

海冰作用下平台结构自激振动的参数分析与响应的数值计算

欧进萍, 段忠东, 王 刚

(哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 本文依据 Maattanen 的自激冰力模型, 分析了冰和结构的各种参数对海冰作用下平台结构自激振动的影响; 对不同动力特性的导管架平台结构简化模型, 进行了海冰作用下结构自激振动响应的数值计算, 发现了自激冰力和结构振动的一些特征, 为进一步理解冰致平台结构自激振动现象, 避免自激振动的产生及采取相应的控制措施提供了有益的结果。

关键词: 海冰; 固定式海洋平台结构; 自激振动

中图分类号: O323 **文献标识码:** A

1 引言

对海冰引起的海洋平台结构振动的研究一直存在两种不同的观点。一种观点认为冰力的动力特性主要归结为冰的破碎, 冰的破碎有其固定的频率, 该频率与结构的运动及动力特性无关。这种理论被称为“强迫振动”理论, Peyton 和 Matlock 等提出的动冰力模型都是强迫振动模型^[1,2]。另一种观点认为冰的抗压强度随加载速率的增加先增大后减小产生的“负阻尼”影响了结构的振动, 自激振动理论可以很好地解析这一现象。Maattanen 根据自激振动理论建立的自激冰力模型是这一理论的代表^[3]。

冰力的强迫振动特性和自激振动特性在现场观测和室内试验都得到了证实。在实测的冰力时程中往往既有强迫振动的成分又有自激振动的成分。在什么情况下更易发生自激振动? 虽然根据自激振动理论建立了自激振动发生的判据, 但自激振动发生的物理条件, 如冰厚、冰速、结构参数等还不清楚。本文将采用 Maattanen 的自激冰力模型研究冰厚、冰速、结构动力特性等参数对平台结构自激振动的影响; 采用三个不同动力特性的简化的导管架结构模型, 计算在冰作用下的自激冰力及结构响应, 分析自激冰力和结构自激振动的特征。

收稿日期: 2000-03-23; 修改日期: 2000-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助重大项目(59895410), 中国海洋石油渤海公司资助项目

作者简介: 欧进萍(1959), 男, 湖南人, 哈尔滨工业大学副校长, 研究员, 博士, 1995年在美国哥伦比亚大学做访问教授, 主要从事结构可靠性、结构振动控制、海洋结构工程等研究

2 自激振动的条件

冰力作用下多自由度结构的运动方程可以表示为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中 $[M]$ 、 $[C]$ 和 $[K]$ 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵 $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 和 $\{x\}$ 分别为结构加速度向量、速度向量和位移向量； $\{F(t)\}$ 为冰力向量，在有冰力作用处有非零分量。根据自激冰力理论，冰力是加载速率的函数，因而也是冰与结构相对速度的函数，即

$$F_i(t) = F_i(v_{ri}) \quad (2)$$

式中 $F_i(t)$ 为 $\{F(t)\}$ 的第 i 个分量， v_{ri} 为第 i 个节点处冰与结构的相对速度，即

$$v_{ri} = v_0 - \dot{x}_i \quad (3)$$

式中 v_0 为冰速， \dot{x}_i 为第 i 个节点处结构运动的速度。

将式(2)在 $v_{ri} = v_0$ 处展开并取线性项，得到

$$F_i(v_{ri}) \approx F_i(v_0) - \left. \frac{dF_i}{dv_r} \right|_{v_r=v_0} \dot{x}_i \quad (4)$$

式中 $F_i(v_0)$ 为静冰力，在动力分析中可不考虑； dF_i/dv_r 称为冰阻尼系数。

忽略静冰力部分，将式(4)表示的冰力分量代入运动方程(1)，得到

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[\Phi]\{\dot{x}\} \quad (5)$$

式中 $[\Phi]$ 为冰阻尼系数矩阵，只有在冰力作用处矩阵的对角元素为非零值，

$$\varphi_{ii} = \left. \frac{dF_i}{dv_r} \right|_{v_r=v_0} \quad (6)$$

其余元素为零。

对式(5)用 $\{x\} = [u]\{y\}$ 进行坐标变换，得到

$$[M^*]\{\ddot{y}\} + [C^*]\{\dot{y}\} + [K^*]\{y\} = -[u]^T [\Phi][u]\{\dot{y}\} \quad (7)$$

