DOI:10.7511/jslx20240311001

基于向量式有限元的深海采矿立管动力响应分析

徐靖昌^{1,2}, 郑 皓², 闫鸿浩*1, 张 明², 王莹莹³

(1.大连理工大学工程力学系,大连116024; 2.长沙矿冶研究院有限责任公司深海矿产资源开发利用国家重点实验室,长沙410012; 3.中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院,北京102249)

摘 要:深海采矿立管是金属结核、富钴结壳、硫化物等水下金属矿产采集输送系统的重要组成部分,复杂海洋环 境载荷对立管力学特性产生了不利影响。向量式有限元法是基于向量式力学的一种新的动力学分析方法,本文 基于向量式有限元法编制 Matlab 程序对水下 5000 米级采矿立管进行动力响应分析,计算立管在波浪、海流等条 件下的位移构型、轴向内力和弯矩分布,并将结果与 Abaqus 和 Orcaflex 结果进行对比验证,同时运用该方法进一 步分析了采矿船运动、结构阻尼及内流速度对立管动力响应的影响。结果表明,采矿船运动会增大立管横向偏移 及两端轴力幅值,结构阻尼会降低采矿船对立管的影响并使结构更快趋于稳定,内流则会使得立管顶端轴力减 小,且减小量与内流速度正相关。同时也表明,向量式有限元法模拟采矿立管动力响应行为具有较高准确性和可 行性,为深海采矿立管机理研究提供了一种新的简便的有限元方法。

关键词:深海采矿;立管;向量式有限元法;动力响应;波流载荷;内流;采矿船运动 中图分类号:TDB57;O242.21 文献标志码:A 文章编号:1007-4708(2025)03-0369-08

1 引 言

深海金属矿产开采是缓解我国金属资源对外 依存大的重要途径,但因海洋环境复杂,深海采矿 系统面临诸多挑战。提升输送管道因其轴向尺寸 大、直径小、结构脆弱,在作业过程中承受波浪海流 等复杂外载荷影响时易发生破坏。动力响应分析 是研究立管在动力载荷作用下型态和力学特点的 主要方式。

目前,已有学者对海洋立管的动力响应开展了 相关研究,主要是使用基于传统有限元的大型商业 软件进行仿真分析。邓合霞^[1]较早地采用基于有 限元法的 Abaqus/AQUA 软件对立管动力响应进 行分析,并强调了在大尺度立管分析中非线性求解 的必要性。白雪峰等^[2]同样使用了 Abaqus 软件 对顶张力立管进行动力响应分析,得到了不同工况 下立管弯矩变化的特点。郑润等^[3]则搭建了实验 和监测平台,进行了模型实验,探究了海洋立管模 型在多因素耦合下的振动特性。高一凡^[4]使用基 于集中质量法的 Orcaflex 软件对采矿立管在不同 因数下的立管轴向振动特点和减振机理进行研究。 也有学者通过推导立管整体控制方程,自编有限元 程序模拟立管动力响应行为。王阳阳^[5]将仿真过 程分为静态和动态分析两个步骤,基于有限元方法 分别采用 Newton-Raphson 增量迭代法和 Newmark 法计算整体模型,发现水面平台纵摇运动对 立管振动影响最大。郐艳荣等^[6]采用了 Newmark 法求解立管有限元离散微分方程,考虑了内外流和 水面平台运动对悬线立管动力响应的影响。

传统有限元方法在分析问题时,需要组装集成 整体刚度矩阵,特别是在求解立管这种几何非线性 强的问题时,刚度矩阵不断随时间更新变化,需要 采用修正拉格朗日法和共旋法等求解切线刚度矩 阵,在建模和组装刚度矩阵时也需要特殊的数学技 巧,求解过程中也不稳定极易发散。向量式有限元 法最早是由丁承先等^[7]提出的,是以向量式力学为 基础的动力学分析新方法,在求解结构非连续力 学、大变位大变形和非线性问题方面具有简便、稳

作者简介:闫鸿浩*(1974-),男,博士,教授(E-mail:yanhh@dlut.edu.cn).

引用本文:徐靖昌,郑 皓,闫鸿浩,等.基于向量式有限元的深海采矿立管动力响应分析[J]. 计算力学学报,2025,**42**(3):369-376,403. XU Jing-chang,ZHENG Hao,YAN Hong-hao, et al. Dynamic response analysis of deep-sea mining riser based on vector form intrinsic finite element method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*,2025,**42**(3):369-376,403.

