

文章编号: 1007-7294(2025)01-0123-11

深水钻井隔水管下放作业可靠性智能评估方法

朱高庚, 陈国明, 刘康

(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: 隔水管下放是深水钻井的重要步骤, 此过程中卡盘承担隔水管系统全部重量, 加之复杂多变的深水环境, 导致下放作业风险较大。为了确保隔水管下放作业安全, 本文针对隔水管连续下放工况, 构建环境载荷参数联合分布模型, 确定基于IAGA-BRNN的结构响应智能预测模型, 结合蒙特卡洛方法形成隔水管下放作业可靠性评估方法并开展应用实例研究。结果表明: 环境载荷参数联合分布模型中大部分参数符合Weibull分布和Beta分布; 提出的预测模型在所有指标上均保持较好的水平, 且较常规预测模型最多提高了76.77%; 隔水管等效应力和最大轴向力是影响下放作业安全的首要 and 次要限制因素, 且随着悬挂隔水管根数增加, 结构可靠度呈下降趋势, 将波高作为限制条件可有效提高作业可靠性。

关键词: 隔水管下放; 可靠性; 蒙特卡洛; 神经网络; 遗传算法

中图分类号: TV131.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.01.012

Intelligent assessment method of reliability for deepwater riser deployment

ZHU Gao-geng, CHEN Guo-ming, LIU Kang

(Centre for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum (East China),
Qingdao 266580, China)

Abstract: Riser deployment is an important step in deepwater drilling, during which the spider is the primary support of the riser system. At the same time, the harsh deepwater environment leads to a high risk of riser deployment. To ensure the safety of riser deployment, firstly, a joint distribution model of environmental parameters was constructed. Then, an intelligent prediction model of structural response based on IAGA-BRNN was determined. Finally, the method of structure reliability assessment for riser deployment was established combining Monte Carlo, and a case study was carried out. Results show that most parameters in the joint distribution model of environment obey Weibull distribution and Beta distribution. The prediction model proposed in this paper performs well in all the prediction indicators, and has a stronger prediction ability compared with the conventional prediction model. The equivalent stress and maximum axial force are the first and secondary limitation factors of the riser deployment. In addition, as the number of hang-off riser increases, the reliability is on the decline, and wave height is the main limiting factor of operational reliability.

Key words: riser deployment; reliability; Monte Carlo; neural network; genetic algorithm

收稿日期: 2024-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52104016); 国家重点研发计划项目(2017YFC0804501)

作者简介: 朱高庚(1993-), 男, 博士研究生;

陈国明(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 通讯作者, E-mail: offshore@126.com。

0 引言

深水钻井隔水管系统是深水油气开采重要而又薄弱的环节^[1],下放作业时隔水管系统处于悬挂状态,不仅受到平台运动和自身不均匀重量分布的影响,还有来自波浪海流等不确定环境因素联合作用,整个系统受力复杂并呈现一定随机性,如何保证其结构完整可靠和作业安全是深水钻井必须考虑的问题^[2]。针对隔水管下放作业时的悬挂状态,相关学者分别研究了水深条件^[3]、恶劣海况^[4]、浮力块配置^[5]、悬挂模式^[6]等不同因素对隔水管力学行为的影响,并建立了悬挂隔水管安全作业窗口^[7-8]。以上研究为隔水管作业安全分析提供了良好的基础,但并未考虑环境载荷随机性,在不确定的环境条件下,确定性方法可能导致过于保守或不安全的设计。近年来,部分学者考虑环境载荷^[9]、管柱尺寸^[10]和工艺条件^[11]等的概率分布评估隔水管结构可靠性,但只有少量研究考虑了随机变量相关性^[12]对可靠性计算结果的影响。此外,目前大部分研究是基于数值模拟技术进行管柱响应的计算,对建模水平要求较高且耗时较长,不能满足可靠性分析要求。借助人工智能算法进行预测可大大降低对计算资源的需求^[13],但常规的误差反馈神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)和支持向量机等常规方法也存在容易陷入局部最优、网络结构和内核函数难以确定及泛化能力差等问题^[14-15]。笔者针对隔水管下放作业的动态过程,考虑环境载荷的联合概率分布和平台运动影响,建立下放隔水管数值分析模型,结合改善的自适应遗传算法(Improved Adaptive Genetic Algorithm, IAGA)和贝叶斯正则化神经网络(Bayesian Regularization of Neural Network, BRNN)开展结构响应预测,依据作业失效准则确定结构失效功能函数,利用蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)方法开展隔水管下放作业可靠性评估。

1 深水钻井隔水管下放作业分析模型

1.1 深水钻井隔水管下放作业流程

在深水钻井作业中,常见的隔水管下放作业有四种场景^[16]:(1)正常钻井作业时,完成井口安装起钻后连接底部隔水管总成(Lower Marine Riser Package, LMRP)和防喷器(Blowout Preventer, BOP)进行隔水管下放作业;(2)BOP失效需要回收进行维修时,维修完成后将隔水管作为下放工具重新安装 LMRP&BOP;(3)LMRP故障需要回收进行维修时,维修完成后将隔水管作为下放工具重新安装 LMRP;(4)遭遇台风等极端海况时需要将隔水管从 LMRP 与 BOP 连接处断开,悬挂或者回收隔水管至甲板,台风过后重新下放底部连接 LMRP 的隔水管。

