

导管架平台碰撞极限承载力的非线性集群并行计算

闫相祯^{1,2}, 赵海培^{3,4}, 于本福^{1,2}, 许志倩^{2,3}, 杨秀娟^{1,2}, 季雪迎⁴

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学油气 CAE 技术研究中心, 山东青岛 266580;
3. 中国石油大学机电工程学院, 山东青岛 266580; 4. 胜利工程设计咨询有限公司, 山东东营 257000)

摘要:将并行计算理论和方法引入到导管架碰撞极限承载力的非线性分析中,根据美国石油学会 API RP 2A-WSD 标准中的方法建立桩腿非线性抗侧力-位移曲线,考虑桩-土非线性的特点分析导管架碰撞极限承载力。利用该方法对埕岛油田某导管架平台的碰撞极限承载力进行研究,分别得到平台在碰撞力作用下的平台顶部荷载-位移曲线、主桩腿弯矩变化、Mises 应力变化曲线等。将集群并行运算的结果与单一 PC 机的结果进行对比,验证并行计算的计算精度和计算效率,同时研究不同影响因素对并行加速比和并行效率的影响。计算结果表明:平台主桩腿最大位移、应力随碰撞位置的降低而增大;碰撞位置越低,平台的碰撞极限承载能力越大;并行计算所得到的结果与单一 PC 机运算得到的结果相差很小,是可信的;并行加速比随着参与并行结点个数的增加而增大,并行效率随着参与并行结点个数的增加而下降;随着模型节点和单元数目的增多,集群的并行效率提高,并且越复杂的模型和结构在进行计算时集群并行计算能力的优势越明显。

关键词:导管架平台; 并行计算; 碰撞极限承载力; 非线性分析; 并行效率

中图分类号:TE 951 **文献标志码:**A

Nonlinear analysis of collision ultimate bearing capacity with offshore jacket platform based on cluster parallel computing

YAN Xiang-zhen^{1,2}, ZHAO Hai-pe^{3,4}, YU Ben-fu^{1,2}, XU Zhi-qian^{2,3}, YANG Xiu-juan^{1,2}, JI Xue-ying⁴

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Oil and Gas CAE Technology Research Center in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
3. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
4. Shengli Engineering & Constructing Company Limited, Dongying 257000, China)

Abstract: By means of parallel computing, the nonlinear analysis of collision ultimate bearing capacity was studied for offshore jacket platform in Chengdao Oilfield. The nonlinear p - y curves of pile were obtained based on API RP 2A-WSD. The collision ultimate bearing capacity was analyzed considering the nonlinear characteristics of pile-soil. The displacement-load curves of platform, moment curves and Mises stress curves of main legs were obtained according to this method. The results based on parallel computing were compared with the results based on personal computer. In addition, the factors affecting parallel efficiency were also investigated. The results show that the collision ultimate bearing capacity, maximum displacement and stress of offshore platform legs decrease with the increase of impact location height. Parallel computing results can meet the actual engineering demands, and have little difference from personal computer ones. The parallel speedup ratio will increase with the increase of parallel node number, and the parallel efficiency will decrease with the increase of parallel node number. The advantages of parallel computing are more obvious when the models are more complex.

Key words: offshore jacket platform; parallel computing; collision ultimate bearing capacity; nonlinear analysis; parallel efficiency

导管架平台与船舶之间的碰撞对平台及海洋环境造成的破坏往往是灾难性的,因此合理分析碰撞对导管架平台产生的影响是导管架平台安全分析的关键^[14]。为了提高导管架平台抵抗外载的能力,导管架平台在设计过程中通常会留有很大的冗余度,使得导管架平台成为高次超静定体系。此外平台在海洋环境的作用和影响下,材料会出现腐蚀、退化的现象,性能发生变化^[5-9],因此导管架平台碰撞极限承载力分析问题属于几何非线性和材料非线性的大变形非线性问题^[10-11],而这类非线性问题的数值模拟耗时很长,尤其当所要解决的问题包含大量节点和单元时,耗时长的问题尤为突出,在没有超级计算机的条件下,一般的解决办法是通过粗化网格节省计算时间,而这样做将会导致计算精度和计算效率下降。为了解决计算时间和计算精度两者之间的矛盾,许多专家和学者^[12-14]引入了并行计算的思想,例如杜新光等^[15-17]采用并行计算方法对结构地震反应进行了分析,认为拆分成多个子结构的并行计算可以得到与整体分析相一致的解;张巍等^[18-20]采用并行计算方法对高拱坝的地震损伤破坏进行了数值模拟分析,分析结果表明采用并行计算可以突破计算能力对大规模数值模拟的限制。以上学者的研究代表了并行计算方法的最新动态,为本文工作的开展提供了参考和借鉴,但是利用并行计算方法进行导管架平台碰撞分析还比较少见。因此,笔者运用并行计算的方法和理念,对埕岛油田某导管架平台进行碰撞极限承载力分析,为提高导管架平台碰撞计算速率和精度提供一种新的思路和方法。