收稿日期:2024-03-11;修改稿收到日期:2024-04-13.

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC2803705);山东省重点研发计划(2021CXGC010707);湖南省科技创新计划(2022RC3003)资助项目.

定等优势^[8]。近些年来也有学者将向量式有限元 法应用在海洋立管上。李效民等^[9]基于 Fortan 使 用向量式有限元方法对多浮筒缓波型柔性立管纵 向运动和疲劳进行了研究。王飞等^[10]基于向量式 有限元法研究了钢悬链线立管触地段与海床土体 的相互作用。Li等^[11,12]基于向量式有限元法建立 二维及三维立管模型,研究了顶张力立管动力响 应。以上学者均论述了向量式有限元法在求解时 的优势和可行性,但在验证结果准确性上尚缺少更 加全面的对比分析,且该方法尚未应用在深海采矿 立管的动力响应研究上。

因此,本文基于向量式有限元方法,建立深海 采矿立管模型,编制 Matlab 求解程序,计算立管在 重力、浮力、波浪力、海流力等因素作用下的位移构 型、轴向内力和弯矩分布,并将结果与成熟商业软 件 Abaqus 及 Orcaflex 结果进行对比,验证结果准 确性,其次基于该方法进一步分析采矿船运动、结 构阻尼和内流速度对采矿立管动力响应的影响。

2 采矿立管数学模型建立

2.1 点值描述

根据向量式力学分析方法,可以通过选择一组 有限数目的质点来描述立管整体结构,结构的力学 特性由质点的运动状态确定。将立管用一系列质 点进行离散,质点与质点之间用单元连接,如图 1 所示,单元本身没有质量,将单元的平动质量和转 动惯量分配到质点上。平动质量包括质点自身的 集中质量和相连单元节点的等效质量,转动惯量包 括质点自身的集中惯量和相连单元节点的等效惯 量,两者均采用相连单元平均分配到节点然后集中 到质点的方法,即

$$M_i = m_i + \sum_{j=1}^k m_j$$
, $I_i = i_i + \sum_{j=1}^k i_j$ (1,2)

$$i_j = \left(\frac{1}{2}\rho lA\right) r_j^2 \tag{3}$$





式中 m_i 为质点集中质量, m_j 为与质点相连单元j的对应节点等效质量, i_i 为质点的集中惯量, i_j 为 与质点相连单元j的对应节点等效惯量,k为与质 点相连的单元总数, ρ 为立管材料密度,l为单元 长度,A为立管截面积,r为截面回转半径。

立管平面域坐标系设置为(x,y),对立管单 元设定一组随体坐标系 (\hat{x},\hat{y}) ,基底为 (\hat{e}_x,\hat{e}_y) , \hat{x} 始终沿单元杆轴方向, \hat{y} 为单元杆轴法向。在 t_n 时刻单元的方向基底求解为

$$\hat{e}_{xs}^{n} = \frac{x_{j}^{n} - x_{i}^{n}}{l^{n}}, \ \hat{e}_{ys}^{n} = \frac{y_{j}^{n} - y_{i}^{n}}{l^{n}}$$
(4)

式中 x_i, x_j为t_n时刻立管单元两端节点的 x 坐标 值, y_i, y_j为t_n时刻立管单元两端节点的 y 坐标 值, lⁿ为t_n时刻单元长度。

*t*_n 时刻单元随体坐标系转换到域坐标系的转换矩阵为

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{e}}_{xs}^{n} & -\hat{\boldsymbol{e}}_{ys}^{n} \\ \hat{\boldsymbol{e}}_{ys}^{n} & \hat{\boldsymbol{e}}_{xs}^{n} \end{bmatrix}$$
(5)

2.2 内力计算与虚拟逆向运动

向量式有限元法计算内力有三个步骤,首先是 假设 *t*_{n+1} 时刻立管单元经虚拟逆向运动回到 *t*_n 时 刻得到虚拟单元,由 *t*_{n+1} 时刻单元形变增量,根据 传统力学理论计算随体坐标系下单元的节点内力 分量和节点弯矩为

$$-\hat{f}_{jx}^{n+1} = \hat{f}_{ix}^{n+1} = \hat{f}_{ix}^{n} + \frac{EA}{l^{n}}(l^{n+1} - l^{n})$$
(6)

$$m_i^{n+1} = m_i^n + \frac{EI}{l^n} (4\theta_i + 2\theta_j)$$

$$m_j^{n+1} = m_j^n + \frac{EI}{l^n} (4\theta_j + 2\theta_i)$$
(7)

$$-\hat{f}_{jy}^{n+1} = \hat{f}_{jy}^{n+1} = \frac{m_i^{n+1} + m_j^{n+1}}{l^n}$$
(8)

