

基于 ADAMS 的新一代水下生产系统功能舱深水悬垂下放仿真研究

贾晓丽^{1*}, 郭永豪¹, 刘书海¹, 王懿²

1 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)海洋工程研究院, 北京 102249

* 通信作者, xljia@cup.edu.cn

收稿日期: 2018-05-03

国家重点研发计划项目(2016YFC0303708)和国家自然科学基金项目(11872377,11402309)联合资助

摘要 悬垂下放法(Pendulous Installation Method, 简称PIM)是针对超深水环境和较大重量管汇的安装专门设计的一种快捷、简便的安装方法,更适用于新一代水下生产系统。本文基于多体动力学软件ADAMS对功能舱的下放过程进行仿真,将功能舱简化为球体加圆柱体的组合体形式,以多段小圆柱体加轴套力的形式近似模拟缆索,参考Morison公式进行绕流阻力的计算,建立了悬垂下放多刚体动力学仿真模型。通过与其他参考文献结果对比验证了模型的有效性。讨论了流体速度、功能舱重力和缆索长度等对下放过程的影响。本文研究内容可对新一代水下生产系统功能舱的工程应用提供理论指导。

关键词 新一代水下生产系统; 悬垂下放; 功能舱; ADAMS; 多刚体动力学仿真模型

Simulation study of the pendulous installation of function modules of the new generation underwater system for deepwater production based on ADAMS software

JIA Xiaoli¹, GUO Yonghao¹, LIU Shuhai¹, WANG Yi²

1 College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Institute for Ocean Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract The pendulous installation method (PIM) is a quick and convenient installation method specially designed for the installation of ultra-deep water and large weight manifolds. This is more suitable for the new generation underwater production systems. This article simulates the pendulous process of the function module with ADAMS software. The function module is simplified as a combination of a sphere and a cylinder. The cable model is approximately simulated in the form of a multi-segment small cylinder plus bushing force. The Morison formula is used to calculate the flow resistance. A multi-rigid-body dynamic simulation model by pendulous installation method was established. The validity of the model is verified by comparing the simulation results with other references. The effect of fluid velocity, gravity of the function module and cable length on

引用格式: 贾晓丽, 郭永豪, 刘书海, 王懿. 基于ADAMS的新一代水下生产系统功能舱深水悬垂下放仿真研究. 石油科学通报, 2019, 02: 174-183
JIA Xiaoli, GUO Yonghao, LIU Shuhai, WANG Yi. Simulation study of the pendulous installation of function modules of the new generation underwater system for deepwater production based on ADAMS software. Petroleum Science Bulletin, 2019, 02: 174-183. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.02.016

the pendulous process is discussed. The research content of this paper can provide theoretical guidance for the engineering application of the function module of new generation underwater production systems.

Keywords new generation underwater production system; pendulous installation method; function module; adams; multi-rigid-body dynamic simulation model

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.02.016

悬垂下放法是针对超深水环境和较大重量管汇的安装专门设计的一种快捷、简便的安装方法,适用水深范围 3000 m 以内,对提升能力和气候窗要求不高。Petrobras 公司最早采用悬垂下放法成功将 280 t 和 200 t 的管汇安装在 1845 m 和 1900 m 水深的位^[1]。姚丽琳利用 FLUENT 和 SESAM 对悬垂下放过程船-缆一体耦合系统进行了时域耦合分析,发现下放过程中,缆索张力稳定,不会出现对缆索造成致命破坏的突变载荷^[2]。张万里以 MOSES 对 PIM 下放管汇的入水阶段和下放阶段进行模拟,分析了风速、流速和波高等参数的敏感性,并提出了一套适用于深水下放安装数值模拟的非线性耦合时域分析方法^[3]。Wang 等人提出了一种非传统悬垂安装方法,并且对 1500 m 水深 195 t 管汇的安装进行了研究,采用 FLUENT 和 SIMO 软件分析得到了船舶运动时间历程、管汇响应及缆索张力^[4]。李欣等人采用非线性时域耦合分析技术对管汇悬垂安装进行了研究,结果表明水上船舶的运动对缆索有显著影响,管汇的重心、浮心等位置对运动也有重要影响^[5]。赵梦一等建立了 PIM 法下放的风险评估体系,得出悬垂运动是事故多发阶段,波浪影响绞车承载能力和安装绳最大张力的确定等结论^[6]。Madduma 等对 Dual Cap-X 下放阶段进行模拟,研究了海流速度、重量和阻力系数的敏感性。分析发现海流速度会影响全局响应,并且流速增加会延长重物下放时间,而增加重量可以缩短这一时间^[7]。

掌握功能舱悬垂下放过程的动力学特性对悬垂下放的成功实施具有非常重要的影响,对缆索进行动力学建模分析是悬垂下放法研究非常重要的一种手段。Niedzwecki 和 Thampi 于 1991 年提出了一种多自由度的集中质量模型^[8]。随后, Kamman 和 Huston 利用集中质量法对固定长度和可变长度缆段的拖曳系统进行了仿真^[9]。在缆索有限段法方面, Kamman 采用三维有限段方法研究了缆索的水下运动,通过与实验数据对比证明了此方法的可行性^[10]。Triantafyllou 采用此法研究了下端自由、上端作缓慢运动的锚链运动特性^[11]。丁昱对多刚体动力学在锚链系统研究中的应用作了初步尝试,分析了锚链系统的运动及动力特性,

并计算了锚链的张力变化^[12]。王延辉等根据 Huston 的多体力学理论以水下弹性缆索为研究对象,发展了缆索的多体有限段模型,提出弹性缆段模型,用于求解弹性缆索的动力学响应^[13]。

