随机波浪及平台运动下控压钻井隔水管端部轴向位置预测方法[1)]

朱焕刚[*,2)]　燕修良[*]　畅元江[†,3)]　许　磊[†]　王　超[†]

[*](中国石化胜利石油工程公司钻井工艺研究院，山东东营 257000)

[†](中国石油大学（华东）海洋油气装备与安全技术研究中心，山东青岛 266580)

摘要　控压钻井（managed pressure drilling，MPD）技术是深水钻探时解决泥浆密度窗口较窄问题的重要技术。MPD 隔水管端部为旋转控制头（rotating control device，RCD），其轴向位置的变化会直接影响井底压力。目前关于深水 MPD 隔水管端部轴向位置预测方法的文献较少。本文基于欧拉-伯努利梁理论，考虑管内高压和钻井液流速的影响，采用直接刚度矩阵法建立 MPD 隔水管系统动力学理论模型，采用 Newmark- β 积分法对 MPD 隔水管系统的动力学方程进行求解，并进一步开展随机波浪及平台运动下隔水管端部轴向位置的动态预测研究。以南海某 1600 m 水深隔水管为例进行分析，算例表明，一年一遇随机海况、管内高压为 12 MPa，钻井液流速为 2 m/s，钻井液密度为 1600 kg/m^3 时，隔水管端部轴向位置改变量在 0.5～0.6 m 之间波动；当进一步考虑平台慢漂运动时，隔水管端部轴向位置改变量在 0.2～0.7 m 之间波动。据此可计算得到井底压力的波动范围，从而可为控压钻井作业时井底压力的精确调控提供参考。

关键词　钻井隔水管，控压钻井，有限元求解器，旋转控制头

中图分类号: O313　　**文献标识码**: A　　doi: 10.6052/1000-0879-23-645

VERTICAL POSITION PREDICTION METHOD OF RISER RCD FOR MANAGED PRESSURE DRILLING UNDER RANDOM WAVE AND VESSEL MOTION[1)]

ZHU Huangang[*,2)]　YAN Xiuliang[*]　CHANG Yuanjiang[†,3)]　XU Lei[†]　WANG Chao[†]

[*](Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Engineering Company Limited, SINOPEC, Dongying 257000, Shandong, China)

[†](Centre for Offshore Engineering and Safety Technology in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract　Managed pressure drilling (MPD) is an important technique to solve narrow drilling mud density window problem in deepwater drilling. The top end of the MPD riser is a rotating control device (RCD), and the variation of its vertical position will directly affect the bottom hole pressure. Currently, literatures regarding the prediction method of vertical position of the RCD could be found sporadically. In this work, based on Euler-Bernoulli beam theory, considering the influence of high pressure inside the riser and drilling fluid flow rate, the dynamic theoretical model of MPD riser system was established by using direct stiffness matrix method, and *Newmark-*β integral method was employed to solve the dynamic equations of the MPD riser system. Further,

2023–12–14 收到第 1 稿，2024–03–06 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金项目（52071337）资助。

2) 朱焕刚，硕士，高级工程师，研究方向为欠平衡钻井、气体钻井和控制压力钻井技术。E-mail：zhuhuangang@126.com

3)通讯作者: 畅元江，博士，教授，研究方向为深水钻井技术与装备、海洋油气装备安全可靠性。E-mail：changyj@upc.edu.cn

引用格式: 朱焕刚, 燕修良, 畅元江等. 随机波浪及平台运动下控压钻井隔水管端部轴向位置预测方法. 力学与实践, 2024, 46(3): 472-481

Zhu Huangang, Yan Xiuliang, Chang Yuanjiang, et al. Vertical position prediction method of riser rcd for managed pressure drilling under random wave and vessel motion. *Mechanics in Engineering*, 2024, 46(3): 472-481

dynamic prediction of the vertical position of the RCD under random waves and vessel motion was researched. Taking a 1600 m deepwater riser in the South China Sea for example, the calculation showed that under one year return sea states, when inside pressure of the riser is 12 MPa, the drilling fluid flow rate is 2 m/s, and the drilling fluid density is 1600 kg/m^3, the vertical position of the RCD fluctuated between 0.5 to 0.6 m. However, when the drift motion of vessel was taken into account, the fluctuation of the vertical position of the RCD will be 0.2～0.7 m. Based on this, the fluctuation range of bottom hole pressure could be calculated according, thus providing a reference for precise control of bottom hole pressure during managed pressure drilling operations.

Keywords　drilling riser, managed pressure drilling, finite element solver, rotating control device

随着海洋钻探逐渐向深水进军，窄安全密度窗口钻井的问题越来越突出。控压钻井（managed pressure drilling，MPD）技术通过 MPD 隔水管单根和管汇系统可在常规钻井隔水管系统的基础上实现控压钻井功能。其应用原理为：当钻井液停止循环运行时，井底压力为井口回压和钻井液静液柱压力的总和，通过调节 MPD 隔水管单根施加的恒定背压可以对井底压力进行有效控制，使井底压力保持在安全密度窗口之内。

MPD 隔水管单根顶部为旋转控制头（rotating control device，RCD），安装在伸缩节下方（如图 1 所示），钻井液静液柱压力与液柱高度呈比例关系，即井底压力与 RCD 轴向位置高度密切相关。钻井平台在海洋环境载荷下发生升沉运动，RCD 轴向位置变化直接影响隔水管内由钻井液液柱高度决定的静液柱压力，使井底压力发生波动，根据液柱高度变化可计算静液柱压力的波动量，通过管汇系统调整背压大小可以有效