式中 E 为弹性模量, I 为截面惯性矩, θ_i 和 θ_j 为立 管节点 t_n 时刻到 t_{n+1} 时刻节点角度变化值, m_i 和 m_j 为节点弯矩, \hat{f}_{ix} 和 \hat{f}_{jx} 为随体坐标系下内力 \hat{x} 轴分量, \hat{f}_{iy} 和 \hat{f}_{jy} 为随体坐标系下内力 \hat{y} 轴分量。

其次在 t_n 时刻将内力分量构成的向量从随体 坐标系转化到域坐标系下,即

$$\boldsymbol{f}_{i}^{n+1} = \boldsymbol{\Omega} \, \hat{\boldsymbol{f}}_{i}^{n+1}, \ \boldsymbol{f}_{j}^{n+1} = \boldsymbol{\Omega} \, \hat{\boldsymbol{f}}_{j}^{n+1}$$
(9)

式中 \hat{f}_{i}^{n+1} 和 \hat{f}_{j}^{n+1} 为 t_{n+1} 时刻随体坐标系下单元内力向量。

最后,单元经由正向运动回到 t_{n+1} 时刻得到正确的内力向量,整个过程如式(10)所示。单元转动的角度由 t_n 时刻和 t_{n+1} 时刻随体坐标下的单元 x̂

轴确定,转动角度计算如式(11)所示,立管单元正 向运动变换矩阵如式(12)所示,在平面问题中节点 弯矩在整个过程中无需转换。

$$\boldsymbol{f}^{n+1} = \boldsymbol{R}_{\gamma} \, \boldsymbol{\Omega} \, \hat{\boldsymbol{f}}^{n+1} \tag{10}$$

$$\Delta \theta = \arcsin(\hat{e}_{xs}^{n} \, \hat{e}_{ys}^{n+1} - \hat{e}_{ys}^{n} \, \hat{e}_{xs}^{n+1}) \tag{11}$$

$$\boldsymbol{R}_{\gamma} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta & -\sin\Delta\theta\\ \sin\Delta\theta & \cos\Delta\theta \end{bmatrix}$$
(12)

式中 $\Delta\theta$ 为 t_n 时刻到 t_{n+1} 时刻单元转动角度变化值, R_y 为转动变换矩阵。

得到域坐标系下各单元节点内力后,将内力集 成到各质点上,集成的质点内力与节点内力是一对 反作用力关系。

2.3 外力计算

外力计算的思路是在 t_{n+1} 时刻,首先按照逆向 运动假设将域坐标系下的单元外力转换为 t_n 时刻 随体坐标下的外力向量,然后同样依据传统有限元 理论求出单元节点的等效外力向量,再通过正向运 动转换回到平面域坐标系中。

立管在水中受到的外载荷主要有波浪力、海流 力、重力和浮力等。重力和浮力可在求得立管各质 点等效质量后直接在域坐标系下施加到质点上。 波浪力和海流力可根据莫里森公式求解,如式(13) 所示,其中等式右边第一、二项为波浪惯性力项,第 三项为波浪、海流拖拽力项。

$$f_{z} = \rho_{w} \frac{\pi D^{2}}{4} a_{w} + C_{a} \rho_{w} \frac{\pi D^{2}}{4} a_{r} + \frac{1}{2} C_{D} \rho_{w} D(v_{w} + v_{h}) | v_{w} + v_{h} | \qquad (13)$$

式中 f_z 为水深 z 处单位高度的立管受到的波浪和 海流载荷, C_a 为附加质量系数, a_w 为波浪水质点 加速度, a_r 为波浪水质点对立管的相对加速度, ρ_w 为海水密度, D 为立管直径, v_w 为波浪水质点对 立管相对速度, v_h 为海流水质点对立管相对速度, C_D 为拖拽力系数。

在计算式(13)时需要选取相应的波浪、海流理 论来计算在不同时刻以及不同空间点处的水质点 速度和加速度。

稳态海流在不同水深的速度分布一般根据经 验公式计算,如式(14)所示。

$$v_h = v_{bot} + (v_{top} - v_{bot}) \left(\frac{h-z}{h}\right)^{12}$$
 (14)

