

# 极区船舶及海洋结构冰荷载的离散元分析

季顺迎, 王帅霖, 刘璐

大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023

**摘要** 冰荷载是影响极区船舶及海洋结构振动响应和疲劳寿命的重要因素。针对海冰的离散特性, 分别采用具有黏结-破碎效应的球体单元、扩展圆盘单元以及基于闵可夫斯基和方法的扩展多面体单元构造海冰离散单元模型, 分析了船体、固定式、自升式以及浮式海洋结构的冰荷载特性及分布规律。此外, 为计算海冰作用下海洋结构的振动响应, 建立了相应的冰激结构振动的离散元-有限元模型。在上述基础上自主研发了基于图像处理单位(GPU)并行算法的海冰离散元软件(IceDEM), 实现了对船舶以及海洋平台结构冰荷载离散元分析的大规模计算。

**关键词** 离散元方法; 极区; 冰荷载; 船舶结构; 海洋结构

近年来, 受全球气候急剧变暖的影响, 极区海冰覆盖面积持续减小。极区航道的夏季通航也开始了可行性论证和探索性运行<sup>[1]</sup>。作为一个近北极国家, 无论北极的西北航道还是东北航道, 对中国的海上运输均有着重要的战略意义。同时, 极区海域蕴藏着丰富的油气资源, 可进行一定程度上的油气开采。然而, 在海冰影响下, 极区航运和油气开发都面临着安全保障的问题。因此, 冰区航行的安全保障及海洋结构的抗冰设计是当前亟待解决的工程问题。通过对海冰与船舶以及海洋平台结构相互作用过程的冰荷载进行深入分析, 可对船舶和海洋平台的设计提出有益的参考。

在冰荷载研究中, 人们综合采用了理论分析、力学试验和数值计算等不同方法<sup>[2-3]</sup>。其中, 冰荷载的数值分析可从不同层面解释海冰的破坏机制、局部冰压力分布特征和总冰力变化规律, 是海冰与海洋结构相互作用研究的重要途径。但计算模型的可靠性和计算参数的合理性需要依托于准确的理论模型, 并通过有效的试验验证。目前, 人们发展了连续介质<sup>[4-5]</sup>、离散元<sup>[6-7]</sup>、黏结单元<sup>[8-9]</sup>等不同数值方法。由于海冰在与海洋结构的相互作用过程中会呈现出由连续体向离散块体转变的破坏过程, 且不同尺度下海冰又呈现出很强的离散分布特性, 并在冰缘区、碎冰区、重叠和堆积冰区表现得更为明显, 这使得离散元方法在确定船体结构及海洋平台冰荷载方面具有明显的计算优势。

离散元方法自 20 世纪 70 年代建立以来, 在单元形态、接触模型、流固耦合、多尺度算法、破坏准则和计算规模等方面不断发展和完善, 目前已广泛应用于岩土、化工、海洋等多个

研究领域<sup>[10-11]</sup>。近年来, 基于离散元方法的海冰与船体、海洋平台结构相互作用取得了很大的进展<sup>[12]</sup>。它不仅能够合理地模拟海冰与海洋结构作用的破坏过程, 在描述碎冰区冰块形状、尺寸等非连续分布特性以及冰块与海洋结构的碰撞过程方面也具有出色的计算性能。在海冰离散元方法中, 计算单元可采用球体<sup>[13]</sup>、圆盘<sup>[14-15]</sup>和块体<sup>[16-17]</sup>等不同形态。球体单元主要通过单元间的黏结-破坏模拟平整冰及其破碎特性, 具有模型简单和计算效率高的特点。圆盘单元主要用于模拟碎冰在波浪作用下的动力学过程以及碎冰与海洋结构的相互作用。它基于闵可夫斯基和(Minkowski Sum)原理<sup>[18]</sup>将圆形平面与球体进行空间叠加从而形成一个具有光滑边界和一定厚度的三维圆盘, 并通过四元数方法描述圆盘的运动过程。块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。该方法已用于对斜面和半圆型防波堤前海冰堆积过程的数值模拟<sup>[19]</sup>。针对碎冰区冰块形态呈多边形且随机分布的特点, 还可采用冯洛诺伊(Voronoi)切割算法生成具有一定的冰块尺寸、几何形态和密集度的冰块分布。

基于上述海冰离散元的应用, 大连理工大学自行研发了基于高性能图像处理单元(GPU), 并行计算技术的海洋结构冰荷载分析软件(IceDEM)。该软件通过不同的海冰离散单元可构造平整冰、碎冰、冰脊和堆积冰等不同海冰形式, 同时可分析不同冰况和海洋结构形式下冰荷载的变化规律, 并且可对海冰与海洋结构的相互作用过程进行动态显示和数值模拟<sup>[20]</sup>, 为极区海洋结构的冰荷载分析提供数值方法和后处

收稿日期: 2016-08-09; 修回日期: 2016-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41176012, 41576179)

作者简介: 季顺迎, 教授, 研究方向为颗粒材料力学、工程海冰数值模型及工程地质灾害, 电子信箱: jisy@dlut.edu.cn

引用格式: 季顺迎, 王帅霖, 刘璐. 极区船舶及海洋结构冰荷载的离散元分析[J]. 科技导报, 2017, 35(3): 72-80. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.03.008

