

# 弹性缆对缓解电气承力缆型潜标环境响应的作用

吴正伟<sup>1,2,3</sup>, 阎耀保<sup>1</sup>

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092;  
3. 同济大学 国家海底科学观测系统项目办公室, 上海 200092)

**摘要:** 针对电气承力缆型潜标(EMC-SSM)在极端海况下动态响应过大问题,建立了环境响应数学模型。通过某型电气承力缆型潜标在百年一遇海况下的拉力响应计算,研究了弹性缆在缓解电气承力缆型潜标环境响应方面的有效性及不同配置对缓解效果的影响规律。结果表明:长度适合时弹性缆对电气承力缆型潜标的动态响应具有显著的抑制作用,但不合适的长度将加剧其动态响应。最后,给出了弹性缆的设置原则和最短有效长度的确定方法。

**关键词:** 弹性缆;电气承力缆;动态响应;潜标

**中图分类号:** P756

**文献标志码:** A

## Effect of Snubber Hose in Mitigating Environmental Responses of Electrical-mechanical Cable Subsurface Mooring

WU Zhengwei<sup>1,2,3</sup>, YIN Yaobao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Project Management Office of China National Scientific Seafloor Observatory, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A mathematical model of environmental responses for electrical-mechanical cable subsurface mooring (EMC-SSM) was established to solve the problem of the significant dynamic response of EMC-SSM under extreme sea conditions. The effectiveness of the snubber hose in mitigating the environmental response of EMC-SSM and the effect of different configurations of the snubber hose on the mitigation were studied by calculating the tensile response of a specific type of EMC-SSM under sea conditions with a 100-year reoccurrence period. The results show that the dynamic response of EMC-SSM is inhibited with an appropriate length of

snubber hose. However, the dynamic response of EMC-SSM is enhanced when the length of snubber hose is inappropriate. Finally, the configuration principle of the snubber hose and the method for determining the shortest effective length were also presented.

**Key words:** snubber hose; electrical-mechanical cable; dynamic response; subsurface mooring

传统浮标和潜标拥有良好的环境适应性、海面到水体的一体化观测能力以及长时间的续航能力,但由于其受制于有限的能量供给和通信带宽,所采集数据的类型和实时性受到制约。为了弥补传统锚系平台在能量供给和通信带宽上的短板,国际海洋工程界在大约二十多年前发起了电气/光电承力缆型锚系的研究与实践<sup>[1-2]</sup>。迄今为止,北美等少数地区拥有实际的电气/光电承力缆型锚系的应用案例<sup>[3]</sup>,国内相关的研究研制工作还处于相对前期阶段<sup>[4]</sup>。从现有的案例来看,电气/光电承力缆型锚系可以大幅提升水体和海面数据的探测和传输效率,是一种具有巨大应用前景的新型海洋观测平台。

电气/光电承力缆型锚系是在传统锚系的基础上将既能传输电能和信号又能承受力载荷的电气/光电承力缆作为系泊缆的一种新型锚系观测平台,借助该平台可以实现从海面、水体到海底的一体化、长期、连续、实时和大数据量的数据观测与传输。典型的电气/光电承力缆的中央是铜导体和光纤,外部是由维克特拉(Vectran)等高分子材料制成的承力单元,内部导体负责供电和短距离信号传输,光纤用于远距离数据传输。光电承力缆与电气承力缆的本质区别只在于缆中央有无光纤,在通信距离和通信

收稿日期: 2021-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(91428207)

第一作者: 吴正伟(1981—),男,博士生,主要研究方向为电气承力缆型锚系关键技术。

E-mail: zhwwu@tongji.edu.cn

通信作者: 阎耀保(1965—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为极限环境下的流体控制等。

E-mail: y-yin@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

容量不同时按需选用,为方便论述,下文以电气承力缆泛指 2 种类型的缆。电气承力缆型锚系面临的主要挑战是电气承力缆内部的铜导体和光纤对伸长率非常敏感,通常所允许的应变不超过 0.5%<sup>[5]</sup>,有时即便电气承力缆的外观是完整的,内部铜导体的轻微受拉也可能导致通信和供电故障的发生<sup>[6-7]</sup>。为了使内部导体和光纤免受拉伸,电气承力缆的承力部件通常由具有较高轴向抗拉刚度的材料制成,在大多数海况条件下,由电气承力缆制成的锚系相较于传统锚系会产生更大的动态响应。由于电气承力缆的特殊性,因此降低电气承力缆型锚系在极端海况下的响应强度就显得非常重要。Grosenbaugh 等<sup>[8]</sup>介绍了一种低弹性模量的电气承力缆,使用的承力部件是尼龙等材料。对比在 3 种深度下低弹性模量缆的动态表现后发现,低弹性模量缆在一定深度范围内可以有效降低电气承力缆型浮标的动态响应,但目前尚未有实际的工程应用案例。Paul 等<sup>[9]</sup>研究了弹性缆在电气承力缆型浮标中降低力学响应强度的效果,发现 24 m 弹性缆的加入可以将浮标中的最大拉力降低 50.6%,拉力波动范围减小 75%。在电气承力缆型浮标上,弹性缆在降低动态响应强度方面的作用已经得到验证<sup>[10]</sup>。