本文采用多体理论针对功能舱下放过程进行多刚体动力学建模,使用多体动力学分析软件 ADAMS 进行仿真,并将安装船与下放功能舱纳入整个多体系统。ADAMS 求解器采用拉格朗日方程方法,可快速建立系统动力学方程,并用自带求解器对系统进行静力学、运动学和动力学分析。本文采用 ADAMS 命令流语言编写模型,将模型参数化,在此基础上研究流体速度、功能舱重力和缆索长度等关键参数对功能舱下放过程动力学特性的影响。

1 模型建立

新一代水下生产系统是将传统海底平面分散布置的水下装备集成到深水功能舱,形成全水下立体空间布局的创新性完整方案。功能舱安装在深水数十兆帕高压和 4℃ 以下的环境中,这使得传统安装方法,如钻杆下放法、吊机下放法不再适用。在深水条件下,由于下放缆索或钻杆的自身重量使其承重能力下降很快,导致这两种方法失效。另外,缆索和钻杆的长度增加也会加剧轴向共振^[14],而悬垂下放法可以避免此种情况的发生。以下放管汇为例,悬垂下放法流程如图 1 所示:在安装地点,下放缆索一端与管汇相连,一端与安装船相连。运输船用吊机将管汇吊起,行驶一段距离,然后下放管汇通过飞溅区(水平面以下 50 m 内),见图 1(a);之后运输船释放管汇,管汇靠自身重力像摆钟一样垂放至接近海底。受拖曳力以及绳索和浮力模块的阻尼作用的影响,管汇不会来回做钟摆运动,见图 1(b)。本文把悬垂下放阶段分为三个阶段,图 1(b)中 1 位置是开始阶段,中间的 2 位置是悬垂阶段,3 位置是稳定阶段。

1.1 绕流阻力

在仿真分析中,缆索和功能舱流体阻力的处理对

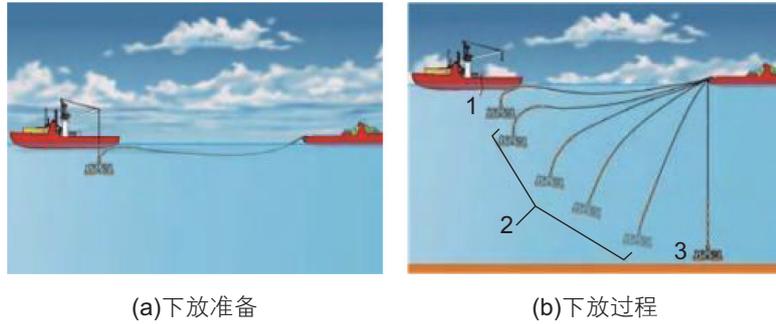


图1 悬垂下放流程示意图

Fig. 1 Pendulous installation method flow diagram

整个系统有很大影响。海洋环境参数主要有风、浪、流三部分构成，本文中定义下放过程开始时缆索和下放重物在飞溅区以下，故忽略了缆索和下放重物受到风浪的影响，重点考虑水流速度及其方向的影响。缆索和功能舱相对于波浪尺度很小，根据小尺度结构物的 Morison 公式进行圆柱绕流阻力的计算^[15]。

根据 Morison 方程，绕流阻力由两项组成，如式(1)所示，第一项是与速度平方有关的拖曳力，第二项是与流体速度变化有关的惯性力。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho D u_x |u_x| + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u_x}{\partial t} \quad (1)$$

其中， C_D 、 C_M 分别为拖曳力系数和惯性力系数，均无因次； ρ 为流体密度， kg/m^3 ； D 为柱体直径， m ； u_x 为流体相对速度， m/s 。

为便于模型的建立，将式(1)中的拖曳力和惯性力分别向法向和切向分解，分解后的法向阻力如下

$$F_n = \frac{1}{2} C_{D_n} \rho D u_n |u_n| + C_{M_n} \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u_n}{\partial t} \quad (2)$$

其中， C_{D_n} 、 C_{M_n} 分别为法向拖曳力系数和法向惯性力系数，均无因次； u_n 为相对流体法向速度， m/s 。

分解后的切向阻力为

$$F_t = \frac{1}{2} C_{D_t} \rho D u_t |u_t| + C_{M_t} \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u_t}{\partial t} \quad (3)$$

其中， C_{D_t} 、 C_{M_t} 分别为切向拖曳力系数和切向惯性力系数，均无因次； u_t 为相对流体切向速度， m/s 。

1.2 变阻力系数

大多数的缆索系统仿真中，都将阻力系数取为常数，对于平稳的动态过程这种取法基本满足要求。但是对于缆索曲率随时间变化较大的情况，阻力系数取常数是 inaccurate 的，因为曲率随时间变化大，意味着各点的速度差异很大，各点的雷诺数也就不同，导致阻

力系数不同。因此，为了提高仿真精度，增强模型适应性，采用分段变阻力系数。根据李斯特实验^[16]，取法向阻力系数为

$$C_{D_n} = \begin{cases} 0.0 & Re_n \leq 0.1 \\ 0.45 + \frac{5.93}{Re_n^{0.33}} & 0.1 < Re_n \leq 400.0 \\ 1.27 & 400.0 < Re_n \leq 10^5 \\ 0.3 & Re_n > 10^5 \end{cases} \quad (4)$$

切向阻力系数为

$$C_{D_t} = \begin{cases} \frac{1.88}{Re_t^{0.74}} & 0.1 < Re_t \leq 100.5 \\ 0.062 & Re_t > 100.5 \end{cases} \quad (5)$$

其中， Re_n 和 Re_t 分别为法向雷诺数和切向雷诺数，均无因次。

1.3 仿真模型建立

缆索建模在 ADAMS 中有三种方法^[17]：(1)多段小圆柱体加球铰链建模；(2)生成柔性体方式建模；(3)多段小圆柱体加轴套力方式建模。ADAMS 中球铰链约束了两物体间的三个移动自由度，从提高仿真准确性角度可知多段小圆柱体加球铰链建模法不适用。对于大变形的柔性绳索类物体，生成柔性体方式无法直接建模。多段小圆柱体加轴套力的形式满足计算精度和计算速度的综合要求，易用命令流实现，并且它与缆索有限段模型相近，所以本文采用此方法对缆索进行建模。

