

海冰与自升式海洋平台相互作用 GPU 离散元模拟¹⁾

狄少丞 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 116023)

摘要 在海冰与自升式海洋平台结构的相互作用过程中, 冰载荷是影响平台结构振动响应和疲劳寿命的重要因素. 采用具有粘接-破碎效应的离散元模型, 可对海冰与自升式海洋平台结构作用中的海冰破碎特征及相应冰载荷进行数值分析. 针对自升式海洋平台的多桩腿结构特性及其冰载荷离散元分析的大规模计算需求, 建立了基于 GPU 的并行算法并开发了相应的计算程序. 为实现离散元分析的高效计算, 采用网格排序方法创建单元邻居列表, 以快速确定海冰单元间及其与平台结构间的接触模式和作用力. 此外, 还发展了球体单元与圆柱形结构在不同接触形式下的计算模型. 为检验该离散元模型的有效性, 对渤海锥体海洋平台结构的作用过程进行了计算, 并与现场实测冰力数据进行了对比验证. 在此基础上对多桩腿自升式平台结构的冰载荷进行了离散元分析, 获得了海冰的破坏特性, 确定了不同桩腿上的冰力时程. 该模型可进一步应用于不同类型海洋结构的冰载荷分析, 为冰区海洋平台的结构设计和现役平台结构的疲劳分析提供参考依据.

关键词 海冰, 自升式海洋平台, 离散元模型, GPU 并行计算

中图分类号: P751, P731.15 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-13-400

引言

自升式平台结构在我国海洋石油勘探和开采中得到了广泛应用, 目前占我国移动平台的 70% 以上, 并应用于渤海冰区的油气开发中. 在海冰与自升式平台的相互作用中, 平台结构的动应力要远大于其静应力, 因此冰载荷问题也由最初的静冰力确定向动冰力分析转化, 以对冰激结构振动响应和疲劳寿命进行评估^[1-2]. 海洋平台结构的动冰载荷可通过模型试验^[3-4]、现场测试^[5-6]、理论分析^[7]和数值方法^[8-9]进行确定. 其中, 数值方法具有研究成本低、周期短等优点, 已用于不同类型海洋平台结构的冰载荷分析.

在海冰载荷的数值分析中, 一般采用有限元方法计算海冰与结构物的相互作用^[9-11]. 它可以处理相对复杂的力学模型和边界条件, 但尚不能有效地描述海冰的动力破碎特性. 近年来, 基于离散元模型的海冰与结构物相互作用研究取得了很大的进

展^[12-14]. 采用具有粘结对效应的离散单元模型在微观尺度下可以描述海冰材料的结构性质, 在宏观上又能合理地模拟海冰与海洋结构作用时的破碎规律, 在冰载荷计算方面显示出很强的优势. 然而, 受当前计算机硬件技术的限制, 在 CPU 上运行的串行离散元模型很难实现大规模离散元数值模拟. 为此, 发展高效的大规模离散元并行算法是解决海冰与大型海洋结构相互作用的一种途径.

近年来, 针对离散单元大规模计算的工程需求, 人们在开发传统多核 CPU 并行算法的同时^[15], 也在大力发展基于图形处理器 (GPU: Graphic Processing Unit) 的并行算法^[16-17]. 基于 GPU 的并行算法在大规模离散元的计算效率方面逐渐显示出很强的优势. 20 世纪 90 年代发展起来的图形处理器计算能力已远高于 CPU 一到两个数量级, 并具有高性能、低功耗、高性价比等特点. 2007 年由 NVIDIA 公司发布的 CUDA 突破了传统 GPU 硬件架构的限制, 高效率地利用了其计算资源, 突出了 GPU 在高性能

2013-11-28 收到第 1 稿, 2014-01-03 收到修改稿.

1) 国家海洋公益性行业科研专项经费 (201105016, 201205007), 国家自然科学基金 (41176012) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (20130041110010) 资助项目.

2) 季顺迎, 教授, 主要研究方向: 颗粒材料计算力学及工程应用. E-mail: jisy@dlut.edu.cn

计算方面的优势,同时降低了编程的难度^[18].此外,基于GPU技术的颗粒单元接触搜索算法在提高离散元计算效率方面也具有显著的优势^[19].目前,GPU并行计算技术已成功应用于大规模离散元的高性能计算中^[20-21].

本文采用具有粘结-破碎效应的离散元模型,发展离散元模型的GPU并行算法,对海冰与自升式海洋平台结构的相互作用过程进行大规模数值模拟,分析海冰与海洋结构作用时的动力破碎特性及其相应的冰载荷.

1 基于 GPU 的海冰离散单元模型

1.1 海冰的离散元模型

在采用离散单元模型计算海冰与自升式海洋平台结构的相互作用过程中,将海冰离散为具有一定质量和大小的颗粒单元,单元间具有相应的粘结作用,并且在外力作用下可以发生破坏^[22].由于具有粘接效应的海冰单元在发生拉伸或剪切破坏时将释放其弹性应变能,并将其一部分能量转化为单元动能,从而导致单元的瞬间冲击运动.同时海冰是一种脆性材料,其失效模式可参考岩石材料的线性软化模型,以有效降低单元在粘接破坏时的动能^[23-24].本文采用的线性软化破坏准则如图1所示^[14],其可表述为

$$f(F_i, \delta_{\max}) = F_i - F_{i_{\max}} \left(1 - \frac{\delta_{\max}}{\delta_f}\right) = 0 \quad (1)$$

式中, F_i ($i = n, s$) 为单元间法向或切向接触力; $F_{i_{\max}}$ 为法向与切向的最大接触力.图1中的 δ_{crit} 为最大法向或切向接触力所对应的位移; δ_{\max} 为卸载前所能达到的最大法向或切向位移,且有 $\delta_{\max} > \delta_{\text{crit}}$; δ_f 为粘结断裂时对应的最大法向或切向位移.