以一个拟布放于东海海域的四观测层位电气承力缆型潜标为例,首先探讨了弹性缆对抑制电气承力缆型潜标环境响应强度的有效性,其次对比了无弹性缆和有弹性缆 2 种潜标模型在百年一遇海况下的环境响应强度,然后研究了弹性缆的数量及加装位置对抑制环境响应效果的影响规律,最后给出了关于弹性缆的推荐加装位置与最短有效长度。

## 1 设计描述与环境条件

### 1.1 设计描述

图 1 为电气承力缆型潜标示意图。从上到下由主浮球、5 m 长的主浮球缆、大传感器包、10 m 长的电气承力缆、小传感器包、10 m 长的电气承力缆和小传感器包、10 m 长的电气承力缆和位于海底的海床

基组成。传感器包和海床基配备了多种传感器,并通过电气承力缆相互连接。海床基中的仪器接口适配器将来自所有传感器的数据汇聚后发送到海底观测网络的水下主节点,同时从水下主节点接收电能并向所有传感器提供电力。

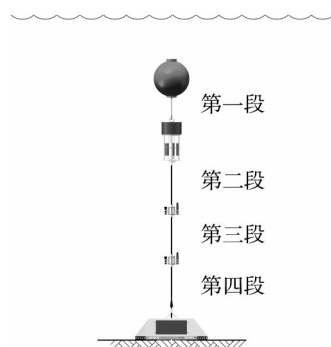


图 1 电气承力缆型潜标示意图

Fig.1 Schematic diagram of electrical-mechanical cable subsurface mooring(EMC-SSM)

电气承力缆型潜标主要部件的参数如表 1 所示。湿重的负值表示该部件提供了浮力。大传感器包由两部分组成,下部装有传感器,上部用于安装浮力材料。弹性缆的物理参数参照了 Paul 等<sup>[9]</sup>中的数据。

### 1.2 环境条件

电气承力缆型潜标是放于海面以下的,常规海况下潜标的工作状态无需担忧,需要重点关注的环境参数是海流和海浪的极值。对于极值数据较为完备的海域,可以通过直接查阅的方式获得相关数据<sup>[11]</sup>;对于相关数据资料尚不完备或缺乏实测数据的海域(以东海为例),本节给出确定方法和过程。

关于海流,通常很难准确地获得所有深度上的流速数据,一般是由海表面流速和海底流速按照公式推算得到其他深度层位上的流速。在像东海这种潮汐流占据主导的海域,采用文献[11-12]中的速度剖面公式,如下所示:

$$S = S_b + (S_t - S_b) \left( \frac{Z - Z_b}{Z_t - Z_b} \right)^{1/e} \quad (1)$$

式中: $S_t$ 和 $S_b$ 分别为海面和海底的流速,采纳大浮标

表 1 电气承力缆型潜标主要部件特征

Tab.1 Characteristics of main components of EMC-SSM

| 主要部件  | 直径/m        | 长度/m      | 湿重/(kg·m <sup>-1</sup> 或 kg) | 截面抗拉刚度/MN | 屈服力或破断力/kN |
|-------|-------------|-----------|------------------------------|-----------|------------|
| 主浮球   | 0.890       | 0.89      | -229.00                      |           |            |
| 主浮球缆  | 0.026       | 5.00      | 0.06                         | 106.0     | 90.0       |
| 大传感器包 | 1.000/0.800 | 0.60/1.10 | -67.00                       |           |            |
| 电气承力缆 | 0.022       | 10.00     | 0.09                         | 4.4       | 111.2      |
| 小传感器包 | 0.450       | 0.80      | -30.00                       |           |            |

标准<sup>[13]</sup>中推荐的海面流速最大值,海底流速为秋季大潮平均流速;指数 $e$ 选取推荐值0.33; $Z_i$ 和 $Z_b$ 分别为海面和海床的 $Z$ 坐标值。流速剖面如图2所示。

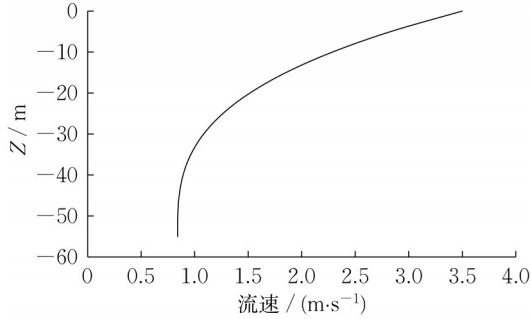


图2 流速曲线

Fig.2 Current speed field

波浪条件的确定相对海流条件更为困难,需要确定3个要素,即波浪谱、波高和波周期。关于波浪谱的选择,竺艳蓉等<sup>[14]</sup>通过4种不同的随机波浪谱研究了一个近海平台的水动力响应,结果表明JONSWAP(Joint North Sea Wave Project)波浪谱可用于表征中国海域的随机波浪。朱绍华等<sup>[15]</sup>在东海80 m深度海域处使用观测数据对波浪谱进行拟合,发现JONSWAP波浪谱在该海域的拟合效果较好。因此,选用JONSWAP波浪谱来表征波浪环境。

JONSWAP波浪谱由以下公式给出<sup>[16]</sup>:

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma \exp\left(-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right)^2\right) \quad (2)$$

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4\right) \quad (3)$$

式中: $S_{PM}(\omega)$ 为Pierson-Moskowitz(PM)波浪谱; $\omega_p$ 为谱峰值角频率; $\omega$ 为各个组分波浪的角频率; $H_s$ 为有义波高; $\gamma$ 为峰型参数; $\sigma$ 为谱宽参数; $A_\gamma$ 为归一化因素, $A_\gamma = 1 - 0.287 \ln \gamma$ 。

