列数值,而航速 V_{ship} 分别为 2.0 m/s, 3.0 m/s, 4.0 m/s 和 5.0 m/s,考虑海冰对船舶结构的作用力主要在船体前进方向,因此这里主要分析 x 方向的冰载荷.由此对船舶在冰区航行 60 s 的冰载荷进行模拟计算.不同航速下冰载荷的最大值 F_{max} 和平均值 F_{mean} 如图 11 所示.可以发现,冰力随航速的增加而迅速增长.

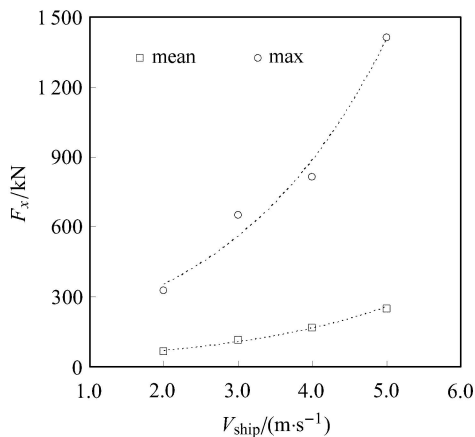


图 11 不同航速下船体结构的冰载荷

Fig. 11 Ice loads on ship hull under different shipping speeds

航速决定了船体与海冰撞击的速度和频率,是决定船体总体阻力的一个重要因素.随着航速的增加,船体受到的海冰的冲击力也迅速增大,并引起船体结构与海冰接触区局部应力的增大.如果减小航速以降低冰力,则又会影响冰区的航运效率.因此,在不同冰况下合理地选择航速是冰区航行的重要因素.

2.3 海冰参数对船体冰载荷的影响

在碎冰区,海冰参数主要包括冰厚、流速、密集度和海冰尺寸等,均是影响船体冰载荷的重要因素.下面分别讨论其对船体结构作用力的影响.在以下离散元分析中,均选用表 2 中的计算参数,并对不同冰况下的海冰参数进行相应调整.

海冰密集度 C 表示冰区内浮冰的有效覆盖面积,其在冰块尺寸确定的条件下直接影响海域中的冰块数量.图 12(a) 给出了密集度 C 分别为 30%, 40%, 50% 和 60% 时,冰力峰值和均值的变化情况.可以发现,随着密集度的增加,冰力峰值大体呈线性增加,但变化不显著.在密集度增加过程中,碎冰区内的冰块数不断增多,海冰与船体的接触频率也相应增大,由此导致平均冰力的上升.

当流速 V_{water} 分别取为 0.2 m/s, 0.4 m/s, 0.6 m/s 和 0.8 m/s 时,船体冰载荷的计算结果如图 12(b) 所示.可以发现,冰力随流速的增加而迅速增大,即流速越快,冰载荷越大.这一方面是由于流速的增加会导致海冰与船体碰撞频率的增大,同时海冰与船体碰撞时的动量也会明显增加.

当冰厚 H_i 分别为 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m 和 1.0 m 时,船体冰载荷计算结果如图 12(c) 所示.为进一步分析冰块尺寸对船体冰力的影响,这里将海冰单元设为相同大小.当海冰尺寸 D 分别为 4.0 m, 5.0 m, 6.0 m 和 7.0 m 时,计算结果如图 12(d) 所示.可以发现,船体冰载荷均值和峰值均随着冰厚和冰块尺寸的增加而增加,且冰力峰值受冰块厚度和尺寸的影响尤为显著.这主要是由于海冰的厚度和尺寸是决定冰块对船体冲击动量的主要因素.