当断裂准则 $f < 0$ 时,表示单元间的粘结是完

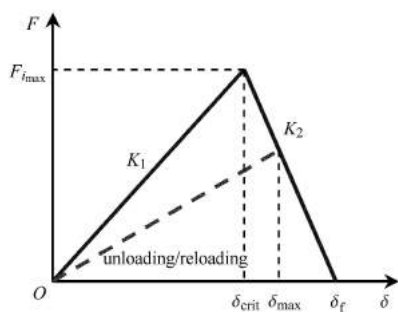


图1 粘结单元断裂的线性软化接触模型

Fig. 1 Linear softening contact model of fracture of bonded elements

整的或粘结已经发生断裂且没有进一步扩展;当 $f = 0$ 时,表示单元间的粘结将要发生断裂或处于开始卸载的状态.图1中的刚度 K_1 为单元间的法向接触刚度或切向接触刚度,刚度 K_2 为线性软化接触刚度,其取值可通过 δ_f 与 δ_{crit} 的比值来确定.本文取 $\delta_f = 1.5\delta_{\text{crit}}$,其中比例系数1.5为软化因子,用来释放海冰材料发生破坏时的弹性应变能,以避免海冰单元在粘接破坏时的飞溅现象.

1.2 海冰单元与自升式平台结构的接触判断

本文所研究的自升式海洋平台如图2所示.在每个桩腿上均设置了用于平台甲板升降的齿条结构.Guo等^[25]对具有齿条结构的圆柱冰载荷进行了室内模型试验,并对比分析了不同冰向下的冰载荷大小.结果表明,齿条结构对圆柱形桩腿的冰载荷影响不明显,因此,本文在计算海冰与自升式平台相互作用的过程中,为简化计算未考虑齿条结构对海冰破坏的影响.对自升式平台的单个桩腿结构建立如图3所示的计算模型.

海冰在与海洋平台结构的耦合作用过程中不断破碎,平台结构则在海冰载荷激励下发生振动.对



图2 渤海冰区自升式海洋平台

Fig. 2 Jack-up platform in the Bohai Sea

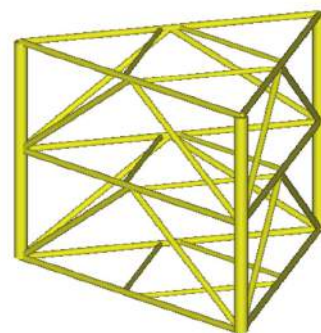


图3 自升式海洋平台桩腿结构模型

Fig. 3 Structure model of the jack-up platform pile

于自升式海洋平台，平台结构在冰激条件下的相对速度和位移要明显小于海冰运动的速度和位移。为此，这里将海洋平台简化为刚体结构。由于自升式海洋平台结构主要由一系列圆柱单元构成，因此在进行海冰与平台结构相互作用的离散元模拟中主要判断球形单元与圆柱形结构的接触模式。从图 3 可以发现，自升式海洋平台桩腿由一系列竖向、横向和斜向构件构成。海冰单元与任意角度圆柱结构的接触模式均可分为如下 3 种 (如图 4 所示)，即：(a) 单元与圆柱侧面接触；(b) 单元与圆柱底面接触；(c) 单元与圆柱棱边接触。因此，在海冰单元与圆柱结构的相互作用中，只要给定圆柱轴线的 2 个顶点和圆柱半径，以及海冰单元的位置和粒径即可进行接触模式判断和冰力计算。

在进行海冰单元与圆柱结构的接触判断时，首先定义圆柱的两个端面圆心 A 和 B 、圆柱半径 $R_{cylinder}$ 、颗粒单元中心坐标 P 和半径 $R_{particle}$ 。球心 P 在圆柱轴线上的投影点为 Q ，如图 5(a) ~ 图 5(c) 所示，由此得到向量 AP, BP, AB, BA, BQ 和 QP ，其中 $BQ = BP - QP, QP = AP - \frac{AP \cdot AB}{|AB|} \cdot \frac{AB}{|AB|}$ 。

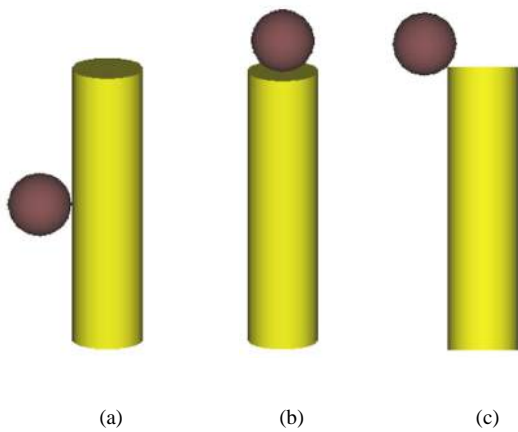
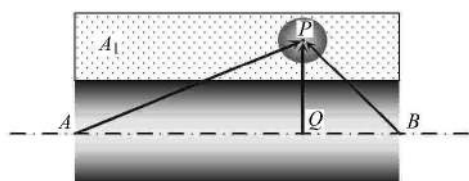


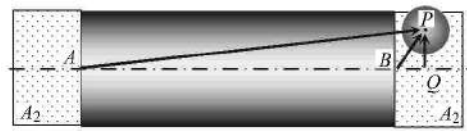
图 4 海冰单元与圆柱结构的接触模式

Fig. 4 Contact modes between sea ice element and cylindrical structure



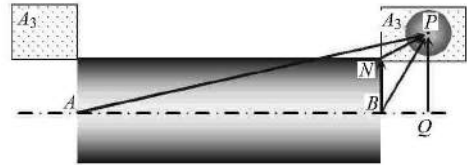
(a) 球形单元与圆柱体侧面接触

(a) Contact between spherical particle and cylinder side surface



(b) 球形单元与圆柱面底面接触

(b) Contact between spherical particle and cylinder end surface



(c) 球形单元与圆柱面棱边接触

(c) Contact between spherical particle and cylinder edge

图 5 海冰单元与圆柱结构的接触判断

Fig. 5 Contact detection between sea ice element and cylindrical structure

颗粒单元与圆柱结构的接触判断主要包括如下三方面，即：

(1) 单元与圆柱侧面接触判断

首先判定颗粒单元的球心是否在区域 A_1 中，判定条件为： $(AP \cdot BA)(BP \cdot BA) \leq 0$ ，如图 5(a) 所示。如果单元在区域 A_1 中，可进一步判定单元与圆柱面的接触情况。如果 $|QP| < R_{cylinder} + R_{particle}$ ，则单元与圆柱面发生接触。

