冰激导管架海洋平台结构的 FEM-DEM 计算分析软件

使用说明

编写人:王帅霖 邵 帅 季顺迎

大连理工大学

2015年7月9日

		目 录	
第-	一部ク	分 软件简介	
	1.1	软件名称	
	1.2	软件行业	3
	2.1	前处理	5
	2.2	计算模型	9
		2.2.1 离散单元模型:	9
		2.2.2 有限元计算模型:	
		2.2.3 耦合接触模型:	
	2.3	后处理	16
		2.3.1 离散元后处理:	16
		2.3.2 有限元后处理:	21
		2.3.3 计算结果数值分析:	23

第一部分 软件简介

寒区海洋平台长期服役在复杂的海洋环境中并受到多种环境荷载的作用,其中在冰荷载激励 下产生的强烈振动是影响平台结构安全的重要因素,也是导致其累积损伤和疲劳寿命的关 键。由于海冰大多以离散碎块的形式漂浮于海面,具有很强的非连续性;当海冰相互碰撞或 与海洋平台结构相互作用时,会进一步发生破碎。对于海冰的这种非连续分布特性及其破碎 现象,可采用离散元方法(DEM)进行数值分析。海洋平台结构在海冰作用下的强烈振动可 采用有限元方法(FEM)进行数值分析。本软件考虑海冰与海洋平台结构的相互作用,将海 冰的离散元方法与海洋平台结构的有限元方法相结合,建立了冰激海洋平台结构振动的 DEM-FEM 耦合模型。该模型提出了海冰与海洋平台结构在接触面上的接触算法,并由此计 算分析海冰作用下海洋平台结构的振动响应以及海冰破碎特性。

本软件主要包括三大模块:建模模块,力学计算模块和结果分析模块。建模模块可采用 具有粘结-破碎功能的球形离散单元构造可破碎的海冰平整冰模型。此外,还需读取其余连 续体部分的有限元模型信息(有限元模型信息可通过 ANSYS 等商业有限元软件生成)。力学计 算模块可通过搜索、接触判断、内力迭代等方式获得海冰与海洋结构作用时的力学行为,并 通过耦合接触算法将载荷传递至海洋平台,采用基于动力子结构(模态综合法)的有限元方 法对海洋平台进行动力分析。结果分析模块可实现海冰与海洋平台相互作用的动态显示,该 模块具有旋转、缩放、透视等功能,并将计算结果输出为 AVI 格式的视频文件,还可输出 自定义时刻的 BMP、PNG 等格式的图形文件。平台结构的冰荷载、位移、振动加速度等力 学信息可通过 office excel 或 origin 软件进行显示。

1.1 软件名称

- 中文: 冰激导管架海洋平台结构的 FEM-DEM 计算分析软件 简称 IceFEM-DEM
- 英文: Computational and Analytical Software of Ice-Induced Vibration of Jacket Offshore Platform Based on Coupled Finite Element- Discrete Element Method

1.2 软件行业

适用行业:海洋平台力学行为及其安全性评估。

软件用途:针对海洋平台与海冰相互作用的动力特性,IceFEM-DEM 可采用离散元方法分 析非连续介质区域的细观力学行为,同时采用有限元并通过适当划分子结构对连续域进行动 力分析,并利用接触耦合算法实现两区域间力学参数的传递,实现对海冰作用下海洋平台结 构整体动力学分析。通过对海洋平台的动力响应和海冰的破碎模式分析为海洋平台的安全使 用和结构设计提供借鉴作用。

软件功能:

(1) 平整冰的离散元建模

对于平整冰可采用具有粘接-破碎性能球体单元进行构造,每个粘接颗粒单元间具有一定的 粘结强度以传递两个粘接单元间的作用力和力矩。其具有物理意义明确、接触计算简单、接 触判断快速等优点,在海冰与结构物相互作用的计算中有很大的优势。由于海冰强度与温度、 盐度、加载速率、冰晶结构等诸多因素密切相关,因此在海冰离散元模型中应考虑以上因素 影响下的破碎准则。海冰的力学参数可在离散元建模模块中给定。

(2) 海洋平台导管架结构的有限元建模

根据导管架平台的结构特性,利用有限元中的梁单元进行构造,并对平台的上部结构和桩基进行了适当的简化。为了应用子结构法,建模时需要对平台进行子结构划分并合理的编号。 有限元建模可借助于 ANSYS 等商业有限元分析软件生成模型信息文件,此后利用软件的有限元模型读取模块读入即可。连续体材料的力学参数可在有限元材料性质模块中给定。

(3) 海冰与导管架海洋平台的离散元-有限元耦合作用数值计算

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,同时将得到的冰载荷 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。

(4) 模拟结果的显示与分析

IceFEM-DEM 软件可实现海冰与海洋平台相互作用的动态显示,该模块具有旋转、缩放、透视等功能,并将计算结果输出为 AVI 格式的视频文件,还可输出自定义时刻的 BMP、 PNG 等格式的图形文件。平台结构的冰荷载、位移、振动加速度等力学信息可通过 office excel 或 origin 软件进行显示。

软件特点:

