海洋工程专题

船舶与海洋平台结构冰载荷的高性能扩展多面体 离散元方法¹⁾

刘 璐* 尹振宇* 季顺迎*,2)

*(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室,大连116024) [†](香港理工大学土木与环境工程系,中国香港999077)

摘要船舶与海洋平台结构的冰载荷是寒区海洋工程结构物设计中的关键参数,而离散元方法是有效计算结构 冰载荷的重要手段.本文采用基于闵可夫斯基和原理的扩展多面体离散元方法模拟船舶与海洋平台结构的相互 作用过程.其中,构造扩展多面体的近似包络函数并建立了基于优化模型的快速接触搜索算法;考虑单元间粘 结作用的刚度软化过程建立了单元间的粘结--破碎模型.同时,发展了 CPU-GPU 协同异构环境下的高性能并行 算法.为分析海冰与海洋结构作用中的冰载荷,采用ISO标准验证了扩展多面体离散元分析结构冰载荷的准确 性.采用离散元方法计算了船舶结构的冰载荷,研究了船舶结构表明的线载荷分布特点,并采用船舶结构冰阻 力经验公式验证了计算结果的合理性.采用离散元方法计算了平整冰区与多桩腿平台结构的相互作用,分析各 桩腿上的冰载荷特点.针对碎冰区的海冰管理过程,采用离散元方法分析了船舶结构绕行过程中的船舶和海洋 平台结构冰载荷.本文方法可有效应用于海洋结构冰载荷分析,能为极地船舶与海洋平台结构的设计和安全运 行提供科学的分析手段.

关键词 扩展多面体,离散元,船舶与海洋平台结构,冰载荷,高性能算法

中图分类号: O343.3, U66 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-19-250

HIGH-PERFORMANCE DILATED POLYHEDRAL BASED DEM FOR ICE LOADS ON SHIP AND OFFSHORE PLATFORM STRUCTURES ¹)

Liu Lu* Yin Zhenyu[†] Ji Shunying^{*,2)}

*(State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China) †(Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract The ice loads on ship and offshore platform structures is the key factor in structure design for cold regions. The discrete element method (DEM) is an important approach to determine the ice load on structures. According to the Minkowski sum theory, the dilated polyhedra based DEM is employed to simulate the interaction between sea ice and ship and offshore platform structures in this paper. In the dilated polyhedra based DEM, the enveloped function of the dilated polyhedron is generated to establish the fast contact detection algorithm based on the optimization model. Meanwhile, the bond-break model between elements is established by considering the stiffness softening process between bonded

²⁰¹⁹⁻⁰⁸⁻³¹ 收稿, 2019-10-08 录用, 2019-10-08 网络版发表.

¹⁾ 国家重点研发计划重点专项 (2017YFE0111400, 2016YFC1401505) 和国家自然科学基金项目 (51639004, 41576179) 资助.

²⁾ 季顺迎,教授,主要研究方向:计算颗粒力学及其工程应用. E-mail: jisy@dlut.edu.cn

引用格式: 刘璐, 尹振宇, 季顺迎. 船舶与海洋平台结构冰载荷的高性能扩展多面体离散元方法. 力学学报, 2019, 51(6): 1720-1739 Liu Lu, Yin Zhenyu, Ji Shunying. High-performance dilated polyhedral based DEM for ice loads on ship and offshore platform structures. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(6): 1720-1739

elements. Accordingly, the high-performance algorithm based on CPU-GPU cooperative-heterogeneous environment is developed. The ISO standard is employed to validate the ice load determined by the dilated polyhedra based DEM for better engineering applications of the interaction between sea ice and marine structures. The ice load on ship hull is calculated by the proposed method while the line load distribution on ship hull is studied. The ice resistance of ship hull is compared with the result by Lindqvist empirical formula to validate the accuracy of DEM simulations. The interaction between level ice and multi-leg platform is simulated while the ice load on each leg is analyzed. For the ice management in broken ice regions, the ice load on ship and offshore structures is simulated when the ship navigates around the offshore platform in circle. The proposed method can be effectively applied in the analysis of ice load on marine structures, and can provide a scientific approach for the design and safety operation of ship and offshore structures.

Key words dilated polyhedron, discrete element method, ship and offshore platform, ice load, high-performance algorithm

引 言

随着两极地区航运和油气资源开发等事业的不 断发展,冰区船舶和海洋平台结构的抗冰设计和安 全运行等问题亟待解决.其中,冰载荷是船舶与海 洋平台结构在冰区安全运行的关键环境载荷,船舶 结构的总体冰阻力和局部冰压力分布是评估船舶结 构破冰能力和结构安全监测的重要衡量指标^[1],海 洋平台结构的冰载荷是研究结构抗冰性能和冰激疲 劳分析的主要参数^[2].在结构冰载荷的数值分析方 法中,离散元方法能够对海冰与结构的相互作用、 海冰破碎和破碎海冰间的接触过程等进行较为全面 地模拟,是合理分析冰载荷的重要手段^[3].

海冰与船舶结构作用过程中,由于船体不同部 位几何结构的差异,海冰会呈现弯曲、挤压、屈曲、 剪切等不同的破坏模式. 在海冰和船艏的作用过程 中,弯曲破坏产生的冰载荷最为显著[4].该过程受结 构形状和海冰参数的影响,海冰会发生径向或环向 断裂破坏. 当海冰作用于船体舯部和船艏两侧时, 由 于该部分结构的垂向倾角很小,海冰呈挤压破坏状 态. 此时海冰在船体表面的局部冰压力分布成为船 体结构安全的关键因素[5-6]. 在海冰与海洋平台结构 的相互作用研究中,主要关注结构的最大静冰力和 交变动冰力[7-8]. 根据结构的几何形状, 海冰与直立 结构和坡面结构作用时的破坏模式和冰载荷形式区 别较大.海冰与直立结构作用主要发生挤压破碎,冰 载荷可能表现为较高频率的持续性冰力[9];海冰与 坡面结构作用时主要发生弯曲破坏,冰载荷通常表 现为规律性的交变冰力[10].

离散元方法自 20 世纪 80 年代开始被用于海冰

碰撞和漂移等研究中[11]. 近年来, 基于离散元方法 的海冰与船体和海洋平台结构间的相互作用研究取 得了较大进展.海冰离散元方法的计算单元可采用 球体[12]、圆盘[13]、多面体[14-15]和扩展多面体[16]等不 同形态.其中,球体单元通过平行粘结模型进行粘结 并考虑单元之间的粘结失效, 使离散的球体单元粘 结为平整冰排,在海流的作用下与海洋平台发生碰 撞进而破碎,具有模型简单和计算效率高的特点[17]. 针对球体单元的尺寸效应带来参数不确定的问题, 可通过离散元模拟海冰的单轴压缩和三点弯曲试验 并结合渤海海冰的强度试验结果,采用无量纲化的 单元尺寸参数分析并总结试样强度的变化规律,从 而能够建立标准化的海冰宏微观强度关系并用于海 冰的相关模拟中[18-19]. 在宏观尺度上, 球体单元需 要大量的单元粘结形成较大的冰区,而多面体单元 可用较少的单元数模拟较大区域的海冰,具有一定 的优势[20-21]. 多面体离散元模型主要模拟平整冰的 破碎、重叠和堆积过程,可合理地描述冰块的几何 形态. 针对碎冰区冰块形态呈多边形且随机分布的 特点,还可采用 Voronoi 切割算法生成具有不同冰块 尺寸、几何形态和密集度的冰块分布[22].目前,采用 块体离散元方法对堆积冰的受压形变过程、海冰与 船体结构的相互作用过程进行了数值模拟[23-24]. 但 多面体的接触检测等面临计算效率低的问题, 合理 构建其粘结-破碎模型也是基于多面体的海冰离散 元方法中的关键问题[25-28].