(2) 单元与圆柱底面接触判断

如果接触条件 $(AP \cdot BA)(BP \cdot BA) > 0$ 成立，表明单元位于区域 A_2 或 A_3 中，如图 5(b) 所示；如果 $|QP| < R_{cylinder}$ 表明单元位于区域 A_2 中；对于任一底面，如果 $|BQ| < R_{particle}$ ，表明单元与圆柱的底面接触。

(3) 单元与圆柱棱边接触判断

如果接触条件 $(AP \cdot BA)(BP \cdot BA) > 0$ 与 $|QP| > R_{cylinder}$ 同时成立，表明单元位于区域 A_3 中，如图 5(c) 所示。对于任一棱边，有 $BN = R_{cylinder} \cdot QP/|QP|$ ， $NP = BP - BN$ 。如果 $|NP| < R_{particle}$ ，表明单元与圆柱体棱边发生接触。

如果海冰单元与圆柱体发生接触，则进一步计算单元与圆柱体的重叠量，并通过相应的接触模型计算其相互作用力。

1.3 基于 GPU 的离散元数值算法

在离散元数值计算中，单元间的邻居搜索和接触判断是影响计算效率的核心内容。本文针对离散元的 GPU 算法特点，采用元胞列表法来组织和检索单元间的接触判断^[26]。模拟区域被划分成若干个大

小稍大于单元直径的网格, 这样各单元仅与相同或相邻网格内的单元作用, 故搜索邻居时所搜索的网格数与体系的大小无关. 本文搜索包含单元所在网格在内的 27 个网格来确定邻居列表.

该搜索算法在具有共享式存储器的多核处理机上可获得较高的加速比. 在基于 GPU 的并行计算中, 可在单元搜索和作用力传递之间表现出很高的计算效率 [26]. 该搜索算法主要包括以下过程:

(1) 首先确定海冰单元所在网格的编号, 如图 6 所示. 以网格为基准对单元进行排序, 排序的结果如图 7(a) 所示. 排序后单元本身的空间位置并没有发生变化, 只是其编号根据单元所在的网格进行了重新排序, 使得空间上更接近的单元排序后的编号也更接近. 这一点有利于在 GPU 中更好地实现单元邻居的搜索和邻居列表的确定. 然后确定同一网格内单元编号的最小值 $I_p^{\min} [I_{\text{cell}}]$ 和最大值 $I_p^{\max} [I_{\text{cell}}]$, 如图 7(b) 所示, I_{cell} 为网格编号.

(2) 创建任一单元 i 的邻居列表 $A_{\text{nei}} [i, I_{\text{nei}}]$. I_{nei} 取值介于 0 与 $N_{\text{max}} - 1$ 之间, 其中 N_{max} 为与单元 i 发生接触的最大单元数目. 本文采用同一粒径的单元, 故

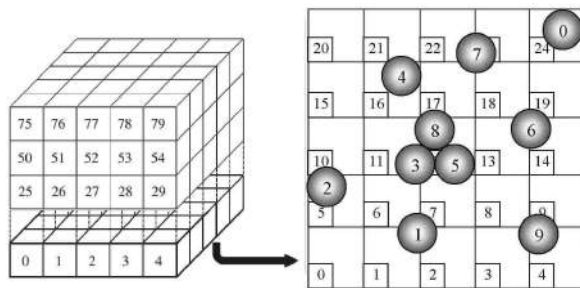
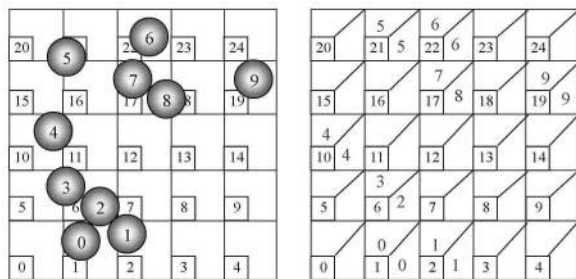


图 6 单元在网格中的位置

Fig. 6 Element position in space grid



(a) 单元排序

(b) 确定网格编号

(a) Sorting of particles

(b) Numbering of cells

图 7 排序后的单元及网格中单元编号的最大与最小值

Fig. 7 Sorted element and the maximum and minimum element indexes in each cell

每个单元最多可与 12 个邻居单元接触. 在单元 i 的邻居列表中单元编号大于 i 的单元数目为 $n_{\text{jgi}} [i]$.

(3) 对数组 $n_{\text{jgi}} [i]$ 进行前缀规约求和, 即

$$s_{\text{jgi}} [i] = \sum_{n=0}^i n_{\text{jgi}} [n] \quad (2)$$

由此可确定每个单元接触对的编号, 即

$$I_{\text{list}} = s_{\text{jgi}} [i - 1] + I_{\text{nei}} \quad (I_{\text{nei}} \in 0, n_{\text{jgi}} [i] - 1) \quad (3)$$

(4) 创建邻居列表 L_p 和 L_n .

(5) 接触力计算. 如果两个单元在当前时间步内保持接触, 且在下一时间步仍然接触, 则这两个单元之间的接触力需要从当前时间步传递到下一时间步并进行迭代.

(6) 单元坐标更新. 计算得到每个单元的作用力后, 由牛顿第二定律确定单元速度和空间位置.

本文离散元算法构建于 NVIDIA Tesla K20 上, 其 GPU 硬件由 13 个流多处理器 (Streaming MultiProcessor, 简称 SMX) 构成, 每个 SMX 由 192 个单精度计算单元和 64 个双精度计算单元及其他功能的单元构成. 在 CUDA 的编程模型中按照网格、线程块、线程三层结构来组织线程. 每个线程计算一对单元接触间的受力, 每个线程块包含 256 个线程. 本文用 GPU 处理离散元计算中单元的受力和单元速度、位置的更新. 这样只需 CPU 在开始计算前读入模拟所需要的参数和单元的坐标、速度、角速度等信息, 并将这些信息复制到显存供 GPU 计算时使用, 计算完成后将计算结果由 GPU 端复制到主机端, 最后输出计算结果.