关于峰型参数,选取文献<sup>[16]</sup>中的平均值, $\gamma = 3.3$ 。当 $\omega \leq \omega_p$ 时, $\sigma = 0.07$ ;当 $\omega > \omega_p$ 时, $\sigma = 0.09$ 。

当 $H_s$ 和 $T_p$ 满足

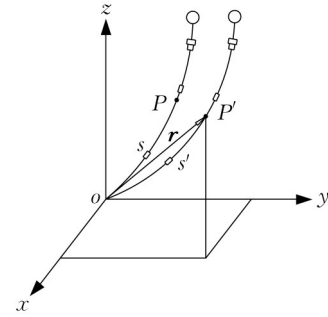
$$3.6 < T_p H_s^{-0.5} < 5 \quad (4)$$

JONSWAP波浪谱将是一个合理的模型。根据He等<sup>[17]</sup>选择了 $H_s$ 。谱峰周期 $T_p$ 的合理取值范围由式(4)和有义波高 $H_s$ 共同决定。最终,选择了百年一遇的JONSWAP波浪谱,有义波高为14.8 m,谱峰周期 $T_p$ 取值范围为13.9~19.2 s。

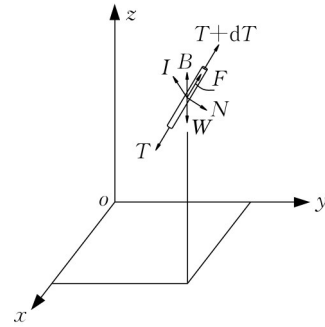
## 2 数学模型与计算参数

### 2.1 数学模型

为了分析电气承力缆型潜标的动态受力情况,需建立2个参考空间 $s$ 和 $s'$ 之间的关系。如图3a所示,在缆未被拉紧时,由 $s$ 表达坐标原点与 $P$ 点之间的曲线长度;当缆被拉紧时, $P$ 点移动到 $P'$ 点,使用 $s'$ 表达 $P'$ 点与原点之间的曲线长度, $P'$ 点的坐标由向量 $\mathbf{r}$ 来表示<sup>[18]</sup>。



a 固定坐标系与曲线坐标系



b 微元缆动态受力分析

图3 电气承力缆型潜标动力学分析

Fig.3 Dynamic analysis of EMC-SSM

图3b为 $P'$ 点处微元缆在某一时刻的受力情况。 $W$ 、 $B$ 、 $F$ 、 $N$ 、 $I$ 和 $T$ 分别为重力、浮力、切向阻力、法向阻力、惯性力和缆的拉力,由牛顿第二定律结合Morison公式<sup>[16]</sup>给出力学平衡方程,如下所示:

$$m \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -g \left( m - \rho A \frac{\partial s'}{\partial s} \right) \mathbf{k} + \frac{1}{2} \rho D \frac{\partial s'}{\partial s} (C_{DN} |\mathbf{v}_{Nr}| \mathbf{v}_{Nr} + C_{DT} |\mathbf{v}_{Tr}| \mathbf{v}_{Tr}) + m_s \mathbf{a}_r + \rho A \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \frac{T}{1 + \epsilon} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s} \quad (5)$$

式中: $m$ 为未拉紧状态下单位缆长质量; $\rho$ 为水的密度; $A$ 为缆的截面积; $D$ 为缆的直径; $\epsilon$ 为缆的应变; $\mathbf{k}$ 为图3中 $z$ 方向的单位向量; $\mathbf{v}_{Nr} = \mathbf{U}_N - \mathbf{v}_N$ 为水流和缆之间的法向相对速度, $\mathbf{v}_{Tr} = \mathbf{U}_T - \mathbf{v}_T$ 为水流和缆

之间的切向相对速度,  $\mathbf{a}_r = \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$  为水流和缆之间的相对加速度,  $\mathbf{U}_N = \mathbf{U} - (\mathbf{U} \cdot \mathbf{u})\mathbf{u}$  为水流在微元缆的法向速度,  $\mathbf{v}_N = \mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{u})\mathbf{u}$  为微元缆的法向运动速度,  $\mathbf{u}$  为  $P'$  处切向的单位向量,  $\mathbf{U}$  为此处的水流速度,  $\mathbf{v}$  为缆的运动速度,  $\mathbf{U}_T = (\mathbf{U} \cdot \mathbf{u})\mathbf{u}$  为水流在微元缆的切向速度,  $\mathbf{v}_T = (\mathbf{v} \cdot \mathbf{u})\mathbf{u}$  为微元缆的切向运动速度;  $C_{DN}$  和  $C_{DT}$  为法向和切向阻力系数;  $m_a = \rho A C_A$  为附加质量, 其中  $C_A$  为附加质量系数, 按照法向和轴向可以分为  $C_{AN}$  和  $C_{AT}$ 。

式(5)即为微元缆的动态力学求解方程。传感器包的力学方程相对简单, 如下所示:

$$m \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -g(m - \rho V)\mathbf{k} + \frac{1}{2} \rho D L (C_{DN} |\mathbf{v}_{Nr}| \mathbf{v}_{Nr} + C_{DT} |\mathbf{v}_{Tr}| \mathbf{v}_{Tr}) + m_a \mathbf{a}_r + \rho V \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + T_u - T_d \quad (6)$$