1 基于并行计算的导管架碰撞非线性分析

1.1 导管架碰撞非线性求解

对于导管架平台的碰撞问题,其非线性稳定性方程可以表示为

$$(K_E(u) + K_\sigma(u) + K_{NL}(u))\{u\} = \{P\}. \quad (1)$$

式中, $K_E(u)$ 、 $K_\sigma(u)$ 、 $K_{NL}(u)$ 分别为平台结构的弹性刚度矩阵、几何刚度矩阵、弹塑性刚度矩阵; $\{u\}$ 、 $\{P\}$ 分别为平台变形和外载荷矩阵。

由于稳定方程中的刚度矩阵随着荷载的加载过程不断变化,所以必须采用合理的荷载步增量逐步寻求结构的极限承载力。把导管架平台的极限承载力 P_{cr} 分成 n 级载荷增量:

$$P_{cr} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i. \quad (2)$$

在第 i 级载荷增量 ΔP_i 作用下,相应的增量方程为

$$(K_E(u_{i-1}) + K_\sigma(u_{i-1}) + K_{NL}(u_{i-1}))\{\Delta u_i\} = \{\Delta P_i\}. \quad (3)$$

式中, $K_E(u_{i-1})$ 、 $K_\sigma(u_{i-1})$ 和 $K_{NL}(u_{i-1})$ 分别表示以构形为 u_{i-1} 作为参考时结构的弹性刚度、几何刚度和弹塑性刚度矩阵。

运用 Newton-Raphson 平衡迭代法对非线性方程式(3) 进行求解,为保证准确获得结构的极限承载力,在进行 Newton-Raphson 平衡迭代计算时,采用了残余应力和位移两种收敛准则。残余应力收敛准则为

$$\|F\|_r^{(k)} \leq \varepsilon_a^F \|F\|_0^{(k)},$$

其中

$$\|F\|^{(k)} = \left(\sum_{i=1}^n (F_i^{(k)})^2 \right)^{1/2}. \quad (4)$$

式中, ε_a^F 为允许应力相对误差,取 0.001; $\|F\|_r^{(k)}$ 、 $\|F\|_0^{(k)}$ 分别表示结构的第 k 个位移方向第 r 次迭代之后结点残余力二范数与迭代刚开始时的载荷二范数。

位移收敛准则为

$$\|U_{r+1}\| - \|U_r\| \leq \varepsilon_a^U \|U_1\|, \quad (5)$$

其中

$$\|U\|^{(k)} = \left(\sum_{i=1}^n (U_i^{(k)})^2 \right)^{1/2}. \quad (6)$$

式中, ε_a^U 为允许位移相对误差,取 0.01; $\|U_{r+1}\|$ 、 $\|U_r\|$ 表示前后两次迭代所得位移增量; $\|U_1\|$ 为首次迭代时的位移增量。

1.2 并行计算模型

目前常用的并行计算模型有多种,例如:PRAM 模型、BSP 模型、Postal 模型、LogP 模型、QSM 模型等,其中 BSP 模型的并行算法有较好的可伸缩性、可移植性以及可预测性,适合在集群系统上运行^[21]。BSP 模型的代价公式为