由于第(1)种场景下隔水管底部同时连接 LMRP&BOP,且下放隔水管长度最长,是四种场景中最频繁且较危险的作业场景,因此本文选择第(1)种场景进行隔水管下放作业研究。依据深水钻井规程和相关文献^[17-18],正常钻井时隔水管下放作业流程大致可分为:①准备工作;②防喷器入水;③隔水管下入和试压;④连接伸缩节和张紧器;⑤坐入 BOP 和安装分流器;⑥ BOP 试压。

依据深水钻井隔水管下放作业流程,按照风险程度和水深位置的不同,可将下放作业分为三种工况,分别是飞溅区工况、连续下放工况和海底安装工况。其中,飞溅区工况发生在隔水管下放作业初期,此工况下会产生较大的波浪载荷力和入水砰击力,可能导致隔水管产生较大的横向偏移与月池发生碰撞,并存在隔水管轴向动态压缩的风险;连续下放工况时需要不断连接新的隔水管并下入水中,此过程持续时间最长,伴随着深水复杂多变的海况,平台升沉运动与隔水管系统重量耦合,隔水管的轴向极大张力存在超出平台最大钩载能力的风险,也可能发生由于应力超过屈服极限导致的隔水管顶部断裂事故。海底安装工况是在完成所有隔水管连接和下入后,将 LMRP&BOP 与海底井口连接的作业,此时悬挂隔水管长度最大并随平台运动,存在因平台垂荡幅度过大超出伸缩节冲程的风险,同时要防范隔水管底部与井口或海底碰撞,避免隔水管触底及底部断裂事故发生。

在连续下放工况时,卡盘需要承担隔水管单根、辅助管线、LMRP&BOP 以及其他部件的全部重量,下放周期较长,作业过程风险较大,对隔水管系统的安全可靠性提出了较高的要求,因此本文重点

针对隔水管的连续下放作业开展可靠性评估。

1.2 下放作业隔水管力学模型

下放作业时隔水管顶部固定于平台卡盘上,底部连接LMRP&BOP为自由端,主要受轴向自身重力和横向波流联合力影响,隔水管的微分控制方程^[6]为

$$F(z,t) = \frac{\partial^2}{\partial z^2} (EI \frac{\partial^2 x(z,t)}{\partial z^2}) + m \frac{\partial^2 x(z,t)}{\partial t^2} - T(z) \frac{\partial^2 x(z,t)}{\partial z^2} \tag{1}$$

式中: E 为隔水管弹性模量,单位为Pa; I 为截面惯性矩,单位为 m^4 ; T 为轴向力,单位为N; m 为隔水管单位长度振动质量,包括单位长度质量及附连水质量等,单位为 kg/m ; t 为时间,单位为s。

隔水管轴向力沿其长度方向变化,任一位置处轴向力为

$$T(z) = m_a g + \int_z^L mg dz \tag{2}$$

式中, m_a 为LMRP&BOP质量,单位为 kg ; z 取值为 $[0,L]$,其中 L 为隔水管长度,单位为 m 。

考虑隔水管运动,波浪和海流的联合作用力采用修正的Morison方程^[19-20]近似表示为

$$F_r = \frac{\pi}{4} \rho C_M D_o^2 a_w - \frac{\pi}{4} \rho (C_M - 1) D_o^2 a_r + \frac{1}{2} \rho D_o C_D (v_w + v_c - v_r) |v_w + v_c - v_r| \tag{3}$$

式中, ρ 为海水密度,单位为 kg/m^3 ; C_M 为惯性力系数; D_o 为隔水管水动力外径,单位为 m ; a_w 为波浪水质点水平加速度,单位为 m/s^2 ; a_r 为隔水管水平加速度,单位为 m/s^2 ; C_D 为拖曳力系数; v_w 为波浪水质点水平速度,单位为 m/s ; v_c 为海流水质点水平速度,单位为 m/s ; v_r 为隔水管水平速度,单位为 m/s 。

下放过程中隔水管顶部坐于卡盘上,此时两者近似于刚性连接,平台运动直接传递至隔水管顶部,底部为自由端,顶部边界条件^[19]为

$$B(i,t) = A_i \sin(\frac{2\pi}{T_i} t + \varphi_i) \tag{4}$$

式中: i 取值为1~6之间整数,分别代表平台的6个自由度; A_1 、 A_2 和 A_3 分别为平台横荡、纵荡和垂荡的运动幅值,单位为 m ; A_4 、 A_5 和 A_6 分别为平台横摇、纵摇和艏摇的运动幅度,单位为 $^\circ$; T_i 为平台运动周期,单位为 s ; φ_i 为平台运动的相位角,单位为 $^\circ$ 。

1.3 环境载荷参数联合分布模型

参考南海陵水区块环境资料和相关文献^[21-22],建立波浪和海流参数的联合分布模型,确定相关环境参数。依据原始数据拟合有义波高 H_s 的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF),如图1所示, $F(H_s)$ 为 H_s 的CDF,服从两参数Weibull分布,有

$$F(H_s) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{H_s}{\eta_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}}\right] \tag{5}$$