式中 $[u]$ 和 $[y]$ 分别为模态矩阵和广义位移向量； $[M^*]$ 、 $[C^*]$ 和 $[K^*]$ 分别为广义质量矩阵、广义阻尼矩阵和广义刚度矩阵。第 i 个模态的运动方程为

$$M_i^* \ddot{y}_i + C_i^* \dot{y}_i + K_i^* y_i = - \sum_{k=1}^n \varphi_{ik} u_k \sum_{j=1}^n u_j \dot{y}_j \quad (8)$$

式中 M_i^* 、 C_i^* 和 K_i^* 分别为第 i 阶模态的模态质量、模态阻尼和模态刚度， n 为模态总数。

对上式变分，导出第 i 阶模态产生自激振动的条件为^[4]

$$C_i^* < - \sum_{k=1}^n \varphi_{ik} u_k^2 \quad (9)$$

该条件用阻尼比表示为

$$\zeta_i < - \frac{\sum_{k=1}^n \varphi_{ik} u_k^2}{2\omega_i M_i^*} \quad (10)$$

式中 ω_i 为第 i 阶模态的圆频率。

式(9)中 $\sum_{k=1}^n \varphi_{ik} u_i^2$ 为冰力附加给结构第 i 阶模态的阻尼, 当加载速率处于冰抗压强度与加载速率关系曲线的下降段时, φ_{ik} 为负值, 因此冰给结构附加负阻尼。当负阻尼抵消结构的正阻尼时, 就发生自激振动。

3 自激振动的参数影响

3.1 冰阻尼系数

根据弹性力学, 冰对圆柱体作用时, 冰与圆柱体接触面的冰应力速率为^[4]

$$\dot{\sigma} = \frac{8\sigma_s v_r}{\pi d} \quad (11)$$

上式中 σ_s 为半圆周表面的等效均布径向冰压力, 即

$$\sigma_s = \frac{F}{dh} \quad (12)$$

d 为圆柱体直径; h 为冰厚; F 为冰压力, 采用 Schawz 冰力公式, 即

$$F = 3.57d^{0.5}h^{1.1}\sigma_c \quad (13)$$

式中 σ_c 为冰的抗压强度。将式(12)和(13)代入式(11), 并对 v_r 求导, 得

$$\frac{d\dot{\sigma}}{dv_r} = \frac{8\sigma_s}{\pi d} \left/ \left(1 - \frac{8cv_r}{\pi d} \frac{d\sigma_s}{d\dot{\sigma}} \right) \right. \quad (14)$$

式中 c 为

$$c = 3.57h^{0.1}d^{-0.5} \quad (15)$$

将式(6)的冰阻尼系数 φ 表示为

$$\varphi = \frac{dF}{dv_r} = \frac{dF}{d\dot{\sigma}} \frac{d\dot{\sigma}}{dv_r} \quad (16)$$

将式(13)和(14)代入上式, 得

$$\varphi = 101.96h^{1.2}\sigma_c \frac{g}{\pi d} \frac{d\sigma_c}{d\dot{\sigma}} \left/ \left(1 - \frac{8cv_r}{\pi d} \frac{d\sigma_c}{d\dot{\sigma}} \right) \right. \quad (17)$$

上式中 h 和 d 的单位为 cm ; σ_c 的单位为 kg/cm^2 ; g 为重力加速度, 单位为 m/s^2 ; φ 的单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ 。

冰的单轴抗压强度与加载速率曲线采用我国渤海海冰试验确定的 $\sigma_c \sim \dot{\sigma}$ 关系¹, 即

$$\log \sigma_c = \begin{cases} -0.036(\log \dot{\sigma})^3 - 0.226(\log \dot{\sigma})^2 + 1.23 & -3 \leq \log \dot{\sigma} \leq 0 \\ 0.241(\log \dot{\sigma})^3 - 0.505(\log \dot{\sigma})^2 + 1.23 & 0 \leq \log \dot{\sigma} \leq 1.4 \end{cases} \quad (18)$$