$$T_s = \{w_i\}_{\max} + \{gh_i\}_{\max} + l. \quad (7)$$

式中, T_s 为超步执行时间; w_i 、 gh_i 分别为进程 i 的计算时间和通信时间; l 为同步时间。

BSP 模型的特点是用超步作为并行计算的基本单位,其计算由一系列用全局同步分开的超步组成,每个超步按顺序分为计算、通信、同步 3 个阶段,如图 1 所示。

基于 BSP 模型的集群并行计算示意图如图 2 所示。在集群上开发的软件具有良好的可移植性,现有的计算机集群一般以 Linux 作为操作系统。集

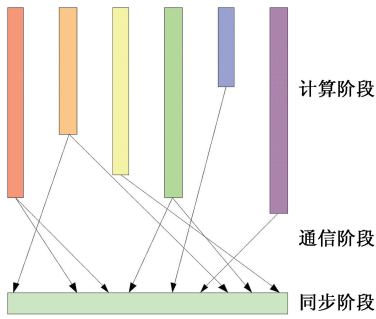


图 1 BSP 模型超步结构

Fig. 1 Superstep structure of BSP model

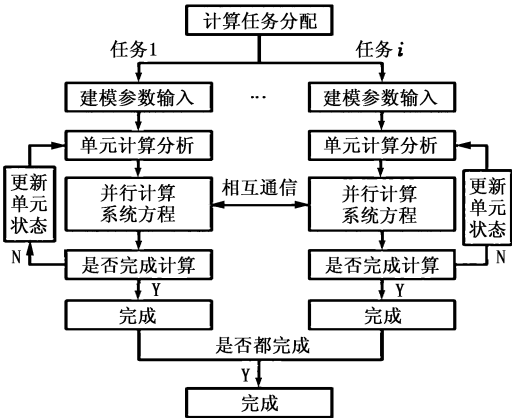


图 2 并行计算示意图

Fig. 2 Illustration of parallel computing

群系统通常采用通用局域网技术,而集群计算能力与网络通信能力的不平衡将会限制集群并行计算性能,因此在程序设计时须遵循几个原则:(1)任务分配的均衡;(2)程序设计尽量减少通信;(3)各子任务独立。

2 工程实例分析

2.1 导管架平台有限元模型建立

对埕岛油田某导管架海洋平台进行分析,平台形式为固定式导管架结构,采用四腿斜导管架矩形布置,四桩腿的倾斜度均为 7 : 1。导管架顶标高 4.5 m,工作点标高 5.5 m,设计水深为 14.7 m,桩灌入深度 41.3 m,桩径 1.2 m。上部组块仅一层,标高为 10.6 m,主尺寸为 13 m×15 m。应用 ANSYS 有限元软件将平台模拟成空间梁、管组合结构,平台梁采用 beam188 单元,平台甲板采用 shell63 单元,导管架采用可以进行非线性分析的 pipe20 单元进行模拟。上层设备组块简化为质量块施加在桩腿标高为 10.6 m 的位置。

平台材料模型采用 ANSYS 提供的多线性随动强化曲线 (MKIN) 模拟平台材料的非线性变化,材料的基本参数:密度、弹性模量、泊松比、屈服极限和强度极限分别为 7 800 kg/m³、206 GPa、0.3、420 MPa、580 MPa。

平台上部组块质量以质量点单元的形式施加在平台顶部导管架腿与平台甲板相交处。由于在实际工况中,当平台与船舶碰撞事件发生时,其碰撞力大小远远大于平台受到的其他载荷诸如风载荷或波浪载荷等,因此在进行有限元分析时仅考虑碰撞力影响,忽略其他载荷。为研究不同工况下平台的碰撞响应,选取了 10 种具有代表性的工况,如表 1 所示,各工况碰撞位置及碰撞方向如图 3 所示。

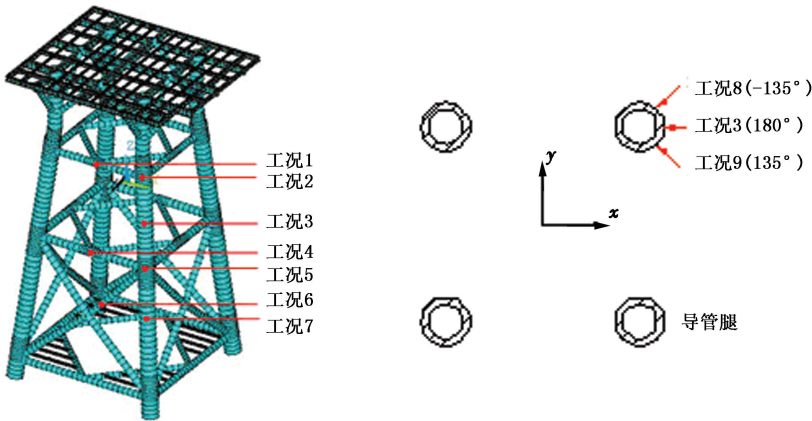


图 3 碰撞位置及碰撞方向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of impact location and impact direction