悬垂下放法的缆索主要由三段组成：从安装船起，第一段为长度较短的链条，连接于安装船；第二段为长度较长的涤纶绳；第三段为布置了浮体单元的钢丝绳，整个模型见图 2 所示。其中(a)是模型的示意图，(b)是整体模型，(c)、(d)、(e)分别为几个连接处的局部放大图。图 3 是分布式浮力模块，它分布在钢丝绳上。

在 ADAMS 环境下，首先定义随物体移动的单向力，根据公式(2)、(3)添加每一段小圆柱体和功能舱的法向及切向绕流阻力。在 ADAMS 中，可以利用设计变量来定义下放系统的参数，利用状态变量来补充定义与时间有关的参数。利用设计时函数来获得指定物体对于给定坐标系的线(角)速度、线(角)加速度等运动学量，将获得的这些量定义成状态变量或者直接写入每一小段模型力的表达式中，就完成了模型中流体阻力的添加^[18]。

其次定义固定在全局坐标系下的单向力，可以添加每一个小圆柱体、功能舱、分布式浮力模块的浮力。在模型中，每个浸入海水中的物体上均作用有

浮力，浮力大小由该部分体积确定，体积可以由设计变量参数直接写出。重力默认 Y 方向，加速度大小为 -9.80665 m/s^2 。浮力如式(6)所示：

$$B_k = -\rho g \pi \left(\frac{D_k}{2}\right)^2 \quad (6)$$

其中， ρ 为流体密度， kg/m^3 ； g 为重力加速度， m/s^2 ； D_k 为第 k 段物体的柱体直径， m 。轴套力在 ADAMS 中只需给定六个方向的刚度和阻尼即可添加。此外，功能舱相比管汇来说，外形较简单，可将其简化为球体加圆柱体的组合体形式。

如上所述下放系统中每个物体所受的重力、浮力、弹性力、切向和法向流体阻力添加完毕，ADAMS 将

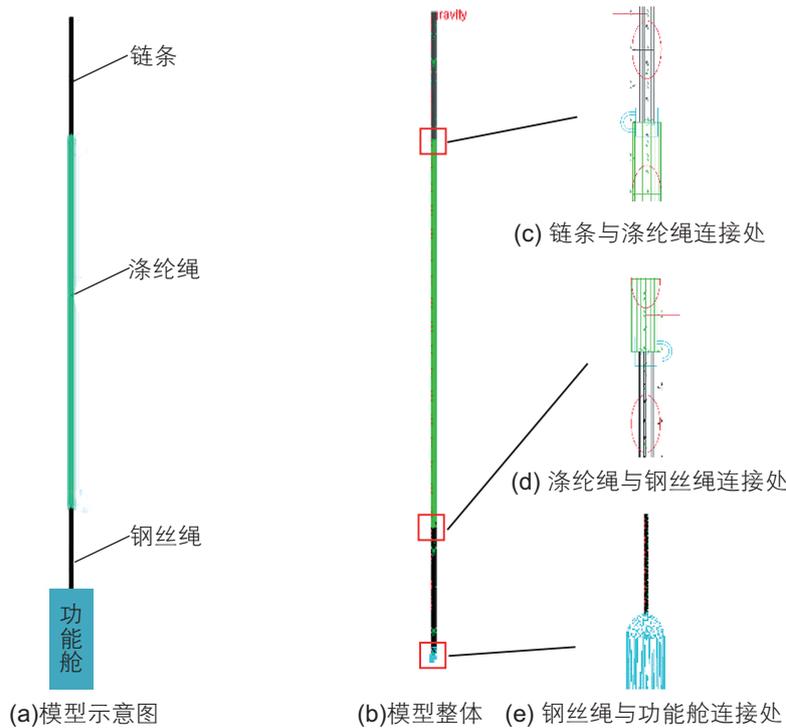


图 2 模型示意图
Fig. 2 Model diagram

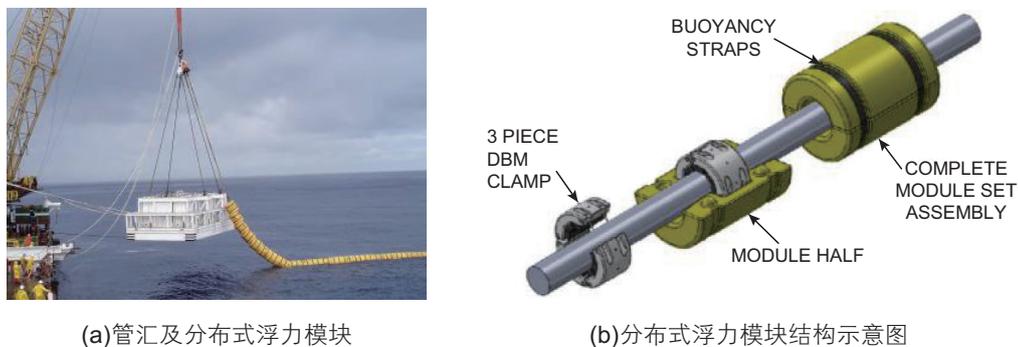


图 3 分布式浮力模块
Fig. 3 Distributed buoyancy module

上述图形模型所有信息汇总后在后台编译成物理模型,然后利用刚体质心笛卡尔坐标和反映刚体方位的欧拉角作为广义坐标,利用带拉格朗日乘子的拉格朗日第一类方程的能量形式得到动力学方程,集成约束方程后ADAMS可自动建立系统的动力学方程,即微分代数方程。ADAMS自带多个求解器用于解决微分代数方程,对求解器进行设置后,即可求解上述数学模型文件,得到广义坐标的数值解。