理分析技术。此外,基于GPU并行的高性能计算技术,可实现海冰离散元的大规模计算。目前,IceDEM已成功应用到寒区海洋结构冰荷载分析中。

本文通过自主研发的IceDEM软件构造不同的海冰离散单元(球体、三维圆盘和扩展多面体),模拟海冰与船体及海洋平台结构的相互作用。考虑不同冰况和结构下的冰荷载大小及分布,为极区船舶的安全行驶和海洋平台安全运行提供参考。

### 1 极区海冰离散单元的构造

考虑海冰的材料性质和离散特性,这里分别采用具有黏结-破碎特性的球形颗粒、三维扩展圆盘和基于闵可夫斯基和方法生成的多面体单元构造海冰离散单元模型。

#### 1.1 球体单元

考虑平整冰的破碎特性,本文采用具有黏结-破碎功能的等粒径球体颗粒单元<sup>[21]</sup>,通过规则排列构造平整冰离散元模型,如图1所示。每个球体单元间具有一定的黏结强度,由法向和切向组成,可传递两个单元间的作用力和力矩,如图2所示。其黏结单元间的法向和剪切应力可由弹性梁在组合荷载下的拉伸、扭转和弯曲理论得到,当其接触力超过黏结强度时,黏结单元发生断裂。

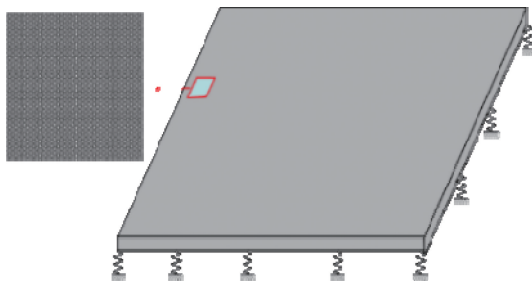


图1 平整冰离散元模型

Fig. 1 Discrete element model of sea ice

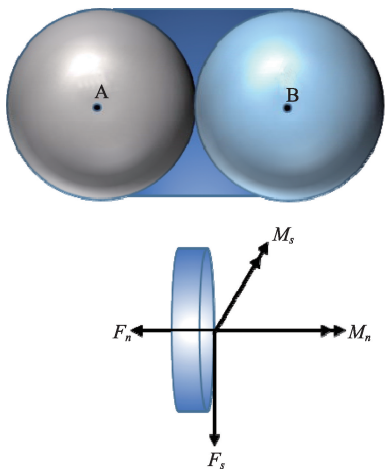
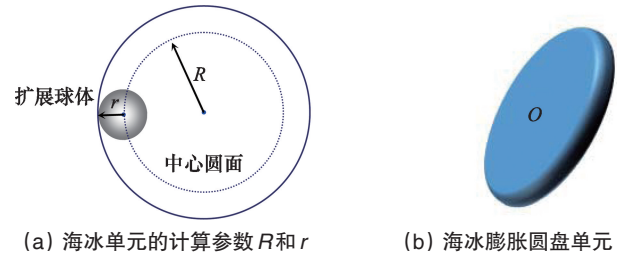


图2 球体离散元黏结模型

Fig. 2 Parallel bonding model of bonded spherical elements

#### 1.2 扩展圆盘单元

针对碎冰区海冰呈现出很强的离散分布特性,采用膨胀颗粒方法构造的三维圆盘单元可有效地描述冰区浮冰的几何形态。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3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上构造出一个外径 $D=2(R+r)$ 、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<sup>[7,15]</sup>。



(a) 海冰单元的计算参数  $R$  和  $r$  (b) 海冰膨胀圆盘单元

图3 碎冰三维圆盘离散单元模型

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

#### 1.3 扩展多面体单元

针对碎冰区海冰具有非规则的多边形几何形态,这里采用基于闵可夫斯基和方法的扩展多面体单元计算碎冰块间的相互影响及其与海洋结构的相互作用。为构造具有随机分布和非规则几何形态的碎冰单元,这里采用冯洛诺伊切割算法在计算域随机生成若干个大小和形态不同的多边形,如图4所示。对生成的多边形,采用闵可夫斯基和方法构造生成相应的扩展多面体海冰单元,即将球体单元与多面体单元相叠加构造光滑的扩展多面体单元<sup>[22]</sup>,如图5所示。通过将

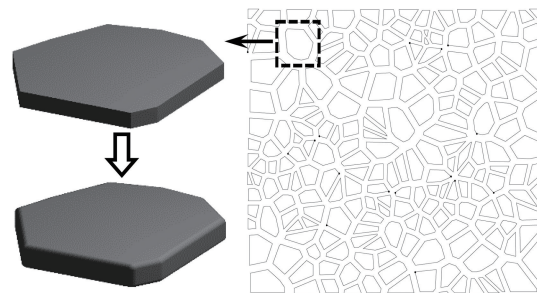
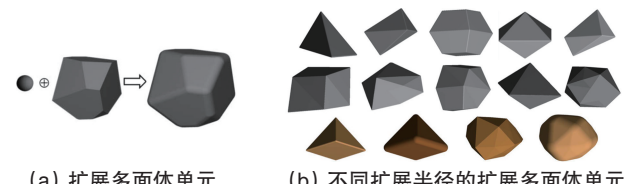


图4 采用冯洛诺伊切割算法生成的多边形单元

Fig. 4 Generation of polygonal ice floes with Voronoi tessellation algorithm in broken ice field