考虑本工程所处海域的工程地质资料及土层性质,根据美国石油学会 API RP 2A-WSD 中提供的方法^[22],采用周期性载荷所对应的侧向土反力计算方

法来模拟桩腿非线性抗侧力-位移 (p - y) 曲线。埕岛区域的侧向土反力 p - y 曲线由试验得到。

表 1 平台碰撞计算工况		
Table 1 Impact calculation condition of platform		
工况	碰撞位置	碰撞方向
1	标高 3.5 m 处水平撑	沿 x 方向
2	标高 3.5 m 处导管腿	沿 x 方向
3	标高 0.0 m 处导管腿	沿 x 方向
4	标高 -4.0 m 处水平撑	沿 x 方向
5	标高 -4.0 m 处导管腿	沿 x 方向
6	标高 -8.0 m 处斜撑	沿 x 方向
7	标高 -8.0 m 处导管腿	沿 x 方向
8	标高 0.0 m 处水平撑	与 x 轴成 -135° 夹角
9	标高 0.0 m 处水平撑	与 x 轴成 135° 夹角
10	无碰撞力作用,仅受自重、波浪、风载荷作用; 取 50 a 重现期,波高:6.83 m。对应周期: 8.6 s;风速:28.0 m/s	

2.2 导管架平台桩腿碰撞非线性分析

不考虑碰撞影响(工况 10)时,平台最大位移、Mises 应力云图见图 4。从图 4 可以看出,不考虑碰撞影响时平台最大位移、Mises 应力较小,均与平台位移应力的许用值(位移许用值 0.253 m 和屈服应力 420 MPa)相差较大,平台安全可靠性较大。

不同工况下平台主桩腿沿深度方向的节点位移、弯矩、Mises 应力分布如图 5 所示。从图 5(a)可

以看出,不考虑碰撞方向影响时,平台主桩腿最大位移随碰撞位置降低而增大,且碰撞位置位于支撑结构时桩顶最大位移较碰撞位置位于桩腿时减小了 20% ~ 40%,支撑构件的吸能效果较明显。碰撞方位角为 180° 和 135° 时主桩腿沿深度方向的位移曲线几乎重合,且其桩顶最大位移几乎达到了碰撞方位角为 -135° 时的两倍,方位角为 135° 时平台抗碰撞性能最佳。

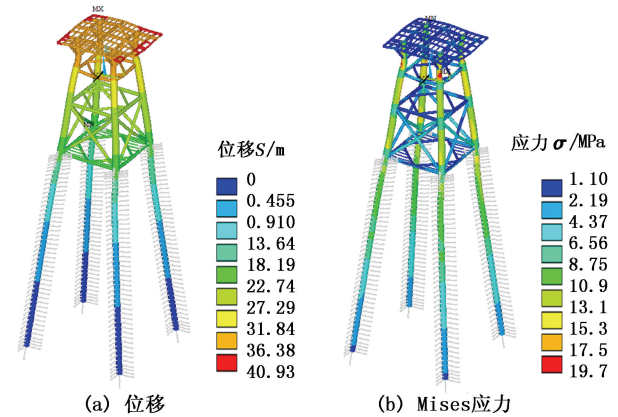


图 4 工况 10 时位移和应力云图
Fig. 4 Contours of displacement and Mises stress in case10

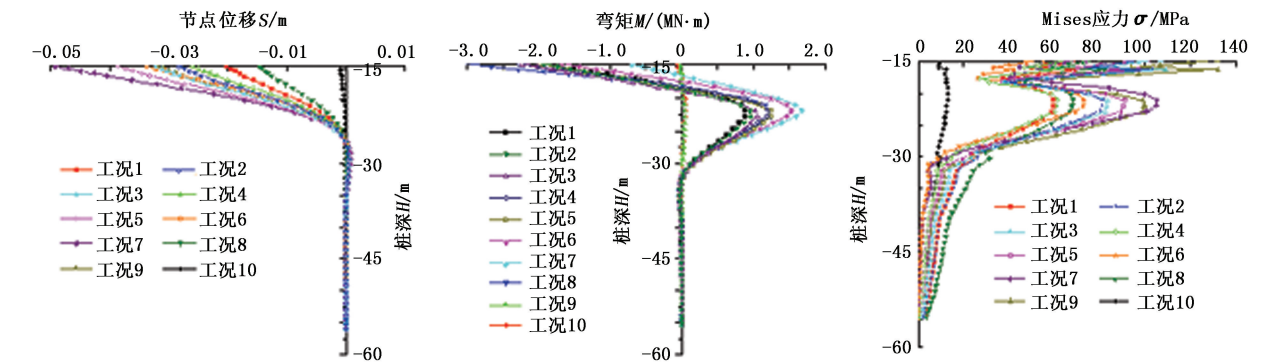


图 5 平台主桩腿位移、弯矩和 Mises 应力曲线
Fig. 5 Horizontal displacement, moment and Mises stress of main pile along depth