2 计算模型的验证

为验证基于 GPU 离散元模型在海冰与自升式海洋平台结构相互作用过程计算中的有效性, 需对数值计算结果和现场实测数据进行分析. 目前, 由于对自升式海洋平台结构的冰载荷尚未进行现场测量, 因此可考虑渤海冰区广泛采用的锥体和直立桩腿的平台结构. 在海冰与锥体结构的相互作用过程中, 冰排对锥面的作用力存在竖直和水平分量, 其主要表现为弯曲破坏并伴随挤压破坏, 海冰单元间的粘接主要以拉伸破坏为主, 同时也存在剪切破坏; 在海冰与直立结构的作用过程中, 则主要表现为挤压破坏, 海冰单元间的粘结在切向方向受剪切而破坏. 对于自升式海洋平台结构, 其桩腿主要为直立形式, 同时也存在若干个斜向支杆, 如图 3 所示. 海冰与该

平台结构的相互作用过程中, 将同时发生挤压破坏和弯曲破坏. 这里可采用锥体结构冰载荷的实测资料验证海冰离散元粘接-破碎模型的合理性, 同时也可检验离散元 GPU 并行计算程序的可靠性.

这里采用渤海 JZ20-2 MUQ 平台 2001 年 1 月 14 日 10:03 的现场海冰实测数据与离散元数值模拟结果进行对比. 图 8 为该海洋平台的锥体结构及其与海冰的作用过程. 海冰单元与锥体结构的接触判断和冰力计算与圆柱形结构类似. 海冰的左右边界单元在水平方向以设定的流速运动, 在竖直方向具有一定刚度可上下运动. 主要计算参数列于表 1 中.

离散元数值模拟的海冰与锥体结构的相互作用过程如图 9 所示. 计算得到的锥体结构在 x 方向的冰力时程曲线如图 10(a) 所示, 现场实测结果如图 10(b) 所示. 在所模拟时间内, 离散元模拟的冰力最大值为 124 kN, 现场观测的海冰对锥体结构的最大冰力为 117 kN; 现场观测中冰力出现峰值的周期为 1.7s, 数值模拟的冰力峰值周期约为 1.9s. 以上数值计算的结果与现场观测的试验数据吻合

表 1 海冰与锥体结构作用离散元模拟的主要计算参数

Table 1 Major computational parameters of DEM simulation of dynamic ice load on conical structure

Definition	Symbol	Values
sea water density	$\rho_w / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1035
current drag coefficient	C_D	0.005
ice velocity	$V / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.43
ice thickness	h_i / m	0.23
initial ice cover area	$a \times b / \text{m}^2$	20×15
elastic modulus of Ice	E / GPa	1.0
bonding strength	σ_t / MPa	0.95
ice density	$\rho_i / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	900
cone diameter	$D_{\text{pile}} / \text{m}$	2.85
angle of cone	$\alpha / (^{\circ})$	60
particle size	D / m	0.094
number of particles	N_p	117 024



(a) 辽东湾 JZ20-2 锥体油气平台

(a) Conical drilling platform JZ20-2 in Liaodong bay

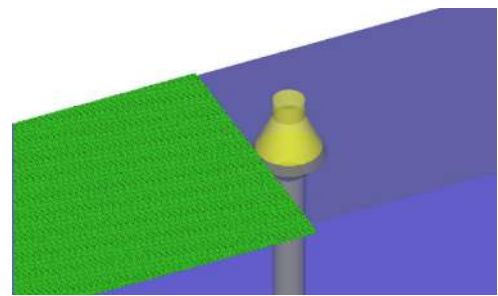


(b) 海冰与锥体结构的相互作用

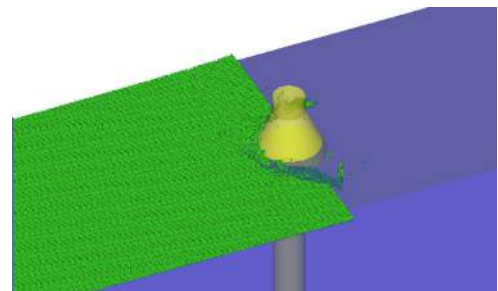
(b) The interaction between sea ice and conical structure

图 8 海冰与锥体海洋平台结构的相互作用过程

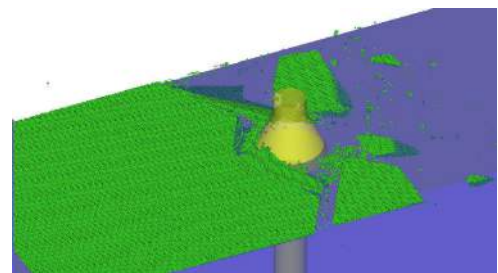
Fig. 8 The interaction between sea ice and conical offshore structure



(a) $t = 0.0 \text{ s}$



(b) $t = 3.1 \text{ s}$



(c) $t = 9.2 \text{ s}$

图 9 离散元模拟的海冰与锥体结构相互作用过程

Fig. 9 The interaction between sea ice and conical structure simulated with DEM

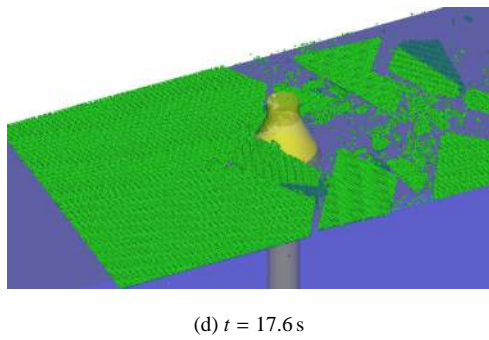
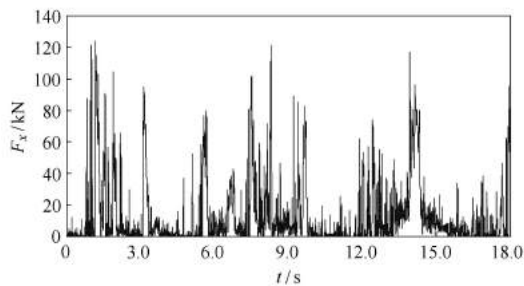