式中 σ_c 的单位为 kg/cm^2 , $\dot{\sigma}$ 的单位为 $\text{kg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。式(18)如图 1 所示。

从式(17)可以看出, 冰阻尼系数随冰厚增大而增大; 冰阻尼系数与桩直径近似反比关

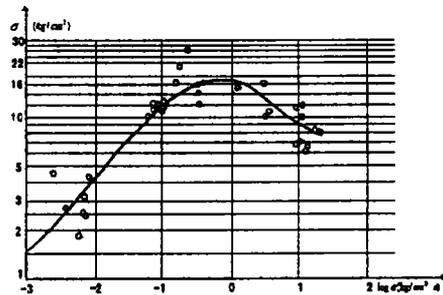


图 1 渤海海冰单轴抗压强度与加载速率的关系

¹ 渤海石油公司联合海冰技术组: 徐继祖、李桐魁等, 渤海结构物海冰设计标准问题研究, 1986年1月。

系, 随桩直径增大而减小。

3.2 结构的动力特性

冰力附加给结构的阻尼与结构的动力特性有关, 因此本文选择了三种不同动力特性的结构模型来进行分析。

模型 1 是渤海 JZ20-2MUQ 平台导管架结构的平面刚架模型, 如图 2(a)所示。模型 2 和模型 3 是在模型 1 的基础上通过撤消或增加斜撑、改变杆件截面和质量分布来得到的。三个模型都由 DRAIN-2D 程序通过自由度缩减形成如图 2(b)所示的具有三个水平自由度的简化模型。三个模型分别对应中等刚性、柔性和刚性结构。三个模型的固有频率列于表 1 中。冰力作用于标高-3.50 米处。

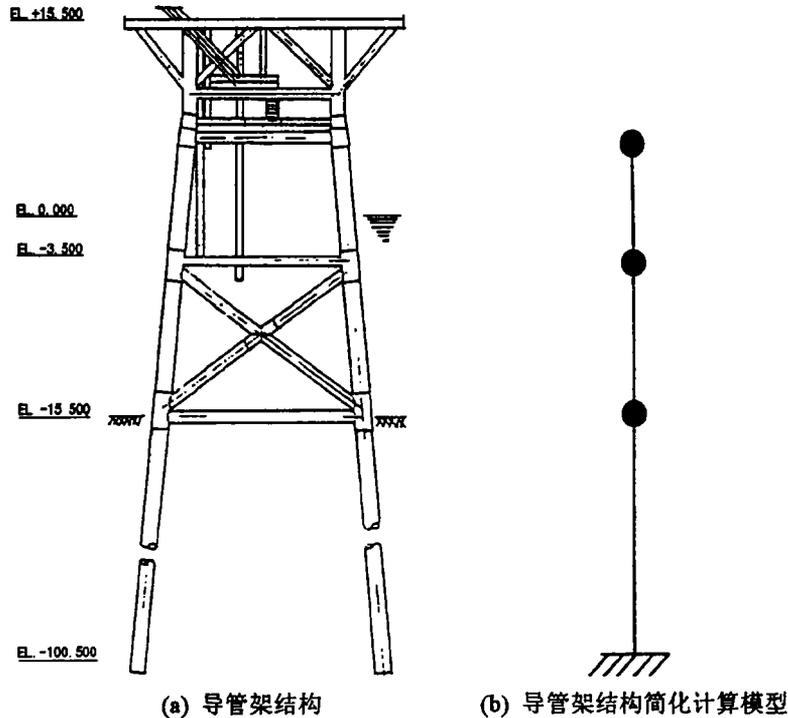


图 2 JZ20-2MUQ 平台导管架结构及其简化模型

表 1 模型结构的固有频率(Hz)

阶数 \ 模型	1	2	3
1	0.8237	3.6316	15.0135
2	0.2643	2.2747	4.8593
3	2.1852	11.8333	20.2596