从图 5(b)可以看出,桩腿所受弯矩的最大值一般出现在两个位置,其分别表现为正弯矩和负弯矩。最大正弯矩出现在标高-22.5 m 附近,最大负弯矩位于泥面处。反弯点则出现在-18 m 标高附近。

从图 5(c)可以看出,桩腿 Mises 应力与该桩腿所受到的弯矩有关,表现为所受弯矩越大则该处应力也越大。标高-18 m 处约为反弯点处,弯矩最小,此处应力值也出现一定的减小;在标高-22 m 处,为桩腿除泥面外弯矩最大的位置,其对应的桩腿等效应力也较大。

考虑导管架平台结构的材料非线性和几何非线性,得到平台碰撞力作用下的平台顶部载荷-位移曲线,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,当碰撞方位不同时,以碰撞方位角为 -135° 时的碰撞极限承载力最大;当碰撞位置均位于桩腿时,碰撞作用使平台发生整体倾覆,此种条件下碰撞作用点越低平台的碰撞极限承载能力越大,但当碰撞作用点接近于泥面时,碰撞作用主要导致平台桩腿的局部变形,对承载不利,此时其碰撞极限承载力较低。

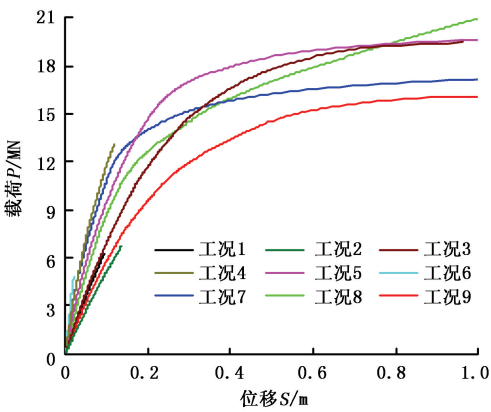


图 6 平台顶部位移-载荷曲线

Fig. 6 Displacement-load curve of platform

2.3 计算模型优选

为了验证不同的模型规模条件下该网络集群的并行计算效率,在数值计算中,建立导管架海洋平台模型时采用了不同的网格划分方法,得到网格疏密不同的 4 种有限元模型,各有限元模型所包含的节点及单元数如表 2 所示。

表 2 不同模型包含的单元及节点数

Table 2 Nodes and units of different models

模型	单元数 N	单元数比值	节点数 n	节点数比值
模型 1	107 453	1.00	158 076	1.00
模型 2	243 862	2.27	331 089	2.09
模型 3	693 974	6.46	856 667	5.42
模型 4	1 410 432	13.13	1 741 271	11.02

分别对这 4 种有限元模型在相同的受力及边界条件下进行了导管架平台的碰撞极限承载力研究,得到了各种不同网格划分方法下经数值模拟得到的导管架平台的极限强度见表 3。4 种模型下的载荷-位移曲线见图 7。

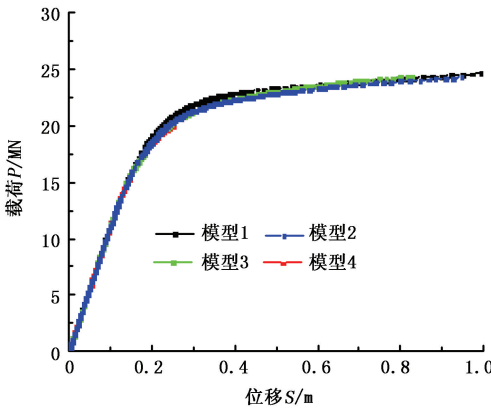


图 7 不同模型的载荷-位移曲线

Fig. 7 Displacement-load curves with different models

由表 3 可以看出,对 4 种不同网格密度条件下的模型进行碰撞极限承载力分析时,除模型 1 外,其

他几个模型的计算结果相差不大,由此说明模型 2 中的网格划分密度对于解决碰撞极限承载力问题已经足够。因此,在计算中为节省计算机资源,采用模型 2 中的网格划分方式就可以得到较精确的计算结果。