需要注意的是,在ADAMS中建立缆索模型时需要将其离散成多段小圆柱体,而且链条的总长、各段半径等参数都是研究下放过程动力学特性的关键影响因素,这就需要分别建立不同参数的模型进行仿真分析。在这种情况下,如果手动建立模型将大大增加建模仿真时间,且容易出错,本文采用ADAMS提供的命令流进行建模在一定程度上解决了上述问题。

2 ADAMS 模拟分析

2.1 模型验证

为了验证模型的有效性,以上述建模方法模拟管

汇下放过程。下放过程的坐标系如图4(a)所示,以安装船与链条连接处为原点,以安装船与运输船连线方向为 x 轴,以垂直水面方向为 y 轴。缆索和管汇参数如表1、2所示^[6],设海洋水流速度为0.3 m/s,方向沿 x 轴水平向右,仿真得到的钢丝绳与管汇连接处张力时间历程如图5所示。

由图5可知,本文仿真结果与参考文献^[6]基本相符,钢丝绳与管汇连接处张力在开始200 s内本文仿真数据平均值是 7.63×10^5 N,参考文献数据平均值是 7.70×10^5 N,误差为0.91%。悬垂下放开始后260 s到500 s之间与文献稍有偏差,分析原因是本文没有考虑风浪对安装船的影响,且简化了安装船与海洋的受力关系,但本文仿真值基本高于参考文献结果,安全系数可以保证。在受力稳定的600 s到1200 s内,本文仿真数据平均值是 2.02×10^6 N,参考文献数据平均值是 1.97×10^6 N,误差为2.53%。

综上所述,本文建模方法可行,可以对功能舱的悬垂下放过程进行仿真。

2.2 功能舱悬垂下放仿真

与管汇下放相似,功能舱下放过程坐标系如图

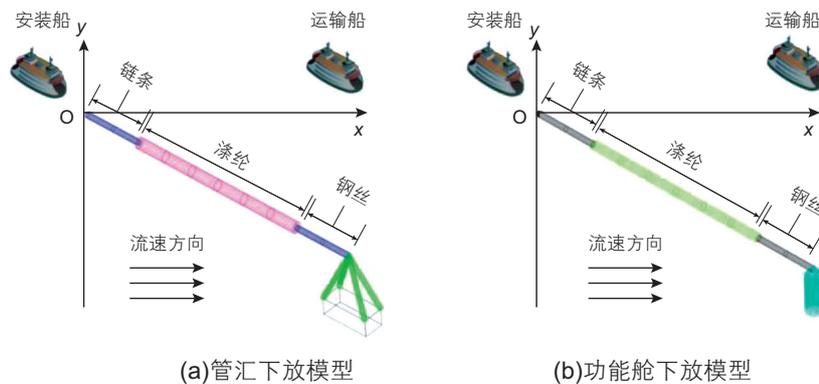


图4 模型坐标系

Fig. 4 Model coordinate system

表1 缆索参数^[6]

Table 1 Cable parameters^[6]

描述	数值		
	链条	涤纶	钢丝
最大承载/t	1097	1250	1000
直径/mm	105	210	127
长度/m	30	1326	44
每米湿重/(kg/m)	193.8	7.4	44.7

表2 管汇参数^[6]

Table 2 Manifold parameters^[6]

长/m	16
宽/m	6.7
高/m	5
干重/t	300
湿重/t	200

4(b)所示, 功能舱悬垂下放仿真相关参数如表 3 所示, 流体速度方向沿x轴水平向右。下放过程中功能舱位置x、y坐标变化如图 6 所示, 安装船与链条、链条与涤纶绳、涤纶绳与钢丝绳、钢丝绳与功能舱四个连接处的张力时历见图 7。

由图 6 可知, 功能舱在 250 s 左右进入稳定阶段。从图 7 可以看出, 安装船与链条连接处和链条与涤纶绳连接处的曲线在前 20 s 快速上升, 之后缓慢下降, 在 50 s 后又开始缓慢上升直到稳定。涤纶绳与钢丝绳连接处和钢丝绳与功能舱连接处曲线在前 25 s 快速上升, 之后缓慢下降直到平稳。四个连接处达到的最大张力值分别为 3.94×10^6 N, 3.88×10^6 N, 4.23×10^6 N, 4.51×10^6 N, 说明受力最危险的地方在钢丝绳与功能舱连接处, 并且由图 7 知此四处张力在前 25 s 都存在明显波动。可以考虑在功能舱周围也布置浮式模块, 增加阻尼以减小下放开始的波动。在选择缆索时可以把最大张力作为参考, 选取具有合适承载能力的缆索。

2.3 关键参数影响分析

2.3.1 流体速度

流体速度分别取 0.0 m/s、0.2 m/s、0.4 m/s、0.6 m/s、0.8 m/s, 其它参数不变。图 8~10 为不同流体速度下钢丝绳与功能舱连接处张力时间历程、功能舱重心

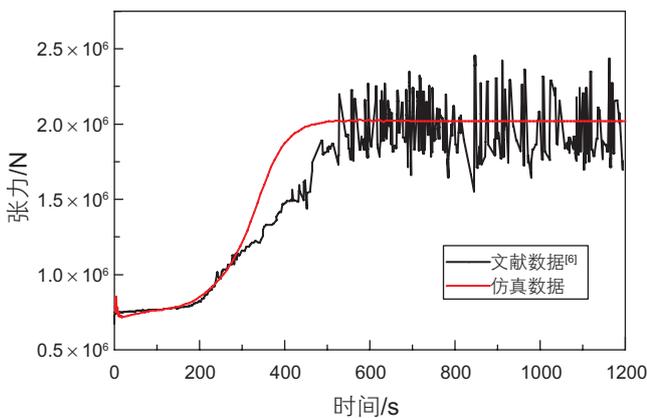


图 5 钢丝绳与管汇连接处张力时间历程
Fig. 5 Tension time history of connection between wire rope and manifold