式中 v_{bot} 为海底海流速度, v_{top} 为海面海流速度, h 为总水深, z 为立管质点到水面的高度。

依据线性波理论, Airy 波水质点速度及加速 度计算公式为

$$v_{x} = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh(KZ)}{\sinh(Kh)} \cos(Kx - \omega t)$$

$$v_{y} = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh(KZ)}{\sinh(Kh)} \sin(Kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial v_{x}}{\partial t} = \frac{2\pi^{2} H}{T^{2}} \frac{\cosh(KZ)}{\sinh(Kh)} \sin(Kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial v_{y}}{\partial t} = -\frac{2\pi^{2} H}{T^{2}} \frac{\sinh(KZ)}{\sinh(Kh)} \cos(Kx - \omega t) \quad (15)$$

式中 H 为波高, T 为波浪周期, K 为波数, Z 为质 点距离海底的高度, ω 为波浪的圆频率。

域坐标系下波浪水质点速度向量 v 转换到立 管单元随体坐标系的方法如式(16)所示,波浪水质 点加速度向量和海流水质点速度向量转换方法同 理。

$$\hat{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{\Omega}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{R}_{\boldsymbol{\gamma}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{v} \tag{16}$$

求得随体坐标系下水质点速度和加速度向量 后,依据式(13)分别计算立管单元的海流力及波浪 力载荷,立管法向分布的力近似认为线性分布载 荷,立管轴向载荷近似认为线性分布,随体坐标系 下节点等效外力求解公式为

$$\hat{f}_{iy} = \frac{(7 \ \hat{p}_i + 3 \ \hat{p}_j)l}{20}$$

$$m_i = \frac{(3 \ \hat{p}_i + 2 \ \hat{p}_j)l^2}{60}$$

$$\hat{f}_{jy} = \frac{(7 \ \hat{p}_j + 3 \ \hat{p}_i)l}{20}$$

$$m_j = \frac{(3 \ \hat{p}_j + 2 \ \hat{p}_i)l^2}{60}$$
(17)
$$\hat{f}_{ij} = \frac{l}{60} (2 \ \hat{p}_i + \hat{p}_j)$$

$$\hat{f}_{jx} = \frac{l}{6} (2 \, \hat{p}_j + \hat{p}_j) \tag{18}$$

式中 \hat{f}_{iy} 和 \hat{f}_{jy} 为立管法向的波浪海流节点等效力 分量, \hat{f}_{ix} 和 \hat{f}_{jx} 为立管轴向的波浪海流节点等效 力分量, m_i 和 m_j 为等效节点弯矩, p_i 和 p_j 为立管 单元对应的节点载荷。

在求得随体坐标系下的单元节点等效外力向 量后,依据式(10)将等效外力向量转换至域坐标系 下,最后将每个单元节点等效外力集成到立管各个 质点上。

2.4 质点控制方程与差分格式

向量式有限元各质点运动依据牛顿第二定律, 在立管平面问题中,质点存在两个平动和一个转动 运动,当考虑立管阻尼时,各质点的控制方程为

$$M_i \ddot{x} + \zeta_m M_i \dot{x} = f_{ix}$$
$$M_i \ddot{y} + \zeta_m M_i \dot{y} = f_{iy}$$

$$I_i \ddot{\beta}_i + \zeta_I I_i \dot{\beta}_i = m_{iz} \tag{19}$$

式中 β_i 为质点转角, f_{ix} 和 f_{iy} 为质点内外力和, m_{iz} 为质点总弯矩, ζ_m 和 ζ_1 为立管阻尼。

为了提高计算精度,采用中心差分格式对控制 方程进行离散,该方法利用 t_{n-1} 和 t_n 时刻的几何和 受力状态进行求解,质点控制方程离散可表示为

> $x_{i}^{n+1} = 2C_{1}x_{i}^{n} - C_{2}x_{i}^{n-1} + C_{1}s^{2}f_{ix}/M_{i}$ $y_{i}^{n+1} = 2C_{1}y_{i}^{n} - C_{2}y_{i}^{n-1} + C_{1}s^{2}f_{iy}/M_{i}$ $\beta_{i}^{n+1} = 2C_{3}\beta_{i}^{n} - C_{4}\beta_{i}^{n-1} + C_{3}s^{2}m_{iz}/I_{i}$ (20)