表 3 不同模型的碰撞极限强度

Table 3 Ultimate bearing capacity of different models

模型类型	碰撞极限承载力 P_{cr}/MN	顶部最大位移 $S_{\max}/\text{m}$	侧移限值对应的载荷 P'/MN
模型 1	26.340	3.227	22.260
模型 2	24.300	0.948	21.612
模型 3	24.200	0.902	21.515
模型 4	24.400	0.913	21.522

2.4 碰撞极限承载力并行计算效果分析

为了比较单一 PC 机与高性能网络集群以及网络集群在考虑多结点并行运算与不考虑多结点并行运算条件下运算效率的差别,对同一模型进行多次模拟计算,分别在单一 PC 机上、在网络集群上不考虑并行运算时、以及在网络集群上考虑并行运算结点数为 1 ~ 8 时,记录每次计算耗时,计算其加速比,验算网络集群的并行效率。

不考虑网络集群的并行运算时,分别在单一 PC 机与网络集群上对模型 2 的导管架海洋平台进行碰撞极限承载力分析,计算耗时情况见表 4。

表 4 计算效率对比

Table 4 Comparison of computational efficiency

类型	结点数 N'	最大 Mises 应力 $\sigma_{\max}/\text{MPa}$	运行时间 T/h	时间对比
PC 机	—	472	$T_1 = 53.34$	
集群非并行运算	—	472	$T_2 = 10.63$	$T_1/T_2 = 5.02$
集群并行运算	1	470	$T_3 = 15.52$	$T_3/T_2 = 1.46$
	2	469	$T_4 = 10.91$	

由表 4 可以看出,进行导管架海洋平台碰撞极限承载力分析时,集群的运算效率较单一 PC 机提高到 5.02 倍。计算机集群非并行运算计算效率大体上等效于集群考虑并行运算时的双结点运算效率,并且大于集群单结点时的运算效率,提高到 1.46 倍。从运行结果看,并行计算所得到的结果与单一 PC 机运算得到的结果相差很小,因此是可信的。

使用网络集群进行并行计算,并行结点为 1 ~ 8 时,得到的网络集群并行计算结果如表 5 所示。其中,加速比是指运行相同任务情况下的串行运行时间 T_1 (单核)/并行运行时间 (多核);并行效率是指加速比/参与并行计算的核数。加速比表明了多核运算速率较单核运算速率的提高倍数,若加速比大

于 1,则表示多核运算速率大于单核运算速率;若加速比小于 1,则表示多核运算速率小于单核运算速率。并行效率则是一个表征在运算过程中是否能够充分发挥各处理机作用的参数,越接近于 1 表明各处理机的功能发挥得越充分,反之则表明功能发挥越不充分。

从表 5 可以看出,加速比随着参与并行结点数的增加而增大,例如结点数为 2 时,加速比为 1.4230,当结点数增大到 8 时,加速比为 2.730 4,但计算增大的幅度逐渐变缓,例如结点数分别为 7、8 时,加速比基本相同。并行效率随着参与并行结点数的增加而下降,例如结点数为 1 时,并行效率为 1.000 0,当结点数增大到 8 时,并行效率为 0.351 3。并行效率下降的原因主要是导管架海洋平台在建模时采用线单元模拟管状或梁结构,且单元及结点数不多,有限元模型相对简单,难以充分发挥网络集群的并行运算优势,实际计算中,若并行计算效率能超过 80%,将是一种比较理想的情况。

表 5 不同结点的计算结果对比

Table 5 Comparison of calculation results with different parallel numbers			
结点数 N'	运算时间 t/h	加速比	并行效率 η
1	15.52	1.0000	1.0000
2	10.91	1.4230	0.7115
3	8.36	1.8570	0.6190
4	7.09	2.1888	0.5472
5	6.38	2.4315	0.4863
6	5.85	2.6520	0.4420
7	5.67	2.7370	0.3910
8	5.52	2.8104	0.3513