(a) 扩展多面体单元 (b) 不同扩展半径的扩展多面体单元

图5 基于闵可夫斯基和生成的多面体单元

Fig. 5 Dilated polyhedron based on Minkowski sum theory

多面体单元的、点、线、面转化为球面可有效的简化单元的接触判断和接触力计算。

## 2 计算模型与结果分析

通过构建不同的海冰离散单元可分析极区船体以及不同类型海洋平台结构上的冰载荷大小以及分布规律,并采用大连理工大学自主研发的基于GPU并行框架下的IceDEM软件进行数值计算及结果输出。

### 2.1 船舶结构冰荷载的离散元分析

近年来,随着极区海冰的迅速消融使得极区航运的需求不断增强,为确保船舶在极区航行的安全性,船舶结构的抗冰性能的研究得到了广泛关注。针对海冰的离散特性,采用离散单元法模拟海冰与船体间的相互作用,其中将船体外壳离散为若干三角单元参与计算,如图6所示。

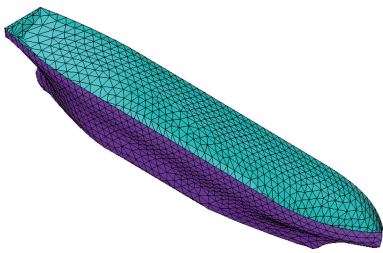


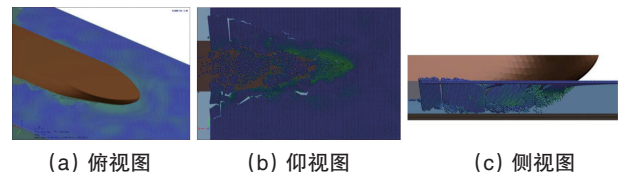
图6 由三角形单元构造的船体

Fig. 6 Ship hull constructed with triangle elements

#### 2.1.1 船体与黏结-破碎的球形单元的相互作用

在用离散元模拟船体与平整冰相互作用中,平整冰采用球形颗粒规则排列的方式构造,并假设在模拟过程中保持固定,船体则在恒定的推力下驶向冰排,具体作用过程如图7所示。可通过分别改变平整冰的冰厚和船舶的推进力,分析该船体在恒定推力以及固定冰厚下的破冰能力。

为显示船体的局部荷载的分布,将船舶在冰区行进的过程



(a) 俯视图 (b) 仰视图 (c) 侧视图

图7 船体与平整冰的相互作用

Fig. 7 Interaction between level ice and ship hull

中单元的节点力进行提取。图8为船体在平整冰中行驶过程中的所受冰压力的分布图,可以看出冰压力的空间分布特点为主要集中在船体附近,且船艏和船肩上的冰压力要明显高于其他位置。因此,需研究船体水线处的冰荷载分布,这里将船体水线处的轮廓提取出来,并统计不同冰速下,结构水线处法向和切向线荷载的分布,如图9所示。

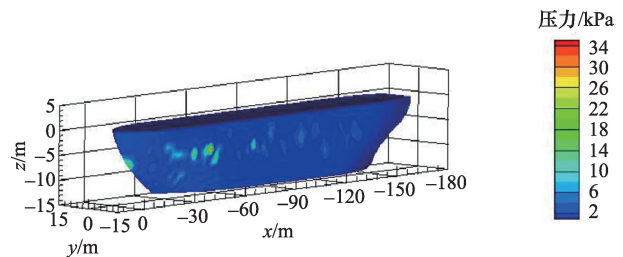
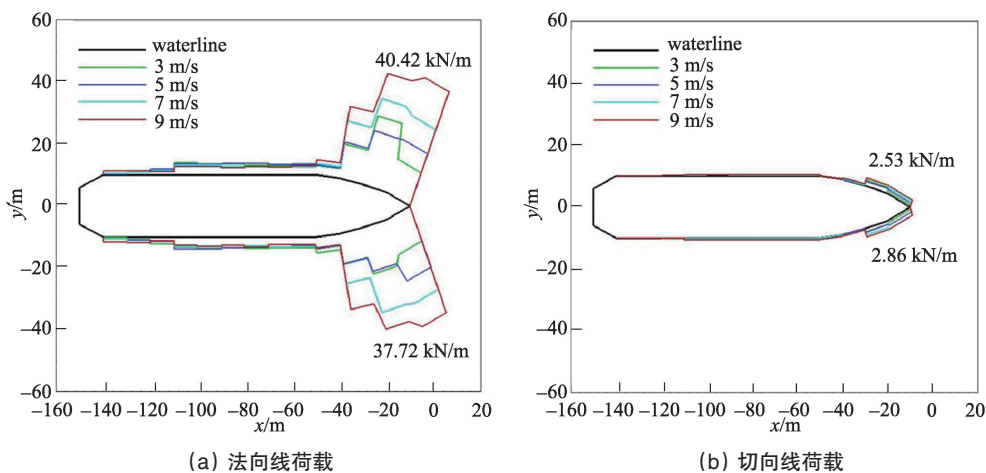


图8 船体冰压力分布

Fig. 8 Distribution of ice pressure on the ship hull

#### 2.1.2 船体与扩展圆盘单元的相互作用

为研究船舶在碎冰区的冰荷载分布,采用三维扩展圆盘单元描述碎冰并与船体进行离散元分析。这里,令海冰单元直径在4.0~6.0 cm内随机分布,初始密集度为50%,船舶航速为4.0 m/s,圆盘单元与船舶的碰撞,如图10所示。通过改变航速和碎冰的初始密集度,得到船体结构上的冰荷载,进而分析在碎冰区冰块尺寸、冰厚、密集度和流速以及船舶自身的航速对其航行安全性的影响<sup>[23]</sup>。