最近,基于扩展多面体的快速搜索算法和粘结-破碎模型发展较快,可应用于海冰与结构相互作用过程的分析中^[29].基于闵可夫斯基和原理可将基本的几何单元与球体单元进行空间叠加从而构成扩

展单元. 采用多面体和球体的闵可夫斯基和可构造 扩展多面体单元[30]. 据此可发展基于扩展多面体的 粘结-破碎模型^[31-32]和 DEM-LBM (Lattice Boltzmann method)的流固耦合模型[33],并用于脆性材料水力压 裂过程的模拟分析中. 由于扩展多面体单元将尖锐 的角点和棱边转换为光滑的球面和圆柱面,在接触 判断中避免了多面体之间难以通过几何元素直接判 断接触的缺点,提高了接触搜索的效率和稳定性; 还可采用精确化的Hertz接触力模型计算接触力,提 高接触力计算的准确性[16,34]. 另外, 根据类似的"扩 展单元"方法,采用多面体扩展函数构造与扩展多面 体类似的几何形状,可通过扩展函数表达式之间的 优化模型求解单元之间的接触搜索问题[35-36]. 通过 优化模型解决接触问题可有效避免几何元素之间复 杂的几何判断,也可避免几何方法中产生多个接触 点引起的物理失真,在具体计算中具有较高的执行 效率[37-38]. 在扩展多面体单元的粘结-破碎模型中, 考虑粘结作用的刚度软化过程可避免粘结失效时突 然的能量释放,有效提高海冰断裂过程模拟的平稳 性^[29].

本文基于闵可夫斯基和原理构造扩展多面体单 元,发展扩展多面体间的快速搜索算法和粘结-破碎 模型,并采用CPU-GPU协同方式进行并行计算.采用 该方法计算海冰与船舶和海洋平台结构的相互作用 过程,通过ISO标准公式和现场监测数据验证分析结 构冰载荷计算的合理性,从而采用将该方法应用于 具体的工程分析中.

1 扩展多面体离散元方法及高性能计算

采用二维的 Voronoi 切割算法将二维平面划分 为若干多边形,将多边形在垂直纸面的方向上进行 拉伸即形成具有一定厚度的多面体,根据闵可夫斯 基和原理将该多面体和球体结合即可构造扩展多面 体形态的海冰单元.

1.1 海冰的扩展多面体构造

假设空间中两个几何体代表的点集 A 和 B,且 集合 A 和 B 为几何封闭形态,那么集合 A 和 B 的闵 可夫斯基和可定义为

$$A \oplus B = \{x + y | x \in A, y \in B\}$$
(1)

式中, x 和 y分别是A 和 B中的几何点. 可知 $A \oplus B$ 是A 和 B中所有点的空间矢量和. 闵可夫斯基和

的几何求取过程可以概述为点集 B 扫略在点集 A 的 外表面上,形成的新几何形状即为 A 和 B 的闵可夫 斯基和.根据闵可夫斯基和的定义,采用球体和任意 多面体可构建扩展多面体^[29].如图 1 所示.其中,球 体半径称为扩展半径,任意多面体称为基本多面体.



Voronoi 切割算法根据随机的空间点将空间划 分为随机的任意多面体或多边形,可合理表述自 然条件下海冰的分布和形状规律^[39].这里采用二 维 Voronoi 切割算法,将一定范围的二维平面划分为 若干任意多边形,如图 2(a)所示.其中,多边形的形 状可根据随机点的分布进行控制^[40].然后将每个多 边形在垂直纸面方向进行拉伸形成多面体,根据闵 可夫斯基和原理则可生成扩展多面体形态的海冰单 元,如图 2(b) 所示.其中, h 为海冰厚度.若r为扩展



(a) 二维Voronoi切割算法生成随机多边形网格(a) Random polygon grid by 2D Voronoi tessellation algorithm



半径,则t = h - 2r.对于碎冰初始场的生成,则可通 过实际海冰面积和冰区范围控制碎冰密集度^[22];而 对于平整冰的生成,则可直接划分网格.

1.2 扩展多面体离散元的接触模型

在扩展多面体单元的接触模型中,可构造扩展 多面体的近似包络函数,从而采用优化模型建立单 元间的接触搜索算法.通过二阶多面体扩展函数与 球面函数的加权求和形式可构造具有多面体特征的 光滑函数^[36],其归一化形式可写作

$$f(x, y, z) = (1 - k) \left(\sum_{i=1}^{N} \frac{a_i x + b_i y + c_i z - d_i^2}{r^2} - 1 \right) + k \left(\frac{x^2 + y^2 + z^2}{R^2} - 1 \right)$$
(2)

式中, k 为光滑度系数; R 为球面函数的半径.

图3为边长为 a 的正四面体和球体函数组合构成的函数在不同加权系数下的几何形态,其中扩展半径 r = 0.1a,球体半径 R = 1.5a.可以看出, k 越小其形态越接近于扩展多面体的形态,当 k = 0.001时的函数几何形态与扩展多面体形态具有高度的相似性.实际上,尽管其形态与扩展多面体尚存在一定的差异,仍可采用该函数作为扩展多面体的近似"包络"函数^[41].



Fig. 3 The envelope function of the dilated polyhedron under different parameter k

扩展多面体的包络函数满足"势能颗粒 (potential particle)"的定义^[35],因此可建立两个函数之间的优 化模型用于单元接触中心点的搜索,该优化模型可 定义为^[38]

设计变量
$$(x, y, z)$$

目标函数 $f_A(x, y, z) + f_B(x, y, z)$
约束条件 $f_A(x, y, z) - f_B(x, y, z) = 0$ (3)

式中, *f_A*和 *f_B*对应两个单元的包络函数.如图 4 所示,两个单元接触时满足上式的解 *C_{AB}*同时位于两个包络函数内部,其可被视为接触重叠区域的接触中心点.



图4 包络函数之间的接触优化模型 Fig.4 The optimization model between envelope functions

根据拉格朗日乘子法构造拉格朗日函数如下

$$L(X,\lambda) = f_A + f_B + \lambda (f_A - f_B)$$
(4)

由 $\nabla L(X, \lambda) = 0$ 可将该优化问题变为四元非线性方 程组,可采用牛顿迭代法进行求解该方程组.在牛 顿迭代法的初始点选取中,可先在迭代中通过调整 光滑度系数 k 由 1.0 渐变至较小值,从而使初始点逐 渐逼近最终解附近,从而提高迭代的收敛效率^[41].另 外,还可在迭代中设置稳定性系数,提高迭代的稳定 性^[42].求得式(3)表示的优化模型结果 C_{AB} 之后,由 该点出发迭代搜索基本多面体上距离最近的点来确 定两个颗粒上的接触点,进而可确定接触重叠量和 接触法向.由于该计算并没有复杂的判断过程,且接 触中心点 C_{AB} 一般距这两个最近点十分接近,所以 该迭代过程并不会耗费较多计算资源^[41].

为简化接触力计算,采用非线性的接触力模型 简化计算扩展多面体之间的接触力^[43-44].其中,法 向接触力可表示为法向弹性力和法向黏滞力之和, 即可得

$$F_{\rm n} = F_{\rm n}^{\rm e} + F_{\rm n}^{\rm v} = k_{\rm n} \delta_{\rm n}^{\frac{3}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} + c_{\rm n} \sqrt{\delta_{\rm n}} \delta''$$
(5)

式中, k_n 为法向接触刚度, $k_n = 4E^* \sqrt{R^*}/3$, $E^* 和 R^*$ 是等效的弹性模量等效颗粒半径 [45]; δ_n 是

报

两颗粒的法向接触重叠量; δ'' 是法向相对速度; c_n 为法向阻尼系数

$$c_{\rm n} = \zeta_{\rm n} \sqrt{m_{AB} k_{\rm n}} \tag{6}$$

式中, mAB 为等效质量^[45], Cn 是无量纲阻尼系数

$$\zeta_{\rm n} = \frac{-\ln e}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}} \tag{7}$$

式中, e 是回弹系数, 可参考不同碰撞速度下颗粒回 弹系数的计算^[46].