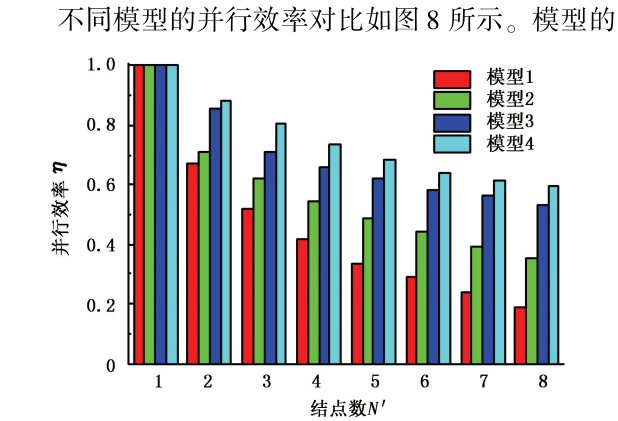


图 8 结点数对并行效率的影响
Fig.8 Influence of parallel numbers on computing efficiency

节点和单元数对比见表 2。从图 8 可以看出,随着模型节点和单元数增加,集群的并行效率提高,当并

行结点数为 8 时,模型 2 的并行效率为 0.351 3,模型 4 的并行效率为 0.592 9,这一现象说明,越复杂的模型和结构在进行计算时,集群并行计算能力的优势就越明显。

3 结 论

- (1)得到了平台在碰撞力作用下的平台顶部载荷-位移、平台主桩腿弯矩变化和 Mises 应力曲线。
- (2)平台主桩腿最大位移、应力随碰撞位置的降低而增大,且碰撞位置位于支撑结构时的最大位移、应力小于碰撞位置位于桩腿时的值;碰撞位置越低平台的碰撞极限承载能力越大,但当碰撞作用点接近于泥面时,碰撞作用将导致平台桩腿的局部变形,对承载不利,此时其碰撞极限承载力较低。
- (3)并行计算的结果与单一 PC 机运算得到的结果相差很小,因此是可信的;并行加速比随着参与并行结点数的增加而增大,但计算增大的幅度随着并行结点数的增加逐渐变缓,并行效率随着参与并行结点数的增加而下降;随着模型节点和单元数增加,集群的并行效率提高,并且越复杂的模型和结构在进行计算时,集群并行计算能力的优势越明显。

参考文献:

[1] 杨亮, 马骏. 冰介质下的船舶与海洋平台碰撞的数值仿真分析[J]. 中国海洋平台, 2008,23(2):29-33.
YANG Liang, MA Jun. Numerical simulation analysis for the collision between offshore platform under the sea ice medium[J]. China Offshore Platform, 2008,23(2):29-33.

[2] 陈铁云, 朱正宏. 海洋平台碰撞和损伤分析的进展[J]. 力学进展, 1989,19(4):454-463.
CHEN Tie-yun, ZHU Zheng-hong. Advances in analysis of collision and damage of offshore platform[J]. Advances in Mechanics, 1989,19(4):454-463.

[3] 金伟良, 龚顺风, 宋剑, 等. 大型船舶碰撞引起的海洋导管架平台结构损伤分析[J]. 海洋工程, 2003,21(2):20-25.
JIN Wei-liang, GONG Shun-feng, SONG Jian, et al. Damage analysis of offshore jacket platform structures due to collision of large barges [J]. The Ocean Engineering, 2003,21(2):20-25.

[4] 孙彦杰, 李良碧, 尹群. 碰撞、爆炸灾害下海洋平台风险评估研究初探[J]. 中国海洋平台, 2007,22(5):38-43.
SUN Yan-jie, LI Liang-bi, YIN Qun. Preliminary study on risking assessment of offshore platform under collision and