(a) 法向线荷载

(b) 切向线荷载

图9 船体不同位置处在不同航速下法向和切向线荷载的分布

Fig. 9 Normal and tangential line loads on different ship location with different ship speed

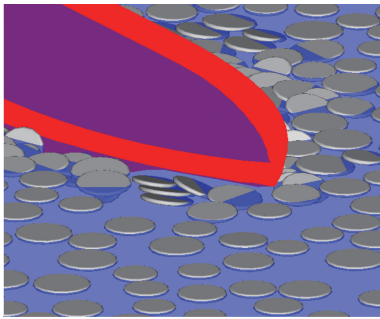


图 10 扩展圆盘碎冰单元与船体结构作用

Fig. 10 Snapshots of the collision of ice floe with ship hull

### 2.1.3 船体与扩展多面体单元的相互作用

考虑基于闵可夫斯基方法的扩展多面体单元构造碎冰离散单元模型,模拟船体在该模型中的运动如图 11 所示,并分析其冰荷载情况。其中,计算区域中的碎冰单元由冯洛诺伊切割算法随机生成,每个单元具有浮力、拖曳力等动力作用。冰区沿水流方向两侧为周期边界,其他为自由边界。这里选取典型海冰和海水的物理参数,其中海冰密度、弹性模量、泊松比等计算参数采用了渤海海冰的实测值,其他计算参数则参考了相关海冰材料的离散元研究工作<sup>[24]</sup>。通过离散元计算,可得到不同冰厚、碎冰密集度以及船速下船体冰荷载的变化规律,如图 12 所示。

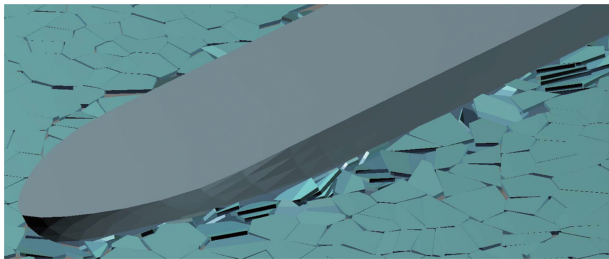


图 11 扩展多面体碎冰单元与船体结构作用

Fig. 11 Interaction between dilated polyhedral ice element model and ship hull

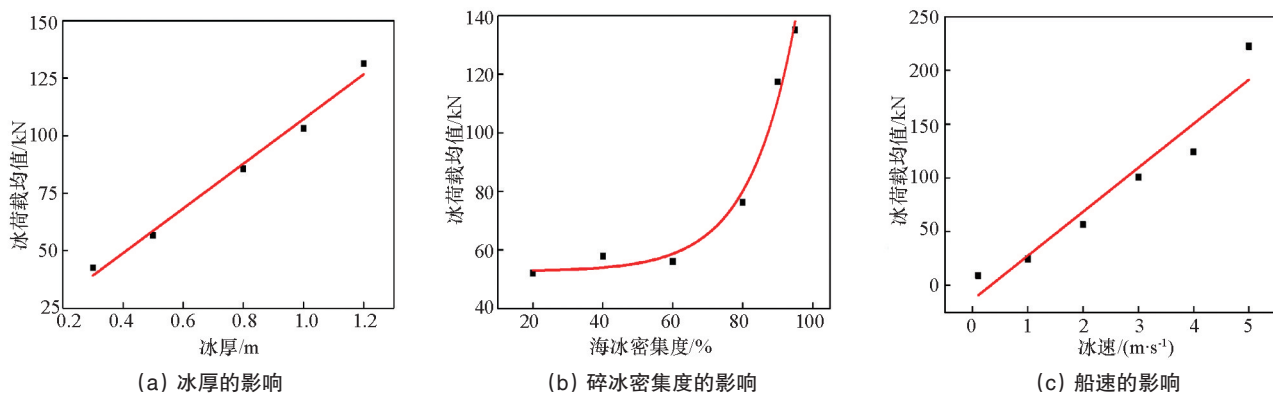
图 12 冰厚、碎冰密集度以及船速对船体冰荷载的影响<sup>[22]</sup>

Fig. 12 Ice loads on ship hull with different values of ice thickness, velocity and concentration

## 2.2 海洋结构冰荷载的离散元分析

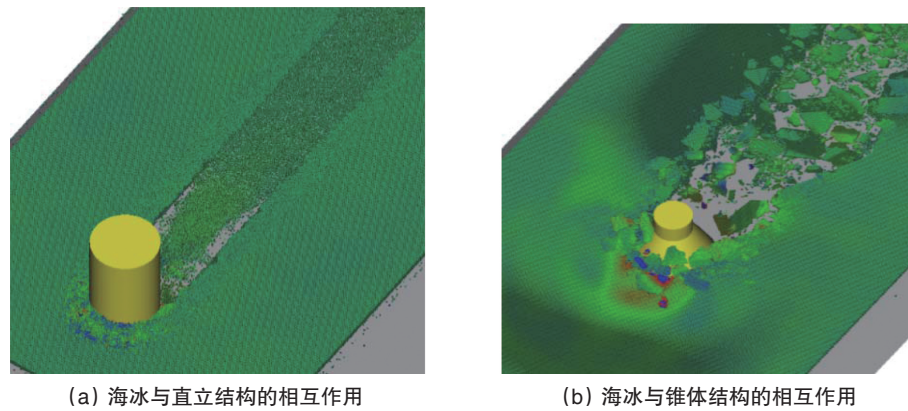
在极区,冰荷载是影响海洋结构安全运行的重要环境载荷之一,它会导致结构的强烈振动,并对结构的疲劳损伤、管线设备的正常运行及人员健康安全造成巨大威胁。目前,极区的海洋结构主要包括固定式、自升式及浮式结构等。针对以上 3 种不同结构形式的海洋结构,采用离散单元模拟海冰与其作用时的破碎过程,确定相应的冰荷载时程曲线。此外,通过离散元-有限元耦合模型分析固定式海洋结构的冰激振动问题。