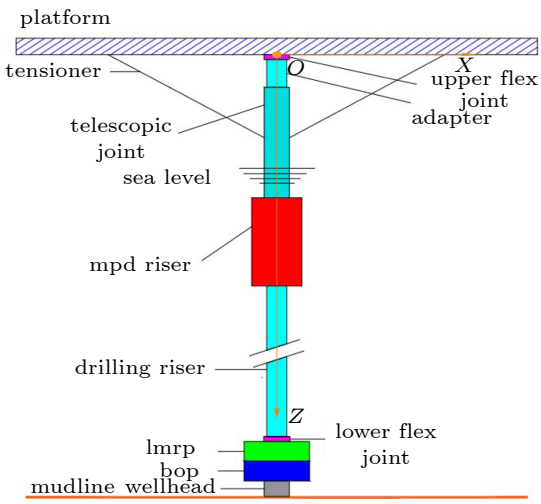

图 1　深水控压钻井隔水管系统设计示意图

Fig. 1　Schematic diagram of design for deepwater MPD riser system

维持井底压力的稳定，具体流程如图 2 所示。

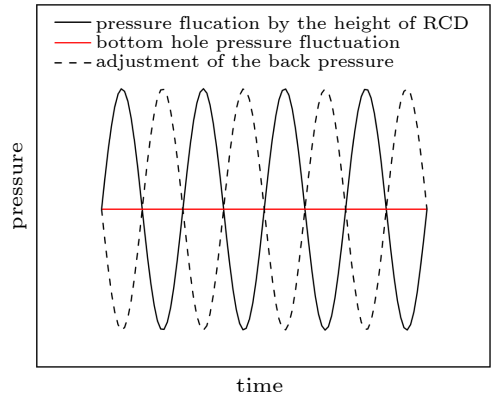

图 2　井底压力调控示意图

Fig. 2　Schematic diagram of bottom hole pressure control

目前，隔水管的理论模型、分析方法和受迫振动响应特性是国内外研究的主要领域。Low 等[1-2]在隔水管系统时域和频域动力学分析方法的基础上进行了深入研究，形成了成熟的理论。Kaewunruen 等[3]采用伽辽金法开展了隔水管弯曲刚度、顶部张力和内部流体黏度等影响因素下隔水管非线性自由振动问题研究。Chang 等[4]和畅元江等[5]使用 ABAQUS 软件开发顶张式隔水管力学仿真模型，研究顶张式隔水管在波流联合载荷、顶张力和平台偏移等多种影响因素下力学特性。刘秀全等[6]综合考虑了波浪载荷、钻井平台运动和土壤抗力，建立了深水钻井隔水管-导管耦合系统波激疲劳分析方法，识别了系统波激疲劳关键部位。鞠少栋等[7]采用通用组合确定准则和非线性搜索方法研究深水钻井隔水管连接作业窗口，建立隔水管-井口-导管整体有限元分析模型，确定隔水管连接作业窗口。张慎颜等[8]进一步将深水钻井平台的六自由度运动模型引入隔水管系统数值模型，精确边界条件，更加准确地分析隔水管耦合系统在波浪、海流联合作用下的动力学特性。王

荣耀等[9]对隔水管系统进行适当简化，建立了隔水管系统有限元模型，得到隔水管系统的静态有限元平衡方程和动态有限元平衡方程，开展深水钻井隔水管系统静态与动态有限元分析。Sun 等[10]建立了深水系泊钻井系统的全耦合模型，研究耦合系统的非线性时域特性，模型中重点考虑了锚链、平台、隔水管的耦合作用。

随着深水钻井和超深水钻井作业的增加，通过使用 MPD 技术应对越来越复杂的钻井条件。国外率先涌现大批不同控制压力钻井的工艺技术，如井底压力恒定的控制压力钻井技术、带压泥浆帽钻井技术、双梯度钻井技术[11]等。诸多油田技术服务公司先后成功开发了控压钻井系统并推广应用，取得了良好效果[12-13]；国内的控压钻井技术也蓬勃发展，塔里木、辽河、大港等油田使用了中石油自主研发的 PCDS 精细控压钻井系列装备[14]，均取得显著成效，赢得了市场的高度认可。

现有研究内容主要通过建立模型分析常规深水钻井隔水管系统的静力学与动力学特性，不足以充分解释 RCD 端部在实际工况下轴向位置的变化所引起的井底压力波动，故分析 MPD 隔水管系统 RCD 端部位置的变化是十分有必要的。笔者基于欧拉-伯努利梁理论和莫里森方程，在常规钻井隔水管系统的基础上考虑 MPD 隔水管内部高压和钻井液流动，创建 MPD 隔水管系统理论模型，建立 MPD 隔水管系统分析的数值计算方法，基于 MATLAB 软件开发 MPD 隔水管系统动态有限元求解器。以南海某深水井为例，开展随机波浪及平运动下 RCD 轴向位置动态预测研究，相对完整地阐释 RCD 轴向位置改变量的变化，通过预测由平台升沉运动导致的 RCD 位置变化，为压力控制设备调控背压提供理论依据。

1 深水 MPD 隔水管系统理论建模

1.1 常规钻井隔水管系统力学模型

钻井隔水管系统在实际工况下受到的海洋环境载荷十分复杂，为建立常规钻井隔水管力学模型，将隔水管系统属性和动力响应情况简化处理，并做出以下假设：

（1）假设钻井隔水管系统为各向同性均质圆管；

（2）忽略隔水管系统细长管线对隔水管系统刚度的影响，忽略钻杆与隔水管内壁产生的碰撞、摩擦等影响；

（3）假设隔水管系统及其载荷与边界条件均处于同一个平面内。

根据以上假设，可建立常规隔水管系统的力学平衡方程

$$EI\frac{\mathrm{d}^4x}{\mathrm{d}z^4}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\left(T_\mathrm{e}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}z}\right)-f(z)=0 \tag{1}$$

式中，E 为隔水管钢材的弹性模量；I 为隔水管截面惯性矩；T_e 为隔水管有效轴向张力，N；$f(z)$ 为 MPD 隔水管系统外部横向载荷，N。

有效轴向张力是隔水管受到的实际拉力，隔水管系统内部充满钻井液，则有效轴向张力为

$$T_\mathrm{e}(z,t)=T_\mathrm{top}-\int_0^z[W_\mathrm{e}(z)-(\rho_\mathrm{w}A_\mathrm{ro}-\rho_\mathrm{f}A_\mathrm{ri})g-F_\mathrm{f}(z)]\mathrm{d}z \tag{2}$$