式中:  $V$  为传感器包的排水体积;  $L$  为传感器包的长度;  $T_u$  和  $T_d$  分别为来自于上端和下端的拉力。

## 2.2 计算参数

电气承力缆型潜标主要部件的水动力参数如表 2 所示。对于所有线缆, 法向阻力系数  $C_{DN}$  设为 1.50, 切向阻力系数  $C_{DT}$  设为 0.01<sup>[6,8,16,18]</sup>; 由于长径比大于 9, 法向附加质量系数  $C_{AN}$  设为 1.00<sup>[16]</sup>; 轴向附加质量系数  $C_{AT}$  选取 Orcina<sup>[12]</sup> 中的推荐值。

表 2 主要部件的水动力参数  
Tab.2 Hydrodynamic parameters of main components

| 主要部件  | $C_{AN}$ | $C_{AT}$ | $C_{DN}$ | $C_{DT}$ |
|-------|----------|----------|----------|----------|
| 主浮球   | 0.50     | 0.50     | 0.50     | 0.50     |
| 主浮球缆  | 1.00     | 0.00     | 1.50     | 0.01     |
| 大传感器包 | 0.72     | 0.64     | 1.10     | 0.50     |
| 电气承力缆 | 1.00     | 0.00     | 1.50     | 0.01     |
| 小传感器包 | 1.00     | 0.76     | 1.30     | 0.66     |

不同于缆的规整外形, 由于传感器包结构的复杂性, 因此其水动力参数的确定相当困难。采用叠加法确定传感器包的阻力系数和附加质量系数。叠加法的原理是将一个复杂结构分解为几个简单结构, 通过半经验法得到每个简单结构的水动力, 原始复杂结构的水动力可以由每个简单结构的水动力叠加得到。Koolhof 等<sup>[19]</sup> 利用叠加法获取了一个管线支撑结构的附加质量系数。当各组件之间相互作用较弱、没有严重的困水现象时, 叠加法的预测精度较高, 否则会产生较大的预测误差。具体步骤如下: 确

定阻力系数时, 先计算特定速度下传感器包内部各部件的阻力并相加, 然后除以传感器包内部各部件的总挡流面积以得到阻力系数; 确定附加质量系数时, 先根据每个传感器包内部部件的长径比来确定每个附加质量系数, 计算所有部件的附加质量并相加, 然后除以总的排水质量得到总的附加质量系数。各内部构件的阻力系数和附加质量系数都参照文献[16]确定, 其中的轴向附加质量系数由文献[16]中方柱的附加质量系数乘以 0.87 获得<sup>[19]</sup>。该方法由于无法考虑组件之间的遮挡效应和困水现象, 可能会高估阻力系数和低估附加质量系数, 但由于传感器包内部组件之间间距较大, 总体上所获水动力参数的精度是可以接受的。

## 3 结果与讨论

本节中将应用 OrcaFlex<sup>[12]</sup> 讨论百年一遇海况下电气承力缆型潜标的受力情况。将普通承力缆型潜标中的三段电气承力缆用弹性缆置换后考察其力学响应变化, 以及不同长度不同位置的影响规律, 并最终给出最短的有效长度。在所有的分析中, 都假定波浪和水流方向相同。为了简化计算, 将谱峰周期  $T_p$  设定为合理范围的平均值, 即 16.55 s。缆的分段长度为 0.05~0.10 m, 时间步长为 0.03~0.10 s, 模拟时长为 10 800 s。

对比的参数包括平均拉力、最大动态拉力和最大拉力。平均拉力是海流及波浪漂移作用下的力, 最大动态拉力为动态响应拉力标准差的 4 倍, 最大拉力为平均拉力与最大动态拉力之和<sup>[8]</sup>。对比的点为所有缆的上下两端。

图 4—9 中图例的指代意义如下: “上”指的是图 1 中最上部一根电气承力缆用弹性缆置换, 也就是对应图 1 中的“第二段”, 依次“中”和“下”对应图 1 中的“第三段”和“第四段”; “A”和“B”指的是某根缆的上端和下端; “上 A”指的是图 1 中最上部一根电气承力缆用弹性缆置换后所有缆上端位置; “无”和“全”指的是无弹性缆和全弹性缆配置。图 4—9 中各点所表达的意义是在不同的弹性缆配置时所有缆两端力学响应的数值。

### 3.1 单根弹性缆配置

图 4—6 是使用单根弹性缆去置换无弹性缆配置中的某一根缆后潜标的平均拉力、最大动态拉力和最大拉力。

### 3.1.1 单根弹性缆下的平均拉力

图4为电气承力缆型潜标在海流加上波浪漂移作用下的平均拉力。从图4可以明显看出,弹性缆对本段缆的平均拉力有着良好的抑制作用。上部弹性缆配置可以做到第二段缆远低于无弹性缆配置,而第三、第四段缆的平均拉力稍高于无弹性缆配置。中部弹性缆配置可以做到第三段缆远低于无弹性缆

配置,而第二、第四段缆的平均拉力稍高于无弹性缆配置。下部弹性缆配置可以做到第四段缆远低于无弹性缆配置,而第二、第三段缆的平均拉力稍高于无弹性缆配置。弹性缆两端的平均拉力差距较大,达到0.5 kN左右,均为上端大于下端。从各配置的平均拉力指标来看,上部弹性缆配置最好,中部弹性缆配置次之,下部弹性缆配置最差。