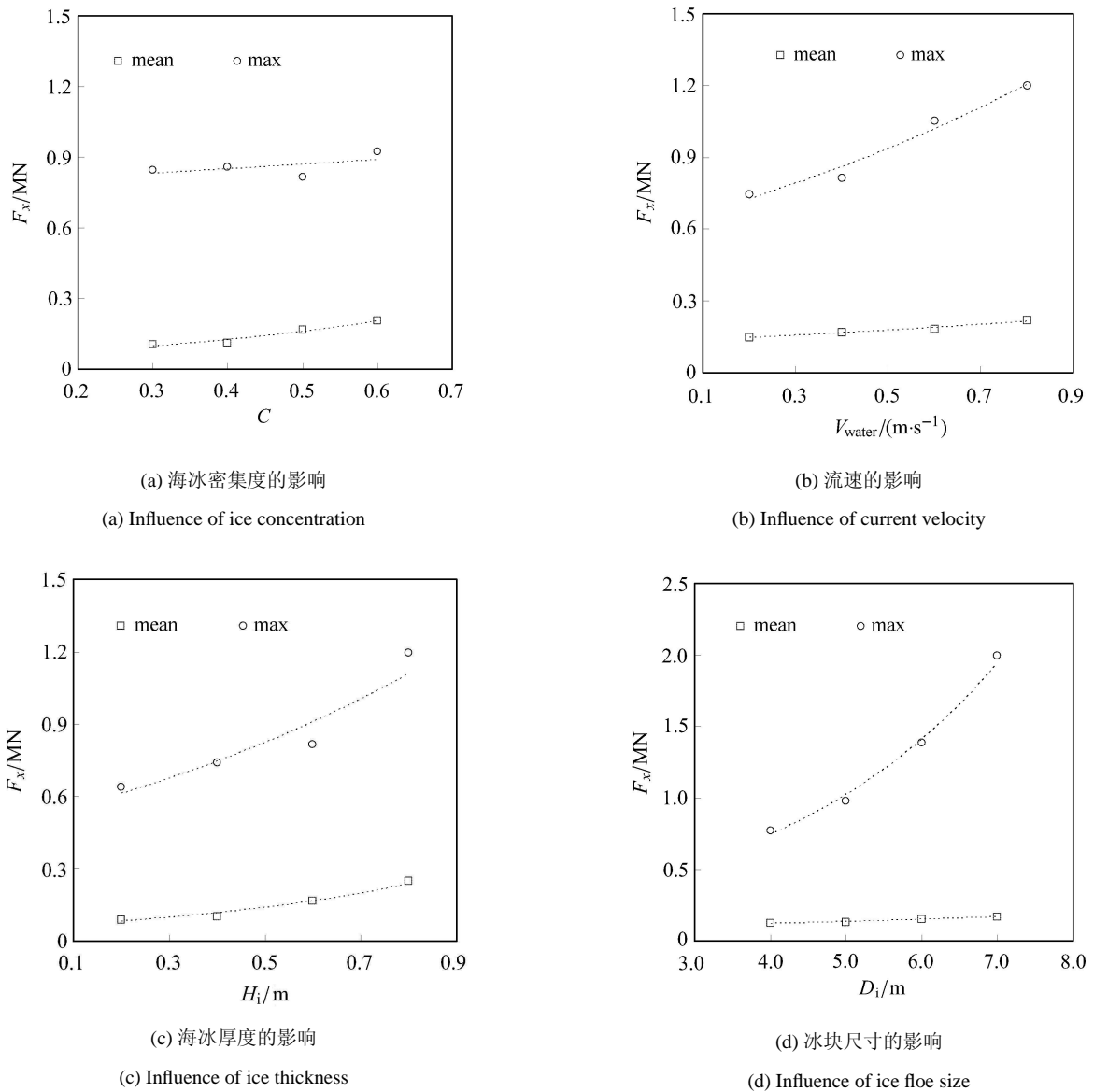


图 12 碎冰区不同冰况下海冰对船体作用力

Fig. 12 Ice loads on ship hull under different ice conditions in broken ice field

通过对碎冰和船体结构在不同航速和海冰参数条件下相互作用的离散元模拟,可以看出航速、海冰尺寸、厚度、密集度以及流速均是影响船体冰载荷的重要因素. 船体冰载荷随航速、冰块尺寸、冰厚、密集度和流速的增加而增大. 因此船舶在碎冰区航行中应充分考虑海冰条件, 确定合理的航速和航线, 以有效地降低冰载荷.

3 结语

为分析碎冰区船体结构的冰载荷, 本文建立了浮冰和船体结构相互作用的离散元模型. 海冰单元采用扩展单元方法构造的三维圆盘单元, 船体由三

角形单元构造. 通过对圆盘海冰单元之间以及圆盘单元和三角形船体单元的接触判断, 确定海冰与船体之间的相互作用, 并由此确定船体总冰力.