切向接触力与切向接触重叠量和摩擦力有关, 一般切向力最大不超过摩擦力.这里可采用简化的 方式避免与摩擦力的频繁比较和判断^[44].其中,切 向弹性力*F*^e可写作

$$F_{t}^{e} = \mu \left| F_{n}^{e} \right| \left[1 - \left(1 - \frac{\delta_{t}}{\delta_{t}^{\max}} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$
(8)

式中, μ 是摩擦系数; δ_t 是切向重叠量, 一般根据相 对切向速度并逐步叠加的方法累计计算切向重叠 量; δ_t^{max} 是最大切向重叠量,其主要由摩擦系数和法 向重叠量决定,且 $\delta_t^{\text{max}} = \mu \delta_n (2 - \nu) / (2 - 2\nu), \nu$ 为泊 松比. 扩展多面体单元间的切向黏滞力 F_t^{ν} 可写作

$$F_{\rm t}^{\rm v} = c_{\rm n} \sqrt{\frac{6\mu m_{AB} \left|F_{\rm n}^{\rm e}\right| \sqrt{1 - \delta_{\rm t} / \delta_{\rm t}^{\rm max}}}{\delta_{\rm t}^{\rm max}}} \delta^{\prime\prime} \tag{9}$$

式中, δ'' 是切向相对速度; c_t 是切向阻尼系数, 这里 取 $c_t = c_n / (2(1 + v))^{[47]}$. 该切向力计算方法避免了每 个时间步中与摩擦力的大小对比, 有效地提高了计 算效率.

由于本文的接触搜索只有一个接触点,即互相接触的两个单元只有一个接触力,故以上接触力模型无法消除单元绕接触法向的非物理转动.为此,这里在单元的转动方程中引入绕接触法向的滚动摩阻力矩 *M*_r^[43]

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{r}} = -\mu_{\mathrm{r}} R^* \left| \boldsymbol{F}_{\mathrm{n}} \right| \boldsymbol{\omega}_{AB} / \left| \boldsymbol{\omega}_{AB} \right| \tag{10}$$

式中, μ_r 是滚动摩擦系数; ω_{AB} 是相对角速度.

1.3 扩展多面体离散元的粘结--破碎模型

1.3.1 扩展多面体单元的粘结模型

借鉴刚体有限元的基本思想,即单元间的刚度 作用建立在交界面上^[48].因此,本文在两个互相 粘结的单元间交界面的角点上设定若干积分点, 将该积分点对应在两个单元上的点视为粘结节点, 并称该交界面对应在两个单元上的面为粘结面,如 图 5(a) 所示.通过施加一定的刚度和阻尼,即可在互 相粘结的节点上计算类似的法向和切向应变^[49].在 本文的相关计算中,粘结节点取为交界面的顶点.其 中,法向应变 ε_n 可写作

$$\varepsilon_{\rm n} = \frac{d \cdot n}{C_{ij}} \tag{11}$$

式中, d 是两个粘结节点之间的距离向量; n 为交 界面的法向, 这里取为两个单元粘结面的外法向之 差, 即 $n = unit(n_i - n_j)$; C_{ij} 为两个粘结单元之间的 特征长度, 与刚体有限元中的定义相同, 即为两个粘 结面到各自单元质心的距离之和, 可写作

$$C_{ij} = h_i + h_j \tag{12}$$

由于粘结力会传递到单元质心上进行合力计 算,因此这里切向应变只考虑与法向垂直的一个方 向应变,即切向为 $t = unit(d - (d \cdot n)n)$,切向应变可 写作

$$\varepsilon_{\rm t} = \frac{|\boldsymbol{d} - (\boldsymbol{d} \cdot \boldsymbol{n})\boldsymbol{n}|}{C_{ij}} \tag{13}$$

根据图 5(b) 所示的粘结力模型,采用三维条件下的弹性矩阵,两个粘结单元在交界面上的弹性应力 σ^{e} 可写作

$$\boldsymbol{\sigma}^{e} = \begin{bmatrix} k_{n} & 0\\ 0 & k_{s} \end{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{E\left(1-\nu\right)}{\left(1+\nu\right)\left(1-2\nu\right)} \begin{bmatrix} 1 & 0\\ 0 & \frac{1-2\nu}{2\left(1-\nu\right)} \end{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}$$
(14)

式中, *E* 为材料弹性模量; *v* 为材料泊松比; σ^{e} 考虑 法向和切向的应力, $\sigma^{e} = \{\sigma, \tau\}^{T}$; *e* 考虑粘结节点之 间的法向和切向应变, 即 *e* = {*e*_n, *e*_t}^T.





Fig. 5 Sketch of bond model (continued)

在粘结力模型中,考虑法向和切向阻尼系数 C_n 和 C_s 表示的黏滞作用.该阻尼效应可代表真实的物理阻尼并消耗动能,从而提高模拟的稳定性. 一般情况下,通过与刚度相关的常系数 β 计算阻尼系数.因此,由黏滞作用产生的应力 σ^v 可写作

$$\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{v}} = \begin{bmatrix} C_{\mathrm{n}} & 0\\ 0 & C_{\mathrm{s}} \end{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^{\prime\prime} = \boldsymbol{\beta} \begin{bmatrix} k_{\mathrm{n}} & 0\\ 0 & k_{\mathrm{s}} \end{bmatrix}$$
(15)

式中, $\boldsymbol{\varepsilon}''$ 是应变率,且 $\boldsymbol{\varepsilon}'' = \{\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_n, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_t\}^{\mathrm{T}}$.两个粘结节点之间的粘结力可写作

$$\boldsymbol{F}^{b} = (\boldsymbol{\sigma}^{e} + \boldsymbol{\sigma}^{v}) \cdot \frac{A}{n}$$
(16)

式中, A 是交界面面积; n 是一个粘结面上的粘结节 点个数. 通过上式计算单元受到的粘结力, 将其转换 到单元质心上, 并结合接触力等其他受力, 即可得到 每个单元质心受到的合力情况.

可以看出,直接在整体坐标系下将节点间的粘结力传递到单元质心上,每个单元的运动可直接在单元的质心上进行求解.因此,该方式可高效地融入离散元方法中并形成算法和数据结构高度统一的数值方法.

1.3.2 扩展多面体单元间的粘结失效模型

在球体单元常用的平行粘结模型中,大多采用 拉剪分区的方式判断粘结的失效,即法向拉伸和切 向剪切分别判断应力是否达到临界值,若其中一个 失效则整个粘结作用失效^[50].显然,该方法对材料 的破坏过程描述较为片面,不能合理地评估裂纹附 近材料的断裂特性.因此,本文同时考虑法向拉伸和 剪切应力计算临界应力强度,在超过临界应力强度 之后引入损伤的概念从而考虑刚度的软化过程,结 合拉伸破坏和剪切破坏并采用混合的断裂能模型计 算断裂能,从而根据断裂能确定粘结节点之间的临 界变形.若节点间的变形大于该临界变形,则该粘结 失效.

采用考虑拉伸和剪切的强度判定准则决定弹性 的临界状态,该准则可写作^[51-52]

$$\left(\frac{\langle \sigma \rangle}{\sigma^{\prime\prime}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau^{\prime\prime}}\right)^2 \ge 1 \tag{17}$$

式中, σ'' 和 τ'' 分别是法向和切向粘结强度; (〉表示 Macaulay 括号, 且有: $\langle x \rangle = x$, 若 $x \ge 0$; $\langle x \rangle = 0$, 若 x < 0. 这里假设拉应力为正且压应力为负, 那 么 $\langle \sigma \rangle$ 即表示只考虑拉伸应力. 图 6 为该强度判定 准则在拉伸和剪切应力坐标系中的表示, 图中曲线 内形状为椭圆, 椭圆之外即表示材料损伤. 另外, 拉剪分区判断准则即为图中虚线与横纵轴围成的长 方形边界, 因此本文采用的强度准则比拉剪分区方 法"更易"发生损伤或破坏.



图6 拉伸和剪切应力结合的强度准则

Fig. 6 Hybrid failure criterion by tensile and shear strength

如图 7 所示,采用 Mohr-Coulomb 准则计算材料 的切向强度,可写作^[53]

$$\bar{\tau} = C - \mu_{\rm b} \sigma \tag{18}$$

式中, *C* 是黏聚力; $\mu_b = \tan \theta$ 是內摩擦系数, θ 是內摩擦角.