式中，T_top 是隔水管顶部张紧力，N；W_e 是坐标 z 处钻井隔水管 t 时刻的有效重量，N；$(\rho_\mathrm{w}A_\mathrm{ro}-\rho_\mathrm{f}A_\mathrm{ri})g$ 是单位长度钻井隔水管管体受管内外压力差产生的虚构拉力，N。F_f 是隔水管所受轴向摩擦力，N。ρ_w 和 ρ_f 分别为海水密度与钻井液密度，kg/m^3；A_ro 和 A_ri 依次为隔水管环状截面外截面圆面积和内截面圆面积，m^2。

钻井隔水管在波浪与海流作用下自由振荡，海洋环境载荷通常采用莫里森方程描述

$$F_x(z)=\frac{\pi\rho D^2}{4}\left[C_\mathrm{M}\dot{u}_\mathrm{w}-(C_\mathrm{M}-1)\frac{\partial^2x}{\partial t^2}\right]+\frac{\rho DC_\mathrm{D}}{2}\cdot\left|u_\mathrm{w}+u_\mathrm{c}-\frac{\partial x}{\partial t}\right|\left(u_\mathrm{w}+u_\mathrm{c}-\frac{\partial x}{\partial t}\right) \tag{3}$$

式中，C_D 为拖曳力系数；C_M 为惯性力系数；D 为 MPD 隔水管系统水力外径，m；u_c 为海流速度，m/s；$\dot{u}_\mathrm{w}$ 为波浪所致水质点的加速度，m/s^2。

1.2 MPD 隔水管关键特性分析

（1）管内高压

深水 MPD 隔水管内部钻井液和外部海水密度不同，使隔水管横截面存在不同液柱压力引起的压力差，考虑隔水管内外压力差在轴向上的影响，可以得到

$$T_\mathrm{e}=T_\mathrm{tw}+(-p_\mathrm{i}A_\mathrm{i})-(-p_\mathrm{e}A_\mathrm{e}) \tag{4}$$

式中，T_{e} 表示管体轴向张力，N；T_{tw} 表示系统等效张力，N；P_{i} 和 P_{e} 分别表示内部流体压力与外部流体压力，MPa。

由式（4）可知，深水 MPD 隔水管系统的管内高压会直接影响隔水管系统的轴向张力，考虑 MPD 管内高压的影响，则隔水管系统内部压力为

$$P_{\mathrm{i}} = P_{\mathrm{const}} + P_{\mathrm{f}} \tag{5}$$

式中，P_{i} 表示 MPD 隔水管系统管内压力，MPa；P_{const} 表示深水 MPD 隔水管系统新增管内高压，MPa；P_{f} 表示原有隔水管系统内部钻井液的压力，MPa。

将式（5）代入式（2），则考虑管内高压作用下的 MPD 隔水管系统有效轴向张力表达式为

$$T_{\mathrm{e}}(z) = T_{\mathrm{top}} - \int_0^z [W_{\mathrm{e}}(z) - (\rho_{\mathrm{w}} A_{\mathrm{ro}} - \rho_{\mathrm{f}} A_{\mathrm{ri}})g - F_{\mathrm{f}}(z)] \cdot \mathrm{d}z - P_{\mathrm{const}} A_{\mathrm{i}} \tag{6}$$

（2）钻井液流速

MPD 隔水管系统环空钻井液的流动会对隔水管内壁产生摩擦力，考虑摩擦力在隔水管系统轴向上的作用，假设钻井液的流动状态稳定，隔水管管段压力损失可通过达西公式得出

$$\Delta p = \frac{\rho_{\mathrm{f}} {u_{\mathrm{f}}}^2 f_{\mathrm{c}} L}{2D} \tag{7}$$

式中 ρ_{f} 为钻井液的密度，kg/m^3；u_{f} 为钻井液流速，m/s；f_{c} 为摩擦系数；L 为隔水管管段长度，m；D 为隔水管横截面内部直径，m。

隔水管内钻井液克服摩擦力产生压力损失，剪切应力与压力损失的关系为

$$\tau_{\mathrm{w}} = \Delta p \frac{D}{4L} \tag{8}$$

剪切应力作用于隔水管内壁表面，因此整体管段承受的总摩擦力为

$$F_{\mathrm{f}} = \Delta p \frac{D}{4L} \times \pi D L = \Delta p \frac{\pi D^2}{4} \tag{9}$$

整理式（9）可得单位长度隔水管承受的摩擦力为

$$F_{\mathrm{f}} = \frac{\rho {u_{\mathrm{f}}}^2 f_{\mathrm{c}} A}{2D} \tag{10}$$

将式（10）代入式（2），可得考虑钻井液流速影响的 MPD 隔水管系统有效轴向张力计算方法

$$T_{\mathrm{e}}(z) = T_{\mathrm{top}} - \int_0^z \left[W_{\mathrm{e}}(z) - (\rho_{\mathrm{w}} A_{\mathrm{ro}} - \rho_{\mathrm{f}} A_{\mathrm{ri}})g - \frac{\rho {u_{\mathrm{f}}}^2 f_{\mathrm{c}} A}{2D} \right] \mathrm{d}z - p_{\mathrm{const}} A_{\mathrm{ri}} \tag{11}$$