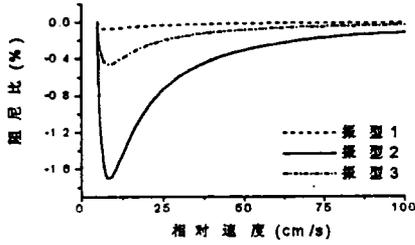
3.3 不同冰厚、冰速对负阻尼的影响

当冰与结构的相对运动速度使冰的加载速率处于图 1 所示冰强度峰值的左边时, 冰力

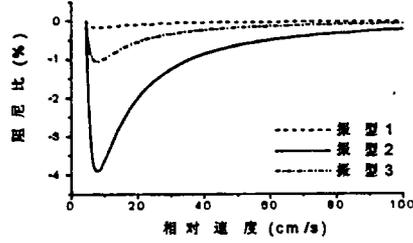
将给结构附加正阻尼，结构振动将很快衰减，本文不考虑这种情况。当相对运动速度使冰的加载速率处于冰强度峰值的右边时，冰强度与应力速率关系曲线最陡处对应着冰力给结构附加的最大负阻尼。我们对冰厚分别取 20cm、40cm 和 120cm、桩直径分别取 100cm 和 150cm，对以上三种结构模型分别计算了不同相对速度时冰力附加的阻尼比。冰力附加给结构的最大负阻尼和相应相对速度列于表 2 中。冰力附加给模型 1 的阻尼比与相对速度的关系如图 3 所示。

表 2 冰力附加的最大负阻尼比(%)及对应相对速度

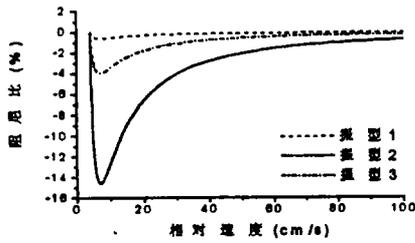
桩径 $d(\text{cm})$	冰厚 $h(\text{cm})$	相对速度 $v_r (\text{cm/s})$	模 型 1			模 型 2			模 型 3		
			振型 1	振型 2	振型 3	振型 1	振型 2	振型 3	振型 1	振型 2	振型 3
100	20	8.5	-0.07	-1.70	-0.46	-0.07	-3.47	-0.80	-0.30	-0.51	-0.32
	40	7.9	-0.17	-3.90	-1.06	-0.17	-7.98	-1.83	-0.69	-1.17	-0.73
	120	7.1	-0.63	-14.59	-3.96	-0.62	-29.81	-6.84	-2.56	-4.37	-2.74
150	20	15.6	-0.05	-1.13	-0.31	-0.05	-2.31	-0.53	-0.20	-0.34	-0.21
	40	14.5	-0.11	-2.60	-0.71	-0.11	-5.32	-1.22	-0.46	-0.78	-0.49
	120	13.0	-0.42	-9.72	-2.64	-0.41	-19.88	-4.56	-1.71	-2.91	-1.83



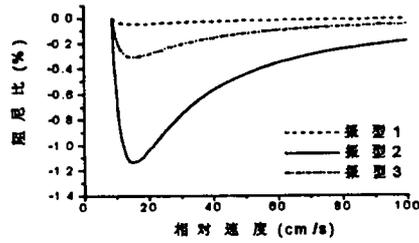
(a) $d=100\text{cm}, h=20\text{cm}$



(b) $d=100\text{cm}, h=40\text{cm}$



(c) $d=100\text{cm}, h=120\text{cm}$



(d) $d=150\text{cm}, h=20\text{cm}$

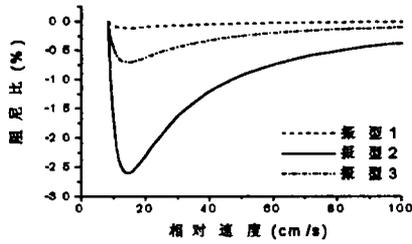
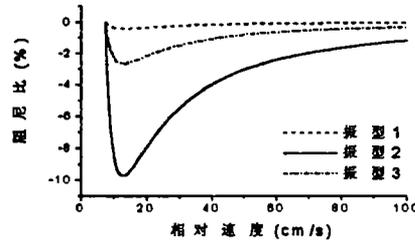
(e) $d=150\text{cm}$, $h=40\text{cm}$ (f) $d=150\text{cm}$, $h=120\text{cm}$