(1) 集成了建模模块,计算模块和结果分析模块,集前处理与后处理于一体。

- (2) 能够分析非连续体材料与连续体材料间相互作用的问题
- (3) 建模、结果分析方便直观。

第二部分 使用说明

2.1 前处理

(a)平整冰离散元建模



图 2.1.1 平整冰离散单元构造

通过程序的输入文件,输入海冰的尺寸,以及颗粒的大小,就可以生成海冰的离散元模型, 如下图所示。

5.24	2015/5/24 21:49	Intel Fortran Pro	4 KB
ANIMATION_3D	2015/6/2 16:24	DAT 文件	23,702 KB
DSM	2015/6/2 8:02	DAT 文件	46 KB
EACHLEG	2015/6/2 16:58	DAT 文件	465 KB
EFORCE 输入文件	2015/6/2 16:58	DAT 文件	147 KB
🖹 fem-dem	2015/6/3 20:55	Fortran Source	137 KB
ICEFORCE	2015/4/15 18:57	C/C++ Header	10 KB
ICEFORCE	2015/6/2 8:01	INP 文件	2 KB
📖 іт-х	2014/5/28 19:41	DAT 文件	1 KB
😹 Jackup	2013/10/18 13:14	应用程序	8,406 KB
🥮 NE1	2015/6/2 8:02	DAT 文件	11 KB
NE2	2015/6/2 8:02	DAT 文件	8 KB
NEWFRAME	2015/5/24 15:43	INP 文件	17 KB
OSM1	2015/6/2 8:01	DAT 文件	1,756 KB
OSM2	2015/6/2 8:02	DAT 文件	937 KB
🥮 ОТР	2015/6/2 8:01	DAT 文件	2 KB
I SM	2015/5/8 9:23	DAT 文件	7,585 KB
🥮 SM1	2015/6/2 8:01	DAT 文件	1,756 KB
🥘 SM2	2015/6/2 8:01	DAT 文件	937 KB
TIME-CXACCE	2015/6/2 16:58	DAT 文件	10,324 KB
TIME-CXDISTANCE	2015/6/2 16:58	DAT 文件	136 KB
TIME-CYACCE	2015/6/2 16:58	DAT 文件	10,324 KB
TIME-CYDISTANCE	2015/6/2 16:58	DAT 文件	136 KB
TIME-CZACCE	2015/6/2 16:58	DAT 文件	10,324 KB
TIME-CZDISTANCE	2015/6/2 16:58	DAT 文件	136 KB
TIME-SCXACCE	2015/6/2 16:58	DAT 文件	136 KB
ZFC	2015/6/6 20:31	INP 文件	18 KB

	IC	EFORCE - 记事本	- • ×
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看	(V) 帮助(H)		
5.0 nstep 50 50 10 30 0 1.01	<pre>(Tstrain: nstep = b*Tstrain/(dudy*dt)) (CTime(nstep .or. Tstrain): Control variable for . (NFrint: output times, and iprint=nstep/Nprint. on (NLast, used to output the last portion of partic) (isearch) (icont) (IPATTERN: 0-Uniform size, 1-two size, 2-Uniform of (DMAX)</pre>	the total calculationg time) utput) Le information) distritution, 3-Normal, 4-Lognormal)	^
0.99 0.4 0.25 920.0 1.0E9	(DNIN) (cc: Concentration) (D: particle diameter) (dens: particle density) (YoungW: Young's Modulus)		
0.5 0.0 0.1 0.1, 0.1 N	(rns) (rzs) (eps: restitution) (amuMax, amuMin) (CTIME. W.WIDE OR N:NARROW)		
0.8,2.0,0.8 5.85, 1.75, 1.75, 12.0 100 0.75	(R1, R2, R3) (H1, H2, H3, H4) (mxnb-max number of neighbors) (skin, <=2/sqrt(3))		
1.0 20 0.1, 0.3 9.8 1.0, 1.0 1.5	(temperature) (Wwall) (mu Vall, eps_Vall) (gz) (RPBN: stifnB/stifn, RPBS: stifsB/stifs) (STENCTH. WPa)	海冰的速度	
0.3, 0.0 10.0, 0.0 20.0, 24.0, 0.25 -5.0, 6.0 1	(Water, Vair) (DragW, DragA) (Ice size in x, y and z directions) (ICE TEMPERATURE, SALINITY) (ICOntact, 1:linear: 2:nonlinear)	海冰三个方向的尺寸	
1. 5, 1. 0, 3. 0 0. 5	(SOFTRATE, STRAINNID, STRAINNAX) (BONDRATE)	海冰的温度和盐度	v
			第 29 行,第 11 列

图 2.1.2 海冰离散元模型输入的参数



图 2.1.2 真实的海冰



图 2.1.3 采用 Granular Flow Dynamics 软件显示海冰模型



图 2.1.5 ANSYS 软件建模

通过 ANSYS 商业有限元软件采用 pipe 单元完成导管架主体结构的建模并施加约束。通过 ANSYS Command Window 调用 JDXB、DYXX、YSXX 三个宏文件(调用方式为在窗口内输 入*USE,JDXB。其余两个文件同上。)。运行宏文件后可得到 NODECOOR.DAT、ELEMENTNUM.DAT、DOF.DAT 三个模型信息文件,分别记录有限元节点坐标、单元节点 编号、约束信息。利用程序的有限元模型读入模块读入这三个文件完成有限元部分的建模。

(c) 程序执行说明

通过软件可生成.EXE 格式的可执行文件,可以直接计算,具体操作过程如下图所示。

I 7.5	2015/7/8 21:04	应用程序	1,128 KB
7.5.exe.intermediate.manifest	2015/7/8 21:04	MANIFEST 文件	1 KB
ANIMATION_3D	2015/7/8 23:17	DAT 文件	21,404 KB
BuildLog	2015/7/8 21:04	Maxthon Docum	5 KB
DSM 🖉	2015/7/8 21:04	DAT 文件	46 KB
EACHLEG	2015/7/9 15:47	DAT 文件	1 KB
EFORCE	2015/7/9 15:47	DAT 文件	1 KB
😢 fem-dem	2015/7/8 21:04	Object File	469 KB
ICEFORCE	2015/6/17 20:07	INP 文件	2 KB
INFORCE	2015/7/8 23:22	DAT 文件	34,663 KB
🎉 Jackup	2013/10/18 13:14	应用程序	8,406 KB
🥮 NE1	2015/7/8 21:04	DAT 文件	11 KB
NE2	2015/7/8 21:04	DAT 文件	8 KB
NEWFRAME	2015/5/24 15:43	INP 文件	17 KB
CSM1	2015/7/8 21:04	DAT 文件	1,756 KB
OSM2	2015/7/8 21:04	DAT 文件	937 KB
🥘 ОТР	2015/7/8 21:04	DAT 文件	2 KB