表 3 仿真相关参数

Table 3 Simulation related parameters

描述	数值	描述	数值
链条长/m	30	功能舱干重/t	469
涤纶长/m	1326	流速/(m/s)	0.3
钢丝绳长/m	44		

的x轴、y轴坐标时间历程曲线, 各图中图(b)均为图(a)的局部放大图。由图 8 可知随着流速增加钢丝绳与功能舱连接处受力减小。图 9 表明流速分别取以上数值时功能舱的水平最大移动距离分别为 1410.43 m、1406.70 m、1402.30 m、1399.15 m、1394.23 m, 可知随着流体速度增加, 功能舱受到阻力增加, 最大水平移动距离变短。图 9 和图 10 可以看出, 随着流体速度的增加, 功能舱下放速度变慢。

2.3.2 功能舱重力

设功能舱重力分别取 469 t、528 t、586 t、645 t, 其它参数不变。图 11、图 12 为不同功能舱重力下钢丝绳与功能舱连接处张力时间历程、功能舱重心的x轴、y轴坐标时间历程曲线。由图 11 可知, 随着功能舱重力的增加, 钢丝绳与功能舱连接处受力明显增大。图 12(a)中不同功能舱重力下的水平最大移动距离分别为 1404.38 m、1406.50 m、1408.19 m、1409.70 m, 说明随着功能舱重力增加, 功能舱水平最大移动距离增大。由

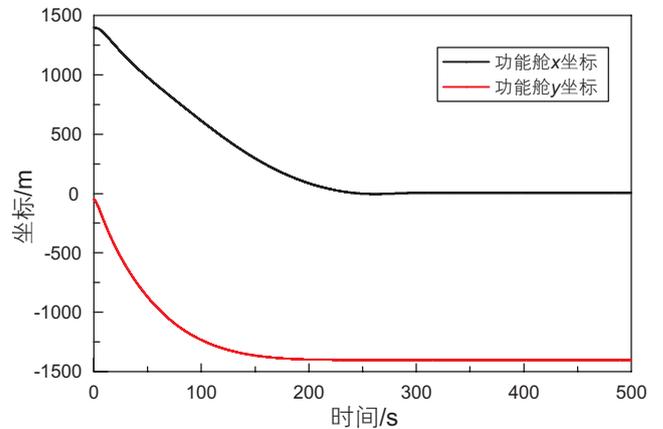


图 6 功能舱x, y坐标时间历程
Fig. 6 Function module x, y coordinate time history

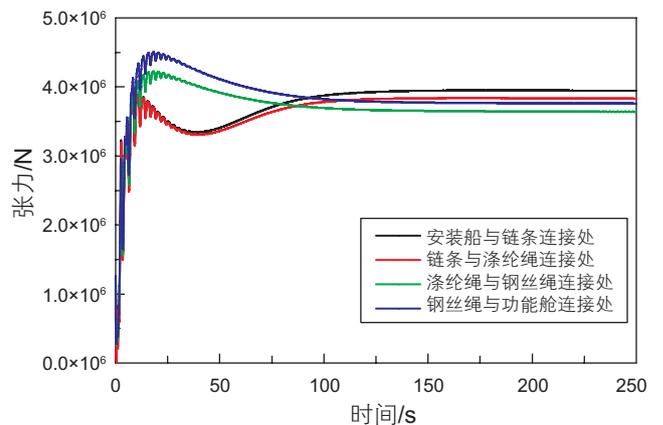


图 7 四个连接处张力时间历程
Fig. 7 Tension time history of four joints

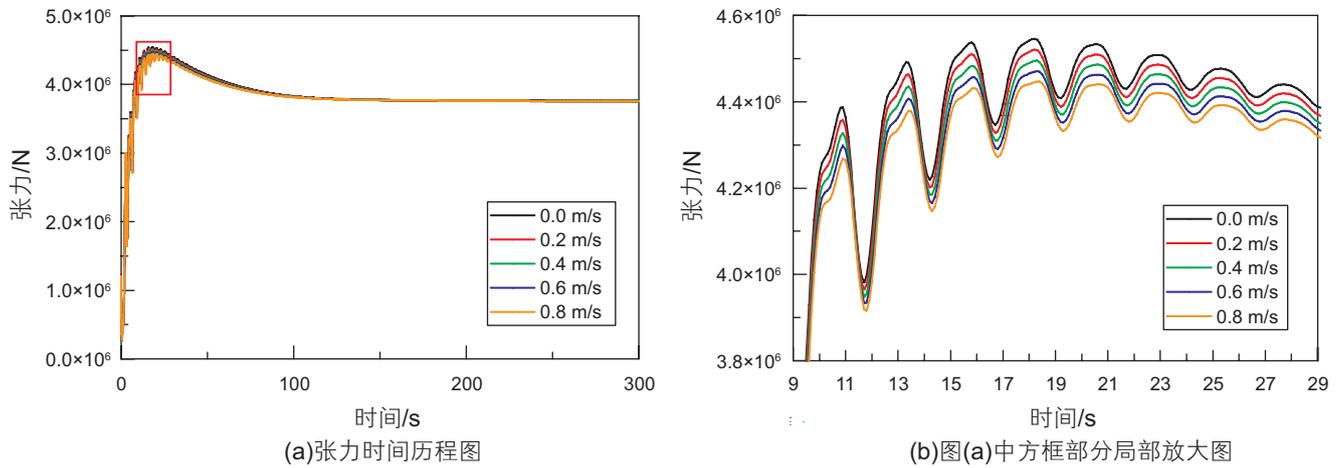


图 8 不同流体速度下钢丝绳与功能舱连接处张力时间历程

Fig. 8 Tension time history of connection between wire rope and function module under different fluid velocity