图3 冰力给模型1附加的阻尼

根据以上对影响自激冰力给结构附加阻尼的参数分析,可以得到如下结论:

- (1) 冰速是影响结构产生自激振动的重要因素。冰自激振动发生条件对冰速十分敏感。冰对结构作用的自激振动一般发生在较低冰速,而且在较窄的冰速范围内。
- (2) 自激振动与结构的变形密切相关;柔性结构较刚性结构更易发生自激振动。
- (3) 结构桩腿直径越小越容易发生自激振动;冰越厚,发生自激振动的可能性越大。

4 自激振动响应的数值计算

4.1 响应数值计算方法

根据自激振动理论,平台结构的运动和冰力是一个耦合的非线性系统,通常得不到解析解,因此常采用数值方法求解自激冰力和结构响应。本文采用了状态空间法求解结构的响应,很好地解决了由于累积误差使数值解不稳定的问题。

结构的运动方程式(1)写成状态方程的形式为

$$\dot{X} = AX + BP(t) \quad (19)$$

$$\text{式中 } X = \{x_1, x_2, \dots, x_n, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n\}_{2n \times 1}^T, \quad P(t) = \{F(t)\}_{n \times 1}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix}_{2n \times 2n}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ [M]^{-1} \end{bmatrix}_{2n \times n}$$

数值计算程序流程如图4所示。

4.2 数值计算结果分析

冰厚分别取20cm、40cm和120cm及不同的冰速,桩腿直径分别取100cm和150cm,对上述三个简化模型进行了自激冰力和平台结构响应数值计算,对自激冰力进行了谱分析。部分工况平台结构的稳态振动响应示于表3和图4、图5。由于模型3在计算所考虑的冰况条件下不发生自激振动,因此表中未列出其结果。由于自激振动以结构第二阶模态振动为主,故冰力作用处结构振动响应较大。

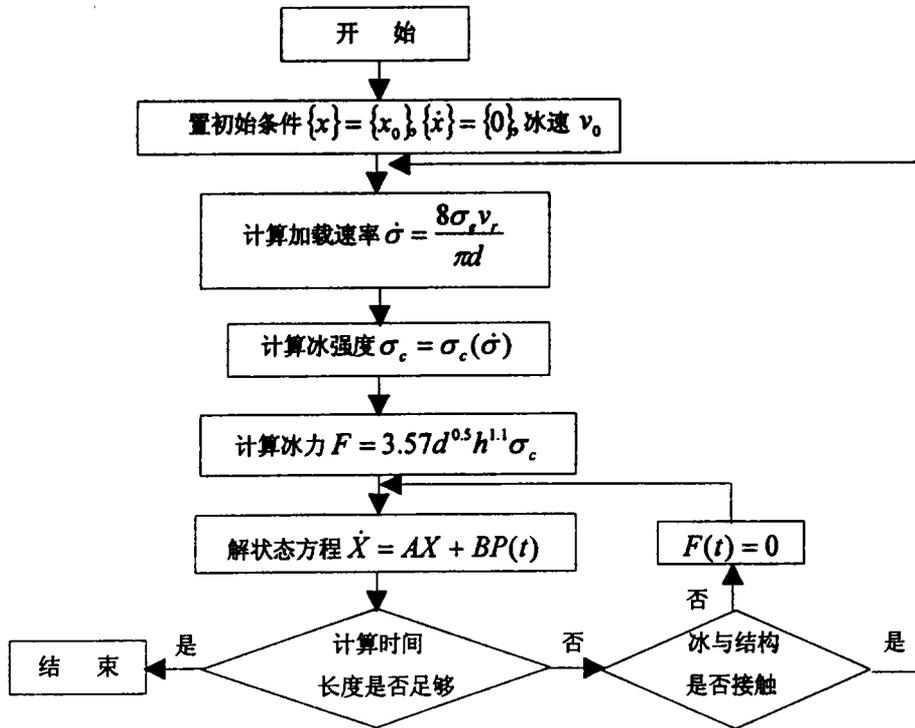
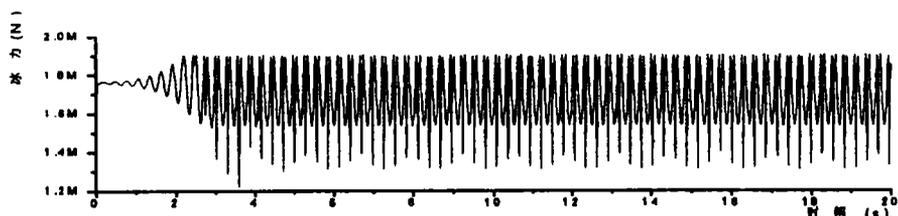