通过对碎冰区浮冰和船体结构相互作用的离散元分析, 讨论了航速和海冰参数(密集度、流速、尺寸和冰厚)对船体冰载荷的影响. 结果表明, 船体冰载荷随航速、冰块尺寸、冰厚、密集度和流速的增加而增大. 尽管本文对碎冰区的冰块形态、船体结构和流体动力学等方面进行了诸多假设, 但计算结果能够有效地反映海冰与船体结构的作用形式以及冰载荷的变化规律.

在冰区船舶设计和航行中, 海冰对船体结构的

局部冰载荷和整体冰阻力均是影响船体安全性与操纵性能的重要因素. 本文主要研究了碎冰区船体总体冰载荷的基本规律, 为进一步分析船体局部冰载荷, 特别是冰压力的高压区分布特征和尺度效应, 提供了一定的前期工作. 在本文工作基础上, 还将进一步开展海冰单元的冻结和断裂模型研究, 对破冰船与平整冰作用下船体的破冰性能以及海冰破碎规律进行离散元模拟. 此外, 还将考虑不同的船舶航行方式, 如直行、转航和之字型等, 更全面地分析海冰对船体结构的冰载荷.

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, 在此深表谢意.

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. 极地研究, 2010, 22(2): 104-124 (Su Jie, Xu Dong, Zhao Jinping, et al. Features of North West Passage sea ice's distribution and variation under Arctic rapidly warming condition. *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. *Journal of Maritime Affairs*, 2007, 6(2): 193-205
- 3 Ji SY, Liu SW. Interaction between sea ice/iceberg and ship Structures. A review. *Advances in Polar Science*, 2012, 23(4): 1-6
- 4 Konno A. Resistance evaluation of ship navigation in brash ice channels with physically based modeling. In: Proceedings of the 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Luleå, Sweden, 2009
- 5 Wang J, Derradji-Aouat A. Numerical assessment for stationary structure (Kulluk) in moving broken ice. In: Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Montréal, Canada, 2011, POAC11-172
- 6 Liu Z, Amdahl J, Løset S. Integrated numerical analysis of an iceberg collision with a foreship structure. *Marine Structures*, 2011, 24: 377-395
- 7 Daley C, Kim H. Ice collision forces considering structural deformation. In: Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Shanghai, China, 2010, OMAE2010-20657
- 8 Mikko S, Pentti K. Ice model tests in compressive ice. In: Proceedings of the 21st IAHR International Symposium on Ice. Dalian, China, 2012
- 9 Taylor RS, Jordaan IJ, Li C, et al. Local design pressure for structures in ice: analysis of full-scale data. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2010, 132: 031502-1-7
- 10 Jordaan IJ, Maes MA, Brown PW, et al. Probabilistic analysis of local ice pressures. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1993, 115(1): 83-89
- 11 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. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65: 314-325
- 12 Ibrahim RA, Chalhoub NG, Falzarano J. Interaction of ships and ocean structures with ice loads and stochastic ocean waves. *Applied Mechanics Review*, 2007, 60(5): 246-290.
- 13 Karulin EB, Karulina MM. Numerical and physical simulations of moored tanker behaviour. *Ship and Offshore Structures*, 2011, 6(3): 179-184
- 14 Zhou L, Su B, Riska K, et al. Numerical simulation of moored ship in level ice. In: Proceedings of the ASME 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands, 2011, OMAE2011-49115
- 15 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. Montréal, Canada, 2011
- 16 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.
- 17 Su B, Riska K, Moan T. Numerical study of ice-induced loads on ship hulls. *Marine Structures*, 2011, 24 (2), 132-152.
- 18 Zhan D, Agar D, He M, et al. Numerical simulation of ship maneuvering in pack ice. In: Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, China, 2010, OMAE2010-21109.
- 19 Su B, Riska K, Moan T. Numerical simulation of local ice loads in uniform and randomly varying ice conditions. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65: 145-159
- 20 Aksnes V. A simplified interaction model for moored ships in level ice. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 63: 29-39
- 21 Zhou L, Su B, Riska K, et al. Numerical simulation of moored structure station keeping in level ice. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 71: 54-66
- 22 Sayed M, Kubat I. Forces on ships transiting pressured ice covers. In: Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Hawaii, USA, 2011
- 23 季顺迎, 李春花, 刘煜. 海冰离散元模型的研究回顾及展望. 极地研究, 2012, 24(4): 315-330 (Ji Shunying, Li Chunhua, Liu Yu. A review of advances in sea-ice discrete element models. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(4): 315-330 (in Chinese))
- 24 Lau M, Lawrence K P, Rothenburg L. Discrete element analysis of ice load on ships and structures. *Ships and Offshore Structure*, 2011, 6(3): 211-221
- 25 Hansen EH, Loset S. Modelling floating offshore units moored in broken ice: model description. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 29: 97-106
- 26 Sawamura J. Numerical investigation of ice bending failure and ice submerging force for ship maneuvering in level ice. In: Proceedings of the 21st IAHR International Symposium on Ice. Dalian, China, 2012
- 27 Konno A, Saitoh O, Watanabe Y. Numerical investigation of effect of channel condition against ship resistance in brash ice channels. In:

- Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Montréal, Canada, 2011
- 28 Lubbad R, Løset S. A numerical model for real-time simulation of ship-ice interaction. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65: 111-127
- 29 Shen HH, Hibler WD, Lepparanta M. The role of floe collisions in sea ice rheology. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(C10): 7085-7090
- 30 Hopkins MA. Onshore ice pile-up: A comparison between experiments and simulations. *Cold Regions Science and Technology*, 1997, 26(3): 205-214
- 31 Hopkins MA. Four stages of pressure ridging. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 21883-21891
- 32 Selvadurai APS, Sefehr K. Two-dimensional discrete element simulations of ice-structure interaction. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36: 4919-4940
- 33 李春花, 王永学, 李志军等. 半圆型防波堤前海冰堆积模拟. *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. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 172-177 (in Chinese))
- 34 Polojarvi A, Tuhkuri J. 3D discrete numerical modelling of ridge keek punch through tests. *Cold Regions Scienc and Technology*, 2009, 56: 18-29
- 35 Hopkins MA. Discrete element modeling with dilated particles. *Engineering Computations*, 2004, 21: 422-430
- 36 Hopkins MA, Shen HH. Simulation of pancake-ice dynamics in wave field. *Annals of Glaciology*, 2001, 33: 355 -360
- 37 Sun S, Shen HH. Simulation of pancake ice load on a circular cylinder in a wave and current field. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 78, 31-39
- 38 季顺迎, 李紫麟, 李春花, 等. 碎冰区海冰与船舶结构相互作用的离散元分析. *应用力学学报*, 2013, 300(4): 520-526 (Ji Shunying, Li Zilin, Li Chunhua, et al. Analysis of interaction between ice floe and ship hull with discrete element model in broken-ice field. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2013, 300(4): 520-526 (in Chinese))
- 39 Hopkins MA. On the mesosacle interaction of lead ice and floes. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(C8): 18315-18326

(责任编辑: 刘希国)

ANALYSIS OF SHIP MANEUVERING PERFORMANCES AND ICE LOADS ON SHIP HULL WITH DISCRETE ELEMENT MODEL IN BROKEN-ICE FIELDS¹⁾

Li Zilin^{*,†} Liu Yu^{**} Sun Shanshan[†] Lu Yunliang[†] Ji Shunying^{†,2)}

^{*}(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

[†](State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

^{**}(Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081, China)

Abstract With the development of navigation channels in Arctic regions and oil/gas exploitations in cold fields, the investigation of ice load on ship hull is required urgently in offshore engineering under various ice and maneuvering conditions. In this paper, the discrete element method (DEM) is adopted to simulate the interactions between drifting ice floes and a moving ship. The pancake ice floes are modeled with three-dimensional discrete elements considering the buoyancy, drag force and added mass of current. The ship hull is constructed with triangle elements. The interaction between ice floe and ship hull is determined through element contact detection and impact force calculation. The influences of ice conditions (current velocities and directions, ice thicknesses, concentrations and ice floe sizes) and navigational speed on the dynamic ice forces of ship hull are examined. This work is of reference value to the ship structure design and the navigation security in ice-covered fields reseaches.

Key words discrete element model (DEM), broken ice field, ship Hull, ice load

Received 21 January 2013, revised 13 April 2013.

1) The project was supported by the Special Funding for National Marine Commonwealth Industry of China (201105016, 2012418007), the National Natural Science Foundation of China (41176012) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT12YQ02).

2) Ji Shunying, professor, research interests: numerical model of engineering sea ice and its applications. E-mail: jisy@dlut.edu.cn