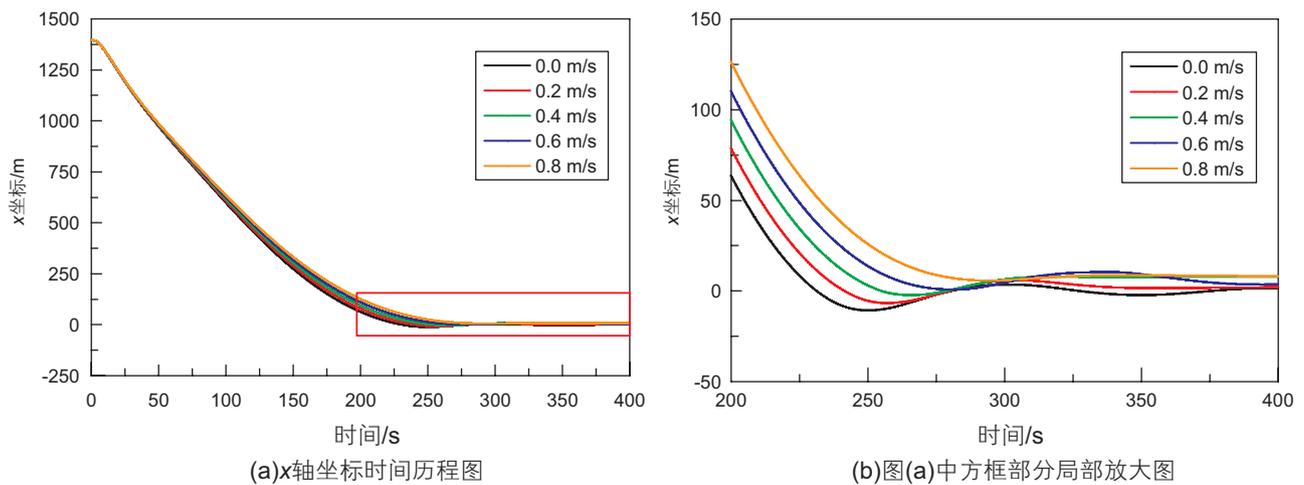


图 9 不同流体速度下功能舱重心x轴坐标时间历程

Fig. 9 x axis coordinate time history of the center of gravity of function module under different fluid velocity

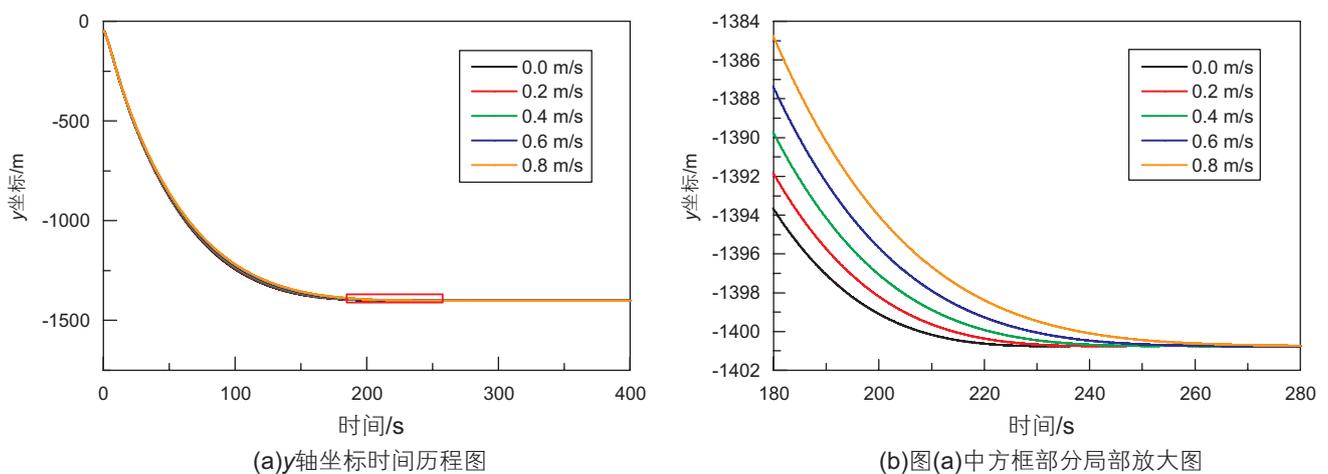


图 10 不同流体速度下功能舱重心y轴坐标时间历程

Fig. 10 y-axis coordinate time history of the center of gravity of function module under different fluid velocity

图 12(a)、(b)可以看出随着功能舱重力增加, 功能舱下落速度加快, 从开始下放到接近平衡位置的时间缩短。

2.3.3 缆索总长

分别取缆索总长度为 900 m、1200 m、1500 m、

1800 m, 即对应改变涤纶绳长度为 826 m、1126 m、1426 m、1726 m, 其它参数不变。图 13、图 14 为不同缆索总长下钢丝绳与功能舱连接处张力时间历程、功能舱重心的 x 轴、 y 轴坐标时间历程曲线。由图 13

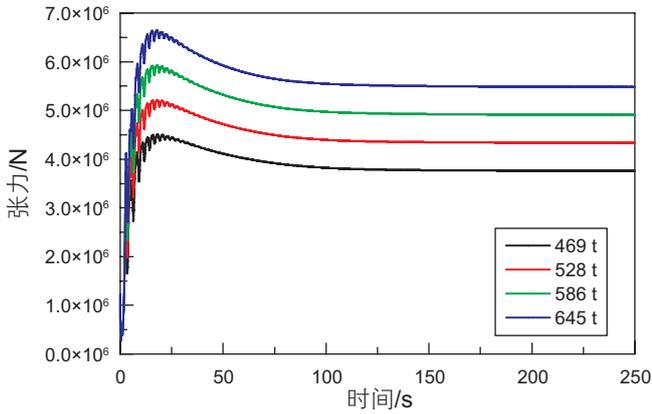


图 11 不同功能舱重力下钢丝绳与功能舱连接处张力时间历程
Fig. 11 Tension time history of connection between wire rope and function module under different weight of function module