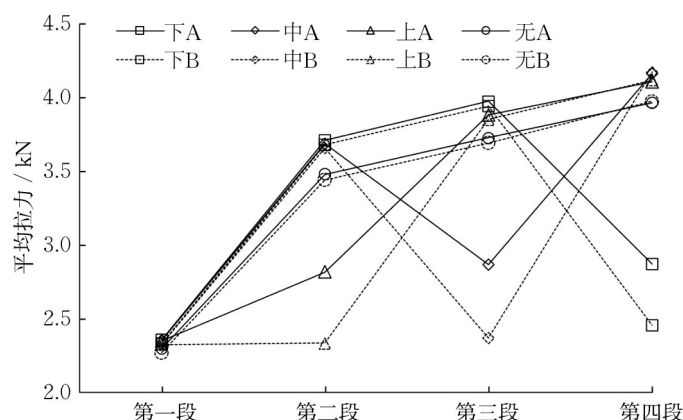


图4 单根弹性缆所处位置对平均拉力的影响

Fig.4 Effect of single snubber hose position on mean tension

### 3.1.2 单根弹性缆下的最大动态拉力

图5为电气承力缆型潜标在海流和波浪共同作用下的最大动态拉力。从图5可以看出,单根弹性缆配置时,最大动态拉力指标都不理想,数值上远超无弹性缆配置。单根弹性缆在最大动态拉力指标上体现的是增幅作用,上部弹性缆配置的增幅最小,中部弹性缆配置次之,而下部弹性缆配置增幅最大。在上部和中部的弹性缆配置时,都是本段弹性缆的上端最大动态拉力大于下端,这与平均拉力所展现的规律一致,但下部弹性缆配置时,下端的最大动态拉力大于上端。原因是:当上部弹性缆和中部弹性

缆配置时来自上方的动态拉力沿着缆向下传递,弹性缆上端的突变跟不上时产生大的冲击力,而下端由于弹性缆的存在使得加速度突变小于上端,所以上端的最大动态拉力更大;当下部弹性缆配置时,动态拉力的传递方向没变,所不同的是弹性缆的下端是海床基,海床基在模型中被假设为固定,无法顺应传递下来的动态拉力,导致最大动态拉力急剧增大,而平均拉力是低频载荷,所以在海床基处的平均拉力没有超过上端的平均拉力。

### 3.1.3 单根弹性缆下的最大拉力

图6为电气承力缆型潜标在海流和波浪共同作

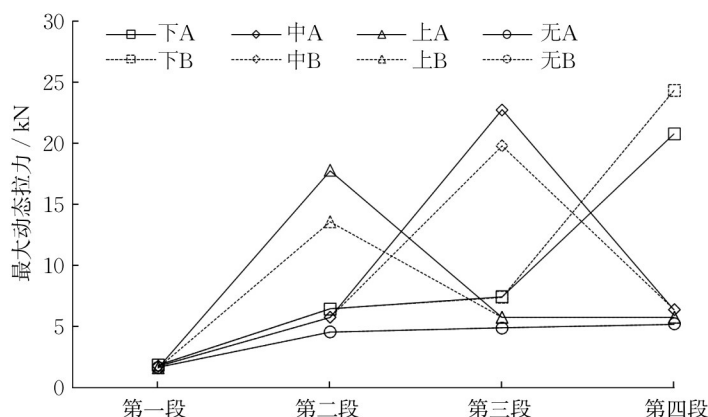


图5 单根弹性缆所处位置对最大动态拉力的影响

Fig.5 Effect of single snubber hose position on maximum dynamic tension

用下的最大拉力。

结合图4—6,在单根弹性缆配置时,对于平均拉力指标,弹性缆对所在段有较大的抑制作用,但对其余段有较小的增幅作用。对于最大动态拉力和最大拉力指标,弹性缆对所在段有较大的增幅作用,对其余段有较小的增幅作用。表3为单根弹性缆配置时相对无弹性缆配置时响应强度的增幅。对于关键的最大动态拉力和最大拉力指标,下部弹性缆配置的增幅可以达到334%和175%,完全没有体现出弹性缆对动态响应强度的抑制作用。

表3 单根弹性缆配置时相对无弹性缆配置时响应强度的增幅  
Tab.3 Response variation amplitude of single snubber hose configuration relative to no snubber hose configuration

| 弹性缆位置 | 各拉力响应强度增幅/% |        |      |
|-------|-------------|--------|------|
|       | 平均拉力        | 最大动态拉力 | 最大拉力 |
| 上部弹性缆 | -35         | 202    | 99   |
| 中部弹性缆 | -34         | 309    | 161  |
| 下部弹性缆 | -33         | 334    | 175  |