- gas explosion hazards[J]. China Offshore Platform, 2007, 22(5):38-43.
- [5] 许亮斌, 陈国明. 考虑断裂和腐蚀失效的海洋平台动态可靠性研究[J]. 石油学报, 2009, 30(1):132-135.
- XU Liang-bin, CHEN Guo-ming. Evaluation method for dynamic reliability of offshore platform considering fracture and corrosion failures[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1):132-135.
- [6] 许亮斌, 陈国明. 考虑疲劳失效的海洋平台动态可靠性分析[J]. 石油学报, 2007, 28(3):131-134.
- XU Liang-bin, CHEN Guo-ming. Dynamic reliability analysis of offshore platform considering fatigue failure[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3):131-134.
- [7] 闫相祯, 刘锦昆, 许志倩, 等. 服役海底管道钢疲劳可靠性试验与海底管道寿命预测[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010, 34(5):109-113.
- YAN Xiang-zhen, LIU Jin-kun, XU Zhi-qian, et al. Evaluation method for dynamic reliability of offshore platform considering fracture and corrosion failures[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(5):109-113.
- [8] 陈养厚, 陈国明, 林红. 滩海石油平台桩基冲刷防治及CFD仿真[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2009, 33(2):112-116.
- CHEN Yang-hou, CHEN Guo-ming, LIN Hong. Scour prevention of offshore platform pile foundation and CFD simulation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(2):112-116.
- [9] 陈团海, 陈国明, 许亮斌. 基于台风验证载荷的平台时变可靠性分析与更新[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011, 35(3):129-134.
- CHEN Tuan-hai, CHEN Guo-ming, XU Liang-bin. Time-dependent reliability analysis and updating of offshore platforms based on typhoon proof load[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(3):129-134.
- [10] 杨秀娟, 修宗祥, 闫相祯, 等. 基于疲劳可靠性优化设计的深水导管架平台多级模糊选型[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010, 34(2):98-103.
- YANG Xiu-juan, XIU Zong-xiang, YAN Xiang-zhen, et al. Fuzzy lectotype of deep water jacket platform based on fatigue reliability optimization design[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(2):98-103.
- [11] 杨秀娟, 修宗祥, 闫相祯, 等. 深水导管架海洋平台随机疲劳寿命可靠性分析[J]. 机械强度, 2011, 33(2):264-269.
- YANG Xiu-juan, XIU Zong-xiang, YAN Xiang-zhen, et al. Random fatigue life reliability analysis of deep water jacket platform [J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(2):264-269.
- [12] SVYATOSLAV C, ISKANDER A. Plasma at atmospheric pressure: fluidic modeling and parallel computing [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(10):2962-2978.
- [13] EVANS J J, LUCAS C E. Parallel application-level behavioral attributes for performance and energy management of high-performance computing systems[J]. Cluster Computing, 2013, 16(1):91-115.
- [14] VELEZ S, MARAVELIAS C T. A branch-and-bound algorithm for the solution of chemical production scheduling MIP models using parallel computing[J]. Computers and Chemical Engineering, 2013, 55(8):28-39.
- [15] 杜新光, 金先龙, 陈向东. 基于并行计算的大跨度斜拉桥行车安全分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7):5-8.
- DU Xin-guang, JIN Xian-long, CHEN Xiang-dong. Simulation analysis for running safety of a light-rail train on a long span cable-stayed bridge based on parallel computation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(7):5-8.
- [16] 刘赞, 王永贵. C/S模式并行计算架构设计及其实现方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(7):889-893.
- LIU Yun, WANG Yong-gui. Parallel computing architecture design and implementation method based on C/S mode [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(7):889-893.
- [17] 张钰, 潘鹏. 考虑子结构间相互作用的结构地震反应并行计算方法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(5):119-123.
- ZHANG Yu, PAN Peng. Parallel computing method for structural seismic response analysis considering interaction between substructures[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5):119-123.
- [18] 张巍, 陈清军. 土桩结构非线性相互作用体系行波效应的并行计算分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2012, 39(6):19-25.
- ZHANG Wei, CHEN Qing-jun. Parallel computing analysis of the traveling wave effect of soil-pile-structure nonlinear interaction system[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(6):19-25.
- [19] 钟红, 林皋. 高拱坝地震损伤破坏的并行计算研究[J]. 计算力学学报, 2010, 27(2):218-224.
- ZHONG Hong, LIN Gao. Research on parallel computing of damage prediction of high arch dams subjected to earth-

- quakes[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010,27(2):218-224.
- [20] 周磊, 谭伟伟, 张凯宁, 等. 基于深腾 7000 系统的大规模 CFD 并行计算[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2011,39(s1):87-90.
- ZHOU Lei, TAN Wei-wei, ZHANG Kai-ning, et al. Massively CFD parallel computing based on DeepComp 7000 system[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech (Natural Science Edition), 2011,39(s1):87-90.
- [21] 宋安军, 彭勤科, 胡保生. 并行计算模型在集群环境下的适应性[J]. 计算机工程, 2003,29(18):4-5.
- SONG An-jun, PENG Qin-ke, HU Bao-sheng. Adaptability of parallel computing model in the NOWs environment [J]. Computer Engineering, 2003,29(18):4-5.
- [22] INSTITUTE A P. API RP 2A-WSD recommended practice for planning [M]//Designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design. Washington, D. C.: API Publishing Services, 2000.
- (编辑 沈玉英)