1.3　深水 MPD 隔水管系统力学模型

由上述分析可知，深水 MPD 隔水管系统与常规隔水管系统的区别在于考虑了管内高压和钻井液流速对系统的影响，综合上述公式可得深水 MPD 隔水管系统动力学模型如下

$$\left.\begin{aligned} & EI \frac{\mathrm{d}^4 x}{\mathrm{d}z^4} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\left(T_{\mathrm{e}} \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}z}\right) - f(z) = 0 \\ & T_{\mathrm{e}}(z) = T_{\mathrm{top}} - \int_0^z \left[W_{\mathrm{e}}(z) - (\rho_{\mathrm{w}} A_{\mathrm{ro}} - \rho_{\mathrm{f}} A_{\mathrm{ri}})g - \frac{\rho {u_{\mathrm{f}}}^2 f_{\mathrm{c}} A}{2D} \right] \mathrm{d}z - p_{\mathrm{const}} A_{\mathrm{ri}} \\ & F_x(z) = \frac{\pi \rho D^2}{4} \left[C_{\mathrm{M}} \dot{u}_{\mathrm{w}} - (C_{\mathrm{M}} - 1) \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \right] + \frac{\rho D_{\mathrm{r}} C_{\mathrm{D}}}{2} \left| u_{\mathrm{w}} + u_{\mathrm{c}} - \frac{\partial x}{\partial t} \right| \left(u_{\mathrm{w}} + u_{\mathrm{c}} - \frac{\partial x}{\partial t} \right) \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

深水 MPD 隔水管系统上端与钻井平台相连，与钻井平台运动保持一致，承受钻井平台的位移边界条件，对于下部边界采用“等效桩法”，取泥线以下 3 m 处固定约束[15]，则深水 MPD 隔水管系统边界条件可表示为

$$\begin{aligned} bc(x_{\mathrm{top}}, t) &= S_{\mathrm{RAO}}(t) \\ bc(x_{-3}, t) &= 0 \end{aligned} \tag{13}$$

式中，$S_{\mathrm{RAO}}(t)$ 为钻井平台通过挠性接头传递给隔水管系统的位移边界，下角标–3 表示下部边界取泥线下 3 m 处固定。

2　深水 MPD 隔水管系统动态有限元方程及求解

2.1　动态平衡方程

深水 MPD 隔水管系统动力学有限元方程如下

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{\delta}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{F} \tag{14}$$

式中，$\boldsymbol{M}$ 为整体质量矩阵；$\ddot{\boldsymbol{\delta}}$ 为整体加速度矩

阵；$\boldsymbol{C}$ 为整体阻尼矩阵；$\dot{\boldsymbol{\delta}}$ 为整体速度矩阵；$\boldsymbol{K}$ 为整体刚度矩阵；$\boldsymbol{\delta}$ 为整体位移矩阵；$\boldsymbol{F}$ 为整体载荷矩阵。

深水控压钻井隔水管系统的质量矩阵如下

$$\boldsymbol{M}^{\mathrm{e}}=\frac{mL}{420}\begin{bmatrix} 140 & & & & & \\ 0 & 156 & & \text{对} & & \\ 0 & 22L & 4L^2 & & \text{称} & \\ 70 & 0 & 0 & 140 & & \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \tag{15}$$

式中，m 是隔水管单元单位长度的有效质量，kg；L 为隔水管单元长度，m。对于水面以上的单元，其有效质量为隔水管管体材料的质量加上内部钻井液的质量

$$m=m_{\mathrm{pipe}}+m_{\mathrm{fluid}} \tag{16}$$

对于水面以下的隔水管单元，其有效质量为隔水管管体材料的质量、管内钻井液质量和附加水质量之和，即

$$m=m_{\mathrm{pipe}}+m_{\mathrm{fluid}}+m_{\mathrm{a}} \tag{17}$$

在确定隔水管系统阻尼矩阵时，一般采用比例阻尼计算的方式。通常将系统整体刚度矩阵和整体质量矩阵的线性组合作为隔水管系统的阻尼矩阵

$$\boldsymbol{C}=\alpha\boldsymbol{M}+\beta\boldsymbol{K} \tag{18}$$

式中，α 与 β 是不依赖于频率的常数，通常由实验确定，这种方式确定的阻尼一般被称为 Rayleigh 阻尼。

隔水管单元刚度矩阵可以表示为

$$\boldsymbol{K}^{\mathrm{e}}=\boldsymbol{K}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{e}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{G}}^{\mathrm{e}} \tag{19}$$

式中，$\boldsymbol{K}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{e}}$ 为线性刚度矩阵；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{G}}^{\mathrm{e}}$ 为非线性特性的刚度矩阵，即几何刚度矩阵。

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{e}}=\begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ & & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ & \text{对} & & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & & \text{称} & & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ & & & & & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \tag{20}$$

MPD 隔水管系统包含挠性接头结构，将挠性接头等效为弯曲梁[16]，单元的刚度由旋转刚度来定义，若挠性接头的转动刚度为 α，则该弯曲梁单元的刚度矩阵可以表示为

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{e}}=\begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \alpha & 0 & 0 & -\alpha \\ & \text{对} & & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & & \text{称} & & 1 & 0 \\ & & & & & \alpha \end{bmatrix} \tag{21}$$

单元几何刚度矩阵的表达式为

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{G}}^{\mathrm{e}}=\frac{T_{\mathrm{e}}}{L}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{6}{5} & \frac{L}{10} & 0 & -\frac{6}{5} & \frac{L}{10} \\ & & \frac{2L^2}{15} & 0 & -\frac{L}{10} & -\frac{L^2}{30} \\ & \text{对} & & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{称} & & \frac{6}{5} & -\frac{L}{10} \\ & & & & & \frac{2L^2}{15} \end{bmatrix} \tag{22}$$

深水 MPD 隔水管系统除了受到波流载荷和自身重力外，还包括钻井液流速给单元施加的摩擦力和隔水管管内外压差致等效力，根据功等效原则可得单元载荷矩阵

$$f^{\mathrm{e}}=\begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ M_i \\ F_{xj} \\ F_{yj} \\ M_j \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} \frac{W_{\mathrm{c}}L}{2} \\ f_{\mathrm{friction}}-\frac{mg}{2}-f_{\mathrm{pressure}} \\ -\frac{W_{\mathrm{c}}L^2}{12} \\ \frac{W_{\mathrm{c}}L}{2} \\ f_{\mathrm{friction}}-\frac{mg}{2}-f_{\mathrm{pressure}} \\ \frac{W_{\mathrm{c}}L^2}{12} \end{Bmatrix} \tag{23}$$