报





Fig. 7 Shear bond strength by Mohr- Coulomb criterion

为避免采用拉剪分区方式判断粘结失效,本文的断裂准则通过等效的应力 $\sigma_{\rm m}$ 和变形 $\delta_{\rm m}$ 构造本构关系,可分别写作^[54]

$$\sigma_{\rm m} = \sqrt{\langle \sigma \rangle^2 + \tau^2}, \quad \delta_{\rm m} = \sqrt{\langle \delta_{\rm n} \rangle^2 + \delta_{\rm s}^2}$$
(19)

式中, δ_n 和 δ_s 分别是法向和切向变形量.当粘结节 点的应力状态满足式(17)时,可视为该节点的应力 状态达到了极限强度,那么根据式(19)可计算等效 的极限强度 σ_n^0 和对应的极限变形 δ_n^0 .

如图 8 所示,采用双线性模型定义等效应力和 变形之间的关系.这里引入复合损伤D描述极限强度 后的刚度软化过程

$$D = \frac{\delta_{\rm m}^{\rm f} \left(\delta_{\rm m}^{\rm max} - \delta_{\rm m}^{\rm 0}\right)}{\delta_{\rm m}^{\rm max} \left(\delta_{\rm m}^{\rm f} - \delta_{\rm m}^{\rm 0}\right)} \tag{20}$$

式中, δ_{m}^{max} 是加载历程中粘结节点上发生过的最大变形; δ_{m}^{f} 是粘结失效时的临界变形,即当 $\delta_{m} > \delta_{m}^{f}$ 时





粘结失效. 那么刚度软化阶段材料的刚度 k" 变为

$$k' = (1 - D)k$$
(21)

式中, k 为极限强度范围内的材料刚度.

 δ_m^f 可根据 $\delta_m^f = 2G^c/\sigma_m^0$ 算得, 式中 G^c 是临界的 混合断裂能, 采用 Benzeggagh-Kenane 模型计算该混 合断裂能^[51,55]

$$G^{c} = G_{I}^{c} + \left(G_{II}^{c} - G_{I}^{c}\right) \left(\frac{G_{II}}{G_{I} + G_{II}}\right)^{\eta}$$
(22)

式中, G_{I}^{c} 和 G_{II}^{c} 分别对应于拉伸和剪切型裂纹 的临界断裂能; η 为常系数,对于脆性材料可 取 $\eta = 1.75^{[56]}$.对应当前状态的拉伸和剪切型断 裂能 G_{I} 和 G_{II} 可通过拉伸和剪切的变形计算二者的 比例,写作

$$\frac{G_{\rm II}}{G_{\rm I}} = \frac{\delta_{\rm s}^2}{\langle \delta_{\rm n} \rangle^2} \tag{23}$$

1.4 离散元高性能计算方法

由于单元间的接触搜索是离散元方法中最为耗时的部分,因此常采用相关并行算法以提高计算效率^[57].为了提高扩展多面体单元接触搜索的计算效率,可通过基于球形包围盒的空间网格法创建邻居列表^[58],并采用多面体包围盒的改进分离轴方法更加精确地筛选邻居列表中的"邻居".

1.4.1 球形包围盒的空间网格法

球形包围盒即是可完全包围单元的最小球体. 采用所有单元中最大的球形包围盒直径的2倍定义 网格的尺寸,则可将计算域划分为由正方形网格构 成的空间网格结构. 通过每个单元形心的空间坐 标 (*x*,*y*,*z*) 可计算其网格坐标 (*i*_x,*i*_y,*i*_z)

$$i_{x} = \operatorname{int}\left(\left(x - x_{\min}\right) / d_{\operatorname{grid}}\right)$$

$$i_{y} = \operatorname{int}\left(\left(y - y_{\min}\right) / d_{\operatorname{grid}}\right)$$

$$i_{z} = \operatorname{int}\left(\left(z - z_{\min}\right) / d_{\operatorname{grid}}\right)$$
(24)

式中, x_{\min} , y_{\min} 和 z_{\min} 分别代表计算域在空间中的最 小值; d_{grid} 是网格尺寸; int()是取整运算符.若计算 域的网格个数为 $N_{grid} = N_x \times N_y \times N_z$,可将三维网格 坐标对应到一维的网格序列上

$$Grid = i_z \cdot N_x \cdot N_y + i_y \cdot N_x + i_x$$
(25)

因此,可进一步确定每个单元与网格的一一对 应关系.以二维情况为例,假设球形包围盒在搜索网 格中的位置如图9所示,可算得每个球形包围盒的 网格坐标和对应的网格编号,列于表1中.根据球形 包围盒与网格的位置关系,可相应地建立网格与球 形包围盒的对应关系,即每个网格内有哪些球形包 围盒,从而建立球形包围盒与网格的双向包含关系.



图9 球形包围盒在搜索网格中的位置

Fig. 9 Sphere bounding boxes in searching grid

	表1	し 单元的网格坐标和网格编号
--	----	----------------

Table 1 Grid coordinate and number of element

Sphere bounding box	Grid coordinate	Grid number	
0	(1, 0)	1	
1	(2, 2)	10	
2	(2, 2)	10	
3	(1, 1)	5	
4	(3, 3)	15	
5	(0, 2)	8	

根据该包含关系,在某个单元的搜索中,只搜 索其所在网格的相邻网格中的单元.在二维空间中 是以该单元所在网格为中心的3×3网格范围,对应三 维空间中是以该单元所在网格为中心的 3×3×3 的网 格范围.进一步比较球心距离和两球形包围盒半径 之和判断单元是否可能接触,从而可建立每个单元 的邻居列表.

GPU 对大量类型高度统一且相互无依赖的大规 模数据计算具有更高的计算效率^[59],而空间网格法 的计算任务可分解为大量相互无依赖的数值计算任 务,非常适合 GPU 的计算.因此,这里采用 GPU 并 行算法执行球形包围盒的空间网格法计算.

1.4.2 多面体包围盒的改进分离轴方法

对于邻居列表中的邻居单元,可采用多面体的方向包围盒(oriented bounding box, OBB)对每个其做更加细致的判断.对于扩展多面体单元,该

包围盒的形状是可包围该扩展多面体的最小多面体. 在 OBB 的接触判断中,最常采用的是分离轴方法 (separate axis algorithm, SAA)^[60]. 一般来说, SAA适用于任意形状空间体的接触判断,包括凹和凸的.为简化描述,二维条件下凹多边形的SAA方法如图 10(a) 所示.多边形i的边 AB 外法向为 n_{ab},那么以该法向 n_{ab} 为轴向建立分离轴 l^{ab}.将多边形 i 和待判断的多边形 j 上的所有点投影到分离轴上.分别计算两个多边形在分离轴上的投影距离 l^{ab}_i 和 l^{ab}_j, 判断两个投影是否有交叉.如果存在交叉,则可能接触; 若不存在交叉,则不存在接触.





可以看出,分离轴方法需要对两个单元的每个 角点、每个面进行计算并综合比较结果才能判断是 否接触. 凸多面体具有所有几何元素都位于其某 个面单侧的特点. 因此,这里提出改进的 SAA 方 法对凸多面体进行判断. 同样以二维情况为例,如 图 10(b) 所示. 从多边形*i*的边 *AB* 上的任意一点到 待判断多边形 *j* 上角点的向量为 *e^{ab}*, 对于所有多边 形 *j* 的角点, 若都能满足以下条件

$$\boldsymbol{e}_{k}^{ab} \cdot \boldsymbol{n}_{ab} > 0$$
, for all vertexes of polyhedron j (26)

那么可认为多边形 *i* 与多边形 *j* 不存在接触. 在 实际判断两个多面体是否接触的计算中,如果在其 中一个多面体中存在符合式 (26) 的面,则可判定两 个多面体不接触,且不需对后面未做计算的角点和 面进行计算,从而节省了计算量.在最坏情况下,该 方法与SAA方法计算量相同;而在最好情况下,该方 法的计算效率会远高于 SAA 方法.

改进的 SAA 算法需要反复进行逻辑判断,适合 在具有更强逻辑运算能力的 CPU 上进行.因此,这 里采用 CPU 并行算法执行改进的 SAA 算法.

2 扩展多面体离散元方法的验证

考虑扩展多面体单元的浮力和拖曳力^[13,22],可 将扩展多面体的离散元方法用于海冰与海洋结构的 相互作用模拟.在海冰的离散元模拟中,对于平整 冰需要采用粘结-破碎模型计算粘结单元间的作用 力,同时采用接触模型计算破碎后海冰单元间的接 触力;而对于碎冰则只需要采用接触模型计算接触 力.为验证扩展多面体离散元方法的合理性,采用渤 海海冰实测数据和 ISO 标准模型验证数值计算结果.