总体上讲,单根弹性缆配置的动态表现要远差于无弹性缆配置,而从配置类型来看,上部弹性缆配置相对最好,中部弹性缆配置次之,下部弹性缆配置最差。

### 3.2 多根弹性缆配置

从3.1节的结论来看,单根弹性缆非但没有抑制响应的作用,反倒会增加潜标的整体响应强度,所以本节探索多根弹性缆配置时的表现。

#### 3.2.1 多根弹性缆下的平均拉力

图7为多根弹性缆配置时电气承力缆型潜标在海流和波浪共同作用下的平均拉力。从图7可以明显看出,弹性缆对本段缆内部拥有良好的降低平均

拉力的作用。上中部弹性缆配置可以做到第二、第三段缆的平均拉力远低于无弹性缆配置,而第四段缆的平均拉力稍高于无弹性缆配置。上下部弹性缆配置可以做到第二、第四段缆的平均拉力远低于无弹性缆配置,而第三段缆的平均拉力稍高于无弹性缆配置。中下部弹性缆配置可以做到第三、第四段缆的平均拉力远低于无弹性缆配置,而第二段缆的平均拉力稍高于无弹性缆配置。全弹性缆配置时所有段的平均拉力都远低于无弹性缆配置时的平均拉力。

弹性缆两端平均拉力的差距较大,达到0.5 kN左右,均为上端大于下端。从各配置的平均拉力指标来看,全弹性缆配置最好,中下部弹性缆配置次之,上下部弹性缆配置更次之,上中部弹性缆配置最差。

#### 3.2.2 多根弹性缆下的最大动态拉力

图8为多弹性缆配置时电气承力缆型潜标在海流和波浪共同作用下的最大动态拉力。从图8可以看出,多根弹性缆配置时,最大动态拉力指标都非常理想,相较单根弹性缆配置时有大幅改善,比无弹性缆配置时亦有很大提升。

所有的多根弹性缆配置都对最大动态拉力指标有显著的抑制作用,抑制效果最强的是全弹性缆配置,中下部弹性缆配置次之,上下部弹性缆配置更次之,上中部弹性缆配置最差,但总体差距不大。上端的最大动态拉力要稍高于下端的最大动态拉力,原因和单根弹性缆配置时一致。多根弹性缆配置时最大动态拉力出现在第二段缆上,说明大传感器包所承受的水动力最大,导致潜标在良好的波浪顺应条件下依然出现较大的动力学响应。

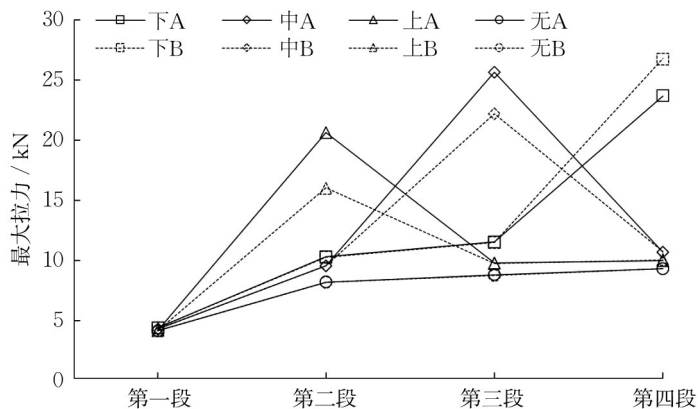


图6 单根弹性缆所处位置对最大拉力的影响

Fig.6 Effect of single snubber hose position on maximum total tension

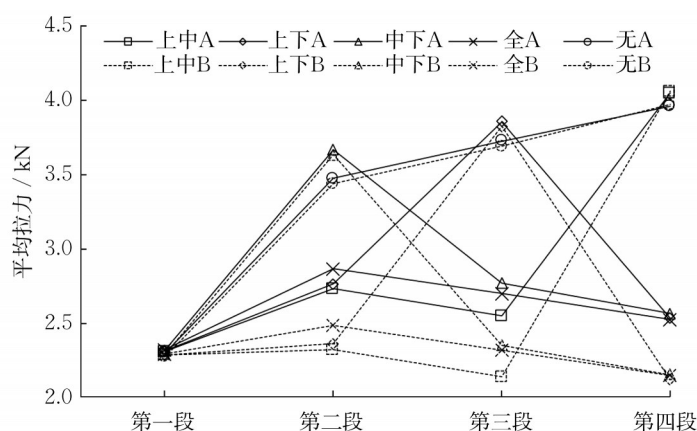


图7 多根弹性缆所处位置对平均拉力的影响

Fig.7 Effect of multi-snubber hose position on mean tension

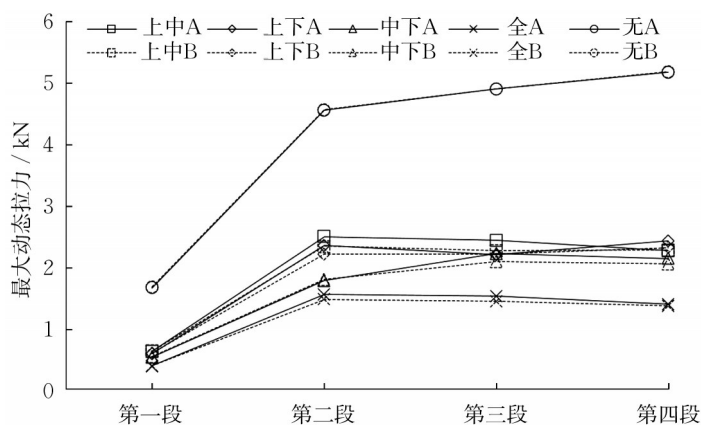


图8 多根弹性缆所处位置对最大动态拉力的影响

Fig.8 Effect of multi-snubber hose position on maximum dynamic tension

### 3.2.3 多根弹性缆下的最大拉力

图9为多根弹性缆配置时电气承力缆型潜标在海流和波浪共同作用下的最大拉力。从图9可以看出,多根弹性缆配置时,最大拉力指标都非常理想,与最大动态拉力类似,但由于平均拉力方面的差距,各个配置间的最大拉力差距较最大动态拉力指标更大。