式中，f_{friction} 表示钻井液对隔水管的摩擦力，N；f_{pressure} 表示隔水管管内外压差致等效力，N。

2.2 求解步骤

直接积分法是求解结构动力学方程常用的方法，本文基于 MATLAB 软件，采用 Newmark-β 积分法对深水 MPD 隔水管系统有限元方程进行求解[17]，具体计算步骤如下。

1. 定义初始状态

（1）建立深水 MPD 隔水管系统刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$，质量矩阵 $\boldsymbol{M}$ 和阻尼矩阵 $\boldsymbol{C}$。

（2）计算初始位移、速度、加速度：δ_0，$\dot{\delta}_0$ 和 $\ddot{\delta}_0$。

（3）选取固定的时间步长 Δt 和积分参数 α，β 计算如下积分常数

$$\alpha_0=\frac{1}{\alpha\Delta t^2},\alpha_1=\frac{\beta}{\alpha\Delta t},\alpha_2=\frac{1}{\alpha\Delta t},\alpha_3=\frac{1}{2\gamma}-1$$
$$\alpha_4=\frac{\beta}{\alpha}-1,\alpha_5=\frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\beta}{\alpha}-2\right),$$
$$\alpha_6=\Delta t(1-\beta),\alpha_7=\beta\Delta t \tag{24}$$

2. 依据初始条件迭代计算

（1）计算有效刚度矩阵 $\overline{\boldsymbol{K}}$

$$\overline{\boldsymbol{K}}=\boldsymbol{K}+\alpha_0\boldsymbol{M}+\alpha_1\boldsymbol{C} \tag{25}$$

（2）计算 $t+\Delta t$ 时刻的有效载荷向量 $\overline{\boldsymbol{F}}$

$$\overline{\boldsymbol{F}}_{t+\Delta t}=\boldsymbol{F}_{t+\Delta t}+\boldsymbol{M}(\alpha_0\delta_0+\alpha_2\dot{\delta}_0+\alpha_3\ddot{\delta}_0)+\boldsymbol{C}(\alpha_1\delta_0+\alpha_4\dot{\delta}_0+\alpha_5\ddot{\delta}_0) \tag{26}$$

（3）计算 $t+\Delta t$ 时刻的速度、加速度

$$\ddot{\delta}_{t+\Delta t}=\alpha_0(\delta_{t+\Delta t}-\delta_t)-\alpha_2\dot{\delta}_t-\alpha_3\ddot{\delta}_t \tag{27}$$

$$\dot{\delta}_{t+\Delta t}=\dot{\delta}_t+\alpha_6\ddot{\delta}_t+\alpha_7\ddot{\delta}_{t+\Delta t} \tag{28}$$

3. 重复运行步骤 2 进行迭代运算，直至计算精度符合要求，计算模型已收敛。深水 MPD 隔水管系统动力学计算流程图如图 3 所示。

3　算例

3.1　配置参数

依托南海某平台，选择水深接近 1600 m 的隔水管系统建立力学仿真模型，系统配置如表 1 所示，隔水管使用的材料为 X80 钢，屈服强度为 552 MPa，导管的材料为 X56 钢，屈服强度为 386 MPa，杨氏模量为 210 GPa，泊松比为 0.3，密度为 7850 kg/m^3。

3.2　RCD 上端部轴向位置预测

MPD 隔水管系统井底压力时刻改变，为维持井底压力的稳定，需对井底的压力进行监测，根据监测结果反馈到控制系统进行压力调整[18]。钻井液液柱压力与液柱高度呈正比例关系，井底压力与 RCD 轴向位置密切相关，实际情况下，井口压力监测结果的反馈过程大约有 5 min 的延迟，在此过程中 RCD 轴向位置不断发生变化，使井底压力发生改变。为实现井底压力的精确调控，依据上述配置开展 RCD 轴向位置的动态变化预测研究。

3.2.1　随机波浪及平台随机纵荡运动

深水 MPD 隔水管系统顶部边界为钻井平台的纵荡运动[19]，实际工程环境中，波浪及平台运动均存在随机性，本文基于随机波浪生成钻井平台的随机纵荡运动，采用由国际船模实验池会议确定的标准波浪谱 P-M 谱作为波浪模拟的靶谱，波流有义波高为 6 m，通过等分区间的方式获取由 25 个正弦波组成的随机波浪，在每一个划分后的微小频率区间后半部分随机选取频率值作为该区间的代表频率，并随机生成每一个组成波的初始相位值。经计算得到某次模拟随机波浪波面高度时程曲线如图 4 所示。

上述钻井平台的随机纵荡运动未考虑慢漂的影响，若考虑平台的慢漂运动，则平台的纵荡位移会叠加一个长周期高振幅的正弦规律运动，在本文分析过程中，考虑慢漂运动时设定单边幅值为 10 m，周期为 200 s。钻井平台的纵荡运动即平台在全局坐标系下的横向位移运动，水动力载荷通过钻井船的响应幅值算子（response amplitude operator，简称 RAO）影响隔水管顶部运动[20]，波浪参数结合钻井船 RAO 数据可确定钻井平台的运动。

3.2.2　随机波浪及平台运动下 RCD 轴向位置预测

假设钻井平台存在规律的垂荡及纵荡耦合运动，分析预测过程的其他相关边界条件及输入参数如下：管内高压 12 MPa，钻井液流速 2 m/s，顶张力 638.3633 吨，钻井液密度为 1600 kg/m^3，则平台规则运动下 RCD 轴向位置改变量结果如图 5 所示。