2.1 坡面结构冰载荷

如图 11 所示,采用 Voronoi 切割算法生成海冰 单元并采用粘结-破碎模型形成平整冰,固定边界在 海冰后侧匀速推动平整冰与坡面结构相互作用,其 运动速度与流速相同.参考海冰数值模拟的相关文 献,选取的计算参数列于表 2 中^[22,61].



图11 平整冰与坡面结构的相互作用模拟示意图 Fig. 11 Sketch of ice-slope interaction

表2 海冰离散元模拟的主要参数

Table 2 Main parameters in sea ice simulation by DEM

Parameter	Symbol	Value	Unit
drag coefficient	$C_{\rm df}$	0.2	1
sea water density	$ ho_{ m w}$	1035	kg/m ³
current speed	$v_{\rm W}$	0.5	m/s
sea ice density	$ ho_i$	920	kg/m ³
sea ice modulus	Ε	1.0	GPa
sea ice Poisson's ratio	ν	0.3	1
sea ice thickness	h	0.5	m
size of ice region	$l \times w$	100×15	m×m
mean size of element	Aave	4.0	m ²
friction coefficient	μ	0.1	1
tensile strength	σ_n	0.5	MPa
cohesion	С	1.5	MPa
internal friction	μ_b	0.3	1
mode-I fracture energy	$G_{\mathrm{I}}^{\mathrm{c}}$	12	N/m
mode-I fracture energy	$G_{\mathrm{II}}^{\mathrm{c}}$	12	N/m

平整冰与坡面结构相互作用的模拟结果如图 12 所示,其中冰载荷为水平方向即 x 方向的作用力.可以看出,平整冰在与斜坡接触后发生明显的弯曲破坏,斜坡上的冰载荷表现位明显上下起伏特性.分别模拟斜坡角度为 30°,45°,60° 和 75° 时的冰载荷,将第一个冰载荷峰值与 ISO 199006 中的标准公式进行对比^[62-63]. ISO 标准公式可写作

$$F_{\rm H} = 0.68\xi \sigma_{\rm f} \left(\frac{\rho_{\rm w} g h^5}{E}\right)^{1/4} \left(w + \frac{\pi^2 l_{\rm c}}{4}\right) \tag{27}$$

式中, *ξ* 是坡面几何参数

$$\xi = (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) / (\cos \alpha - \mu \sin \alpha)$$



(a) Ice failure during interacting with slope
 图12 平整冰与坡面结构相互作用的离散元模拟
 Fig. 12 DEM simulation of ice-slope interaction



Fig. 12 DEM simulation of ice-slope interaction (continued)

l_c是特征长度

$$l_{\rm c} = \left[\frac{Eh^3}{12\rho_{\rm w}g\left(1-\nu^2\right)}\right]^{1/4} \tag{28}$$

图 13 是离散元模拟和 ISO 标准计算的坡面结 构冰载荷对比,图中标出了两者的对比误差.对比表 明离散元模拟结果与 ISO 标准在趋势上基本一致, 在数值上也十分接近.由于 30° 和 45° 时海冰会发生 较完整的弯曲破坏,因此模拟冰载荷大小与 ISO 结 果误差较小.当斜坡角度增大到 60° 和 75° 时,海冰 的破坏模式不完全为弯曲破坏,故冰载荷的误差相 对较大.一般情况下,ISO 标准定义的是最大值,因 此总体上本文的离散元模拟结果符合 ISO 标准,能 够说明基于扩展多面体的离散元方法具有较好的合 理性.



Fig. 13 Ice load on slope by DEM and ISO standard

2.2 锥体平台结构冰载荷

采用渤海实测锥体结构的冰载荷数据验证海冰 离散元的计算结果.如图 14 所示,平整冰的上下和 后侧是固定边界,其运动速度与流速相同;锥体结构 在水线处的锥径是 3.13 m,锥角为 60°.采用表 2 中 列出的海冰相关物理力学参数作为离散元模拟的计 算参数.



Fig. 14 Sketch of ice-cone interaction

平整冰与锥体结构相互作用的模拟结果如 图 15 所示.可以看出,平整冰在与锥体结构接触后 发生弯曲破坏,破碎海冰会沿着锥体向上攀爬,从而 在冰载荷时程曲线中形成规律性的峰值载荷.渤海的



(a) 平整冰与锥体结构相互作用发生破坏 (a) Ice failure during interacting with cone



现场监测数据中包含大量不同冰厚条件下的冰载 荷,因此这里采用不同的冰厚模拟平整冰与锥体结 构的相互作用,通过 ISO 标准和现场实测数据分析 计算结果的合理性.

图 16 是离散元模拟、ISO 标准和渤海的现场监 测数据对比. 可以看出,离散元计算结果在趋势 上与 ISO 标准和现场监测结果保持一致,数值上 基本处于 ISO 标准和现场监测数据之间. 当*h* < 0.15 m 时,离散元结果与 ISO 标准值更为接近; 当*h* > 0.15 m 时,离散元结果明显小于 ISO 标准值. 因此,本文的离散元模拟结果与 ISO 标准值和渤海 现场监测结果均具有较好的一致性,充分说明了扩 展多面体离散元方法在海冰与海洋结构相互作用模 拟中的合理性.





3 船舶结构冰载荷的离散元分析

船舶结构冰载荷是破冰设计和航行安全的重要 参数,主要包括结构冰阻力和局部冰载荷分布^[64-65]. 采用扩展多面体离散元方法模拟船舶结构在冰区的 破冰航行过程,分析船舶结构总体冰阻力和线载荷 分布情况.

3.1 船舶结构冰载荷分析

采用扩展多面体离散元方法模拟平整冰与船体 结构的相互作用.如图 17 所示,船体模型采用雪 龙号科考船的结构模型,结构表面划分为三角形单 元用于建立结构与海冰单元的接触关系.相关计算 参数参考表 2 中列出的参数,平整冰区域的尺寸为 400 m × 120 m,船体运动速度为1.5 m/s.



图17 雪龙号科学考察船的船体结构模型 Fig. 17 Ship hull of scientific expedition vessel Xuelong

图 18 所示是船体结构在平整冰区的破冰过程 模拟. 从图中可以看出,平整冰在船艏的作用下发 生弯曲破坏,且沿船艏两侧扩展开.海冰在船体运 行方向上发生持续的破碎,冰面上会出现与船宽相 当的开阔水道.同时,破碎后的冰块会浮在开阔水道 上,部分碎冰会附着在船底并与船底摩擦,随后沿 着船底运动到船艉.平整冰破碎后会在船艏部区域 发生堆叠淤积.随着船体持续运动,该部分碎冰会与 船舯、船艉发生摩擦并被逐渐排开.

图 19 是船体破冰过程中结构上 3 个方向的冰 载荷时程曲线. 从图中可看出, x 和 z 方向的冰载荷 体现了海冰破坏模式主要为弯曲破坏. x 方向冰载荷 对船体在破冰过程影响最大,也是船体运动的主要 推进方向. 因此,尽管在 y 和 z 方向上也受到了较大 的冰载荷,但通常主要研究 x 方向的冰载荷. 在后续 的模拟中,主要分析 x 方向的冰载荷.

采用 Lindqvist 经验公式对比不同冰厚条件下船 舶结构的冰阻力,即 x 方向的冰载荷. Lindqvist 公式 表示的船舶结构冰阻力 R_i 可写作^[66]

$$R_{\rm i} = (R_{\rm c} + R_{\rm b}) \left(1 + \frac{1.4\nu}{\sqrt{gh}} \right) + R_{\rm s} \left(1 + \frac{9.4\nu}{\sqrt{gL}} \right)$$
(29)

式中, v 是船冰相对速度; L 是水线处的船长; R_c, R_b 和 R_s 分别表示船艏挤压破坏阻力、弯曲破坏阻力 和浸没阻力.