式中 x_i^{n+1} , x_i^n , x_i^{n-1} 为质点在 t_{n+1} , t_n , t_{n-1} 时刻的 x位移分量, y_i^{n+1} , y_i^n , y_i^{n-1} 为质点在 t_{n+1} , t_n , t_{n-1} 时刻的 时刻的y位移分量,控制方程离散所得系数 $C_1 = 1/(1+\zeta_m s/2)$, $C_2 = C_1/(1-\zeta_m s/2)$, $C_3 = 1/(1+\zeta_1 s/2)$, $C_4 = C_3/(1+\zeta_1 s/2)$,s为时间步长。

3 数值求解

基于上述向量式有限法的理论编制 Matlab 程 序进行求解,并将计算结果与基于传统有限元的 Abaqus 软件及基于集中质量法的 Orcaflex 软件 结果进行对比验证。本文计算的深海采矿立管包 含矿浆内流质量,同时还带有扬矿泵和中间仓这一 采矿立管特有的附属设备,各部分如图 2 所示,立 管的具体参数来自文献[13],列入表 1。

本文研究 5000 米级采矿立管,针对水深与波 浪波长比大于 20 的情况,波浪通常选取 Airy 波来 模拟,具体海况参数列入表 2。

图 3 为同一工况下,即立管顶端简支,初始时 刻保持竖直状态且无结构阻尼及内流速度时,受到波 浪和海流作用下 Matlab 程序与 Abaqus 及 Orcaflex

	表	1	立	管	参	数
--	---	---	---	---	---	---

Ta	b.1	Riser	parameters
----	-----	-------	------------

参数	值
长度/m	5000
外径/m	0.254
壁厚/m	0.024
材料质量密度/kg·m ⁻³	10099
内流质量密度/kg·m ⁻³	1200
弹性模量/Pa	2.06 $\times 10^{11}$
提升泵质量/kg	8000
提升泵位置/m	水下 800
中间仓湿重/kg	22000
中间仓位置/m	水下 5000
拖曳力系数	1.2
惯性力系数	2.0





表 2 海况参数

Tab. 2 Sea condition parameter

参数	值
波高/m	3.9
波长/m	155.97
周期/s	10
海面流速/m•s ⁻¹	1.7
海底流速/m \cdot s ⁻¹	0.1

的动力响应计算结果对比。图 3(a)为立管水下构型,在三种软件计算下,位移构型一致,立管在水下 0~500 m 时横向偏移快速增大,在 500 m 后放缓, 其中基于向量式有限元法的自编程序求解最大横 向偏移为 7.22 m, Abaqus 计算的最大横向偏移为 7.18m,误差为 0.5%;Orcaflex 计算的最大横向偏 移为 7.78 m,误差为 7.2%,图 1(b,c)中的轴力和 弯矩误差均极小。一般集中质量法计算精度不如 采用连续系统的传统有限元法的精度高,与实际情 况也存在一定差异,而由图中位移、轴力和弯矩的 结果可知,向量式有限元法的计算结果介于集中质 量法和传统有限元法之间,说明本文的方法及程序 在分析立管动力响应问题时具有一定的准确性和 可行性。

由于采矿立管含有扬矿泵和中间仓设备,因此 图 3(b)中轴力曲线在水下 800 m 处出现弯曲变 化,在水下 5000 m 处立管轴力不为 0,扬矿泵和中 间仓增大了立管在安装位置处的轴力。图 3(c)为 立管弯矩分布,可知最大弯矩为 756.12 kN •m~ 931.06 kN •m,均出现在水面附近,在水下 1000 m 后趋于 0,主要原因是海流速度在水下 0 m~1000 m 内迅速减小到 0.1 m/s,海流力在水下 1000 m 后较 小,以及水面波浪力周期性变化带来的影响。





4 不同参数对立管动力响应影响

4.1 采矿船运动

在平面问题中,采矿船在水平和垂直方向上存 在两个自由度,主要为水平慢漂运动和升沉运动, 慢漂为船舶在波浪作用下摇荡频率低,近似缓慢行 驶,船舶升沉运动可采用正弦函数来进行近似描 述。根据本文海况以及深海采矿立管特性,采矿船 运动公式可取为

$$x(t) = 6.54\sin\left(\frac{2\pi t}{10}\right), y(t) = \sin(1.5t)$$
 (21)