将不考虑平台慢漂运动下钻井平台随机纵荡位移作为隔水管顶部位移边界，计算得到 RCD 轴向位置改变量时程曲线如图 6 所示。

将考虑平台慢漂运动下钻井平台随机纵荡位移作为隔水管顶部位移边界，计算得到 RCD 轴向位置改变量时程曲线如图 7 所示。图中，橙色

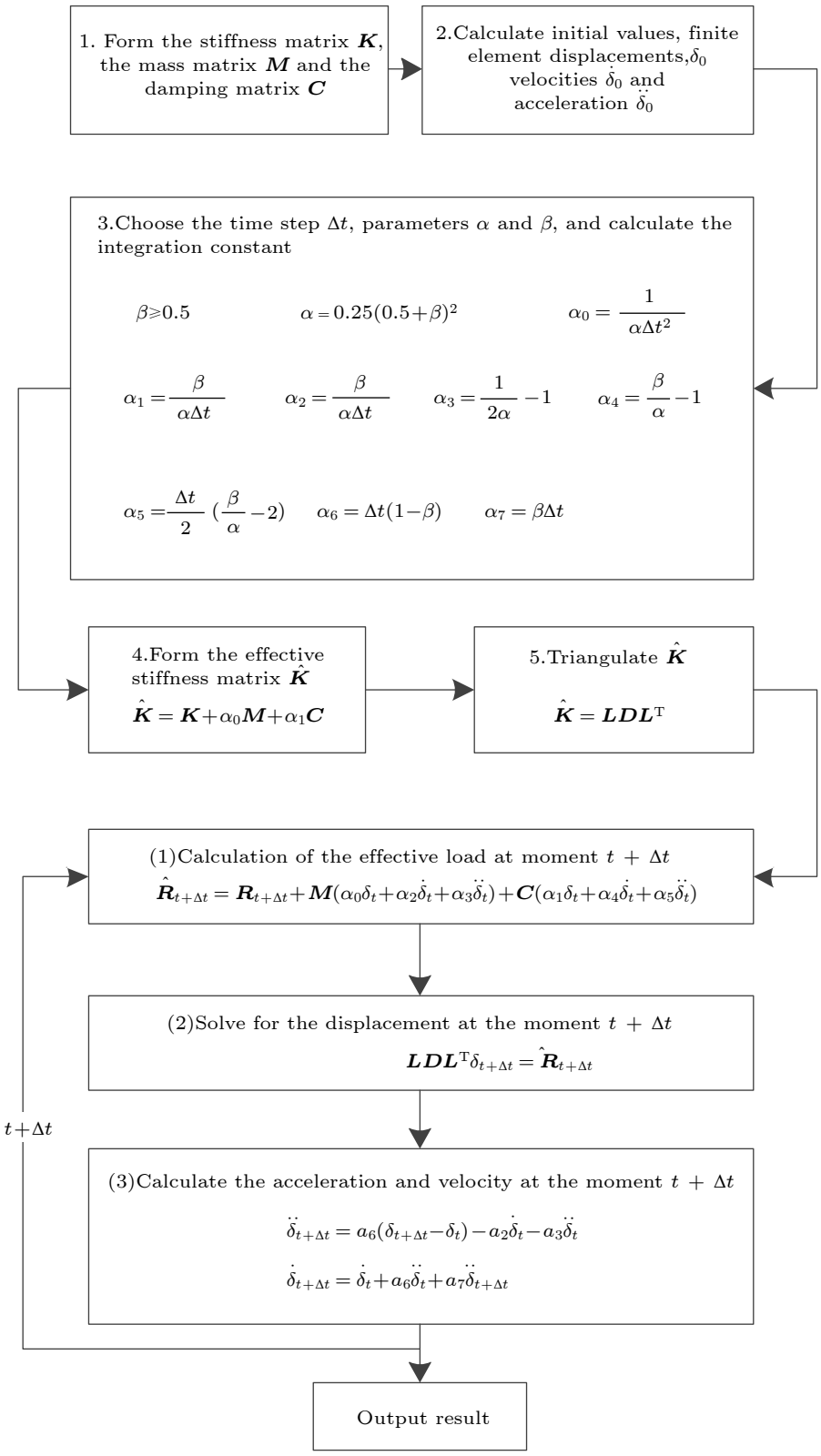

图 3 Newmark-β 法求解流程

Fig. 3 Process of solving Newmark-β method

点划线表示钻井平台未发生运动且隔水管处于静态平衡状态时 RCD 的位置，黄色虚线表示钻前设计 MPD 隔水管系统配置时 RCD 的设计位置，平台运动时，RCD 轴向位置改变量如蓝色实线所示。依据 RCD 轴向位置改变量的结果可提前预测由管内液柱压力的变化导致的井底压力变化，

表 1　1600 m 深水 MPD 隔水管系统基本配置

Table 1　Basic configuration of deepwater MPD riser system in 1600 m water depth

Components	Number	Single length/m	Hydrodynamic diameter /m	Wall thickness/m	Wet weight /kg
diverter + UFJ	1	5.1	0.5334	0.0254	10311.34
adapter	1	10.67	0.5334	0.0254	5049.39
tensioner	1	—	—	—	—
telescopic joint	1	34.29	0.5334	0.0254	5049.39
MPD riser	1	10.67	0.5334	0.0254	38407
21”×1” riser	2	22.86	0.5334	0.0254	13465
21”×1” riser /2500ft	10	22.86	1.3716	0.0254	653
21”×0.9375” riser /2500ft	21	22.86	1.3716	0.02381	330
21”×0.875” riser /5000ft	15	22.86	1.3716	0.02223	1660
21”×0.875” riser /7500ft	10	22.86	1.3716	0.02223	1844
21”×0.75” riser /10000ft	10	22.86	1.3716	0.01905	2164
LFJ	1	2.1	1	0.4	12579.7
LMRP+BOP	1	15.47	2.09	—	365400
wellhead	1	1	0.3267	—	247.3
conductor	1	3	0.9144	0.0508	2421