挤压破坏阻力 Rc 可写作

$$R_{\rm c} = 0.5\sigma_{\rm f}h^2 \frac{\tan\psi + \mu\cos\varphi/\cos\psi}{1 - \mu\sin\varphi/\cos\psi}$$
(30)

式中, σ_f 是海冰弯曲强度; φ 为首柱倾角; α 为水线 进角; ψ = arctan (tan φ / sin α).

弯曲破坏阻力 Rb 写作

$$R_{\rm b} = \frac{27}{64} \sigma_{\rm f} B \frac{h^{1.5}}{\sqrt{E/[12(1-\nu^2)g\rho_{\rm w}]}} \cdot \frac{\tan\psi + \mu\cos\varphi}{\cos\psi\sin\alpha} \left(1 + \frac{1}{\cos\psi}\right)$$
(31)



图18 船体结构在平整冰区的破冰过程模拟

Fig. 18 Simulation of ship icebreaking in level ice region











图19 船体破冰过程中的冰载荷时程

Fig. 19 Ice loads on ship hull

式中, B 为船舶结构型宽. 浸没阻力 R_s 写作

$$R_{\rm s} = (\rho_{\rm w} - \rho_{\rm i}) \, ghBK \tag{32}$$

式中

$$K = T \frac{B+T}{B+2T} + \mu \left(0.7L - \frac{T}{\tan \varphi} - \frac{B}{4 \tan \alpha} + T \cos \varphi \cos \psi \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \varphi} + \frac{1}{\tan^2 \alpha}} \right)$$
(33)

式中,T为船体吃水深度.

图 20 是本文离散元计算船舶结构冰阻力与 Lindqvist 经验公式的对比.从图中可看出,本文结果在趋势上与经验公式一致,但本文结果明显大于经验公式的结果.Lindqvist 经验公式只考虑船体结构表面的 70% 被破碎后的海冰覆盖,且没有考虑碎冰的翻转、堆积等过程,且忽略的海流的影响^[67].因此导致本文的结果大于经验公式.实际上,船舶结构破冰后会有大量的碎冰在船侧和船底覆盖甚至堆积,如图 21 所示.碎冰在船体结构表面的会发生类似的"粘附"现象,且随着冰厚的增大碎冰的堆积现象愈加明显.由于海流会对该部分碎冰产生拖曳力作用,从而会大大增加船舶结构的冰阻力.

船舶结构冰载荷在结构不同位置处的分布是评

估船舶航行安全的重要因素,这里分析船舶结构在 直行过程中的线载荷分布,如图 22 所示.从图中可 以看出,船舶破冰过程中主要受力部位是船艏,特别



图20 离散元和Lindqvist公式的船舶冰阻力对比

Fig. 20 Ice force on ship hull by DEM and Lindqvist formula



(d) $h = 2.0 \,\mathrm{m}$

(e) $h = 2.5 \,\mathrm{m}$

(f) $h = 3.0 \,\mathrm{m}$

图21 破碎海冰覆盖在船舶结构表面

Fig. 21 Broken sea ice covers on the surface of ship hull



Fig. 22 Line load during ice-breaking of ship



Fig. 22 Line load during ice-breaking of ship (continued)

是船艏柱和船肩处.船艏柱是主要的破冰部位,承受 了由弯曲破坏导致的破冰阻力;而由于船艏型线向 后收缩,船肩位置承受了来自两侧海冰的挤压作用. 对比不同冰厚条件下船艏柱和船肩处的线载荷,可 发现船肩处的线载荷要明显大于船艏柱线载荷,如 图 23 所示.由于船舶直行的连续式破冰是主要的破 冰手段,因此船肩处是船舶结构安全管理的主要关 注部位.



Fig. 23 Line load on ship stem column and ship shoulder

3.2 双船冰载荷分析

多艘破冰船或极区科考船在冰区协同作业时,

Seed

(a) $t = 25 \, \text{s}$

会出现多船平行进入冰区并以平行方向在冰区破冰 航行的情况.如图 24 所示,模拟两艘船前后在平行 方向上以不同速度在冰区航行,初始时船一在前船 二在后,且在水平方向上间隔一定距离 d. 另外,船 一船速为 1.0 m/s,船二船速为 1.5 m/s.



图24 双船平行航行破冰

Fig. 24 Two ships in parallel navigation channel in level ice

图 25 是两船平行以不同速度航行在平整冰的 模拟过程.从图中可以看出,两船与海冰作用并使 海冰发生弯曲破坏,破冰后分别形成宽阔水道.由于 出现了两个水道,两水道中间形成了两端自由的平 整冰区域,加之两船之间的航行速度不同,导致中间 区域出现从一个水道到另一个水道的贯穿裂纹^[68].





图25 平整冰区两船平行航行的模拟

Fig. 25 Simulation of double ships navigating parallel in level ice region



Fig. 25 Simulation of double ships navigating parallel in level ice region (continued)

实际上,因为船二的船速较快能先于船一开辟出水 道,当船一航行时其靠船二的一侧平整冰是自由边 界.因此,在船一的碰撞挤压下平整冰出现了裂缝 贯通两个水道,如图 25(c)所示.在船一的持续作用 下,冰层再次出现了裂纹,从而在两水道中间的海冰 中形成若干条贯穿裂纹,如图 25(d)所示.

图 26 是两船在冰区航行过程中的结构冰载荷时程曲线.两船的结构冰载荷都体现了弯曲破坏模式的特征,具有明显的脉冲特性.另外,分析两船上



的线载荷分布情况,如图 27 所示. 从图中可以看 出,两船的船艏和船肩部位依然是冰载荷集中部位. 但船艏两侧的载荷存在明显差异,两船靠内侧的载 荷较另一侧大,即船一右舷和船二的左舷较另一侧 的冰载荷大.两船在破冰过程会在中间形成两侧为 自由端的冰层,但自由端会与船舶结构发生接触作 用,受到结构的约束.因此,两船会通过中间的冰层 相互影响,增强了船舶结构内侧的冰载荷.



图27 两船破冰过程中的线载荷 Fig. 27 Line load during ice-breaking of two ships

4 海冰管理中船舶与海洋平台结构冰载荷

采用扩展多面体的离散元方法计算多桩腿海洋 平台结构与平整冰的作用过程,分析不同桩腿上的 冰载荷特点.同时考虑海冰管理过程中船舶和海洋 平台结构同时与海冰的作用过程,分析船舶结构在 绕海洋平台航行过程中的冰载荷.

4.1 平整冰区多桩腿海洋平台结构的冰载荷分析

图 28 是多桩腿海洋平台结构与平整冰相互作用的模拟示意图.海洋平台结构共有4个桩腿,分别编号 1~4,每个桩腿在水线处加装抗冰锥.主要的计算参数参考表 1,模拟中冰厚为 0.05~0.35 m,平整 冰区的长和宽分别为 150 m 和 50 m.

40

30

NX/KN 20

1(

100



图28 多桩腿海洋平台结构与平整冰相互作用模拟示意图 Fig. 28 Sketch of ice and multi-leg platform



(a) Pile 1

150

t/s

(c) 桩腿 3

(c) Pile 3

175

整个计算仿真时间约为280s,选取中间较为 稳定的部分进行分析,即100~200s时间段. 冰 厚 0.15 m 时, 各桩腿上 x 方向的冰载荷如图 29 所 示. 从图中可明显看出, 桩腿1和桩腿2上的冰载 荷呈现明显的周期性特点,具有典型的锥体结构冰 力特征. 另外, 桩腿 1 和桩腿 2 上的冰力明显大于桩 腿3和4上的冰力,且桩腿1和桩腿2、桩腿3和桩 腿 4 上的冰力水平基本相同, 如图 30 所示.





图29 各桩腿上的冰载荷

200



4.2 海冰管理中船舶及海洋平台结构的冰载荷

125

海洋平台结构在冰区运行过程中可能会受到 严重的冰载荷影响,在恶劣冰况下需要破冰船协助 海洋平台进行破冰作业,降低海洋平台结构上的冰 载荷.采用扩展多面体离散元方法计算船舶结构在 碎冰区的海洋平台结构的绕行过程,分析船舶和海 洋平台结构的冰载荷.如图 31 所示,船舶结构以半 径 100 m 绕海洋平台结构运动, 行进速度为 1.0 m/s. 为更合理地分析船舶结构的冰阻力,定义船舶结构 的标架坐标系. 船舶结构的冰载荷均在标架坐标系 内进行统计.另外,为生成更加随机的碎冰初始场, 初始时刻给每个单元绕z轴的随机转速.图 32 是海 冰密集度为 60% 时海冰管理过程的离散元模拟,海 冰在与船舶和海洋平台作用后均形成了开阔水道.