### 2.2.1 固定式海洋平台结构冰荷载

固定式海洋平台仅考虑直立和锥体 2 种结构,并通过与平整冰离散单元模型相互作用得到结构上的冰荷载时程曲线。平整冰离散单元模型采用若干个规则排列并具有黏结-破碎的球体单元,其颗粒间的黏结强度根据海冰式样的单轴压缩和三点弯曲确定。图 13 为通过离散单元法模拟平整冰在 2 种固定式结构前的破碎形式,可以明显地发现海冰破碎形式的不同。海冰与直立结构相互作用过程中,海冰以挤压破碎为主,主要形态特征表现为破碎后海冰呈粉末状,冰力较难降为零,如图 14(a)所示。而海冰与锥体结构相互作用过程中,海冰以弯曲破碎为主,冰盖发生弯曲破碎后,冰力将卸载为零,如图 14(b)所示。这也与现场观测到的结果一致。

在海冰与多桩锥体海洋平台结构的相互作用中,平台结构总冰力在海冰流向和桩腿方位的影响下呈现出显著的遮蔽效应。针对渤海 JZ20-2 四锥体平台,如图 15 所示,采用离散单元法,模拟不同冰向下平整冰与该平台的相互作用。确定不同冰向下该锥体平台结构各桩腿的冰荷载(图 16),统计不同冰向下平台各桩腿的冰力衰减系数,并与 ISO19906 标准进行对比,得到了较好的结果<sup>[25]</sup>(图 17)。

针对固定式平台与海冰相互作用的动力过程,采用离散元方法分析海冰运动及其与海洋平台结构作用时的破碎特性,同时将得到的冰荷载传递到有限元模型中作为力边界条件,并由此计算海洋平台的动力响应,再进一步将更新后的平台位移作为离散元的位移边界条件。通过 IceDEM 软件的后处理可生成相应的海冰与海洋平台相互作用的离散元

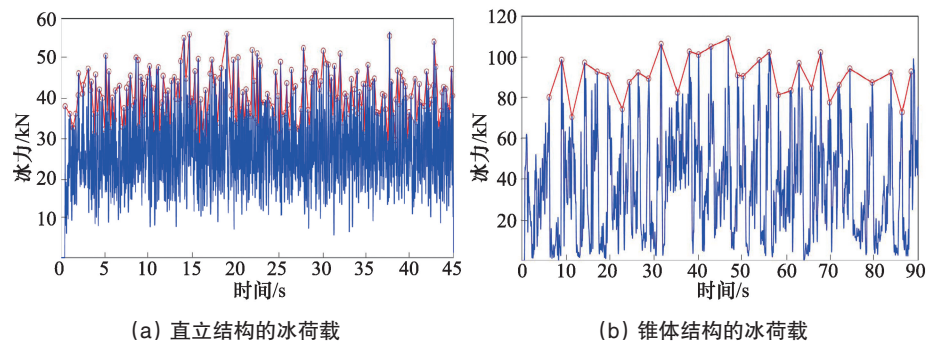


(a) 海冰与直立结构的相互作用

(b) 海冰与锥体结构的相互作用

图 13 固定式冰荷载结构的离散元分析

Fig. 13 DEM analysis of the ice load on offshore platform



(a) 直立结构的冰荷载

(b) 锥体结构的冰荷载

图 14 固定式平台冰荷载时程曲线

Fig. 14 Ice loads on offshore platform

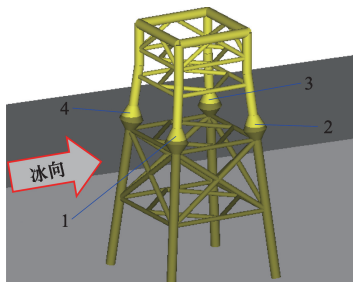


图 15 渤海 JZ20-2 MUQ 四锥体平台及离散元模型

Fig. 15 Four-legs conical platform JZ20-2 MUQ in Bohai Sea and its DEM model

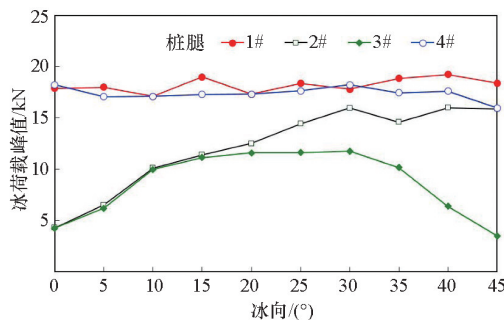


图 16 不同冰向下各桩腿的冰力峰值

Fig. 16 Averaged force peaks of piles in various ice drifting directions

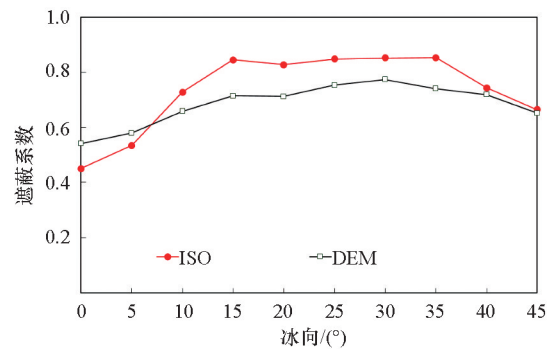


图 17 四桩锥体平台结构总冰力的遮蔽系数

Fig. 17 Yielding coefficients of global ice load on four leg conical platform structure