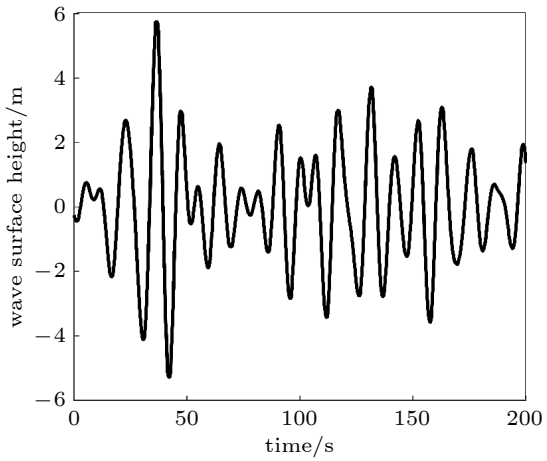

图 4　波面高度时程曲线

Fig. 4　Time history curve of wave surface height

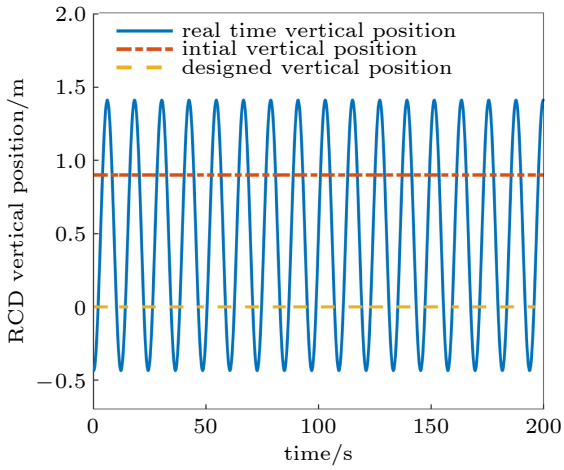

图 5　平台规律运动时 RCD 轴向位置预测

Fig. 5　Prediction of the position of the rotating control device when the platform move regularly

在此基础上对井底压力提前调控，尽可能降低井底的压力波动，从而消除隔水管系统轴向位置动态变化对井底压力的影响。

3.2.3　随机波浪及平台运动下 RCD 轴向位置预测结果分析

由前文所述可知，黄色虚线为设计位置，其轴向位置改变量为 0。橙色点划线为平台未运动且仅考虑轴向作用力时（只受顶张力作用）的 RCD 初始位置，其值为 0.91 m，本结果分析注重蓝色实线的变化，结论也是针对蓝色实线展开。

由图 6 可得，不考虑慢漂的钻井平台随机纵荡运动下 RCD 处于往复运动状态，轴向位置改变峰值约为 0.55 m，轴向最低位置改变量约为 0.49 m，RCD 轴向位置上下浮动不会超过 0.1 m，最大井底压力波动量约为 0.009 MPa。由图 7 可得，在考虑平台慢漂运动下，RCD 轴向位置改变量较之前变化剧烈，最大值达 0.7 m，振幅约为 0.5 m，最大井底压力波动量约为 0.011 MPa。

在工程实际方面，对比此次算例所用南海某

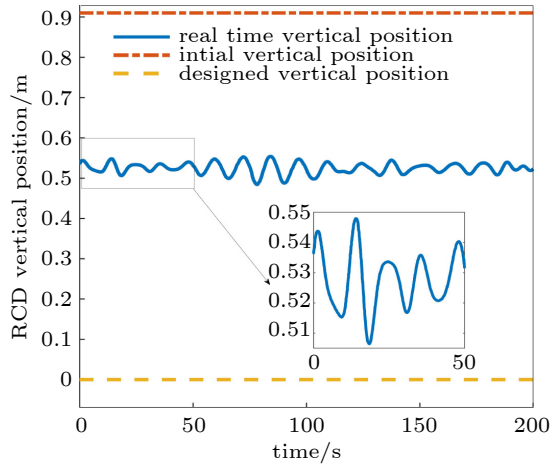

图 6 钻井平台随机纵荡下 RCD 轴向位置预测

Fig. 6 Prediction of the position of the rotary control device under random turbulence of the drilling platform

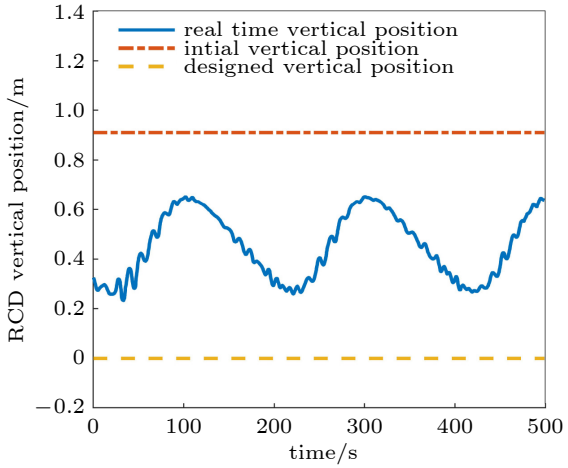

图 7 考虑平台慢漂运动时 RCD 轴向位置预测

Fig. 7 Prediction of the position of the rotating control device when considering the slow drift motion of the platform

平台 1600 m 水深隔水管系统，不论是否考虑钻井平台慢漂运动，RCD 轴向位置改变量均小于 1 m，不足隔水管总长的 1/1600，可见本文 RCD 轴向位置预测精度较高，且 RCD 轴向位置改变量对比 MPD 隔水管系统总长不明显，引起的压力波动较小，根据计算结果可以为 MPD 隔水管系统井底压力精确调控提供参考。

4 结论

(1) 本文基于欧拉-伯努利梁理论，依据弹性力学基本方程及有限元方法结合隔水管系统的特点研究了平衡方程中刚度矩阵、质量矩阵、载荷矩阵以及其他参数的确定方法，得到了深水控压钻井隔水管系统的动力学方程，并使用 Newmark-β 法对动态平衡方程进行求解。