(b) Mean force

图30 各桩腿上的冰载荷对比 Fig. 30 Comparison of ice loads on each pile



图31 海冰管理模拟示意图 Fig. 31 Sketch of ice management



(a) $t = 200 \, \text{s}$



(b) t = 600 s图32 海冰管理过程模拟Fig. 32 DEM simulation of ice management

海冰管理过程中船舶和海洋平台结构上的冰 载荷如图 33 所示,这里船舶结构的冰载荷是船舶 前进方向上的冰阻力. 从图中可以看出,船舶结 构在绕行时前进阻力较大;之后由于其运动速度与 海冰同向,船舶冰阻力明显小于绕行时的冰阻力. 在 400 s 时海洋平台结构位于船舶开辟的水道中,其 冰载荷出现了明显的下降. 另外,由于船舶向右侧 转向,其右侧船艏和左侧船艉的冰载荷较为集中, 如图 33(c) 所示.









(c) Line load on ship hull

图33 海冰管理过程中船舶和海洋平台结构冰载荷(续)

Fig. 33 Ice load on ship and platform during ice management (continued)

5 结 论

本文采用闵可夫斯基和构造了扩展多面体单 元,根据扩展多面体的包络函数发展了单元接触搜 索的优化算法,同时建立了考虑刚度软化过程的单 元间粘结-破碎模型,由此建立了基于扩展多面体 的离散元方法,并将该方法应用于船舶与海洋平台 结构冰载荷的计算分析中.为验证本文方法的合理 性,采用 ISO 标准和渤海现场监测冰载荷数据验证 分析了本文计算结果的准确度.采用本文方法进一 步模拟了工程实际中船舶和海洋平台结构的冰载荷. 相关计算分析结果表明,扩展多面体的离散元方法 在海冰与海洋结构的相互作用分析中体现出了很好 的适应性,对船舶与海洋结构的冰载荷分析准确性 较高.该方法可对复杂工况下的海冰与海洋结构相 互作用过程进行详细地分析,为极地船舶与海洋平 台结构的设计和安全运行提供了科学的分析手段. 此外,发展单元内的破碎准则从而建立单元间 和单元内的多级破碎模型,可有效提高海冰与结构 相互作用的分析精度并提高计算效率.为更加全面 详细地分析海冰与结构相互作用过程,还需考虑海 水的影响并发展相应的DEM-CFD流固耦合模型.

参考文献

- Ritch R, Frederking R, Johnston M, et al. Local ice pressures measured on a strain gauge panel during the CCGS Terry Fox bergy bit impact study. *Cold Regions Science & Technology*, 2008, 52(1): 29-49
- 2 岳前进,刘圆,屈衍等.抗冰平台的冰振疲劳分析.工程力学, 2007,24(5):159-164 (Yue Qianjing, Liu Yuan, Qu Yan, et al. Fatigue-life analysis of ice-resistant platforms. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(5):159-164 (in Chinese))
- 3 Dempsey JP. Research trends in ice mechanics. *International Jour*nal of Solids and Structures, 2000, 37: 131-153
- 4 Tan X, Riska K, Moan T. Effect of dynamic bending of level ice on ship's continuous-mode icebreaking. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 107: 82-95
- 5 Kujala P, Arughadhoss S. Statistical analysis of ice crushing pressures on a ship's hull during hull-ice interaction. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 70: 1-11
- 6 Li C, Jordaan IJ, Taylor RS. Estimation of local ice pressure using up-crossing rate. *Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering*, 2010, 132(3): 71-78
- 7 Sodhi DS. Vertical penetration of floating ice sheets. *International Journal of Solids and Structures*, 1998, 35(31-32): 4275-4297
- 8 Frederking RMW, Timco GW. Quantitative analysis of ice sheet failure against an inclined plane. *Journal of Energy Resource Technol*ogy, 1985, 107: 381-387
- 9 Huang Y, Ma J, Tian Y. Model tests of four-legged jacket platforms in ice: Part 1. Model tests and results. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 95: 74-85
- 10 Huang Y. Model test study of the nonsimultaneous failure of ice before wide conical structures. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 63(3): 87-96
- Shen HH, Hibler WD, Leppäranta M. On applying granular flow theory to a deforming broken ice field. *Acta Mechanica*, 1986, 63(1-4): 143-160
- 12 龙雪, 宋础, 季顺迎等. 锥角对锥体结构抗冰性能影响的离散元 分析. 海洋工程, 2018, 36(5): 92-100 (Long Xue, Song Chu, Ji Shunying, et al. Influence of cone angle on anti-icing performance of conical structure with numerical simulations of discrete element method. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(5): 92-100 (in Chinese))
- 13 Sun S, Shen HH. Simulation of pancake ice load on a circular cylinder in a wave and current field. *Cold Regions Science & Technology*, 2012, 78(3): 31-39
- Lau M, Lawrence K, Rothenburg L. Discrete element analysis of ice loads on ships and structures. *Ships and Offshore Structures*, 2011, 6(3): 211-221
- 15 王永学,李春花,孙鹤泉等. 斜坡式防波堤前海冰堆积数值模拟. 水利学报, 2003, 6: 105-110 (Wang Yongxue, Li Chunhua, Sun

Hequan, et al. Numerical simulation of sea ice pile-up on inclined breakwater. *Shuili Xuebao*, 2003, 6: 105-110 (in Chinese))

- 16 刘璐, 龙雪, 季顺迎. 基于扩展多面体的离散单元法及其作用于圆 桩的冰载荷计算. 力学学报, 2015, 47(5): 1046-1057 (Liu Lu, Long Xue, Ji Shunying. Dilated polyhedra based discrete element method and its application of ice load on cylindrical pile. *Chinese Journal* of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(5): 1046-1057 (in Chinese))
- 17 狄少丞,季顺迎.海冰与自升式海洋平台相互作用GPU离散元模 拟. 力学学报, 2014, 46(3): 562-571 (Di Shaocheng, Ji Shunying. GPU-based discrete element modelling of interaction between sea ice and jack-up platform structure. *Chinese Journal of Theoretical* and Applied Mechanics, 22014, 46(3): 562-571 (in Chinese))
- 18 Long X, Ji S, Wang Y. Validation of microparameters in discrete element modeling of sea ice failure process. *Particulate Science and Technology*, 2018, 37(4): 546-555
- 19 龙雪, 刘社文, 季顺迎. 水位变化对正倒锥体冰载荷影响的离散 元分析. 力学学报, 2019, 51(1): 74-84 (Long Xue, Liu Shewen, Ji Shunying. Influence of water level on ice load on upward-downward conical structure based on DEM analysis. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 74-84 (in Chinese))
- 20 Wilchinsky AV, Feltham DL, Hopkins MA. Modelling the reorientation of sea-ice faults as the wind changes direction. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(57): 83-90
- 21 Hopkins MA, Thorndike AS. Floe formation in Arctic sea ice. Journal of Geophysical Research Oceans, 2006, 111(C11S23): 1-9
- 22 Liu L, Ji S. Ice load on floating structure simulated with dilated polyhedral discrete element method in broken ice field. *Applied Ocean Research*, 2018, 75: 53-65
- 23 Ranta J, Polojärvi A, Tuhkuri J. Limit mechanisms for ice loads on inclined structures: Buckling. *Cold Regions Science & Technology*, 2018, 147: 34-44
- 24 Gong H, Polojärvi A, Tuhkuri J. Discrete element simulation of the resistance of a ship in unconsolidated ridges. *Cold Regions Science* & *Technology*, 2019, 167: 102855
- 25 Smeets B, Odenthal T, Vanmaercke S, et al. Polygon-based contact description for modeling arbitrary polyhedra in the discrete element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015, 290: 277-289
- 26 周海娟, 马刚, 袁葳等. 堆石颗粒压缩破碎强度的尺寸效应. 岩土 力学, 2017, 38(7): 2425-2433 (Zhou Haijuan, Ma Gang, Yuan Wei, et al. Size effect on the crushing strengths of rock particles. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 46(3): 562-571 (in Chinese))
- 27 Wang J, Li S, Feng C, A shrunken edge algorithm for contact detection between convex polyhedral blocks. *Computers and Geotechnics*, 2015, 63: 315-330
- 28 熊迅, 李天密, 马棋棋等. 石英玻璃圆环高速膨胀碎裂过程的离 散元模拟. 力学学报, 2018, 50(3): 622-632 (XiongXun, Li Tianmi, Ma Qiqi, et al. Discrete element simulations of the high velocity expensionand fragmentation of qartz glass rings. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(3): 622-632 (in Chinese))
- 29 Liu L, Ji S. Bond and fracture model in dilated polyhedral DEM and its application to simulate breakage of brittle materials. *Granular*