式中,形状参数 $\beta_{H_s}=1.743$,尺寸参数 $\eta_{H_s}=1.904$ 。

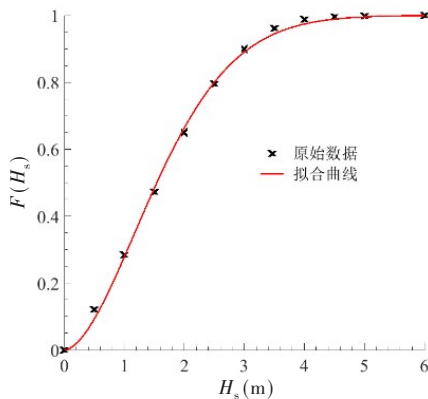


图1 有义波高 H_s 的CDF拟合
Fig.1 Fitting plot for CDF of H_s

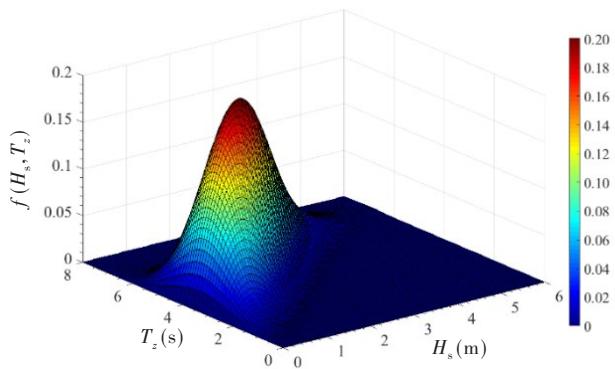


图2 H_s 和 T_z 的联合PDF
Fig.2 Joint PDF of H_s and T_z

根据数据拟合结果,跨零周期 T_z 服从以 H_s 为条件的Normal分布,两者的联合概率密度函数(Probability Density Function, PDF)如图2所示, $f(T_z/H_s)$ 和 $f(H_s, T_z)$ 分别为 T_z 的条件PDF和联合PDF,有

$$f(T_z/H_s) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T_z - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (6)$$

$$f(H_s, T_z) = f(H_s) \times f(T_z/H_s) \quad (7)$$

式中,均值 $\mu=3.408-0.244\sin(H_s)-0.042H_s^2+0.84H_s$,标准差 $\sigma=0.712\exp(-0.492H_s)+0.454$ 。

平均波浪角 θ_{wave} 服从以 H_s 为条件的Beta分布,该分布要求变量取值为 $[0, 1]$,因此令 $\theta'_{\text{wave}}=\theta_{\text{wave}}/360$,得到 $f(\theta'_{\text{wave}}/H_s)$ 和 $f(H_s, \theta'_{\text{wave}})$ 分别为 θ'_{wave} 的条件PDF和联合PDF:

$$f(\theta'_{\text{wave}}/H_s) = \frac{1}{B(\alpha_1, \beta_1)} \theta'^{\alpha_1-1}_{\text{wave}} (1 - \theta'_{\text{wave}})^{\beta_1-1} \quad (8)$$

$$f(H_s, \theta'_{\text{wave}}) = f(H_s) \times f(\theta'_{\text{wave}}/H_s) \quad (9)$$

式中, $\alpha_1=3.521\exp(-0.372H_s)+2.181$, $\beta_1=-2.663H_s^{0.067}+5.653$ 。

不同 H_s 下 θ_{wave} 的PDF和 θ'_{wave} 与 H_s 的联合PDF如图3和图4所示。

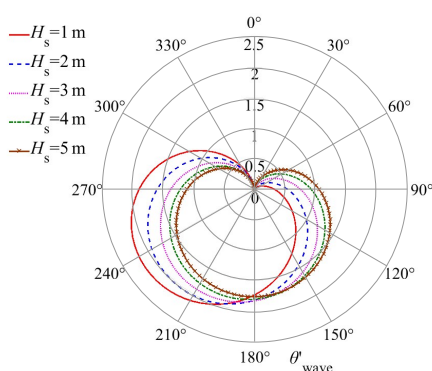


图3 不同 H_s 下 θ_{wave} 的PDF

Fig.3 PDF of θ_{wave} for different H_s ranges

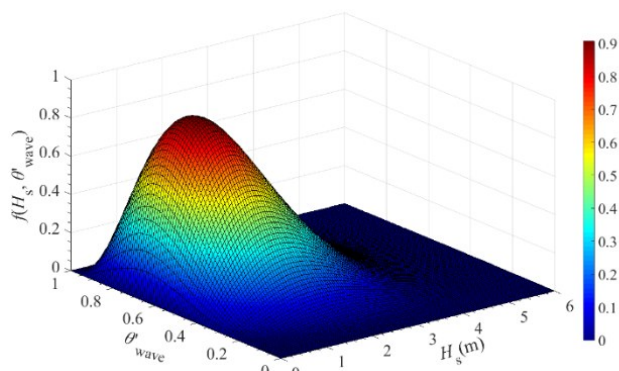


图4 H_s 和 θ'_{wave} 的联合PDF

Fig.4 Joint PDF of H_s and θ'_{wave}

表层海流速度 V_s 服从两参数Weibull分布,其PDF为

$$f(V_s) = \frac{\beta_{V_s}}{\eta_{V_s}} \left(\frac{V_s}{\eta_{V_s}}\right)^{\beta_{V_s}-1} \exp\left[-\left(\frac{V_s}{\eta_{V_s}}\right)^{\beta_{V_s}}\right] \quad (10)$$

式中,形状参数 $\beta_{V_s}=2.262$,尺寸参数 $\eta_{V_s}=0.286$ 。

平均海流角 θ_{cur} 服从以 V_s 为条件的Beta分布,令 $\theta'_{\text{cur}}=\theta_{\text{cur}}/360$,得到 $f(\theta'_{\text{cur}}/V_s)$ 和 $f(V_s, \theta'_{\text{cur}})$ 分别为 θ'_{cur} 的条件PDF和联合PDF:

$$f(\theta'_{\text{cur}}/V_s) = \frac{1}{B(\alpha_2, \beta_2)} \theta'^{\alpha_2-1}_{\text{cur}} (1 - \theta'_{\text{cur}})^{\beta_2-1} \quad (11)$$

$$f(V_s, \theta'_{\text{cur}}) = f(V_s) \times f(\theta'_{\text{cur}}/V_s) \quad (12)$$