式中x(t),y(t)分别为采矿船水平和垂向位移,t

为分析时间。

由图 4(a)可知,采矿船运动对立管构型和受 力会产生较大影响。立管整体构型产生扰动变化, 且最大横向偏移相较于立管顶端简支约束时增大, 在 720 s 时最大横向位移为 15.40 m。由图 4(b) 可知,采矿船运动使得立管顶端轴力在 6300 kN~ 10500 kN内周期性变化,会对立管的结构强度及 疲劳产生不利影响。图 4(c)为不同水深处立管节 点的横向位移时程,可知随着水深增加,节点横向 位移的波动幅值迅速减小,采矿船水平运动对立管 的影响随着水深的增加而衰减。由图 4(d)可知, 水下 4000 m 处节点纵向位移波动幅值较大,水下 1500 m 处节点位移波动幅值较小,且进一步由图 4(e)波动幅值在立管的分布曲线可以发现,立管节 点波动幅值最小值在水下 1650 m 处,最大值在立 管底端,故采矿船的升沉运动会使立管整体的纵向 位移产生波动变化,对立管中部影响较小,对立管 顶端和底端的纵向位移影响较大,进而恶化立管两 端轴力。

4.2 结构阻尼

阻尼是系统能量耗散形式的统称,会对结构形态等产生影响^[14]。采矿立管因自身结构属性,以及在水中运动等都会受到阻尼的影响。本文在考虑采矿船运动的基础上,进一步分析当结构阻尼 分别为 0,0.4,0.8 时阻尼对立管的动力响应的影响。

由图 5 可知,结构阻尼会对立管构型、轴力、节 点横向及纵向位移产生影响。当存在结构阻尼时, 立管最大横向偏移减小,且结构阻尼越大,横向偏 移量越小,立管构型也更加光顺。无阻尼时,最大 轴力为 14000 kN,立管顶端轴力在 50 s 后趋于稳 定;结构阻尼为 0.4 时,最大轴力为 11200 kN,轴 力在 20 s 后趋于稳定;结构阻尼为 0.8 时,最大轴 力为 11000 kN,轴力在 12 s 后趋于稳定,可见阻尼 越大,立管轴力峰值越小,也越快趋于稳定。由图 5(c,d)可知,阻尼越大,立管节点在横向和纵向位 移波动幅值越小,也越快趋于稳定。因此,结构阻 尼可以减弱采矿船周期性运动带来的不利影响,且 有利于立管结构的稳定。

4.3 管道内流速度

立管内部矿浆流动因素也是重要的研究内容, 本文设置矿浆流速分别为 0.6 m/s,3.6 m/s, 7.2 m/s,在结构阻尼 ζ 为 0.8 且无采矿船运动影 响时,分析不同内流速度对立管的影响。





由图 6 可知, 深海采矿立管内矿浆提升流动速度会 对立管构型及内力产生影响。矿浆内部流动主要 对管道产生轴向内摩擦力^[15], 图 6(a)中, 内流速度 越大, 立 管 横 向 偏 移 越大。当内 流 速 度 为 0.6 m/s, 最大偏移为 5.424 m; 当速度为 7.2 m/s 时, 最大偏移为 5.480 m。立管节点的纵向位移值 减小, 立管整体构型上移。由图 6(b)可知, 内流速 度越大, 立管顶端轴力越小。内流速度为 0.6 m/s 时, 轴力为 8274 kN; 内流速度为 7.2 m/s 时, 轴力 为 8086 kN, 主要原因为内摩擦力抵抗重力, 立管 质点纵向位移减小, 进而使得轴向内力减小。



5 结 论

本文将向量式有限元法应用于采矿立管动力 响应的模拟中,并将结果与 Abaqus 及 Orcaflex 结 果进行对比,并进一步分析了采矿船运动和立管结 构阻尼及内流速度对立管内力及构型的影响,得到 以下结论。

(1)向量式有限元法与有限元法的 Abaqus 及 集中质量法的 Orcafex 计算结果相吻合,且计算精 度介于 Abaqus 和 Orcaflex 之间,表明向量式有限 元法在分析采矿立管动力响应问题中具有一定的 准确性和可行性。

(2)向量式有限元法在分析采矿船运动影响 时,可以直接在立管质点控制方程上施加动态边 界,实现动力学行为分析。采矿船的水平运动会扰 动立管构型,增大了立管最大横向偏移量,升沉运 动对立管顶端和底端节点的纵向位移影响较大,导 致立管两端轴力产生周期性波动变化,进而加剧疲 劳损伤,影响立管使用寿命。