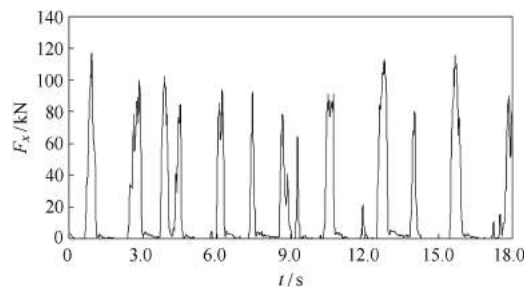
图 9 离散元模拟的海冰与锥体结构相互作用过程 (续)

Fig.9 The interaction between sea ice and conical structure simulated with DEM (continued)



(a) 离散元模拟结果

(a) The simulated results with DEM



(b) 渤海现场监测结果

(b) The field measured results in the Bohai Sea

图 10 海冰对锥体结构的动冰力

Fig. 10 Dynamic ice load on conical structure

很好, 该离散元模型可较为准确地确定海冰的破碎过程以及海洋结构的冰力时程。

3 自升式海洋平台结构的冰力计算

海冰与自升式海洋平台结构的相互作用示意图如图 11 所示, 图中三角形为自升式平台的三根桩腿。在海冰与自升式平台相互作用过程中, 海冰主要以脆性挤压破坏为主, 并对平台结构产生随机动冰力。这里对海冰的随机破坏过程与冰载荷时程进行离散元数值分析, 主要计算参数采用表 1 中的数值, 其他

参数列于表 2 中。

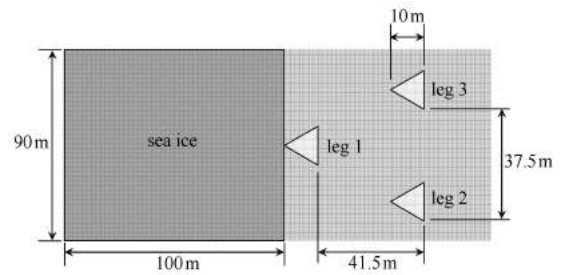


图 11 海冰与自升式平台结构的相互作用示意图

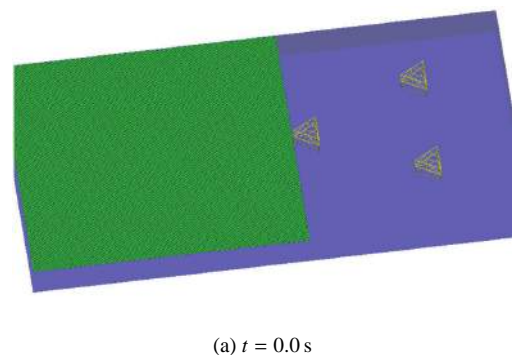
Fig. 11 Sketch of the interaction between sea ice and jack-up platform structure

表 2 海冰与自升式平台作用离散元模拟的主要计算参数

Table 2 Major computational parameters of DEM simulation of dynamic ice load on jack-up platform

Definition	Symbol	Values
current velocity	$V/(m \cdot s^{-1})$	1.0
ice thickness	h_i/m	0.5
initial ice cover area	$a \times b/m^2$	100×90
bonding strength	σ_t/MPa	0.69
particle diameter	D/m	0.25
number of particles	N_p	332 000

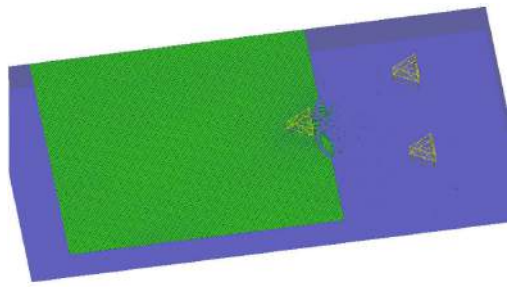
离散元数值模拟的海冰与平台结构的相互作用过程如图 12 所示。图 13 更清晰地显示了桩腿 1 与海冰相互作用过程中, 海冰的破坏特性以及海冰在桩腿桁架结构中的堆积现象。计算得到的 3 个桩腿在 x, y, z 方向的冰力时程如图 14 ~ 图 16 所示, 其冰力最大值和均值列于表 3 中。可以发现, 海冰载荷主要集中在 x 方向, 即海冰运动方向; 在 y 和 z 方向的冰力 F_y 和 F_z 主要由斜向杆件和桩柱表面摩擦而产生。尽



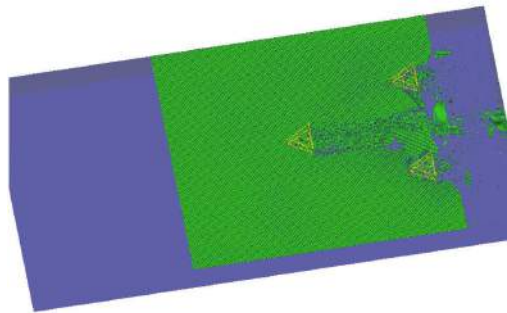
(a) $t = 0.0 s$

图 12 离散元模拟的海冰与自升式平台相互作用过程

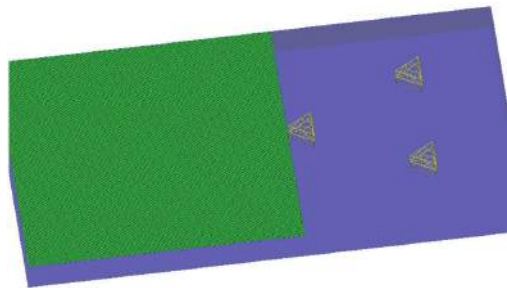
Fig.12 The interaction between sea ice and jack-up platform simulated with DEM