所有的多根弹性缆配置都对最大拉力指标有显著的抑制作用,抑制效果最强的是全弹性缆配置,中下部弹性缆配置次之,上下部弹性缆配置更次之,上中部弹性缆配置最差。

结合图7—9,在多根弹性缆配置时,对于平均拉力指标,全弹性缆配置的抑制效果非常明显,上中部弹性缆配置时有较小的增幅作用,其余2种多弹性缆配置有小幅的抑制作用。对于最大动态拉力和最大拉力指标,多根弹性缆对潜标整体都有明显的抑制作用。表4为多根弹性缆配置时相对无弹性缆配置时响应强度的增幅。在关键的最大动态拉力和最

大拉力2项指标上,全弹性缆配置的降幅可以达到71%和54%,充分地体现了弹性缆对动态响应强度的抑制作用。

### 3.3 最短弹性缆长度

由3.2节的分析可知,全弹性缆配置时的动力学指标是最理想的,但潜标的静态漂移也最大,同时加大了布放回收的难度,因此弹性缆的长度选取原则应该是在动态响应强度得到有效抑制的前提下尽可能短。由于中下部弹性缆配置在2根弹性缆配置中是最优的,所以本节在下部弹性缆配置的基础上,从下部小传感器包上方开始以1 m为间隔递增弹性缆长度去置换原本的普通电气承力缆,并保持弹性缆与普通电气承力缆的长度之和为10 m。为了简化比对图形,比对的部位统一为潜标的根部,也就是无弹性缆配置时最大拉力峰值位置。

图10为最大拉力与弹性缆长度的关系。结合图10和表5可以看出,最大拉力随弹性缆长度的增加先增大后减小,峰值最大拉力出现在弹性缆总长

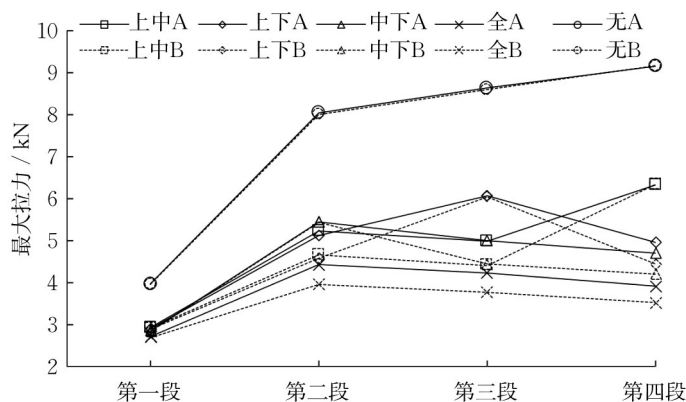


图 9 多根弹性缆所处位置对最大拉力的影响

Fig.9 Effect of multi-snubber hose position on maximum total tension

表 4 多根弹性缆配置时相对无弹性缆配置时响应强度的增幅

Tab.4 Response variation amplitude of multi-snubber hose configuration relative to no snubber hose configuration

| 弹性缆位置  | 各拉力响应强度增幅/% |        |      |
|--------|-------------|--------|------|
|        | 平均拉力        | 最大动态拉力 | 最大拉力 |
| 上中部弹性缆 | 2           | -53    | -31  |
| 上下部弹性缆 | -3          | -54    | -34  |
| 中下部弹性缆 | -8          | -58    | -41  |
| 全弹性缆   | -33         | -71    | -54  |

为 13 m 左右时,相对于无弹性缆配置时最大动态拉力和最大拉力增幅高达 620% 和 335%;当弹性缆总长达到 17~18 m 时 2 项拉力指标开始小于无弹性缆配置,19 m 时则非常趋近于全弹性缆配置时的最大拉力,相对于无弹性缆配置时的最大动态拉力和最大拉力降幅达到 57% 和 52%,非常接近 20 m 时 60% 和 54% 的指标,所以电气承力缆型潜标的弹性缆最短有效总长度为 19 m。

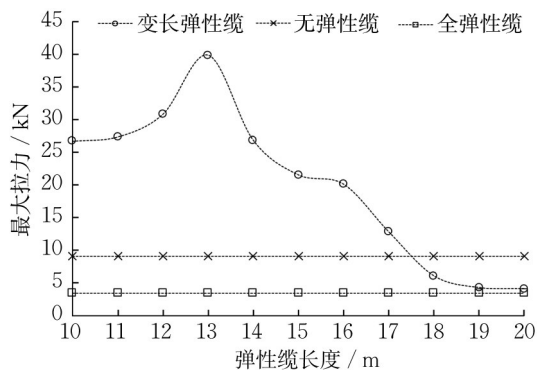


图 10 最大拉力与弹性缆长度的关系

Fig.10 Relationship between maximum total tension and snubber hose length

表 5 不同弹性缆长度对无弹性缆配置在第四段缆根部处响应强度增幅

Tab.5 Response variation amplitude of snubber hose length relative to no snubber hose configuration at the root of the fourth cable

| 弹性缆长度/m | 各拉力响应强度增幅/% |      |
|---------|-------------|------|
|         | 最大动态拉力      | 最大拉力 |
| 11      | 381         | 199  |
| 13      | 620         | 335  |
| 14      | 372         | 193  |
| 17      | 106         | 41   |
| 18      | -23         | -33  |
| 19      | -57         | -52  |
| 20      | -60         | -54  |