式中, $\alpha_2=-5.499\exp(0.376V_s)+14.14$, $\beta_2=0.895V_s^{1.593}+2.545$ 。

2 下放作业隔水管结构可靠性评估方法

下放作业隔水管结构可靠性评估方法如图5所示,主要包括结构响应数值分析、结构响应智能预测模型和结构可靠性评估三部分。首先结合环境载荷参数联合分布模型和平台水动力分析模型,形成下放隔水管数值分析模型,开展结构响应分析;然后,以数值分析结果作为样本集,结合IAGA确定最优隐藏节点个数,利用BRNN建立结构响应智能预测模型;最后,基于作业限制准则构建结构功能

函数,结合结构响应预测结果,利用MC方法开展隔水管下放不同作业阶段可靠性评估。

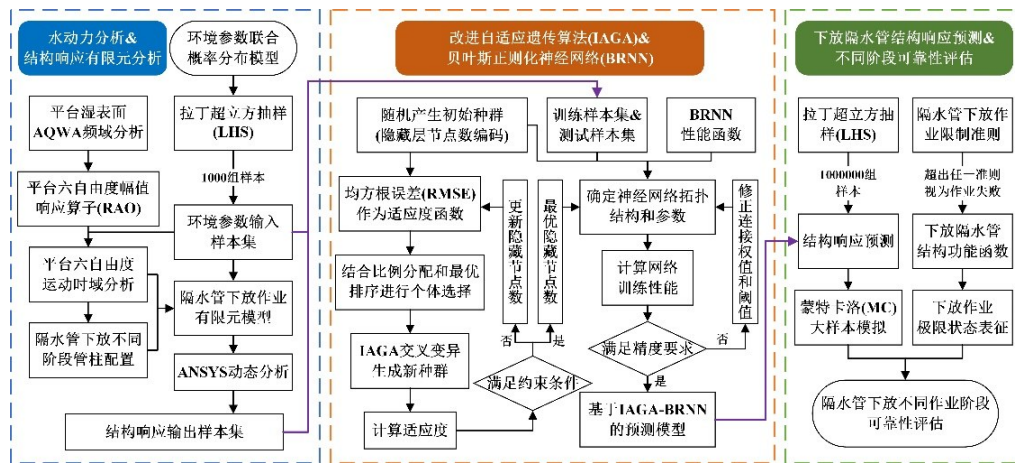


图5 隔水管下放作业结构可靠性评估方法

Fig.5 Structural reliability assessment method of riser deployment

2.1 下放隔水管结构响应数值模型

下放隔水管结构数值分析模型主要包括环境载荷模型、管柱结构模型和边界条件三部分:环境载荷主要包括波浪载荷和海流载荷,可由环境载荷参数联合分布模型获得;管柱尺寸和力学性能参数由隔水管下放配置表获得,由于隔水管下放作业为动态过程,不同阶段隔水管配置不同,依据浮力块等级不同,分别建立不同悬挂根数的隔水管模型;悬挂隔水管顶部和平台刚性连接,底部为自由端,顶部边界条件与平台运动保持一致,由于环境载荷不仅直接对管柱作用,也会对平台运动产生作用进而影响隔水管,因此需要首先确定平台的运动响应。

依据平台的尺寸和质量参数,利用AWQA建立平台的湿表面模型,开展不同角度和频率下的平台运动频域分析,形成平台六自由度幅值响应算子(Response Amplitude Operator, RAO),确定平台在不同环境载荷下的运动响应作为隔水管建模边界条件。结合隔水管数值模型,利用ANSYS动态分析得到隔水管的最大等效应力、挠性接头转角、最大最小轴向力和不同位置最大横向位移等数据,作为后续管柱结构响应预测的训练样本。

2.2 基于IAGA-BRNN的预测模型

利用BRNN模型的贝叶斯正则化方法限制网络权值,结合IAGA的自适应交叉变异算子确定最优隐藏节点数,改善网络结构,提高模型的收敛能力、预测精度和泛化能力,形成基于IAGA-BRNN的下放隔水管结构响应预测模型。

BRNN利用贝叶斯正则化方法训练BPNN,通过在训练性能函数中引入惩罚系数和网络权值来降低网络复杂度,提升网络的泛化能力,其训练性能函数 $F^{(23)}$ 修正为

$$F = \alpha E_D + \beta E_W$$

$$E_D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2, E_W = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_j^2 \tag{13}$$

式中, α 和 β 为正则化系数, E_D 为网络输出的均方误差, E_W 为网络权值的均方误差, n 为训练数据集的样本总数, m 为网络权值的总数, t_i 为第*i*组样本的目标输出值, o_i 为第*i*组样本的实际输出值, w_j 为第*j*个网络权值。

BRNN的关键在于正则化系数的选取,因此在训练时首先选定初始的 α 和 β ,并将网络权值视为随机变量,同时认为训练数据集与权集的先验概率服从高斯分布,然后依据贝叶斯准则,由后验概率求得 F 在最小点处的 α 和 β 优化解:

$$P(w|D, \alpha, \beta, M) = \frac{P(D|w, \beta, M)P(w|\alpha, M)}{P(D|\alpha, \beta, M)} \quad (14)$$

$$P(D|w, \beta, M) = \frac{\exp(-\beta E_D)}{(\pi/\beta)^{n/2}}, P(w|\alpha, M) = \frac{\exp(-\alpha E_w)}{(\pi/\alpha)^{m/2}}$$