(b) $t = 15.0\text{ s}$



(c) $t = 59.4\text{ s}$



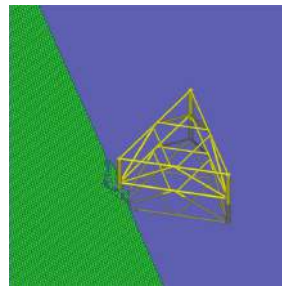
(d) $t = 74.2\text{ s}$

图 12 离散元模拟的海冰与自升式平台相互作用过程 (续)

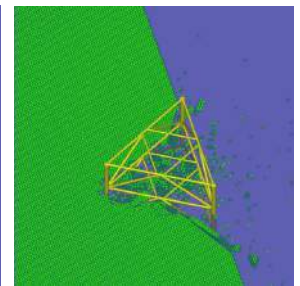
Fig.12 The interaction between sea ice and jack-up platform simulated with DEM (continued)

表 3 自升式海洋平台桩腿冰力的离散元计算结果
Table 3 Simulated ice loads on piles of jackup platform simulated with DEM

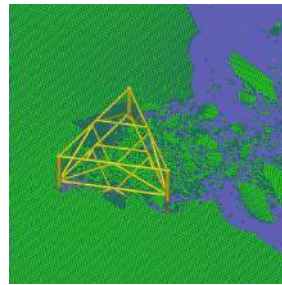
Legs of Jack-up platform		1#	2#	3#
maximum ice loads/ kN	x-direction	1 475.3	1 001.1	1 050.0
	y-direction	1 261.1	737.9	503.1
	z-direction	162.2	102.5	131.4
average ice loads/ kN	x-direction	79.3	44.3	36.3
	y-direction	28.0	33.2	-11.5
	z-direction	1.1	-4.1	-2.5



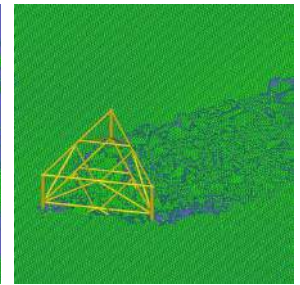
(a) $t = 1.5\text{ s}$



(b) $t = 10.4\text{ s}$



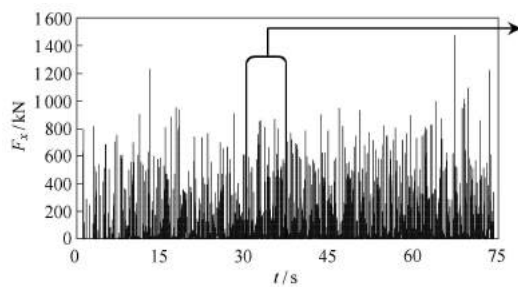
(c) $t = 20.8\text{ s}$



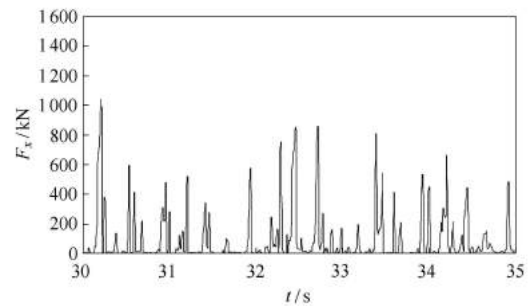
(d) $t = 44.5\text{ s}$

图 13 桩腿 1 与海冰相互作用的过程

Fig. 13 The interaction between sea ice and leg 1 of jack-up platform simulated with DEM



(a) Leg 1



(a*) Leg 1

图 14 离散元模拟的海冰对自升式平台桩腿 1 的动冰力

Fig. 14 Dynamic ice loads on leg 1 of jack-up platform simulated with DEM

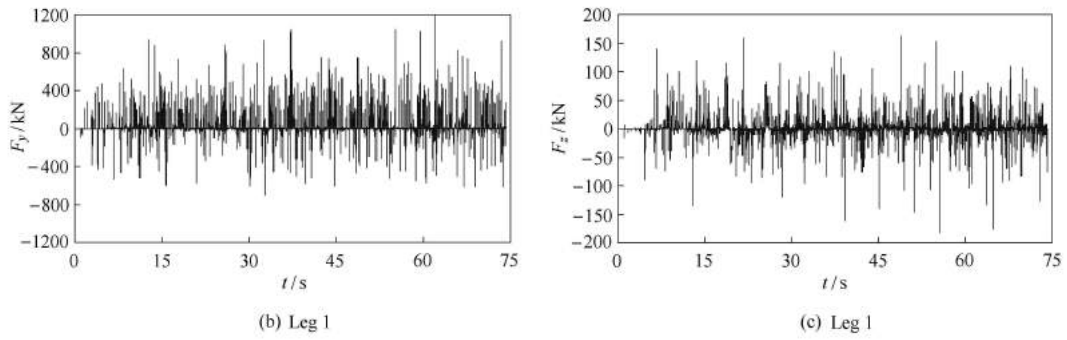
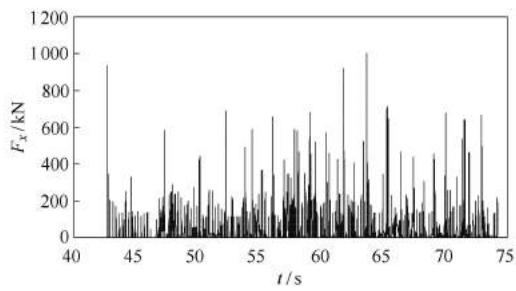
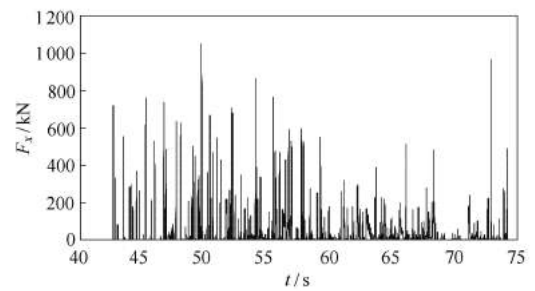


图 14 离散元模拟的海冰对自升式平台桩腿 1 的动冰力 (续)