(a) step1 找到 exe 文件双击进入



(b) step2 输入模拟的时间 回车结束



(c) step 3 输入截取的模态数 回车结束 图 2.1.6 程序执行的步骤

2.2 计算模型

2.2.1 离散单元模型:

在采用离散单元模型计算海冰颗粒的动力作用及破碎过程,采用具有粘接-破碎性能球体单元进行构造。这里对海冰颗粒离散元模型中的接触力模型、粘接模型及粘接强度的设定进行介绍。

(a) 单元间的接触力模型

在颗粒相互作用过程中,一般考虑单元间因相对速度和弹性变形而引起的粘弹性作用力,并采用 Mohr-Coulomb 摩擦定律计算剪切力,如图 2.2.1 所示。其中,*M*_A和 *M*_B为颗粒 A 和 B 的质量,*K*_n和 *K*_s分别是法向和切向刚度系数,*C*_n和 *C*_s是法向和切向阻尼系数,*H*是摩擦系数。



图2.2.1 两个单元间的接触力模型

单元间法向力包括弹性力和粘滞力两部分,即

$$F_{\rm n} = K_{\rm n} x_{\rm n} - C_{\rm n} \dot{x}_{\rm n} \tag{1}$$

式中, x_n和 x_n分别为颗粒的法向变形和应变率。

单元间的切向力也由弹性和粘滞两部分组成,且满足 Mohr-Coulomb 摩擦定律,有

$$F_s^* = K_s x_s - C_s \dot{x}_s \tag{2}$$

$$F_{\rm s} = \min(F_{\rm s}^*, \operatorname{sign}(F_{\rm s}^*)\mu F_{\rm n})$$
(3)

式中, x_s和 x_s分别为颗粒的切向变形和应变率。

球单元A和B碰撞的法向有效刚度系数为

$$K_{\rm n} = \frac{2k_{\rm n}^{\rm A}k_{\rm n}^{\rm B}}{k_{\rm n}^{\rm A} + k_{\rm n}^{\rm B}} \tag{4}$$

式中, k^A_n和 k^B_n分别为球单元 A 和 B 的刚度系数。

法向阻尼系数按下式计算,即

$$C_{\rm n} = \zeta_{\rm n} \sqrt{2MK_{\rm n}} \tag{5}$$

这里无量纲法向阻尼系数为

$$\zeta_{\rm n} = \frac{-\ln e}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}} \tag{6}$$

式中,*M*为两颗粒单元的有效质量,*e*为回弹系数。切向和法向刚度、阻尼系数有如下关系: $K_s = \alpha K_n$, $C_s = \beta C_n$, 这里取 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.0^{[16-17]}$ 。

在线性接触模型中,计算步长一般取时间步长为二元接触时间的1/50。该二元接触时间 定义为

$$T_{\rm bc} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{2K_{\rm n}}{M} \left(1 - \zeta_{\rm n}^{2}\right)}} \tag{7}$$

式中,*T*_{bc}为二元接触时间,即两个球单元从碰撞到分离的接触时间。在线粘弹性模型中, 它是一个与颗粒大小和材料性质相关的常数。

(b) 平行粘接模型

考虑单元间的冻结作用,应建立颗粒的粘接模型。粘结模型可以分为两种:接触粘结和 平行粘结。接触粘结的粘结仅发生在接触点上,并且只能传递力;平行粘结将两个球体胶粘 在一起,不仅可以传递力,还可以传递力矩。本文采用平行粘接模型以更合理地模拟海冰单 元间的粘接作用。

在平行粘接中,两个粘接颗粒单元间设定一个弹性粘接圆盘,如图 2.2.2 所示。圆盘可以传递两个单元间的作用力和力矩,即拉力、剪力、弯矩和扭矩。并且,力和力矩都可以分 解为法向分量和切向分量

$$\vec{F}_i = \vec{F}_i^{\rm s} + \vec{F}_i^{\rm n} \tag{8}$$

$$\vec{M}_i = \vec{M}_i^{\rm s} + \vec{M}_i^{\rm n} \tag{9}$$

式中, \vec{F}_i^n , \vec{M}_i^n 和 \vec{F}_i^s , \vec{M}_i^s 分别是法向分量和切向分量。

在平行粘接模型中,粘接圆盘上的最大拉应力和剪应力依据梁的拉伸、扭转和弯曲理论

有

$$\sigma_{\max} = \frac{-\overline{F}^{n}}{A} + \frac{\left|\overline{M}_{i}^{s}\right|}{I}\overline{R}$$
(10)

$$\tau_{\max} = \frac{\left|\overline{F}_{i}^{s}\right|}{A} + \frac{\left|\overline{M}^{n}\right|}{J}\overline{R}$$
(11)

式中, A、J和I分别为平行接触圆盘的面积、极惯性矩和惯性矩, $f A = \pi \overline{R}^2$, $J = 1/2\pi \overline{R}^4$, $I = 1/4\pi \overline{R}^4$, 其中 \overline{R} 为粘接圆盘的半径。当最大拉应力和剪应力超过其拉伸强度和剪切强度时粘接单元将断开。