式中, w 为网络权集, D 为训练数据集, M 为所用神经网络模型, $P(w|D, \alpha, \beta, M)$ 为给定 w 后 D 的后验概率分布, $P(D|\alpha, \beta, M)$ 为标准化因子。

IAGA 利用 Sigmoid 函数实现 P_c 和 P_m 非线性调整^[24], 在演化迭代过程中保证优秀个体的种群优势, 提高劣势个体的变异能力, 使算法能够跳出局部最优解, 加快收敛速度。 P_c 和 P_m 的自适应调整公式分别为

$$P_c = \frac{P_{cmax} - P_{cmin}}{1 + \exp(\omega(\frac{2(f_{avg} - f_c)}{f_{avg} - f_{min}} - 1))} + P_{cmin}, P_m = \frac{P_{mmax} - P_{mmin}}{1 + \exp(\omega(\frac{2(f_{avg} - f_m)}{f_{avg} - f_{min}} - 1))} + P_{mmin} \quad (15)$$

式中, 最小交叉概率 $P_{cmin}=0.5$, 最大交叉概率 $P_{cmax}=0.8$, 最小变异概率 $P_{mmin}=0.005$, 最大变异概率 $P_{mmax}=0.05$, f_c 为参与交叉个体中较大的适应度, f_m 为变异个体的适应度, f_{min} 为种群的最小适应度, f_{avg} 为种群的平均适应度, 调整系数 $\omega=9.904$ 。

2.3 作业限制准则和结构功能函数

根据相关标准^[25]和作业安全要求, 确定隔水管下放作业的限制准则如表 1。

表 1 隔水管下放作业限制准则

Tab.1 Operation criteria of riser deployment

名称	限制准则	依据
隔水管最大等效应力 S_{mises}/MPa	≤ 370	API RP 16Q 标准规定; 隔水管所用 X80 钢屈服强度为 552 MPa, 安全系数为 0.67
隔水管最大动态轴向力 T_{max}/MN	≤ 11.27	平台最大钩载限制为 1150 吨
隔水管最小动态轴向力 T_{min}/MN	≥ 0.445	隔水管不能出现动态压缩, 一般最小值取 100 kips=0.445 MN
隔水管在平台月池处位移 U_{mp}/m	≤ 4.5	隔水管不能和月池发生碰撞, 月池尺寸为 45 m×9 m
底部挠性接头转角 $R_{fl}/(^{\circ})$	≤ 9	API RP 16Q 标准规定

参考表 1, 当超出任何一项准则时, 可认为结构失效, 因此确定下放作业隔水管结构功能函数 Z 由 $Z_1=370-S_{mises}$, $Z_2=11.27-T_{max}$, $Z_3=T_{min}-0.445$, $Z_4=4.5-U_{mp}$ 和 $Z_5=9-R_{fl}$ 五部分构成, 当且仅当 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 和 Z_5 均大于 0 时, $Z>0$, Z 可表示为以下变量的函数:

$$Z = g(N, H_s, T_2, \theta'_{wave}, V_s, \theta'_{cur}) \quad (16)$$

式中, N 为悬挂隔水管根数; $Z=0$ 时, 即为下放隔水管结构的极限状态方程。

目前工程中广泛使用响应面法和 MC 方法求解此类问题可靠性, 响应面法的核心思想是利用合适的多项式近似替代极限状态方程, 但当结构问题较为复杂或呈现很强的非线性时, 该方法难以准确评估结构可靠性。MC 方法通过对大样本的重复计算, 进而获取结果统计特征, 是一种相对精确法, 常被用作其他方法的验证标准。其最大缺点在于大样本重复计算非常耗时, 但本文通过基于 IAGA-BRNN 的预测模型可在尽量保持 MC 方法精度的前提下大大减轻其计算负担。此外, 本文采用拉丁超立方抽样(LHS)方法对输入概率累积分布在(0, 1)上进行等区间分层并在每层中随机抽取样本, 可有效避免样本的聚集效应。

3 应用实例

3.1 隔水管下放作业参数配置

以中国南海某深水钻井隔水管下放作业为例进行分析, 管柱配置参数见表 2。

表2 隔水管下放配置表

Tab.2 Structural configuration of riser deployment

名称	外径/m	内径/m	长度/m	有效重量/kg	数量
伸缩节	0.7112	0.6604	30.312	41 610	1
10ft短节	0.5334	0.4858	3.048	3445	1
20ft短节	0.5334	0.4858	6.096	4982	1
2000ft浮力单根	0.5334	0.4890	16.764	565	26
4000ft浮力单根	0.5334	0.4890	16.764	1717	24
6000ft浮力单根	0.5334	0.4890	16.764	2792	23
隔水管裸单根	0.5334	0.4858	16.764	10 408	1
下挠性接头	-	-	2.988	9001	1
LMRP	-	-	7.844	168 950	1
BOP	-	-	9.983	206 360	1

3.2 下放隔水管结构响应预测

结合下放作业隔水管结构可靠性评估方法,通过LHS获取250组环境参数样本,分别建立悬挂15根、35根、55根和75根隔水管的4组管柱模型,形成1000组隔水管数值模型。以环境参数、不同阶段悬挂管柱参数和平台运动响应参数共同组成的1000组数据作为输入样本,利用数值模拟得到的1000组结构响应作为输出样本,共同组成1000组样本集,其中75%作为训练样本,25%作为测试样本。利用750组训练样本训练IAGA-BRNN预测模型并计算250组测试输入样本的输出响应,如图6所示。以输出的最大等效应力值 S_{mises} 为例,其预测输出值和目标输出值对比分析如图7所示。