## 4 结论

(1)弹性缆对抑制电气承力缆型潜标的平均拉力、最大动态拉力和最大拉力是有效的,相较无弹性缆配置的电气承力缆型潜标可大幅降低各项动态响应指标。当全部采用弹性缆配置时,对最大动态拉力和最大拉力的抑制效果可达 71% 和 54% 以上。

(2)弹性缆长度不足会导致最大动态拉力和最大拉力的大幅增加,当弹性缆长度在 13 m 左右时,可以使得原无弹性缆配置下潜标根部处的最大动态拉力和最大拉力分别增加 620% 和 335%,极易导致断缆事故的发生。

(3)潜标配置中弹性缆长度足够时,弹性缆应优先从锚位置向上配置。潜标配置中弹性缆长度不足时,弹性缆加装在潜标的上部可以更好地降低动态响应。

(4)本研究中电气承力缆型潜标的最短弹性缆有效长度是 19 m,使得原无弹性缆配置时潜标根部处的最大动态拉力和最大拉力分别下降 57% 和 52%。

## 作者贡献声明:

吴正伟:思路与构思提出,方法设计,数据整理与可视化,撰写初稿。

阎耀保:论文撰写指导,初稿的审阅与修改。

## 参考文献:

- [1] Committee on Seafloor Observatories: Challenges and Opportunities, Ocean Studies Board, National Research Council. Illuminating the hidden planet: the future of seafloor observatory science[M]. Washington DC: National Academies Press, 2000.
- [2] DETRICK R, FRYE D, COLLINS J, *et al.* DEOS moored buoy observatory design study[R]. Woods Hole: Woods Hole Oceanographic Institution, 2000.
- [3] Moorings [DB/OL]. [2021-11-25]. <https://oceanobservatories.org/marine-technologies/moorings/>.
- [4] 张少伟, 杨文才, 辛永智, 等. 浮标基海洋观测系统研究进展[J]. 科学通报, 2019, 64: 2963.  
ZHANG Shaowei, YANG Wencai, XIN Yongzhi, *et al.* Research progress of a mooring buoy system for sea surface and seafloor observation[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64: 2963.
- [5] PAUL W, BENTLEY D, CHAFFEY M, *et al.* Electrical and electro-optical mooring links for buoy based ocean observatories[C]// 2003 International Conference Physics and Control. Tokyo: IEEE, 2003: 201-206.
- [6] HAN S M, GROSENBAUGH M A. On the design of single-point cable-linked moorings for ocean observatories[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(3): 585.
- [7] PAUL W, BENTLEY D. Conductor survival in lightweight upper ocean working cables [C]// Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE). Stavanger: OnePetro, 2001: 708-714.
- [8] GROSENBAUGH M A, PAUL W, FRYE D, *et al.* Development of synthetic fiber-reinforced electro-optical-mechanical cables for use with moored buoy observatories[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(3): 574.
- [9] PAUL W, CHAFFEY M, HAMILTON A, *et al.* The use of snubbers as strain limiters in ocean moorings[C]// Proceedings of Oceans, 2005 MTS/IEEE. Washington DC: IEEE, 2005: 2722-2729.
- [10] FULLERTON B, SWIFT M R, BODUCH S, *et al.* Design and analysis of an automated feed-buoy for submerged cages [J]. Aquacultural Engineering, 2004, 32(1): 95.
- [11] Petroleum and natural gas industries, specific requirements for offshore structures, Part 1, metocean design and operating considerations: ISO 19901-1 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.
- [12] Orcina Ltd. OrcaFlex manual (version 10.0e) [M]. Ulverston: Orcina Ltd., 2016.
- [13] 全国海洋标准化技术委员会. 大型海洋环境监测浮标[S]. 北京: 国家海洋局, 2011.  
China National Technical Committee of Standardization for Ocean. Large mooring buoy system for ocean observing [S]. Beijing: State Oceanic Administration, 2011.
- [14] 竺艳蓉, 谢峻, 龚佩华. 各种波浪谱在海洋工程中适用性的研究[J]. 海洋学报, 1995, 17(6): 126.  
ZHU Yanrong, XIE Jun, GONG Peihua. Study on applicability of various wave spectra in ocean engineering [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1995, 17(6): 126.
- [15] 朱绍华, 于文太, 李广帅, 等. 基于双峰海浪谱的风浪和涌浪分离应用研究[J]. 中国造船, 2017, 58(4): 160.  
ZHU Shaohua, YU Wentai, LI Guangshuai, *et al.* Separation of wind wave and swell based on double peak spectrum [J]. Shipbuilding of China, 2017, 58(4): 160.
- [16] VERITAS D N. Environmental conditions and environmental loads: DNV-RP-C205 [S]. Høvik: Det Norske Veritas, 2010.
- [17] HE H, SONG J, BAI Y, *et al.* Climate and extrema of ocean waves in the East China Sea [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(7): 980.
- [18] BERTEAUX H O. Buoy engineering [M]. New York: Wiley, 1976.
- [19] KOOLHOF W I, CHAI S, MORAND H. Numerical study of the hydrodynamic properties of a mid-water arch [C]// The Twenty-Second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes: OnePetro, 2012: 199-205.