图2.2.2 两个单元间的平行粘结模型

(c) 粘结强度的确定

在冰激椎体平台结构振动计算中,海冰的弯曲强度是一个重要的海冰力学参数并与海冰物理参数密切相关。对辽东湾 JZ202 海域的现场海冰物理力学实测结果,提出了该海域平整冰弯曲强度的推算方法,即

$$\sigma_f = 0.485 - 0.027 \sqrt{v_b} \tag{12}$$

式中: σ_f 为海冰弯曲强度(MPa); v_b 为海冰卤水体积,它与海冰温度和盐度的关系:

$$v_b = S_i (0.532 + \frac{49.185}{|T_i|}) \tag{13}$$

式中, T, 为冰温; S, 为海冰盐度, 可视作冰厚的函数。对于辽东湾海冰:

$$S_i = 19.077 h_i^{-0.387} \tag{14}$$

式中, h_i为冰厚。

在海冰离散元模型中,令法向粘结强度(σ_b^n)为宏观海冰的弯曲强度。并使颗粒间的法向 粘结强度和切向粘结强度相等。($\sigma_b^n = \sigma_b^s$)

(d)颗粒间断裂软化模型

粘接颗粒之间的破坏模式采用线性软化模型以有效避免颗粒破坏时将能量全部转化为动能。该线性软化失效准则如图 2 所示,其可表述为

$$f = K_{\rm nf} u_{\rm n} = (1 - \omega) K_{\rm n} u_{\rm n} \tag{15}$$

式中, K_{nf} 为法向弹性损伤模量, ω 为损伤量。当 $\omega = 0$ 时,粘接颗粒单元间无破损;当 $\omega = 1$ 时,粘接颗粒单元完全断开;当 $0 < \omega < 1$ 时,粘接颗粒单元间有一定的损伤度,其写作

$$\omega = \frac{\phi(u_{\rm n}) - 1}{\phi(u_{\rm n})} \tag{16}$$

式中, $\phi(u_n)$ 为法向相对位移 u_n 的函数, 即

$$\phi(u_{n}) = \begin{cases} 1 & u_{n} \leq u_{0} \\ \frac{K_{n}^{2}u_{n}}{K_{ns}n_{b} + K_{n}n_{b} - K_{ns}K_{n}u_{n}} & u_{0} \leq u_{n} \leq u_{max} \\ \infty & u_{max} \leq u_{n} \end{cases}$$
(17)

式中, n_b为法向拉伸强度。



2.2.2 有限元计算模型:

本软件对导管架海洋平台的冰激结构振动进行分析,其主要由三部分组成,即上部结构、导管架和桩基。导管架部分为钢管焊接的空间梁结构,横截面为圆环形,是有限元模型的主体。 上部结构包括上部梁格、甲板及各种作业设备。在保证主体结构几何形状的真实性,在结构 动力特性上也要保证结构的振动频率和振型的真实性的前提下将上部结构和桩基进行部分 简化。导管架平台的钢材弹性模量为 200MPa, 泊松比为 0.3, 密度为 7860kg/m³, 每个节点 在空间有六个自由度。这里以渤海 MUQ20-2 椎体导管架平台为例, 如图 2.2.4 所示。





(a) 辽东湾 JZ20-2 MUQ 锥体海洋平台 (b) 锥体平台的有限元模型

图 2.2.4 有限模型与实际海洋平台结构

为了提高有限元部分的计算效率,本软件采用了动力子结构(约束模态综合法)的方法对结构的刚度阵和质量阵进行了缩减。这里将整体平台结构划分为两个子结构,以 MUQ20-2 四桩腿锥体海洋平台结构为例,如图 2.2.5 所示。约束模态综合法的子结构坐标变换矩阵由两部分组成,一是边界约束的子结构主模态矩阵 Φ_{κ} ;二是约束模态矩阵 Φ_{c} 。

$$\Phi_{K} = \begin{bmatrix} \phi_{k} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Phi_{C} = \begin{bmatrix} \phi_{c} \\ I \end{bmatrix}$$
(18)

其中 ϕ_k 是截取前 k 阶子结构主模态 ϕ_n 获得, ϕ_n 可由特征值方程: $(K_{II} - \lambda M_{II}) \{\phi_n\} = 0$ 求得,式中的 K_{II} 、 M_{II} 是子结构刚度阵和质量阵的子矩阵。 ϕ_c 可由 $\phi_c = -K_{II}^{-1}K_{IB}$ 得到。子结构的刚度阵和质量阵按照内部节点和外部节点分块表示为,

$$K = \begin{bmatrix} K_{II} & K_{IB} \\ K_{BI} & K_{BB} \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} M_{II} & M_{IB} \\ M_{BI} & M_{BB} \end{bmatrix}$$
(19)

因此各个子结构的位移可表示为:

$$\begin{cases} u^{I} \\ u^{B} \end{cases} = \begin{bmatrix} T \end{bmatrix} \begin{cases} q_{k} \\ q_{b} \end{cases} = \begin{bmatrix} \phi_{k} \phi_{c} \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{cases} q_{k} \\ q_{b} \end{cases}$$
(20)

已知子结构在物理坐标下的运动方程:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \tag{21}$$

将式 (20) 代入式 (21), 并对方程左乘 T^{T} , 有:

$$\overline{M}\ddot{q} + \overline{C}\dot{q} + \overline{K}q = \overline{F}(t) \tag{22}$$

其他子结构也可按照相同的方法获得,随后按照对号入座的方式可以形成整体运动方程:

$$\tilde{M}\ddot{q} + \tilde{C}\dot{q} + \tilde{K}q = \tilde{F}(t) \tag{23}$$

式中, *Ñ*、*Ĉ*、*K*和*F*(*t*)分别表示整体下的广义质量、阻尼、刚度和荷载矩阵。利用直接积分法中 Newmark 方法求解该方程,可解得广义坐标下节点位移*q*(*t*),按照式(20)即可返回到各子结构在物理坐标下的响应 u(*t*)。