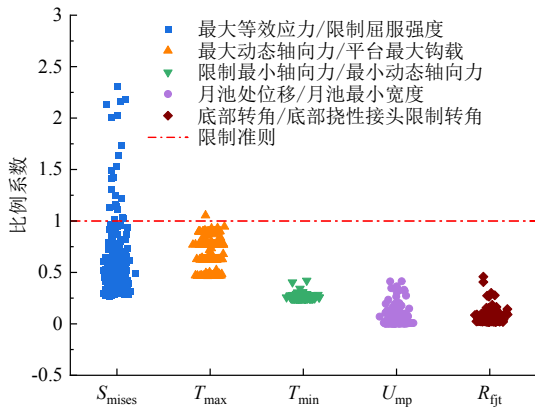


图6 测试样本预测输出

Fig.6 Predicted output of the test sample

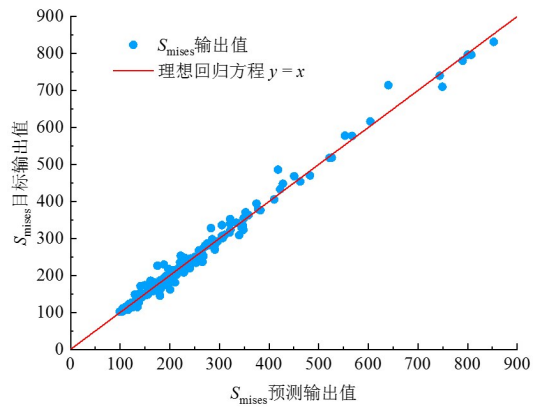


图7 S_{mises} 预测输出与目标输出对比

Fig.7 Comparison of outputs for S_{mises}

由图6可知,250组测试样本的预测输出中 S_{mises} 和 T_{max} 均存在超过限制的情况,其中 S_{mises} 是影响隔水管安全下放作业的主要限制因素,主要原因是下放作业后期的悬挂隔水管长度较长。其他如 T_{min} 、 U_{mp} 和 R_{ft} 等均满足要求,且远低于限制准则,主要是硬悬挂作业模式和LMRP&BOP的存在,避免了隔水管产生动态压缩和较大的横向偏移。由图7可知,测试样本的 S_{mises} 预测值绝大部分落在理想回归方程对应的直线上,说明IAGA-BRNN模型的预测输出和目标输出较为吻合,该模型具有较好的预测能力。同时通过均方根误差(RMSE)和相关系数(CC)两个指标分析预测输出结果误差(归一化后),并对比BPNN模型的预测结果评价IAGA-BRNN模型的预测性能,分析结果见表3。

表3 IAGA-BRNN模型预测性能评价表

Tab.3 Prediction performance of IAGA-BRNN model

预测指标	预测模型	S_{mises}	T_{max} & T_{min}	U_{mp}	R_{ft}
RMSE	IAGA-BRNN	0.007	0.038	0.020	0.023

续表 3

预测指标	预测模型	S_{mises}	$T_{max}&T_{min}$	U_{mp}	R_{fit}
CC	BPNN	0.021	0.050	0.030	0.099
	IAGA-BRNN	99.48%	99.10%	99.76%	99.82%
	BPNN	95.78%	98.44%	99.46%	96.51%

分析表3可知,IAGA-BRNN模型在5项预测输出值的预测指标上均保持较好的水平,相较常规的BPNN模型,基于IAGA-BRNN的结构响应预测模型在两个预测指标上均有明显提升, RMSE最多降低了76.77%,CC最高提升了3.86%,证明提出的模型预测能力更强,为后续的可操作性评估结果准确性提供了保障。

3.3 隔水管下放作业可靠性评估

由于隔水管下放作业是一个动态过程,不同下放阶段悬挂管柱根数和长度不同,结构可靠性也有明显差异,依据浮力块等级不同,分别选取悬挂15根、35根、55根和75根隔水管时的下放状态计算结构可靠度(表征系统可靠性的概率度量指数),结果如图8所示。

由图8可知,随着悬挂隔水管根数的增加,结构可靠度呈减小趋势,主要是由于隔水管长度的增加导致最大等效应力增大及作用在结构上的波流联合力增加,而隔水管等效应力是限制作业安全的首要因素,因此结构可靠度下降。按照文献中给出的安全作业参考线^[12],当可靠度大于99%时可认为下放作业是安全的,在安全系数为0.67时,悬挂55根和75根隔水管进行下放作业均不满足要求;悬挂75根隔水管时(目标下放长度)结构可靠度为95.39%,此时结构可靠度最低,因此,应当按照作业要求及时释放伸缩节和张紧器,将大钩载荷逐步转移到张紧器上,减小卡盘载荷和平台运动对隔水管系统影响。当安全系数分别提高至0.8和0.9时,前者只有悬挂75根隔水管作业时结构可靠度略低于安全要求,后者在隔水管下放的全部阶段均满足要求,且随着安全系数的提高,可靠度下降趋势逐渐放缓。