(DEM)与有限元(FEM)耦合模型<sup>[26]</sup>(图 18)。同时,为验证该耦合模型的有效性,将模拟得到的结果与实测结果比较,发现模拟结果与实测结果相吻合(图 19)。

### 2.2.2 自升式海洋平台结构冰荷载

自升式海洋平台结构已广泛的应用于渤海冰区的油气开发中,冰荷载是影响其结构安全的重要因素之一。为有效研究海冰与自升式平台的相互作用,海冰离散元模型采用上述具有黏结-破碎的球体单元构造。对于自升式平台,这里

研究的实际结构如图 20(a)所示,为简化计算未考虑齿条结构对海冰破坏的影响。自升式平台单个桩腿建立的计算模型如图 20(b)所示。其与自升式海洋平台的作用过程如图 21

所示。由此可确定该结构各桩腿的冰荷载,并进一步分析海冰与多桩腿结构相互作用过程中的破碎、重叠和堆积特性<sup>[27]</sup>。这里给出该平台单个桩腿上的冰力时程,如图 22 所示。

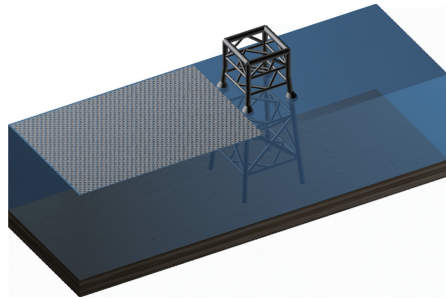
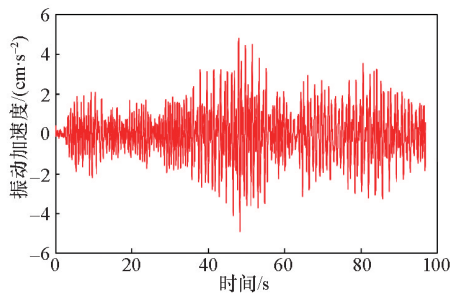
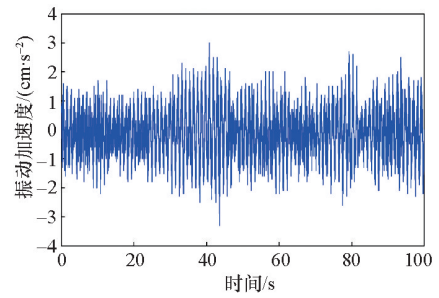


图 18 离散元-有限元耦合模型  
Fig. 18 Coupled DEM-FEM model



(a) 模拟结果



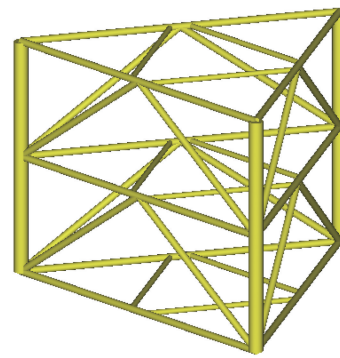
(b) 实测数据

图 19 冰速 0.1 m/s 平台振动加速度

Fig. 19 Vibration acceleration of the platform under ice velocity  $v=0.1\text{m/s}$



(a) 渤海冰区自升式海洋平台



(b) 自升式海洋平台桩腿结构模型

图 20 渤海冰区自升式海洋平台与桩腿结构 DEM 模型

Fig. 20 DEM model of Jack-up platform and pile in the Bohai Sea

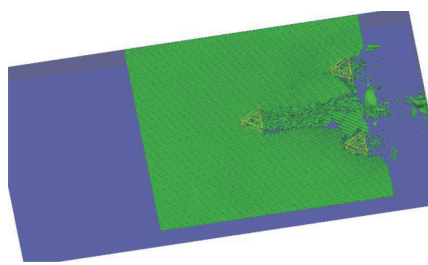


图 21 自升式海洋平台与海冰相互作用

Fig. 21 Interaction between sea ice and jack-up platform simulated with DEM

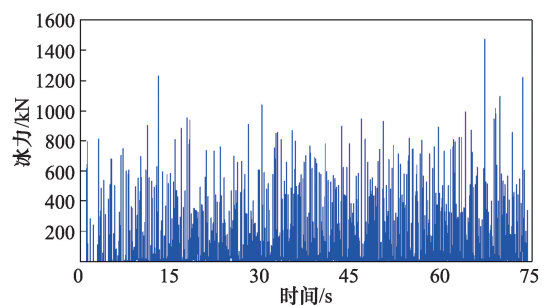


图 22 离散元模拟的海冰对自升式桩腿的冰荷载

Fig. 22 Ice loads on leg of jack-up platform simulated with DEM

### 2.2.3 浮式平台结构冰荷载

浮式平台结构通常是由上部的浮体与下部系泊缆绳组成,在冰区除了受到海水浮力、海流拖曳力和海浪的影响,海冰的作用也是不可忽视的。在进行浮式结构与海冰相互作用的 DEM 模拟中,浮式结构由若干三角形平板拼接而成,并只考虑浮力与拖曳力对浮式结构的影响,而忽略海浪的作用。这里对 Kulluk 锚系浮式钻井平台进行冰荷载离散元分