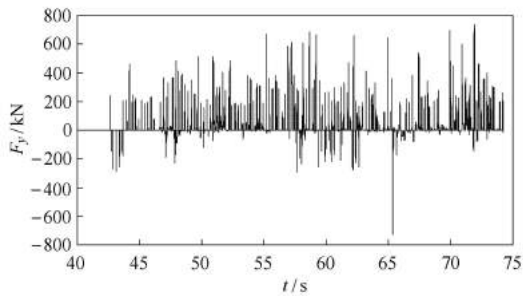
Fig. 14 Dynamic ice loads on leg 1 of jack-up platform simulated with DEM (continued)



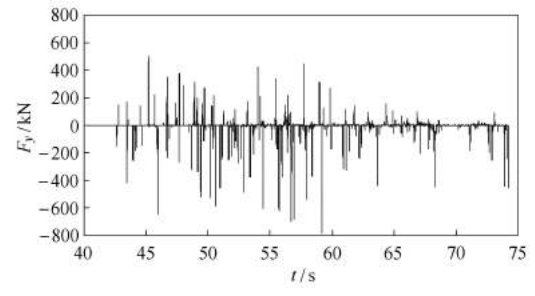
(a) Leg 2



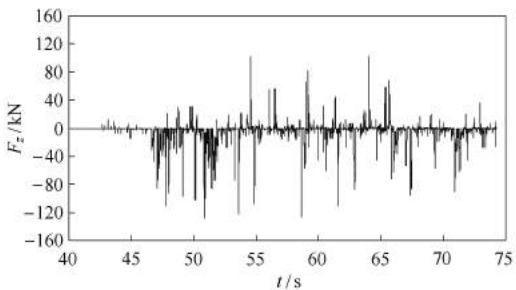
(a) Leg 3



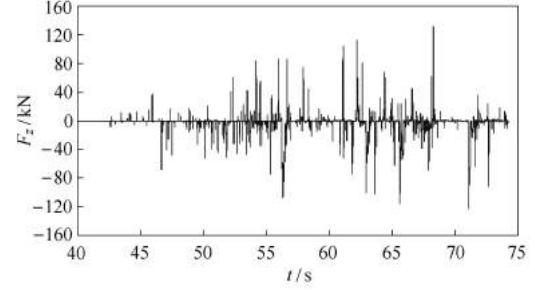
(b) Leg 2



(b) Leg 3



(c) Leg 2



(c) Leg 3

图 15 离散元模拟的海冰对自升式平台桩腿 2 的动冰力

Fig. 15 Dynamic ice loads on leg 2 of jack-up platform simulated with DEM

图 16 离散元模拟的海冰对自升式平台桩腿 3 的动冰力

Fig. 16 Dynamic ice loads on leg 3 of jack-up platform simulated with DEM

管自升式平台的整体结构和单个桩腿结构均是对称的, 但受海冰破碎的随机性影响, 3 个桩腿上的 F_y 和 F_z 均表现出正负交替的脉动特性。

对于冰力 F_x , 无论是最大值还是均值, 桩腿 1 上的冰力均明显高于桩腿 2, 3 上的冰力。这主要是由于海冰被桩腿 1 破碎后再与后续桩腿 2, 3 作用时, 其在计算域的中部形成自由边界, 侧向约束的减弱导致其与桩腿 2, 3 作用时的冰力降低。此外, 作用在桩腿 2, 3 上的 F_y 均值符号相反, 是由于作用于这两个桩柱上海冰边界条件的差异导致的。由于自升式平台桩腿 2, 3 之间海冰在被桩腿 1 破碎后形成自由边界, 在平台结构内侧的冰力要明显低于具有强约束条件外侧的冰力, 从而导致两个桩腿的 y 向冰力更多地指向结构内侧, 即桩腿 2 的 F_y 均值为正, 而桩腿 3 的 F_y 均值为负。从桩腿 2, 3 的 F_y 的时间历程来看, 桩腿 2 的脉动载荷明显正值较多, 桩腿 3 则相反。对于 3 个桩腿上的 F_z , 其最大值和均值均明显低于 F_x 和 F_y 。这主要由于 F_z 由桩腿表面摩擦产生。尽管也有部分斜向杆件会产生一定的竖向阻碍作用(如图 13 所示), 但其是在海冰与直立杆件发生前期破碎后而发生的, 作用效果要明显减弱。

以上计算结果表明, 该离散元模型可很好地模拟海冰与自升式平台相互作用的动力过程以及海冰破碎现象, 从而确定平台结构的冰载荷; 基于 GPU 的离散元方法在模拟真实尺度的海冰与自升式平台相互作用过程中体现出很好的适用性。

当海冰漂移方向不同时, 作用于多桩腿结构上的总冰力将存在明显的遮蔽效应; 此外, 海冰同时作用于竖向和斜向杆件上时, 具有明显的局部破坏特性。这可通过基于 GPU 的海冰离散元模型在后续工作中进一步进行数值分析。

4 结 论

为研究海冰与自升式海洋平台结构的动力作用过程以确定相应的冰载荷, 本文采用 CUDA 语言开发了基于 GPU 并行计算的离散单元模型。为提高大规模离散元的计算效率, 发展了颗粒单元接触判断的快速搜索算法。采用以上离散单元模型对海冰与渤海 JZ20-2 平台结构的作用过程进行了数值计算, 并与现场观测的数据进行了对比分析。在此基础上, 对海冰与自升式平台的相互作用过程进行了数值分析, 确定了相应的动冰力特性。

基于 GPU 并行算法的离散单元模型对深入研究海冰与海洋结构的作用特性具有很好的应用前景, 可对海冰与大型海洋结构在真实尺度下进行数值模拟。在下一步工作中将研究冰速、冰厚、冰向等因素对自升式平台的冰力影响, 并对平整冰、冰脊、碎冰等海冰与不同类型海洋平台结构的相互作用进行数值分析。