在进行隔水管下放作业时,作业人员会根据海洋水文预报和现场监测海况随时调整下放策略,因此分别针对以下三个环境参数设定停止作业条件,包括 $H_s > 5\text{ m}$ 时停止作业、 $T_z > 10\text{ s}$ 时停止、 $V_s > 1\text{ m/s}$ 时停止作业和以上任一超过限制时停止作业,计算在人为干预下的隔水管下放作业可靠性,结果如图9所示。分析可知,将 H_s 作为限制条件时,可靠性提升效果最为明显,最大可提高4.07%,此时所有作业阶段下放作业可靠性均大于99%,满足安全作业要求;将 T_z 和 V_s 作为限制条件时,可靠性提升效果均不明显,悬挂55根和75根隔水管时仍不满足安全要求;相比仅将 H_s 作为限制条件,综合考虑三种环境参数进行人为干预,在各作业阶段可靠性仅有小幅提升,但会增加作业复杂性和分散作业人员精力,不利于做出准确判断,因此建议仅考虑 H_s 作为限制准则调整隔水管下放作业策略,以保证下放作业安全。

由于本文既考虑环境载荷对隔水管的直接影响,又考虑环境载荷对平台运动作用传递给隔水管的间接影响,但并未考虑动力定位(DP)系统会实时修正和抵抗平台的漂移,导致可靠性结果整体比较保守。此外,等效应力限制准则本身有较大的安全裕量,加上人为干预可以随时调整下放策略,因

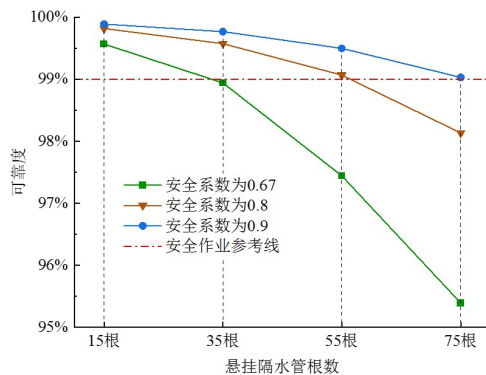


图8 不同下放阶段隔水管结构可靠性
Fig.8 Structural reliability of riser under different deployment stages

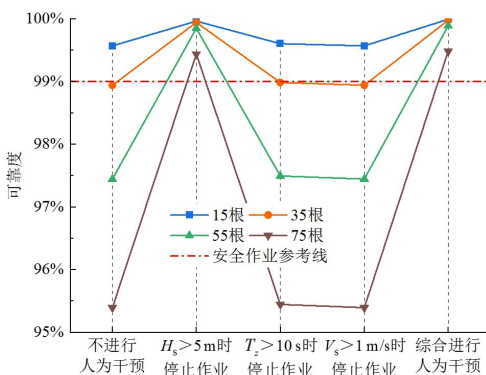


图9 人为干预下隔水管下放作业可靠性
Fig.9 Operational reliability of riser deployment under human intervention

此在本文给定的海况和工况中隔水管下放作业总体上是安全可行的。以满足限制准则为首要条件,针对隔水管下放作业提出以下预防和改进措施:选择合适的海况和下放波浪相位角;将钻井平台进行顺流漂移并选择合适的平台漂移速度;适当放缓隔水管下放速度;完成安装后及时连接张紧器和释放伸缩节;有条件的可以选择双井架作业等。

4 结 论

本文针对隔水管连续下放工况,构建了环境载荷参数联合分布模型,确定了基于 IAGA-BRNN 的结构响应智能预测模型,结合蒙特卡洛方法形成了隔水管下放作业可靠性智能评估方法,主要结论包括:

(1) 分析四种常见的隔水管下放场景,明确正常钻井作业是最频繁且较危险的作业场景,识别下放作业时三种工况的风险因素和结构弱点,确定连续下放工况为重点关注对象,同时建立环境载荷参数的联合分布模型,发现大部分参数符合 Weibull 分布和 Beta 分布。

(2) 提出下放作业隔水管结构可靠性评估流程,建立基于 IAGA-BRNN 的结构响应智能预测模型,分析结果表明该模型在所有结构响应的预测指标上均保持较好的水平,且相较常规的 BPNN 模型有明显提升,具有更强的预测能力。

(3) 明确隔水管等效应力和最大轴向力是影响下放作业安全的首要 and 次要限制因素,可靠性评估结果表明随着悬挂隔水管根数增加,结构可靠度呈下降趋势,但随着安全系数的提高,可靠度下降趋势放缓,将波高作为作业限制条件可大幅提升作业可靠性。

参 考 文 献:

- [1] 陈国明,刘秀全,畅元江,等.深水钻井隔水管与井口技术研究进展[J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(5):129-139.
Chen Guoming, Liu Xiuquan, Chang Yuanjiang, et al. Advances in technology of deepwater drilling riser and wellhead[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 129-139. (in Chinese)
- [2] 畅元江,陈国明,许亮斌,等.超深水钻井隔水管设计影响因素[J].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 risers[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 523-528. (in Chinese)
- [3] 孙友义,陈国明,畅元江,等.超深水隔水管悬挂动力分析与避台风策略探讨[J].中国海洋平台,2009,24(2):29-32.
Sun Youyi, Chen Guoming, Chang Yuanjiang, et al. Hang-off dynamic analysis and the discuss of typhoon avoidance strategy for ultra-deepwater drilling risers[J]. China Offshore Platform, 2009, 24(2): 29-32. (in Chinese)
- [4] Gallagher C, Williams D. Emergency disconnect and storm hang-off: Reducing risk for drilling risers in harsh environments [C]//Proceedings of the ASME 2019, 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Glasgow, Scotland, UK, 2019.
- [5] 孙友义,陈国明,畅元江.下放或回收作业状态下超深水钻井隔水管轴向动力分析[J].中国海上油气,2009,21(2):116-119.
Sun Youyi, Chen Guoming, Chang Yuanjiang. Axial direction dynamic analysis on ultra-deep-water drilling riser under setting down and recovery operations[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(2): 116-119. (in Chinese)
- [6] Mao L, Zeng S, Liu Q, et al. Dynamical mechanics behavior and safety analysis of deep water riser considering the normal drilling condition and hang-off condition[J]. Ocean Engineering, 2020, 199: 106996.
- [7] 鞠少栋,畅元江,陈国明,等.深水钻井隔水管悬挂窗口确定方法[J].石油学报,2012,33(1):133-136.
Ju Shaodong, Chang Yuanjiang, Chen Guoming, et al. Determination of the hang-off window for deepwater drilling riser[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 133-136. (in Chinese)