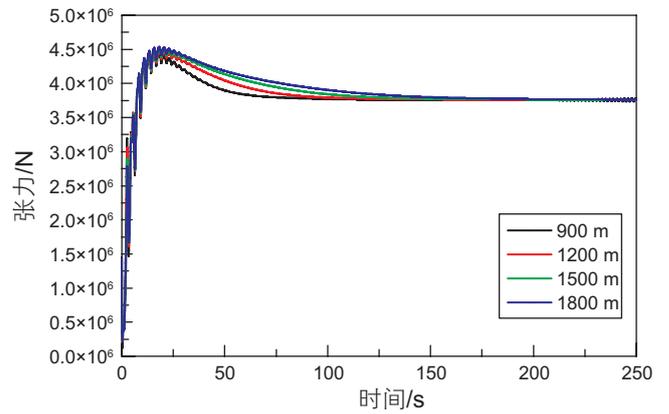
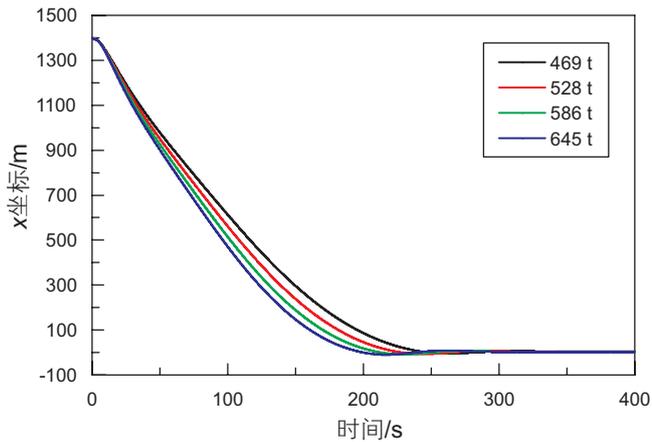
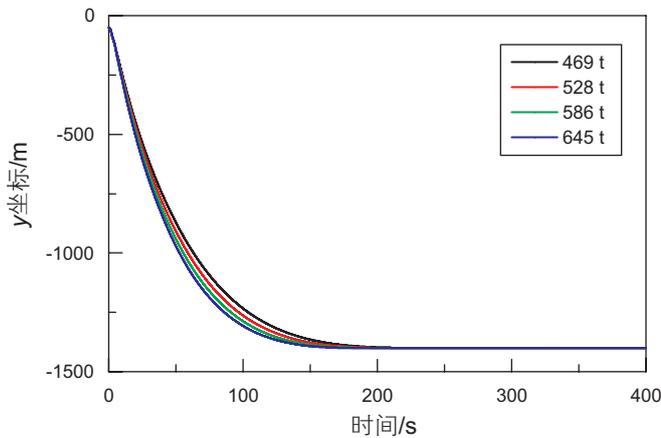


图 13 不同缆索总长下钢丝绳与功能舱连接处受力时间历程
Fig. 13 Tension time history of connection between wire rope and function module under different cable length

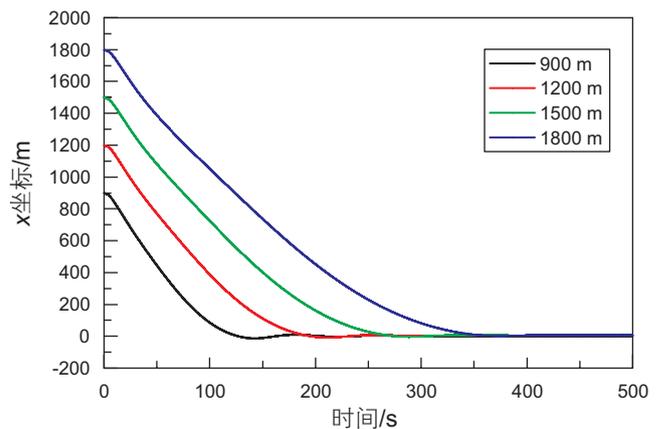


(a)x轴坐标时间历程

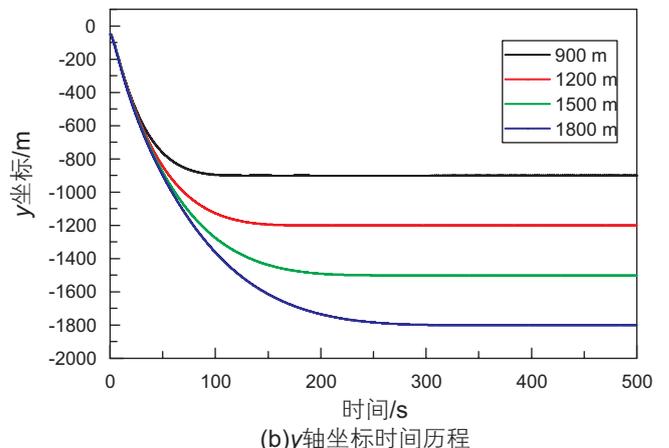


(b)y轴坐标时间历程

图 12 不同功能舱重力下功能舱重心 x 、 y 轴坐标时间历程
Fig. 12 x 、 y axis coordinate time history of the center of gravity of function module under different weight of function module



(a)x轴坐标时间历程



(b)y轴坐标时间历程

图 14 不同缆索总长下功能舱重心 x 、 y 轴坐标时间历程
Fig. 14 x 、 y axis coordinate time history of the center of gravity of function module under different cable length

可知钢丝绳与功能舱连接处张力在前 25 s 迅速增大, 之后缓慢下降直到平稳。在 25 s 到 150 s 左右, 随着缆索长度增加, 钢丝绳与功能舱连接处张力变化变慢。由图 14 可知, 随着缆索长度增加, 下放时间变长。