(3)向量式有限元法可以有效分析结构阻尼对 立管动力响应的影响,符合阻尼对结构的能量耗散 特性。立管结构阻尼可以减小采矿船运动影响下 的立管最大横向偏移量,减小立管节点位移和顶端 轴力幅值,并使其趋于稳定,且阻尼越大,趋于稳定 的速度越快。

(4)向量式有限元法在分析外力对立管结构影 响时,可以快速且灵活地施加外力。波浪及海流使 立管产生横向偏移,立管内流则进一步增大横向偏 移,但偏移量相对波流较小。内流能减小立管顶端 轴力,且速度越大,轴力越小,对立管结构强度设计 具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 邓合霞.海洋立管在非线性波浪载荷下的极值响应研究[D].哈尔滨工程大学,2006.(DENG He-xia. The Research of Extreme Response of Ocean Riser Subjected to Nonlinear Wave Loads[D]. Harbin Engineering University,2006.(in Chinese))
- [2] 白雪峰,王 璐,方 正.复杂海洋载荷作用下深水海 洋立管非线性动力响应分析[J]. 舰船科学技术, 2022,44(7):104-108,131.(BAI Xue-feng, WANG Lu,FANG Zheng. Nonlinear dynamic response analysis of deepwater riser under complex ocean loads[J]. Ship Science and Technology,2022,44(7):104-108, 131.(in Chinese))
- [3] 郑 润,王春光,何文涛,等. 多参数耦合作用下海洋 立管动力响应实验[J]. 科学技术与工程,2023,23
 (22): 9413-9422. (ZHENG Run, WANG Chunguang, HE Wen-tao, et al. Experimental of dynamic response of marine riser under coupling effect of multiparameter [J]. Science Technology and Enginee-

ring, 2023, 23(22): 9413-9422. (in Chinese))

- [4] 高一凡.深海采矿立管系统纵向振动减振机理研究
 [D].中国石油大学(北京),2021. (GAO Yi-fan. Research on Longitudinal Vibration Damping Mechanism of Deep Sea Mining Riser System [D]. China University of Petroleum (Beijing), 2021. (in Chinese))
- [5] 王阳阳.钢悬链线立管与半潜式平台耦合动力响应研究[D].中国石油大学(华东),2017.(WANG Yangyang. Integrated Dynamic Response Analysis of Steel Catenary Riser and Semi-submersible Platform[D]. China University of Petroleum (Huadong),2017.(in Chinese))
- [6] 邻艳荣,周济福,王 旭.内外流作用下悬链线立管动 力响应分析[A].第三十一届全国水动力学研讨会论 文集(下册)[C].2020.(KUAI Yan-rong,ZHOU Jifu,WANG Xu. Dynamic response analysis of the catenary riser due to internal flow angoceancurrent[A]. Proceedings of the 31st National Hydrodynamics Symposium[C].2020.(in Chinese))
- [7] 丁承先,段元锋,吴东岳.向量式结构力学[M].北京:
 科学出版社,2012. (DING Cheng-xian, DUAN Yuan-feng, WU Dong-yue. Vector Mechanics of Structures
 [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [8] 余 杨,赵 字,张振兴,等.多浮筒段缓波型立管向 量有限元分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技 术版),2021,54(6):561-574.(YU Yang,ZHAO Yu, ZHANG Zhen-xing, et al. Analysis of a lazy-wave riser with multi-buoy sections based on VFIFE[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2021,54(6):561-574.(in Chinese))
- [9] 李效民,张 林,牛建杰,等.基于向量式有限元的深 水顶张力立管动力响应分析[J].振动与冲击,2016, 35(11):218-223. (LI Xiao-min, ZHANG Lin, NIU Jian-jie, et al. Dynamic response of a deep-sea top tensioned riser based on vector form intrinsic finite element[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35 (11):218-223. (in Chinese))