Matter, 2019, 21: 41

- 30 Galindo-Torres SA, Muñoz JD, Alonso-Marroquín F. Minkowski-Voronoi diagrams as a method to generate random packings of spheropolygons for the simulation of soils. *Physical Review E*, 2010, 82: 056713
- 31 Galindo-Torres SA, Pedroso DM, Williams DJ, et al. Breaking processes in three-dimensional bonded granular materials with general shapes. *Computer Physics Communications*, 2012, 183(2): 266-277
- 32 Behraftar S, Galindo Torres SA, Scheuermann A, et al. A calibration methodology to obtain material parameters for the representation of fracture mechanics based on discrete element simulations. *Computers and Geotechnics*, 2017, 81: 274-283
- 33 Galindo-Torres SA. A coupled discrete element Lattice Boltzmann method for the simulation of fluid–solid interaction with particles of general shapes. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2013, 265(2):107-119
- 34 谭援强,肖湘武,张江涛等. 尼龙粉末在SLS 预热温度下的离散元 模型参数确定及其流动特性分析. 力学学报, 2019, 51(1): 56-63 (Tan Yuanqiang, Xiao Xiangwu, Zhang Jiangtao, et al. Determination of discrete element model contact parameters of nylon powder at SLS preheating temperature and its flow characteristics. *Chinese Jounal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 56-63 (in Chinese))
- 35 Harkness J. Potential particles for the modelling of interlocking media in three dimensions. *International Journal for Numerical Meth*ods in Engineering, 2010, 80(11): 1573-1594
- 36 Houlsby GT. Potential particles: A method for modelling noncircular particles in DEM. *Computers & Geotechnics*, 2009, 36(5): 953-959
- 37 Boon CW, Houlsby GT, Utili S. A new algorithm for contact detection between convex polygonal and polyhedral particles in the discrete element method. *Computers & Geotechnics*, 2012, 44(1): 73-82
- 38 Boon CW, Houlsby GT, Utili S. A new contact detection algorithm for three-dimensional non-spherical particles. *Powder Technology*, 2013, 248(2): 94-102
- 39 Gherardi M, Lagomarsino MC. Characterizing the size and shape of sea ice floes. *Scientific Reports*, 2015, 5: 583-593
- 40 Sotomayor OE, Tippur HV. Role of cell regularity and relative density on elasto-plastic compression response of random honeycombs generated using Voronoi diagrams. *International Journal of Solids* & *Structures*, 2014, 51(21-22): 3776-3786
- 41 刘璐,季顺迎. 基于扩展多面体包络函数的快速接触搜索算法. 中 国科学:物理学力学天文学, 2019, 49:064601 (Liu Lu, Ji Shunying. A fast detection algorithm based on the envelope function of dilated polyhedron. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49:064601 (in Chinese))
- 42 Podlozhnyuk A, Pirker S, Kloss C. Efficient implementation of superquadric particles in discrete element method within an opensource framework. *Computational Particle Mechanics*, 2017, 4(1): 101-118
- 43 Dong K, Wang C, Yu A. A novel method based on orientation discretization for discrete element modeling of non-spherical particles. *Chemical Engineering Science*, 2015, 126: 500-516

- 第 6 期
- 44 Liu SD, Zhou ZY, Zou RP, et al. Flow characteristics and discharge rate of ellipsoidal particles in a flat bottom hopper. *Powder Technol*ogy, 2014, 253(253): 70-79
- 45 Zhou Y. A theoretical model of collision between soft-spheres with Hertz elastic loading and nonlinear plastic unloading. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2011, 1: 041006
- 46 Ramirez R, Poschel T, Brilliantov NV, et al. Coefficient of restitution of colliding viscoelastic spheres. *Physical Review E*, 1999, 60(3): 4465-4472
- 47 Ji S, Shen HH. Internal parameters and regime map for soft polydispersed granular materials. *Journal of Rheology*, 2008, 52(1): 87-103
- 48 Zhang JH, He JD, Fan JW. Static and dynamic stability assessment of slopes or dam foundations using a rigid body–spring element method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2001, 38(7): 1081-1090
- 49 Azevedo NM, Candeias M, Gouveia F. A rigid particle model for rock fracture following the voronoi tessellation of the grain structure: formulation and validation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(2): 535-557
- 50 Potyondy DO, Cundall PA. A bonded-particle model for rock. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(7): 1329-1364
- 51 Ma G, Zhou W, Chang XL. Modeling the particle breakage of rockfill materials with the cohesive crack model. *Computers & Geotechnics*, 2014, 61(61): 132-143
- 52 Ma G, Zhou W, Chang XL, et al. A hybrid approach for modeling of breakable granular materials using combined finite-discrete element method. *Granular Matter*, 2016, 18: 7
- 53 Guo L, Latham JP, Xiang J. Numerical simulation of breakages of concrete armour units using a three-dimensional fracture model in the context of the combined finite-discrete element method. *Computers & Structures*, 2015, 146: 117-142
- 54 Park K, Paulino GH, Roesler JR. A unified potential-based cohesive model of mixed-mode fracture. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2009, 57(5): 891-908
- 55 Benzeggagh ML, Kenane M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. *Composites Science and Tech-*

nology, 1996, 56(3): 439-449

- 56 Camanho PP, Davila CG, Moura MFD. Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials. *Jour*nal of Composite Materials, 2003, 37(15): 1415-1438
- 57 Govender N, Wilke DN, Kok S. Collision detection of convex polyhedra on the NVIDIA GPU architecture for the discrete element method. *Applied Mathematics and Computation*, 2014, 267: 810-829
- 58 Nishiura D, Sakaguchi H. Parallel-vector algorithms for particle simulations on shared-memory multiprocessors. *Journal of Computational Physics*, 2011, 230(4): 1923-1938
- 59 Chow AD, Rogers BD, Lind SJ, et al. Incompressible SPH (ISPH) with fast Poisson solver on a GPU. *Computer Physics Communications*, 2018, 226: 81-103
- 60 Torquato S, Jiao Y. Dense packings of the Platonic and Archimedean solids. *Nature*, 2009, 463: 876-879
- 61 Hopkins MA. On the ridging of intact lead ice. Journal of Geophysical Research Oceans, 1994, 99(C8): 16351-16360
- 62 International Organization for Standardization. ISO 19906: 2010, Petroleum and natural gas industries-Arctic offshore structures. Europe: ISO, 2010
- 63 Frederking RMW, Timco GW. Quantitative analysis of ice sheet failure against an inclined plane. *Journal of Energy Resource Technol*ogy, 1985, 107: 381-387
- 64 Zhou Q, Peng H, Qiu W. Numerical investigations of ship-ice interaction and maneuvering performance in level ice. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 122: 36-49
- 65 Li Z, Chuang Z, Ji C. Ice forces acting on towed ship in level ice with straight drift. Part II: Numerical simulation. *International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering*, 2018, 10: 119-128
- 66 Lindqvist G. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships//Proceedings of POAC, 1989, 722-735
- 67 Lu W, Lubbad R, Løset S. Parallel channels' fracturing mechanism during ice management operations. Part II: Experiment. *Cold Re*gions Science & Technology, 2018, 156: 117-133
- 68 Lu W, Lubbad R, Aleksey S, et al. Parallel channels' fracturing mechanism during ice management operations. Part I: Theory. Cold Regions Science & Technology, 2018, 156: 102-116