析,其平台简图如图 23 所示。Kulluk 海洋平台的离散单元模型也是由三角形边界单元拼接而成,如图 24 所示。该浮式平台与海冰作用的离散元模拟见图 25。由此可以通过离散元方法分析不同冰况下浮式平台上的冰荷载以及相应的作用过程。本文给出单一冰况下,该浮式平台的冰荷载时程曲线,如图 26 所示。

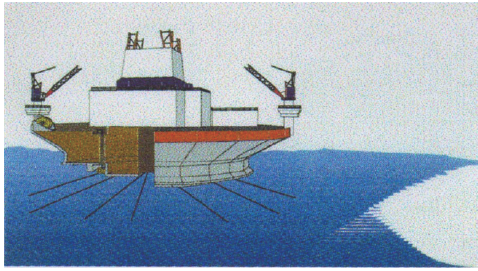


图 23 Kulluk 海洋平台  
Fig. 23 Schematic of Kulluk



图 24 Kulluk 平台离散元模型  
Fig. 24 DEM model of Kulluk

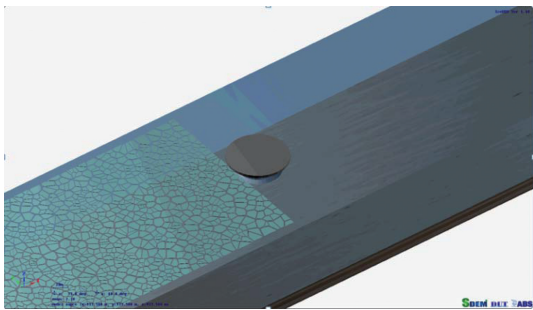


图 25 离散元模拟的浮冰与 Kulluk 海洋平台相互作用  
Fig. 25 Interaction between ice floes and Kulluk simulated with DEM

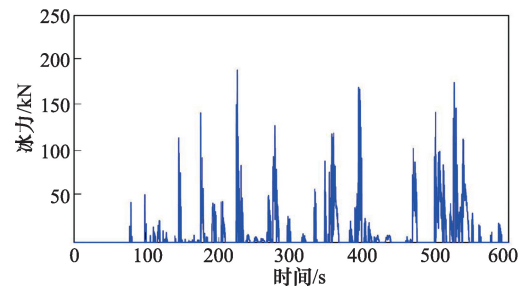


图 26 Kulluk 平台的冰载荷时程曲线  
Fig. 26 Ice loads of the Kulluk simulated with DEM

### 3 结论

本文针对极区船舶及海洋平台的冰荷载数值计算,考虑不同的海冰类型及其具有的离散特性,采用具有黏结-破碎的球形颗粒单元、扩展圆盘单元以及多面体单元构造不同的海冰离散单元模型。通过该模型分析了船体及不同类型海洋平台上冰荷载的大小和分布规律。此外,为分析极区结构的冰激振动,建立了相应的离散元-有限元耦合模型。此外,在数值计算中加入了 GPU 高性能并行计算技术使得离散元的计算规模和计算效率有了很大的提升。

海冰的离散单元模型在模拟海冰与结构相互作用的数值模拟中展现出很好的计算性能,可以有效地模拟海冰的破碎现象并能较合理地反应不同结构下冰荷载的特性。以上工作有助于揭示船体以及海洋平台冰荷载的变化规律和分布特性,为极区船舶的安全行驶以及海洋平台的正常运行提供参考依据。在此基础上,为更加专业和方便地使用离散元法模拟极区结构与海冰的相互作用,大连理工大学自主研发出了 IceDEM 软件且展现出了很好的应用前景。下一步,将通过室内模型试验及现场监测数据对海冰离散元单元模型进行进一步的验证和改进。