3 结论

本文基于 ADAMS 对功能舱悬垂下放过程进行仿真, 根据 Morison 公式进行绕流阻力计算, 建立了悬垂下放多刚体动力学仿真模型, 通过对比验证了模型有效性, 并进一步讨论了流体速度、功能舱重力和缆

索长度对下放过程的影响。研究发现: 1) 随着流速增加, 钢丝绳与功能舱连接处张力变小, 功能舱受到阻力增大, 最大水平移动距离变短; 2) 随着功能舱重力增加, 钢丝绳与功能舱连接处受力明显增大, 功能舱水平最大移动距离增大, 下落速度加快, 接近平衡位置的时间缩短; 3) 随着缆索总长度增加, 钢丝绳与功能舱连接处张力在激增后, 缓慢下降, 功能舱下放时间变长。本文仿真方法可以预测在不同流速下下放各阶段缆索承载力及下放功能舱的运动轨迹, 可对新一代水下生产系统安装提供一定的理论指导。

参考文献

- [1] 王懿. 水下生产系统及工程[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2017. [WANG Y. Underwater production systems and engineering[M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2017.]
- [2] 姚丽琳. 深水水下安装下放运动分析技术研究[D]. 上海交通大学, 2011. [YAO L L. Research on hydrodynamic analysis of subsea deepwater installation[D]. Shanghai Jiao Tong University, 2011.]
- [3] 张万里. 基于多体非线性耦合理论的下垂式安装方法数值模拟[D]. 天津大学, 2012. [ZHANG W L. Numerical analysis of pendulous installation method based on nonlinear Multi-body coupling theory[D]. Tianjin University, 2012.]
- [4] WANG A M, ZHU S, ZHU X, et al. Pendulous installation method and its installation analysis for a deepwater manifold in South China Sea[C]. The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013.
- [5] LI X, YU J X, ZHOU Q J, et al. Numerical simulation of the installation of deepwater manifold through pendulous installation method[J]. Journal of Ship Mechanics, 2014, 18(9): 1072–1085.
- [6] 赵梦一, 葛玖浩, 李伟, 陈国明, 李秀美, 张慎颜, 阮彩添. 超深水水下分离器摆锤法下放风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(09): 151–157. [ZHAO M Y, GE J H, LI W, CHEN G M, LI X M, ZHANG S Y, RUAN C T. Risk assessment on pendulous installation of subsea separator in ultra deepwater[J]. Center for Offshore Engineering and Safety Technology, 2015, 11(09): 151–157.]
- [7] MADDUMA H T D, MURRAY B. Assessment and numerical simulation of the pendulous installation method in deepwater[D]. NTNU, 2016.
- [8] NIEDZWECKI J M, THAMPI S K. Snap loading of marine cable systems[J]. Applied Ocean Research, 1991, 13(5): 210–219.
- [9] KAMMAN J W, HUSTON R L. Modeling of variable length towed and tethered cable systems[J]. Journal of Guidance Control Dynamics, 2012, 22(4): 602–608.
- [10] KAMMAN J W, HUSTON R L. Modelling of submerged cable dynamics[J]. Computers & Structures, 1983, 20(1): 623–629.
- [11] TRIANTAFYLLOU M. S. Anchor line dynamics[J]. Proceedings of MARIN Workshops on Advanced Vessels, Station Keeping, Propulsor-Hull Interaction, and Nautical Simulators. 1992.
- [12] 丁昱. 锚链动力响应的多体力学分析[D]. 上海交通大学, 1997. [DING Y. Multibody mechanics analysis of dynamic response of anchor chain[D]. Shanghai Jiao Tong University, 1997.]
- [13] 王延辉, 李晓平, 王树新, 等. 水下弹性缆索动力学分析[J]. 海洋工程, 2005, 23(3): 55–59. [WANG Y H, LI X P, WANG S X. Dynamic analysis of underwater elastic cable[J]. The Ocean Engineering, 2005, 23(3): 55–59.]
- [14] 王莹莹, 段梦兰, 冯玮, 王德国, 刘军鹏, 曾旷遥. 深水管汇安装方法及其在南海荔湾 3-1 气田中应用研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(03): 23–30. [WANG Y Y, DUAN M L, FENG W, WANG D G, LIU J P, ZENG K Y. Investigation on installation methods of deepwater manifolds and their applications to LW3-1 gas field in South China Sea[J]. THE OCEAN ENGINEERING, 2011, 29(03): 23–30.]
- [15] 朱照清, 龚维明, 戴国亮. 作用在小直径桩柱结构上的波浪力研究综述[J]. 常州工学院学报, 2008, 21(S1): 222–226. [ZHU Z Q, GONG W M, DAI G L. Review of wave force research on small diameter pile structures[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2008, 21(S1): 222–226.]
- [16] 李晓平. 多体系统动力学建模方法及在水下缆索中的应用研究[D]. 天津大学, 2004. [LI X P. Multi-body dynamics modeling and its application in marine cable systems[D]. Tianjin University, 2004.]

- [17] 李海军, 杨兆建. ADAMS 中钢丝绳索类物体建模方法研究[J]. 机械管理开发, 2007(S1): 4-5+7. [LI H J, YANG Z J. Research on modeling method of wire rope in ADAMS[D]. Mechanical Management and Development, 2007(S1): 4-5+7.]
- [18] 柳宁, 李俊峰, 冯庆义, 王天舒. 基于 ADAMS 的水下人体模型仿真[J]. 系统仿真学报, 2007(02): 240-243. [LIU N, LI J F, FENG Q Y, WANG T S. Simulation of underwater human body model based on ADAMS [J]. Journal of System Simulation, 2007(S1): 4-5+7.]

(编辑 马桂霞)