致谢 该文在 GPU 并行计算方面的工作得到了北京荣天汇海科技有限公司的技术支持, 在自升式平台结构的冰载荷分析中得到美国船级社 (ABS) 刘建成博士和 Han Yu 博士的指导帮助, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Sodhi D. Crushing failure during ice-structure interaction. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68: 1889-1921
- 2 Palmer A, Yue QJ, Guo FW. Ice-induced vibrations and scaling. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 60: 189-192
- 3 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
- 4 Moslet P O. Medium scale ice-structure interaction. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 54: 143-152
- 5 Wang Y, Yue Q, Guo F, et al. Performance evaluation of a new ice-resistant jacket platform based on field monitoring. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 71: 44-53
- 6 Timco GW, Johnston M. Ice loads on the caisson structures in the Canadian Beaufort Sea. *Cold Regions Science and Technology*, 2004, 38: 185-209
- 7 Jordaan IJ. Mechanics of ice-structure interaction. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68: 1923-1960
- 8 Kärnä T, Kamesaki K, Tsukuda H. A numerical model for dynamic ice-structure interaction. *Computers and Structures*, 1999, 72: 645-658
- 9 王刚, 武文华, 岳前进. 锥体接触宽度对冰排弯曲破坏模式影响的有限元分析. *工程力学*, 2008, 25(1): 235-240 (Wang Gang, Wu Wenhua, Yue Qianjin. FEM analysis on ice-bending failure mode with width effect of ice-cone interaction. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(1): 235-240 (in Chinese))
- 10 Gagnon R E. A numerical model of ice crushing using a foam analogue. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65: 335-350
- 11 Kuutti J, Kolari K, Marjavaara P. Simulation of ice crushing experiments with cohesive surface methodology. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 92: 17-28
- 12 Selvadurai APS, Sepehr K. Two-dimensional discrete element simulations of ice-structure interaction. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36: 4919-4940
- 13 Polojärvi A, Tuhkuri J. 3D discrete numerical modelling of ridge keel punch through tests. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 56: 18-29

- 14 Paavilainen J, Tuhkuri J, Polojärvi A. 2D numerical simulations of ice rubble formation process against an inclined structure. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 68: 20-34
- 15 Walther JH, Sbalzarini IF. Large-scale parallel discrete element simulations of granular flow. *International Journal for Computer-Aided Engineering and Software*, 2009, 26(6): 688-697
- 16 陈飞国, 葛蔚, 李静海. 复杂多相流动分子动力学模拟在 GPU 上的实现. *中国科学化学*, 2008, 38(12): 1120-1128 (Chen Feiguo, Ge Wei, Li Jinghai. The achievement of molecular dynamics simulation of complex multiphase flow based on GPU. *Scientia Sinica Chimica*, 2008, 38(12): 1120-1128 (in Chinese))
- 17 夏健明, 魏德敏. 图形处理器在大规模力学问题计算中的应用进展. *力学进展*, 2010, 40(1): 57-63 (Xia Jianming, Wei Demin. Advances in graphics processing units' applications to the computation of large-scale mechanical problems. *Advances in Mechanics*, 2010, 40(1): 57-63 (in Chinese))
- 18 张舒, 褚艳利. GPU 高性能运算之 CUDA. 北京: 中国水利水电出版社, 2009 (Zhang Shu, Chu Yanli. CUDA of GPU High Performance Computing. Beijing: China Water & Power Press, 2009 (in Chinese))
- 19 Pazouki A, Mazhar H, Negrut. Parallel collision detection of ellipsoids with applications in large scale multibody dynamics. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2012, 82: 879-894
- 20 Radeke CA, Glasser BJ, Khinast JG. Large-scale power mixer simulations using massively parallel GPU architectures. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65: 6435-6442
- 21 Longmore J, Marais P, Kuttel MM. Towards realistic and interactive sand simulation: A GPU-based framework. *Powder Technology*, 2013, 235: 983-1000
- 22 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. *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. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(1): 463-469 (in Chinese))
- 23 Scholtes L, Donze FV. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2012, 52: 18-30
- 24 Onate E, Rojek J. Combination of discrete element and finite element methods for dynamic analysis of geomechanics problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193: 3087-3128
- 25 Guo F, Yue Q, Xu N. Model test for studying ice forces on Jcack-up structure. In: Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, 2010
- 26 Nishiura D, Sakaguchi H. Parallel-vector algorithms for particle simulations on shared-memory multiprocessors. *Journal of Computational Physics*, 2011, 230: 1923-1938

(责任编辑: 陆启韶)

(责任编辑: 刘希国)

GPU-BASED DISCRETE ELEMENT MODELLING OF INTERACTION BETWEEN SEA ICE AND JACK-UP PLATFORM STRUCTURE¹⁾

Di Shaocheng Ji Shunying²⁾

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

Abstract During the interaction between sea ice and jack-up platform, the ice load is the key factor affecting vibration response and fatigue life of the structure. In this study, a discrete element method (DEM) with bonding-breaking function is developed to simulate the breakage characteristics of ice cover and the relative ice load on platform structure. According to the demand in the large scale DEM simulation between the sea ice and the jack-up platform structure with multi-legs, a parallel algorithm with high efficiency is established based on GPU (Graphical Processing Units) technique. In this algorithm, the element neighbor lists are generated with the sorting approach of cell index. The contact modes and contact forces between element-element and element-structure are determined. Meanwhile, the global ice load on jack-up structure can also be obtained. Moreover, the contact models between spherical element and cylindrical structure are also developed to determine the interaction between ice cover and jack-up structure. To validate this GPU-based DEM, the interaction between sea ice and conical jacket offshore structure is simulated and compared well with the field data in the Bohai Sea. Moreover, the ice loads on jack-up structure with multi-legs are simulated. The breakage characteristics of sea ice during the dynamic interaction and the ice loads on each structure legs are obtained. This GPU-based DEM can be applied to determine the ice loads on different offshore structures for ice-resisted structure design and ice-induced structure fatigue analysis.

Key words sea ice, jack-up platform, discrete element model, GPU parallel computation

Received 28 November 2013, revised 3 January 2014.

1) The project was supported by the Special Funding for National Marine Commonwealth Industry of China (201105016, 201205007), the National Natural Science Foundation of China (41176012) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20130041110010).

2) Ji Shunying, professor, research interests: computational mechanics of granular materials and its engineering applications. E-mail: jisy@dlut.edu.cn