图 2.2.5 海洋平台子结构的划分

常用的 Newmark 方法的形式为

$$m\ddot{x}_{k+1} + c\dot{x}_{k+1} + kx_{k+1} = F_{k+1}$$
(24)

$$\dot{x}_{k+1} = \dot{x}_k + (1 - \delta)\Delta t \ddot{x}_k + \delta \Delta t \ddot{x}_{k+1}$$
(25)

$$x_{k+1} = x_k + \dot{x}_k \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \alpha\right) \left(\Delta t\right)^2 \ddot{x}_k + \alpha \left(\Delta t\right)^2 \ddot{x}_{k+1}$$
(26)

式中, F_{k+1} 为时刻 t_{k+1} 时结构的外载荷; $\delta \ \alpha$ 均为 Newmark 方法的计算参数,当满足 $\delta \ge 0.5$ 和 $\alpha \ge 0.25(0.5+\delta)^2$ 时,计算是无条件稳定的,通常取 $\delta = 0.5$ 和 $\alpha = 0.25$ 。 将式(25)和(26)代入(24),得到关于 x_{k+1} 的方程

$$\overline{K}x_{k+1} = \overline{F} \tag{27}$$

式中, \bar{K} 和 \bar{F} 分别为等效刚度和等效载荷,即

$$\overline{K} = \frac{m}{\alpha (\Delta t)^2} + \frac{c\delta}{\alpha \Delta t} + k$$
(28)

$$\overline{F} = m \left(\frac{x_k}{\alpha (\Delta t)^2} + \frac{\dot{x}_k}{\alpha \Delta t} + \frac{0.5 - \alpha}{\alpha} \ddot{x}_k \right) + c \left(\frac{\delta x_k}{\alpha \Delta t} + \frac{\delta - \alpha}{\alpha} \dot{x}_k + \frac{(0.5\delta - \alpha)\Delta t}{\alpha} \ddot{x}_k \right) + F_{k+1}$$
(29)

将求得的 x_{k+1} 代入到式(26)和式(25),可分别得到 \ddot{x}_{k+1} 和 \dot{x}_{k+1} 。

2.2.3 耦合接触模型:

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 载荷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。通过海冰与平台结构的接触判断及等效节点力 的转化公式可实现海冰与平台的相互作用。在海冰与海洋平台结构的作用过程中,海冰与平 台结构接触的位置是随机的,为此需确定海洋平台在冰载荷作用下的等效节点载荷。

在局部坐标系下,假定单元的两端固定如图 2.2.3 所示,由静力平衡可求得固定端的反力,即:

$$R_{A} = -\frac{(3a+b)Pb^{2}}{L^{3}} \qquad R_{B} = -\frac{(3b+a)Pa^{2}}{L^{3}}$$
(2)

式中, *R_A*、 *R_B*为梁两端的反力, *P*为外载荷, *L*为单元长度, *a*为距离 *A*点的长度, *b*为距离 *B*点的长度。



图 2.2.6 离散元和有限元梁单元相互作用示意图

2.3 后处理

2.3.1 离散元后处理:

采用 Jackup 软件可以对道碴颗粒运动进行三维动态显示。在主界面中,单击 File(F) 下 滑菜单中的 Open 按钮,将弹出如下对话框。后处理可以读取计算得到的三维动画数据 ANIMATION_3D.DAT,数据格式如图 2.3.2. 具体输出格式要求,可以在主界面的 Help(H) 选项中查看。

19. 19.		打开			×
🔄 🏵 🔻 🕇 📕 « 🦻	每冰FEM-DEM ♭ 7.5 ♭ 7.5 ♭ x64	→ Release v	Ů 搜索"Relea	se"	٩
组织 ▼ 新建文件夹				≣≕ ▼ 🔲	0
☆ 收藏夹	名称	修改日期	类型	大小	^
	ANIMATION_3D	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	
🜏 家庭组	DSM 🖉	2015/7/8 20:34	DAT 文件	46 KB	
	EACHLEG	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	
📕 这台电脑	EFORCE	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	
Administrator (55	INFORCE	2015/7/8 20:34	DAT 文件	x ase" ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓	
huangiinyst (huan	NE1	2015/7/8 20:34	DAT 文件	11 KB	
I huangjinysi (huan	NE2	2015/7/8 20:34	DAT 文件	8 KB	
Id (ws1-win7)	CSM1	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1,756 KB	
(f*' windows (swodniv	OSM2	2015/7/8 20:34	DAT 文件	937 KB	
🃥 本地磁盘 (C:)	<i>(</i> OTP	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	
👝 本地磁盘 (E:)	//////////////////////////////////////	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1,756 KB	
🧰 本地磁盘 (F:)	//////////////////////////////////////	2015/7/8 20:34	DAT 文件	937 KB	
🧰 本地磁盘 (G:)	STRESS	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	
	TIME-SACCELX	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	
📬 网络	TIME-SACCELY	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	
	TIME-SACCELZ	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	
	TIME-SDISTANCEX	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	
	TIME-SDISTANCEY	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	
	TIME-SDISTANCEZ	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	
	TIME-TACCELX	2015/7/8 20:34	DAT 文件	1 KB	×
文件	名(N):		✓ dat file(*.d	lat)	~
			打开(O) 取消	