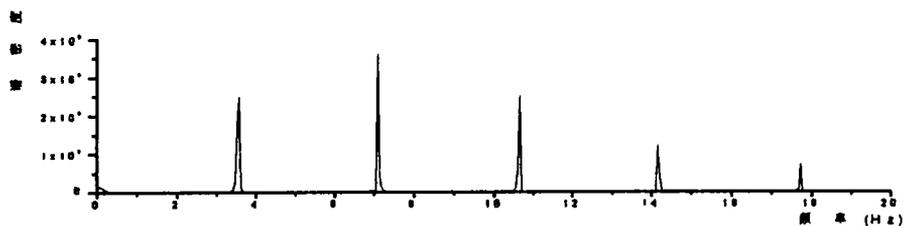
图 4 数值计算程序流程图

表 3 平台结构稳态响应

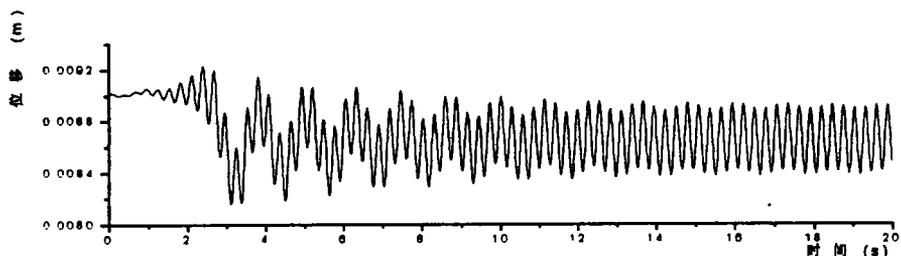
结构 模型	桩径 $d(\text{cm})$ 结构阻尼 比 ζ (%)	冰厚 $h(\text{cm})$ 冰速 $v_0(\text{cm/s})$	导管架端部			冰力作用处		
			位 移		加速度 (cm/s^2)	位 移		加速度 (cm/s^2)
			最大值(cm)	放大系数		最大值(cm)	放大系数	
1	$d=100$ $\zeta=4$	$h=40$ $v_0=8$	0.23	1.05	4.51	0.49	1.69	105.91
	$d=100$ $\zeta=10$	$h=120$ $v_0=15$	0.69	1.05	13.99	1.45	1.75	317.78
	$d=150$ $\zeta=4$	$h=120$ $v_0=15$	0.89	1.02	13.60	1.67	1.52	343.00
2	$d=100$ $\zeta=4$	$h=40$ $v_0=15$	1.15	1.04	3.94	1.84	2.19	218.71
	$d=100$ $\zeta=10$	$h=120$ $v_0=5$	4.31	1.00	1.16	3.50	1.08	78.47
	$d=150$ $\zeta=4$	$h=40$ $v_0=15$	1.53	1.01	3.13	1.97	1.73	170.69