**致谢:**海冰离散元计算分析软件(IceDEM)的研发得到美国 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 博士对扩展多面体离散元模型的程序研发给

予了大力支持;本文部分工作由大连理工大学狄少丞、李正、龙雪、朱红日、孔帅、蔡柯等完成,并得益于美国船级社刘社文、刘建成、刘翔、陈营营及夏翌的讨论。

### 参考文献 (References)

- [1] Chircop A. Climate change and the prospects of increased navigation in the Canadian Arctic[J]. Journal of Maritime Affairs, 2007, 6(2): 193-205.
- [2] Bhat S U. Modeling of size effect in ice mechanics using fractal concepts[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1990, 112(4): 370-376.
- [3] Derradji-Aouat A, Sinha N K, Evgin E. Mathematical modeling of monotonic and cyclic behavior of fresh water columnar grained S-2 ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 2000, 31(1): 59-81.
- [4] Gagnon R E, Wang J. Numerical simulations of a tanker collision with a bergy bit incorporating hydrodynamics, a validated ice model and damage to the vessel[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 81: 26-35.
- [5] 张健, 万正权, 陈聪. 船-冰碰撞载荷下球鼻艏结构动态响应研究[J]. 船舶力学, 2014, 18(1-2): 106-114.  
Zhang Jian, Wan Zhengquan, Chen Cong. Research on structure dynamic response of bulbous bow in ship-ice collision load[J]. Journal of Ship Mechanics, 2014, 18(1-2): 106-114.
- [6] 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.
- [7] 李紫麟, 刘煜, 孙珊珊, 等. 船舶在碎冰区航行的离散元模型及冰载荷分析[J]. 力学学报, 2013, 45(6): 868-877.  
Li Zilin, Liu Yu, Sun Shanshan, et al. Analysis of ship maneuvering performances and ice loads on ship hull with discrete element model in broken-ice fields[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(6): 868-877.
- [8] Kuutti J, Kolari K, Marjavaara P. Simulation of ice crushing experiments with cohesive surface methodology[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 92: 17-28.
- [9] Lu W, Lubbad R, Løset S. Simulating ice-sloping structure interactions with the cohesive element method[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 136(3): 031501.
- [10] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [11] 徐泳, 孙其诚, 张凌, 等. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(2): 251-260.  
Xu Yong, Sun Qicheng, Zhang Ling, et al. Advances in discrete element methods for particulate materials[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(2): 251-260.
- [12] 季顺迎, 李春花, 刘煜. 海冰离散元模型的研究回顾及展望[J]. 极地研究, 2012, 24(4): 315-329.  
Ji Shunying, Li Chunhua, Liu Yu. A review of advances in sea-ice discrete element models[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2012, 24(4): 315-329.
- [13] 季顺迎, 狄少丞, 李正, 等. 海冰与直立结构相互作用的离散单元数值模拟[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 463-469.  
Ji Shunying, Di Shaocheng, Li Zheng, et al. Discrete element modelling of interaction between sea ice and vertical offshore structures[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 463-469.
- [14] Hopkins M A, Frankenstein S, Thorndike A S. Formation of an aggregate scale in Arctic sea ice[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: 1-10.
- [15] Sun S, 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.
- [16] Polojärvi A, Tuhkuri J. Velocity effects in laboratory scale punch through experiments[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 70: 81-93.
- [17] Galindo-Torres S A. A coupled Discrete Element Lattice Boltzmann Method for the simulation of fluid - solid interaction with particles of general shapes[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 265: 107-119.
- [18] Li W, McMains S. A sweep and translate algorithm for computing voxelized 3D Minkowski sums on the GPU[J]. Computer-Aided Design, 2014, 46: 90-100.
- [19] 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.
- [20] 王宇新, 张弛, 狄少丞, 等. 海冰与海洋平台碰撞分析中的可视化方法[J]. 计算机辅助工程, 2016, 25(1): 55-67.  
Wang Yuxin, Zhang Chi, Di Shaocheng, et al. Visualization method for analysis on collision between sea ice and offshore platform[J]. Computer Aided Engineering, 2016, 25(1): 55-67.
- [21] Ji Shunying, Di Shaocheng, Liu Shewen. Analysis of ice load on conical structure with discrete element method[J]. Engineering Computations, 2015, 32(4): 1121-1134.
- [22] 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[J]. 力学学报, 2015, 47(6): 1047-1057.  
Liu Lu, Long Xue, Ji Shunying. Dilated polyhedra based discrete element method and its application of ice load on cylindrical pile[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(6): 1047-1057.
- [23] Ji Shunying, Li Zilin, Li Chunhua, Shang Jie. Discrete element modeling of ice loads on ship hulls in broken ice fields[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(11): 50-58.
- [24] Ji Shunying, Wang Anliang, Su Jie. Experimental studies on elastic modulus and flexural strength of sea ice in the Bohai sea[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2011, 25(4): 182-195.
- [25] 王帅霖, 狄少丞, 季顺迎. 多桩锥体海洋平台结构冰荷载遮蔽效应离散元分析[J]. 海洋工程, 2016, 34(2): 1-9.  
Wang Shuilin, Di Shaocheng, Ji Shunying. Discrete element analysis of shadowing effect of ice load on multi-leg conical offshore platform structure[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(2): 1-9.
- [26] 邵帅, 周国丰, 王帅霖, 等. 基于离散元-有限元模型的海冰锥体海洋平台结构振动分析[J]. 计算力学学报, 2015, 32(5): 662-667.  
Shao Shuai, Zhou Guofeng, Wang Shuilin, et al. Ice induced vibration of conical offshore platform structure based on discrete element model-finite element model[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, 32(5): 662-667.
- [27] 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[J]. 力学学报, 2014, 46(4): 561-571.  
Di Shaocheng, Ji Shunying. GPU-based discrete element modelling of interaction between sea ice and jack-up platform structure[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(4): 561-571.

## Analysis of ice load on ship and offshore structure in polar region with discrete element method

JI Shunying, WANG Shuailin, LIU Lu

State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China

**Abstract** The ice load is an important factor for vibration and fatigue of ship and offshore structure in polar region. For analyzing the ice load on different type offshore structures, the bonding-breaking effect between bonded spherical elements, the expansion disk element, and the polyhedron element based on the Minkowski sum theory are respectively adopted to construct the discrete element model of sea ice. Additionally, the ice-induced vibration of the jacket platform is calculated by using the coupled discrete element-finite element numerical method. And IceDEM, a software tool for sea ice DEM simulation based on GPU is developed to improve the computational efficiency. The present study can not only promote the development of discrete element method in polar marine engineering but also assist the design of ship and offshore structure in ice-covered fields.

**Keywords** discrete element method; polar region; ice load; ship hull; offshore structure

(责任编辑 刘志远)