图 2.3.1 选择输入文件对话框

文件(F) 実	捐(E) 格式	文件	识别名	夺 ^{HD}		AN	IMATION	_3D - 记事	本						×
3DA: -51.07 0.000	70 48 00 0. 0	. 930 - 3000	-51.070 0.1000	48.930 0.0000	-51.	070 48.	930					结	构信息		^
1 cyli 2 cyli 4 cyli 5 cyli 6 cyli 1 cyli 8 cyli 10 cyli 11 cyli 13 cyli 13 cyli 13 cyli 14 cyli 13 cyli 14 cyli 15 cyli 16 cyli 17 cyli 18 cyli 19 cyli 19 cyli 10 cyli 11 cyli 12 cyli 13 cyli 12 cyli 12 cyli 13 cyli 13 cyli 14 cyli 12 cyli 13 cyli 13 cyli 14 cyli 13 cyli 13 cyli 13 cyli 13 cyli 13 cyli 13 cyli 13 cyli 13 cyli 24 cyli 25 cyli 26 cyli 30 cyli 31 cyli 31 cyli 31 cyli 33 cyli 34 cyli 35 cyli 35 cyli 36 cyli 37 cyli 38 cyli 39 cyli 39 cyli 39 cyli 30 cyli 31 cyli 30 cyli 31 cyli 30 cyli 31 cyli 33 cyli 34 cyli 35 cyli 36 cyli 37 cyli 38 cyli 39 cyli 39 cyli 39 cyli 30 cyli 30 cyli 30 cyli 31 cyli 30 cyli 31 cyli 32 cyli 33 cyli 33 cyli 34 cyli 35 cyli 36 cyli 37 cyli 38 cyli 39 cyli 39 cyli 39 cyli 30 cyli 30 cyli 30 cyli 30 cyli 30 cyli 31 cyli 32 cyli 33 cyli 33 cyli 34 cyli 35 cyli 36 cyli 37 cyli 38 cyli 39 cyli 39 cyli 39 cyli 30 cyli 39 cyli 30 cyli 31 cyli 31 cyli 32 cyli 33 cyli 34 cyli 35 cyli 36 cyli 37 cyli 38 cyli 37 cyli 38 cyli 39 cyli 30 cyli 31 cyli 3	0 inder	$\begin{array}{c} & & & & & \\ & & -1.\ 0 & & \\ & & 18.\ 9; \\ & & -1.\ 0; \\ & & 18.\ 9; \\ & & -0.\ 18.\ 9; \\ & & -0.\ 18.\ 9; \\ & & -0.\ 18.\ 9; \\ & & -0.\ 18.\ 9; \\ & & -0.\ 18.\ 9; \\ & & -0.\ 18.\ 9; \\ & & 0.\ 0.\ 10.\ 17.\ 76.\ 17.\ 77.\ 76.\ 17.\ 77.\ 77.\ 77.\ 77.\ 77.\ 77.\ 77$	5 5000 1000 1000 500	122 -10, 5000 -10, 5000 -10, 5000 -1, 5000 -1, 5000 -1, 5000 -1, 5000 -1, 5000 0, 0000 0, 0000 0, 0000 0, 0000 1, 00		$\begin{array}{c} 1\\ 8. 91000\\ 18. 91000\\ -1. 05000\\ -1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 1. 05000\\ 0. 00000\\ 1. 00000\\ 1. 00000\\ 1. 00000\\ 1. 00000\\ 1. 00000\\ 1. 00000\\ 1. 00000\\ 1. 00000\\ 0. 00000\\ 1. 0000\\ 1$	$\begin{array}{c} 0.8\\ 0.8\\ 0.8\\ 0.8\\ 0.8\\ 0.8\\ 0.8\\ 0.8\\$	0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000	$\begin{array}{c} -0.156\\ 18.010\\ 18.010\\ -0.155\\ 0.000\\ 17.866\\ 0.000\\ 17.866\\ 0.000\\ 17.766\\ 0.100\\ 17.766\\ 17.766\\ 17.766\\ 17.766\\ 8.933\\ 0.100\\ 0.100\\ 0.100\\ 17.766\\ 8.933\\ 1.300\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 16.566\\ 1.300\\ $	000 000 <th>$\begin{array}{c} -1.50000\\ -1.50000\\ -1.50000\\ 0.00000\\ 0.00000\\ 0.00000\\ 0.00000\\ 0.00000\\ 1.0000\\ 1.0000\\ 1.00000\\ 1.0000\\ 1.0000\\ 1.0000\\ 1.0000\\ 1.0000\\ 1.00000\\ 1.00$</th> <th></th> <th>8. 01000 8. 01000 0. 15000 0. 15000 0. 15000 0. 01000 7. 86000 0. 00000 7. 76000 0. 10000 0. 10000 0. 10000 8. 93000 0. 10000 8. 93000 0. 10000 8. 93000 7. 76000 8. 93000 6. 56000 6. 56000 6. 56000 6. 56000 1. 30000 6. 56000 1. 30000 6. 56000 1. 30000 1. 30000 1. 30000 6. 56000 1. 30000 1. 30000 6. 56000 1. 30000 1. 300000 1. 3000000000 1. 3000000000000000000000000000000000000</th> <th>$\begin{array}{c} 0.200\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.331\\ 0.$</th> <th>00 00 00 00 00 00 00 00 00 00</th>	$\begin{array}{c} -1.50000\\ -1.50000\\ -1.50000\\ 0.00000\\ 0.00000\\ 0.00000\\ 0.00000\\ 0.00000\\ 1.0000\\ 1.0000\\ 1.00000\\ 1.0000\\ 1.0000\\ 1.0000\\ 1.0000\\ 1.0000\\ 1.00000\\ 1.00$		8. 01000 8. 01000 0. 15000 0. 15000 0. 15000 0. 01000 7. 86000 0. 00000 7. 76000 0. 10000 0. 10000 0. 10000 8. 93000 0. 10000 8. 93000 0. 10000 8. 93000 7. 76000 8. 93000 6. 56000 6. 56000 6. 56000 6. 56000 1. 30000 6. 56000 1. 30000 6. 56000 1. 30000 1. 30000 1. 30000 6. 56000 1. 30000 1. 30000 6. 56000 1. 30000 1. 300000 1. 3000000000 1. 3000000000000000000000000000000000000	$\begin{array}{c} 0.200\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.800\\ 0.331\\ 0.$	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