(2) 基于随机波浪生成钻井平台的随机动荡运动，选择有义波高为 6 m 的 P-M 波浪谱为实例，得到钻井船随机纵荡运动结果。开展随机波浪及钻井平台随机纵荡运动条件下控压钻井隔水管端部位置动态预测研究，得到了在随机波浪及钻井平台随机纵荡运动条件下的 RCD 上端部轴向位置运动位置预测图。

(3) 以南海某 1600 m 深水井为例，开展随机波浪及平台运动下隔水管端部轴向位置的动态预测研究，确定不考虑慢漂运动与考虑慢漂运动两种状况下 RCD 上端部轴向位置改变量。不考虑平台慢漂时，RCD 轴向位置改变量最大值约为 0.58 m，最大井底压力波动量为 0.009 MPa；考虑平台慢漂时，RCD 轴向位置改变量最大值约为 0.7 m，最大井底压力波动量为 0.011 MPa。根据研究结果可计算井底压力的波动范围，为控压钻井作业时井底压力的精确调控提供参考。

参 考 文 献

1 Low YM, Langley RS. A hybrid time/frequency domain approach for efficient coupled analysis of vessel/mooring/riser dynamics. *Ocean Engineering*, 2008, 35(5-6): 433-446

2 Low YM. Extending a time/frequency domain hybrid method for riser fatigue analysis. *Applied Ocean Research*, 2011, 33(2): 79-87

3 Kaewunruen S, Chiravatchradej J, Chucheepsakul S. Nonlinear free vibrations of marine risers/pipes transporting fluid. *Ocean Engineering*, 2005, 32(3-4): 417-440

4 Chang YJ, Chen GM, Sun YY, et al. Nonlinear dynamic analysis of deepwater drilling risers subjected to random loads. *China Ocean Engineering*, 2008, 22(4): 683-691

5 畅元江, 陈国明, 许亮斌等. 超深水钻井隔水管设计影响因素. 石油勘探与开发, 2009, 36(4): 523-528
Chang Yuanjiang, Chen Guoming, Xu Liangbin, et al. Influential factors for the design of ultra-deepwater drilling riser. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(4): 523-528 (in Chinese)

6 刘秀全, 陈国明, 畅元江等. 深水钻井隔水管-导管系统波激疲劳分析. 石油学报, 2013, 34(5): 977-982
Liu Xiuquan, Chen Guoming, Chang Yuanjiang, et al. Wave induced fatigue analysis on deepwater drilling riser-conductor system. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(5): 977-982 (in Chinese)

7 鞠少栋, 畅元江, 陈国明等. 深水钻井隔水管连接作业窗口分析. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 105-110
Ju Shaodong, Chang Yuanjiang, Chen Guoming, et al. En-

velopes for connected operation of the deepwater drilling riser. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 105-110 (in Chinese)

8 张慎颜, 刘秀全, 畅元江等. 深水钻井平台-张紧器-隔水管耦合系统动力学特性分析. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2019, 43(2): 123-130
Zhang Shenyan, Liu Xiuquan, Chang Yuanjiang, et al. Dynamic characteristic analysis on deepwater drilling platform/tensioner/riser coupling system. *Journal of China University of Petroleum*, 2019, 43(2): 123-130 (in Chinese)

9 王荣耀, 陈国明, 畅元江等. 深水钻井隔水管静态有限元求解器设计. 石油机械, 2012, 40(2): 18-21

10 Sun YY, Chen GM, Jin H, et al. Coupled system analysis for a deepwater drilling riser. *Journal of Ship Mechanics*, 2009, 13(3): 369-377

11 殷志明. 新型深水双梯度钻井系统原理、方法及应用研究. [硕士论文]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2007
Yin Zhiming. New dual-gradient deepwater drilling systems—principle, method and application. [Master Thesis]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2007 (in Chinese)

12 孙宝江, 王雪瑞, 王志远等. 控制压力固井技术研究进展及展望. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 56-61
Sun Baojiang, Wang Xuerui, Wang Zhiyuan, et al. Research development and outlook for managed pressure cementing technology. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 56-61 (in Chinese)

13 周英操. 精细控压钻井技术及其应用. 北京: 石油工业出版社, 2018

14 周英操, 刘伟. PCDS 精细控压钻井技术新进展. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 68-74
Zhou Yingcao, Liu Wei. New progress on PCDS precise pressure management drilling technology. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 68-74 (in Chinese)

15 畅元江, 王健, 姬景奇等. 基于局部等效方法的深水水下井口半解耦分析模型. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2019, 43(3): 129-137
Chang Yuanjiang, Wang Jian, Ji Jingqi, et al. A semi decoupled analysis model of subsea wellhead based on local equivalent method. *Journal of China University of Petroleum*, 2019, 43(3): 129-137 (in Chinese)

16 Labuschagne A. Finite element analysis of plate and beam models. [PhD Thesis]. South Africa: Univrsity of Pretoria, 2006

17 刘秀全. 深水钻井隔水管完整性及台风事故应对策略研究. [博士论文]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2014
Liu Xiuquan. Research on integrity and typhoon accident coping strategy for deepwater drilling riser. [PhD Thesis]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014 (in Chinese)

18 王方. 控压钻井关键技术探讨. 中国石油和化工标准与质量. 2022, 42(3): 185-186, 189

19 畅元江. 深水钻井隔水管设计方法及其应用研究. [博士论文]. 青岛：中国石油大学 (华东), 2008
Chang Yuanjiang. Design approach and its application for deepwater drilling risers. [PhD Thesis]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008 (in Chinese)

20 畅元江, 陈国明, 孙友义等. 基于波浪谱与钻井船 RAO 的钻井船运动模拟. 系统仿真学报, 2009, 21(5): 1310-1313
Chang Yuanjiang, Chen Guoming, Sun Youyi, et al. Vessel motion simulation based on wave spectrum and drilling vessel RAO. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(5): 1310-1313 (in Chinese)

(责任编辑: 王永会)