- [10] 王 飞,李效民,马芳俊,等. 向量式有限元法在管土 相互作用中的应用[J]. 船舶力学,2019,23(4):467-475. (WANG Fei, LI Xiao-min, MA Fang-jun, et al. Application of vector form intrinsic finite element method on riser/seafloor interaction[J]. Journal of Ship Mechanics, 2019,23(4):467-475. (in Chinese))
- [11] Li X M, Guo X L, Guo H Y. Vector form intrinsic finite element method for the two-dimensional analysis of marine risers with large deformations[J]. Journal of Ocean University of China, 2018, 17(3):498-506.
- [12] Li X M, Guo X L, Guo H Y. Vector form intrinsic finite element method for nonlinear analysis of threedimensional marine risers [J]. Ocean Engineering, 2018,161:257-267.
- [13] 肖林京,左 帅,宋庆辉,等.深海采矿扬矿管的静态 特性分析[J]. 矿业研究与开发,2020,40(4):130-135. (XIAO Lin-jing, ZUO Shuai, SONG Qing-hui, et al. Analysis on static characteristics of lifting pipe in deep sea mining[J]. *Mining Research and Development*,2020,40(4):130-135. (in Chinese))
- [14]张 敏,范蓓蓓.高效耗能摩擦阻尼钢筋混凝土框架 结构减震性能分析[J].计算力学学报,2023,40(6): 912-919.(ZHANG Min,FAN Bei-bei. Analysis of the seismic performance of reinforced concrete frame structures with high-efficiency energy-consuming friction dampers[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023, 40(6): 912-919. (in Chinese))
- [15] 万串串,许文远,史采星,等. 高浓度全尾砂浆大垂高 长距离管道输送阻力计算与工程实践[J]. 中国矿业, 2023, 32 (10): 153-158. (WAN Chuan-chuan, XU Wen-yuan, SHI Cai-xing, et al. Resistance calculation and engineering practice of high concentration unclassified tailings slurry transportation in long distance pipeline with large vertical height[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(10): 153-158. (in Chinese))

Nonlinear analysis method for frame structure with no consideration of geometric stiffness

CHEN An-quan^{*1,2}, LIN Hang-wei¹

 School of Architecture and Engineering, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China;
 The Engineering Technology Research Center of Intelligent Construction and Building Industrialization of Neijiang, Neijiang 641100, China)

Abstract: Based on the mechanical mechanism of incremental iteration, the characteristics of predictor, corrector and equilibrium check are analyzed in detail. Combined with the rigid body rule, an accurate formula for calculating the recovery force of element nodes in nonlinear analysis of frame structures is established. Meanwhile, a refined plastic hinge model is utilized to construct the elasto-plastic beam element and derive the elasto-plastic stiffness matrix, and the nonlinear analysis method for frame structures with a clear physical concept and simple process is established. Through the analysis of typical cases, it is demonstrated that using only elastic stiffness or elasto-plastic stiffness can address the nonlinear response of the frame structure even without considering the geometric stiffness. The only sacrifice is to slightly increase the number of iterations in the numerical calculation. The result proves the reliability of the proposed method, which is the application of elastic stiffness and elasto-plastic stiffness of frame structures in nonlinear capacity and post-buckling analysis.

Key words: frame structure; geometric nonlinearity; material nonlinearity; rigid body rule; refined plastic hinge

(上接第376页)

Dynamic response analysis of deep-sea mining riser based on vector form intrinsic finite element method

XU Jing-chang^{1,2}, ZHENG Hao², YAN Hong-hao^{*1}, ZHANG Ming², WANG Ying-ying³
 (1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep-sea Mineral Resources, Changsha Research Institute

Mining and Metallurgy Co.,Ltd.,Changsha 410012,China; 3. College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum,Beijing 102249,China)

Abstract: A deep-sea mining riser is an important part of the collection and transportation system of underwater metal minerals such as metal nodules, cobalt-rich crusts and sulfides. The complex marine environment load has an adverse effect on the mechanical properties of the riser. The vector-form intrinsic finite element(VFIFE)method is a new dynamic analysis method based on vector mechanics. In this paper, the Matlab program based on the VFIFE is used to analyze the dynamic response of an underwater 5000 m mining riser. The displacement configuration, axial internal force and bending moment distribution of the riser under the conditions of wave and current are calculated, and the results are compared with Abaqus and Orcaflex. The effects of mining ship motion, structural damping and internal flow velocity on the dynamic response of the riser are further analyzed. The results show that the movement of the mining ship will increase the lateral deviation of the riser and the amplitude of the axial force at both ends. The structural damping will reduce the influence of the mining ship on the riser and make the structure tend to be come stable faster. The internal flow will reduce the axial force at the top of the riser, and the reduction is positively correlated with the internal flow velocity. It also shows that VFIFE has high accuracy and feasibility in simulating the dynamic response behavior, and provides a new and simple finite element method for the study of deep-sea mining riser mechanism.

Key words:deep sea mining;riser;vector from intrinsic finite element(VFIFE);dynamic response;wave current load;Inward flow;mining vessel movement