							ANIMATION	20.3285				第1行	, 第 1 列		.::
文件(F) 编辑(E) 110 cylinder 111 cylinder	格式(O) 查看(15.43(15.43)	/) 帮助(H) 000 26. 000 26	88900	15. 43000 2. 43000	0.80000	15, 43000	31. 28900 31. 28900	15, 4300	0 0.8	0000					^
112 cylinder 112 cylinder 113 cylinder 114 cylinder 115 cylinder 117 cylinder 118 cylinder 120 cylinder 121 cylinder 122 cylinder 123 cylinder 124 cylinder 125 cylinder 126 cylinder 126 cylinder 127 cylinder 128 cylinder 128 cylinder 129 cylinder 129 cylinder 120 cylinder 120 cylinder 121 cylinder 122 cylinder 122 cylinder 123 cylinder 124 cylinder 125 cylinder 126 cylinder 127 cylinder 128 cylinder 129 cylinder 129 cylinder 120 cylinder 120 cylinder 121 cylinder 121 cylinder 122 cylinder 122 cylinder 123 cylinder 124 cylinder 125 cylinder 126 cylinder 127 cylinder 127 cylinder 128 cylinder 129 cylinder 129 cylinder 120 cylinder 121 cylinder 121 cylinder 122 cylinder 122 cylinder 123 cylinder 124 cylinder 125 cylinder 126 cylinder 127 cylinder 127 cylinder 128 cylinder 128 cylinder 129 cylinder 129 cylinder 129 cylinder 120 cylinder 120 cylinder 120 cylinder 120 cylinder 120 cylinder 120 cylinder 121 cylinder 121 cylinder 121 cylinder 122 cylinder 121 cylinder 12	15, 433 2, 433 2, 433 8, 933 15, 433 15, 433 15, 433 15, 433 2, 433 2, 433 15, 433 15, 433 15, 433 15, 433 15, 433 15, 433 2, 4,	20. 20. 000 26. 000 26. 000 31.	23900 200 200 200 200 200 200 200	a. 3000 2. 43000 15. 43000 15. 43000 15. 43000 2. 43000 2. 43000 2. 43000 2. 43000 15. 43000 15. 43000 15. 43000 2. 43000 2. 43000 2. 43000 2. 43000 2. 43000 2. 43000 2. 43000 2. 43000 3. 93000 15. 43000 15. 45000 15. 4	0. 80000 0. 80000 0. 38100 0. 38100 0. 38100 0. 38100 0. 38100 0. 38100 0. 38100 0. 38100 0. 38000 0. 80000 0. 800000 0. 800000 0. 80000 0. 80000 0. 80000 0. 80000 0. 8	15, 43000 8, 93000 15, 43000 15, 43000 15, 43000 2, 43000 2, 43000 2, 43000 15, 43000 15, 43000 15, 43000 15, 43000 15, 43000 15, 43000 15, 43000 2, 43000 15, 45000 15, 45000 10, 450000 10, 450000 10, 450000 10, 450000 10, 450000 10, 450000000 10, 4500000000000000000000000000000000000	31, 23900 31, 23900 26, 83900 31, 23900 26, 83900 31, 23900 26, 83900 31, 23900 31, 23	2, 4300 2, 4300 15, 4300 15, 4300 2, 4300 2, 4300 2, 4300 15, 4300 15, 4300 15, 4300 2, 4300 2, 4300 2, 4300 2, 4300 15, 4300 10, 43000 10, 4300 10, 4300 10,	- 0.83 0 0.33 0 0.33 0 0.33 0 0.33 0 0.33 0 0.33 0 0.33 0 0.33 0 0.33 0 0.33 0 0.33 0 0.38 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.88 0 0.89 0 0.89	0000 8100 8100 8100 8100 8100 8100 8100 8100 00000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000	/	果	页粒单;	元信息	
1 2	-0.6729 -0.5479	15. 2257 15. 2257	-2.7974 -2.5809	0.2500	25.0000 25.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
3	-0.6729	15.2257	-2.3644	0.2500	25.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
9. 5	-0.6729	15. 2257	-2. 1479	0.2500	25.0000 25.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0,0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
6 7	-0.5479 -0.6729	15. 2257 15. 2257	-1.7149 -1.4984	0. 2500 0. 2500	25.0000 25.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0. 0000 0. 0000	0.0000	0.0000	0.0000	0, 0000 0, 0000	
8	-0.5479	15. 2257	-1.2819	0.2500	25.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
9 10	-0.6729 -0.5479	15. 2257 15. 2257	-1.0654 -0.8489	0.2500 0.2500	25.0000 25.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0,0000	0.0000	0.0000	0.0000	0, 0000 0, 0000	
11	-0.6729	15. 2257	-0.6324	0.2500	25.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
12 13	-0.5479 -0.6729	15. 2257 15. 2257	-0. 4159 -0. 1994	0.2500	25.0000 25.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000 0.0000	ノ
ς												篇 133 行,	鍼 126 列		, ×