- [8] Wang Y, Gao D, Fang J. Mechanical behavior analysis for the determination of riser installation window in offshore drilling [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 24: 317–323.
- [9] Zhang X, Yang H Z, Adaikalaraj P F B, et al. Structural reliability analysis for offshore drilling riser deployment operability [C]//*Proceedings of the ASME 2017, 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Trondheim, Norway, 2017.
- [10] 畅元江, 王 康, 张伟国, 等. 台风下 TLP 立管系统可靠性评估[J]. *海洋工程*, 2017, 35(4): 1–7.
Chang Yuanjiang, Wang Kang, Zhang Weiguo, et al. Reliability assessment of TLP riser system under typhoon[J]. *The Ocean Engineering*, 2017, 35(4): 1–7. (in Chinese)
- [11] Cabrera-miranda J M, Paik J K. On the probabilistic distribution of loads on a marine riser[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 134: 105–118.
- [12] Sengupta P, Low Y M, Zhang X, et al. Reliability assessment of marine drilling risers with correlated random variables[C]//*Proceedings of the ASME 2016, 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Busan, South Korea, 2016.
- [13] 王敏生, 光新军, 耿黎东. 人工智能在钻井工程中的应用现状与发展建议[J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(4): 420–427.
Wang Minsheng, Guang Xinjun, Geng Lidong. Application status and development suggestions of artificial intelligence in drilling engineering[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(4): 420–427. (in Chinese)
- [14] 焦李成, 杨淑媛, 刘 芳, 等. 神经网络七十年: 回顾与展望[J]. *计算机学报*, 2016, 39(8): 1697–1716.
Jiao Licheng, Yang Shuyuan, Liu Fang, et al. Seventy years beyond neural networks: Retrospect and prospect[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(8): 1697–1716. (in Chinese)
- [15] 汪海燕, 黎建辉, 杨风雷. 支持向量机理论及算法研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(5): 1281–1286.
Wang Haiyan, Li Jianhui, Yang Fenglei. Overview of support vector machine analysis and algorithm[J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(5): 1281–1286. (in Chinese)
- [16] 孙友义. 深水钻井隔水管强度评价方法及应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
Sun Youyi. Strength assessment for deepwater drilling riser and engineering application[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009. (in Chinese)
- [17] 姜 维, 周俊昌, 唐海熊, 等. 深水钻井规程与指南[R]. 北京: 中国海洋石油总公司, 2011.
Jiang Wei, Zhou Junchang, Tang Haixiong, et al. Deepwater drilling procedures and guidelines[R]. Beijing: China National Offshore Oil Corporation, 2011. (in Chinese)
- [18] 刘 康, 陈国明, 畅元江, 等. 深水钻井隔水管下放试压单元智能优化[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(6): 130–137.
Liu Kang, Chen Guoming, Chang Yuanjiang, et al. Intelligent optimization on pressure test for deepwater drilling risers in running[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2019, 43(6): 130–137. (in Chinese)
- [19] 刘秀全, 陈国明, 畅元江, 等. 台风条件下深水钻井隔水管触底事故分析及对策[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(6): 738–742.
Liu Xiuquan, Chen Guoming, Chang Yuanjiang, et al. Analysis and countermeasures of deepwater drilling riser grounding accidents under typhoon conditions[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 738–742. (in Chinese)
- [20] 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[J]. *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[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2019, 43(2): 123–130. (in Chinese)
- [21] O'Sullivan E, Brekke J N, Dib M. Riser deployment and hang-off analysis for a harsh environment, deepwater site[C]//*Proceedings of OMAE04, 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, British Columbia, Canada, 2004.
- [22] 许亮斌, 周建良, 王荣耀, 等. 南海深水钻井平台悬挂隔水管撤离防台分析[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(3): 101–107.
Xu Liangbin, Zhou Jianliang, Wang Rongyao, et al. Analysis of deep water drilling platform evacuation from imminent typhoons with riser hanging-off in the South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(3): 101–107. (in Chinese)

-
- [23] Shi J, Zhu Y, Khan F, et al. Application of Bayesian regularization artificial neural network in explosion risk analysis of fixed offshore platform[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 57: 131–141.
- [24] 金 晶, 苏 勇. 一种改进的自适应遗传算法[J]. *计算机工程与应用*, 2005(18): 64–69.
Jin Jing, Su Yong. An improved adaptive genetic algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005(18): 64–69.
(in Chinese)
- [25] American Petroleum Institute, API RP 16Q: Recommended practice for design selection operation and maintenance of marine drilling riser system[S]. Washington: API Publishing Services, 2017.