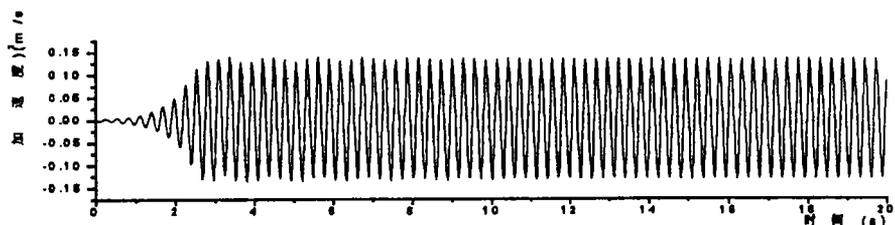
(a) 自激冰力



(b) 冰力功率谱

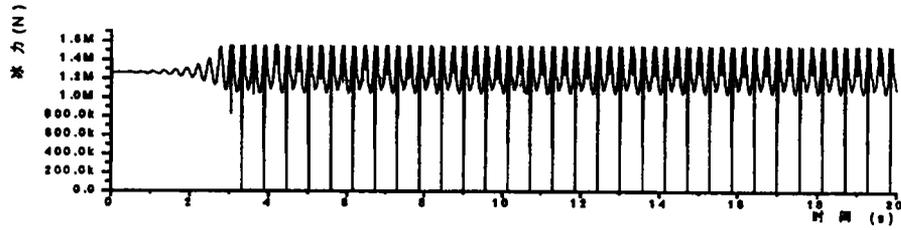


(c) 导管架端部位移

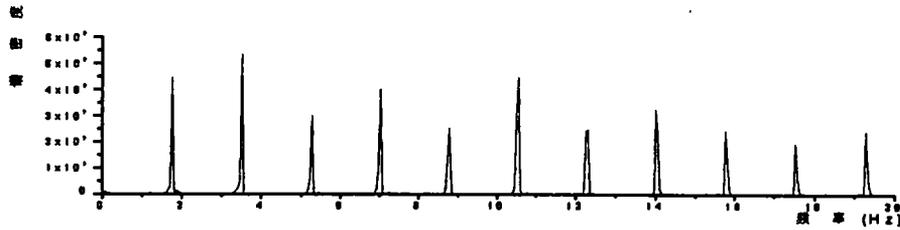


(d) 导管架端部加速度

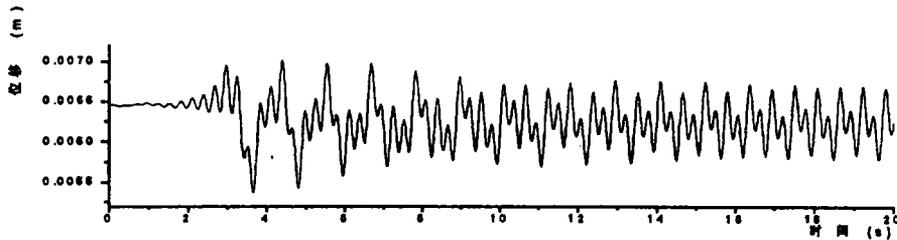
图4 冰力和模型1自激振动反应
(桩径 $d=150\text{cm}$, 结构阻尼比 $\zeta=4\%$; 冰厚 $h=120\text{cm}$, 冰速 $v_0=15\text{cm/s}$)



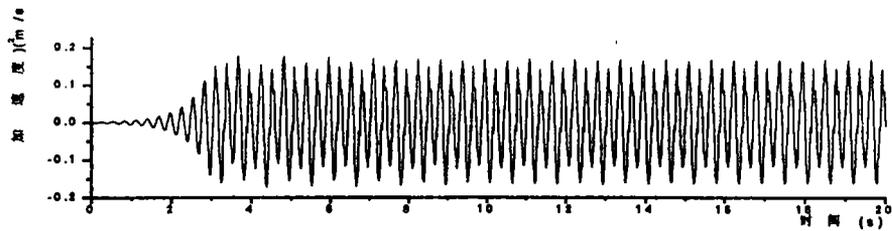
(a) 自激冰力



(b) 冰力功率谱



(c) 导管架端部位移



(d) 导管架端部加速度

图 5 冰力和模型 1 自激振动反应

(桩径 $d=100\text{cm}$, 结构阻尼比 $\zeta=4\%$; 冰厚 $h=120\text{cm}$, 冰速 $v_0=15\text{cm/s}$)

根据以上数值计算结果显示的自激冰力特点和结构振动响应特征, 可以得到以下结论:

(1) 自激冰力的频率结构取决于所激发的结构响应和冰与结构的接触状态；对于固定式平台结构自激冰力一般是高频激励；

(2) 自激冰力激发冰力作用处结构主要振动模态的响应，自激冰力不仅具有该模态频率成分，而且有 n 倍该模态频率的倍频率分量，这是结构非线性响应的谐波分量。自激冰力可能激发几个模态的振动，相应地，自激冰力有倍频率分量和它们的组合的频率分量；

(3) 当结构响应足够大时，冰与结构发生脱离。脱离具有比较固定的频率，约为 2Hz；自激冰力还有上述倍频率加 2Hz 的频率分量；

(4) 由于冰力和阻尼的非线性，自激冰力作用结构的响应振幅不会无限增大，而是经过过渡阶段后达到最大稳定振动状态。

5 结论

本文对平台结构冰自激振动的条件及其参数影响进行了分析，并对平台结构的冰自激振动进行了数值计算，得到如下结论：

1、结构冰自激振动发生的条件对冰速十分敏感，一般发生在较低冰速下比较窄的冰速范围内；柔性结构较刚性结构更容易发生冰自激振动；结构桩腿直径越小或冰越厚则越容易发生自激振动。

2、对于固定式平台结构，自激冰力是一种高频激振力，该作用力包含所激发的结构模态的频率和倍频率分量。

3、海冰作用下平台结构自激振动响应经过过渡阶段后达到稳定振动状态。

参考文献：

- [1] H R Peyton. Sea ice force[C]. Proceedings of Conference On Ice Pressures Against Structures, 1996.
- [2] H Matlock, W Dawkins, etc. Analytical model for ice-structure interaction[J]. ASCE J. Eng. Mech., 1971, EM4: 1083-1092.
- [3] M Maattanen. Stability of self-excited ice-induced structural vibration[C]. 4th International Conference On Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions, Newfoundland, 1977. 684-694.
- [4] 徐继祖, 李维扬, 等编著. 海洋工程结构动力分析[M]. 天津大学出版社, 1992.

(下转 035 页)

on a hypercube[J]. *Computers & Structures*, 1989;31(6): 921-934

NETWORK PARALLEL SUBSTRUCTURE CONJUGATE GRADIENT METHOD BASED ON PVM

YU Tian-tang, JIANG Hong-dao

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098)

Abstract: In recent years, network parallel environment is an important direction of parallel environment, PVM is one of the best popular software platforms which support heterogeneous or isogeneous network parallel computing. In this paper, a network parallel finite element method based on PVM is studied with substructure conjugate gradient method. In the method, the finite element grid is divided into n substructures, the information of n substructures is distributed to n microcomputers. The generation and formation of stiffness matrixes and loading arrays of n substructures are done by n microcomputers simultaneously. Preconditioned conjugate gradient method is employed to compute the nodal displacements, then each microcomputer determines the strains and stresses for its associated substructure. The method does not require the formation of global stiffness and loading array, the nodal displacements can be simultaneously obtained. The speed of convergency is faster than general superposition method. Examples show that the proposed parallel substructure conjugate gradient method can achieve better parallel speedup ratio for network.

Key words: network parallel environment; PVM; substructure method; preconditioned conjugate gradient method; parallel speedup ratio

(上接 017 页)

PARAMETRIC ANALYSIS AND RESPONSE SIMULATION OF SELF-EXCITED ICE-INDUCED VIBRATION OF OFFSHORE PLATFORM STRUCTURES

OU Jin-ping , DUAN Zhong-dong , WANG Gang

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150090)

Abstract: In accordance with the self-excited ice force theory, which was proposed by Maattanen, the influences of various parameters of ice and structure on the self-excited structural vibration were investigated. For simplified structure models of different dynamic properties, response simulations of ice-induced vibration were performed, and from the simulations some features of self-excited ice forces and structural vibrations were found. The results in this paper are useful for both promoting understanding of self-excited vibration and avoidance or control of this kind of vibration.

Key words: sea ice; fixed offshore platform structure; self-excited vibration