图 2.3.2 三维动画文件格式

单击选择输入文件,并单击 打开@ 按钮,软件将对输入文件进行解析。 如果输入文件比较大,则用户需要耐心等一会。输入文件解析完成后界面如图 2.3.3 所示。界面分为三部分,菜单区,控制区及显示区域。



图 2.3.3 后处理工作界面

菜单区 ▶ ■ ★ Ⅱ ▶ 🖬 ● R 的按键功能分别对应:动画播放,动画复位,

动画快退,动画暂停,动画快进,保存当前画面图片(jpg, bmp 格式),保存动画视频(avi 格式),动画自动旋转。





图 2.3.4 控制区标注

Color 区: Background 可调整整个画面的背景颜色,单击 Background 右边的颜色块将弹出【颜色】对话框,用户可自行选择合适的颜色,若是颜色不合用,可单击 规定自定义颜色 @) >> 按钮,将弹出如图 2.3.5 所示的【颜色】对话框,用户可以 鼠标单击调色板区域,添加自定义颜色。一个实际应用情况如图 2.3.6 所示。



(a)颜色选择对话窗口

(b) 自定义颜色对话窗口

图 2.3.5 背景颜色选择项



图 2.3.6 不同背景下的显示效果

对于颗粒颜色所代表的物理意义, Speed 表示速度, Diameter 表示颗粒直径, Constant 将颗粒统一绘制成同一颜色, part 显示用户自定义物理量, 在输出文件颗粒信息最后一列给出。颗粒颜色代表数值的大小, 具体趋势, 如图 2.3.4 最下方颜色渐变条所示, 颜色越偏向 红色, 所代表的数值越大。不同选项的效果如下图。



(c) constant (d) part 图 2.3.7 不同选项下的显示效果 Boundary 区:可以调整结构的颜色和水面的颜色,上面选项用于调整结构的颜色及透 明度,下面的选项用于调整水面的颜色及透明度。不同设置的效果如图 2.3.8。



图 2.3.8 不同结构颜色选项下的显示效果

2.3.2 有限元后处理:

Offshore platform FEM-DEM 计算完成后会生成有限元节点上位移、速度、振动加速度等信息以及海冰对平台的荷载。将上述信息导入 excel 或 origin 等数据分析软件中,可得到平台响应的结果,结果文件说明如图 2.3.9 所示。



图 2.3.9 结果输出文件说明

下面具体简绍一下,输出结果文件的格式以及代表的物理意义,如下图所示,

时间				名	₩桩腿Ξ	三个方向	句的冰石	荷载				
					FACH	UFG - 记和本						- 0 ×
文件(F) 编辑(F) 1	將式(O) 香香(V) 数	th(H)			Crief.	100 - 109-4-						
TIME	FX1(KN)	FY1(KN)	FZ1(KN)	FX2(KN)	FY2(KN)	FZ2(KN)	FX3(KN)	FY3(KN)	FZ3(KN)	FX4(KN)	FY4(KN)	FZ4(KN)
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.054	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0,000	0.000
0.072	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.090	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.108	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0, 144	0,000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.162	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.198	8.600	0.102	-7.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.804	0.230	-7.289
0.234	7.087	0.078	-5, 951	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7,937	0.218	-6.715
0.252	6.797	0.072	-5.708	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.584	0.240	-7.258
0.270	7.226	0.074	-5.961	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10.247	0.291	-8.548
0.288	7.853	0.076	-6.587	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	11.617	0.335	-9.687
0.306	8.508	0.078	-6.967	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	11.391	0.337	-9.589
0.342	8, 350	0.069	-6.876	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	15, 462	0.469	-12,841
0.359	7.874	0.062	-6.616	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	14.292	0.447	-12.092
0.377	8.922	0.067	-7.376	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	15.232	0.484	-12.898
0.395	8.751	0.061	-7.263	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	17.419	0.560	-14.478
0.413	8,934	0.052	-7.284	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	17.090	0.559	-14.349
0.449	9,481	0.053	-7.855	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	18,016	0.610	-15, 263
0.467	9.333	0.048	-7.739	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	19.113	0.658	-16.194
0.485	9.673	0.045	-8.132	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	20.714	0.724	-17.552
0.503	12.161	0.050	-10.090	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.499	0.799	-19.067
0.521	12. 987	0.048	-10.736	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	23.729	0.854	-19,930
0.557	13. 117	0.036	-11.031	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	25. 198	0.935	-21.286
<												>
									第	174 行,第 160 列		

图 2.3.10 各桩腿冰力文件说明





-

	时间						
	Î			STRESS - 记事	本		- - ×
文	件(F) 编辑(E)	格式(O) 查看(V) 帮助(H)					
	TIME 0.	. 000					^
	ELEMENT	MAXALFA1(MPa)	MINALFA1(MPa)	MAXTAL1(MPa)	MAXALFA2(MPa)	MINALFA2(MPa)	MAXTAL2(MPa)
	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	3 1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	ч к	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0. 0000	0. 0000	0. 0000
	9	ŏ. ŏŏŏŏ	0.0000	0. 0000	0. 0000	0.0000	0. 0000
	1Ŏ	ŏ. ŏŏŏŏ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	o. 0000	0.0000
	13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	22	0.0000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	28	0. 0000	0. 0000	0. 4000	0.0000	0.0000	0.0000
	₩	0.4000	0	0	0.0000	0.0000	0.0000
Ιr					0.0000	0.0000	0.0000
	单元号	拉应力	玉应力	切应力	0.0000	0.0000	0.0000
	+-70.5	14/24/1	12/22/3	911-275	0.0000	0.0000	0.0000
L					0.0000	0.0000	0.0000
	20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	31	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.1		v. vvvv		v. vvv.	v. vvv-	** * * * *
<u> </u>							2
						第1行,第1	列

图 2.3.11 平台应力文件说明







图 2.3.13 平台结点位移文件说明

2.3.3 计算结果数值分析:

最后通过 office excel 或 origin 软件对平台结构的冰荷载、位移、振动加速度等力学信息进行绘制并进一步分析。考虑到动力输出结果的随机性,这里采用 origin 或 matlab 中的









也可以通过后处理软件看到平台的动态图,如下图所示。

