doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2021.12.007

全海深 ROV 非金属铠装脐带缆动力学性能研究 $^{\circ}$

王海龙②*** 张奇峰*** 全伟才*** 崔雨晨**** 闫兴亚***

(*中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)(**中国科学院机器人与智能制造创新研究院 沈阳 110169)

(***湖南科技大学海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室 湘潭 411201)

(**** 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 为了全面评估全海深无人遥控潜水器(ROV)在不同模式配置、不同作业深度及 工况下的脐带缆受力状态,提高脐带缆在全海深 ROV 系统应用的安全性和可靠性,开展 了全海深 ROV 非金属铠装脐带缆动态力学理论分析与研究。针对铠缆系统水下运动具 有小应变和大位移的几何特点,基于几何精确梁理论和虚功原理建立全海深非金属铠装 脐带缆三维非线性有限元模型,基于所建立的动力学模型并结合工作母船升沉与海流联 合激励,对脐带缆在全海深应用环境下扭转特性、在位运行等动态力学特性进行分析和研 究。实验结果得出 5000 m 左右潜深为该全海深脐带缆系统的共振区域。研究结果可为 全海深 ROV 非金属铠装脐带缆的安全应用及配套绞车优化设计提供理论依据。 关键词 全海深遥控潜水器(ROV);非金属铠装脐带缆;动态特性;共振区域

0 引言

遥控潜水器(remotely operated vehicle, ROV)是 一种有缆遥控无人潜水器,通过脐带缆传输动力和 信号,因其具有强大的水下作业能力,已成为海洋科 学研究、海洋探查和资源开发等不可或缺的手 段^[1-3]。随着海洋装备研制能力和配套水平的提 高,当前我国正在建设覆盖全海深的海洋探测作业 体系,而全海深 ROV 是该体系的重要组成部分^[4]。

目前,制约全海深 ROV 发展的首要瓶颈问题就 是脐带缆,由于传统的 ROV 采用金属铠装脐带缆, 因受强度/重量比限制,其最大使用深度很难突破 6000 m,更大深度的脐带缆的研制仍是一项国际技 术难题。

世界海洋最深处是太平洋上的马里亚纳海沟,

最深处达到 11 034 m。由于受技术手段的限制,人 类对该区域的研究甚少,目前仅日本和美国研制了 相关无人潜水器开展了少量科学研究。其中,日本 研制的最大工作深度 11 000 m"海沟"号 ROV 是国 际上首套也是唯一一套全海深 ROV。该 ROV 系统 采用中继器模式,母船与中继器之间通过主缆连接, 中继器与 ROV 之间通过次缆连接。而且仅有日本 藤仓株式会社生产的非金属铠装脐带缆最大工作深 度可达 11 000 m,并成功应用于日本海洋科技中心 研制的"海沟"号 ROV。遗憾的是,2003 年 6 月 29 日,"海沟"号 ROV 在太平洋海域海底调查作业时 由于次缆断裂导致丢失^[58]。

根据我国深海科学技术发展战略规划,在国家 重点研发计划支持下,中天科技海缆有限公司联合 上海交通大学和沈阳自动化研究所等共同开展全海 深 ROV 非金属铠装脐带缆关键技术研究和试验,研

① 国家重点研发计划(2017YFC03056)资助项目。

② 男,1988年生,博士,副研究员;研究方向:深海 ROV 技术,新概念水下推进技术;联系人,E-mail: wanghailong@sia.cn。 (收稿日期:2020-11-10)

制全海深 ROV 非金属铠装脐带缆试验样品,完成光 学、电气、动态力学、动力及信号传输等分析和试验, 填补全海深 ROV 非金属铠装脐带缆设计、制造、分 析和测试技术空白。

目前,针对水下系泊系统、拖曳系统和 ROV 铠 缆系统等水下缆索动力学建模主要有 3 种方法,即 有限差分法、高阶有限元法和集中质量法。集中质 量法忽略了节点间弯曲和扭转,仅考虑弹性因素的 影响,属于低阶有限元法;有限差分法不适合处理低 张力缆索问题,因为该算法在零张力时会出现数值 奇点;高阶有限元法具有完整的物理意义和理论基 础,能够很好地模拟缆索低张力动态特性^[9-11]。

为了全面评估全海深 ROV 非金属铠装脐带缆 动力学性能,提高脐带缆在全海深 ROV 系统应用的 安全性和可靠性,本文针对不同海况,结合母船升沉 运动状态,建立全海深 ROV 非金属铠装脐带缆三维 非线性动态力学模型,并对其在全海深应用环境下 的扭转特性、在位运动等动态力学特性进行分析和 研究,为全海深非金属铠装脐带缆的研制和安全使 用提供理论支撑。

1 全海深脐带缆结构组成

根据全海深 ROV 系统的设计需求,动力单元和 控制单元供电相对独立,同时参照日本"海沟"号主 缆结构形式,全海深脐带缆总体结构采用 3 芯动力 单元和 2 芯控制单元共计 5 芯结构,动力单元工作 交流电压 4160 V,末端输出功率不小于 45 kW;控制 单元工作交流电压 3000 V,末端输出功率 3 ~ 5 kW, 结构示意图如图1所示。脐带缆外径42 mm,空气



图 1 全海深 ROV 非金属铠装脐带缆结构示意图

中重量 1.6 kg/m,水中重量 0.5 kg/m,最小断裂强 度 400 kN,安全工作载荷 66 kN,最小弯曲半径 700 mm,最大使用水深 11 000 m。

2 脐带缆动力学建模

2.1 脐带缆动力学建模





以上三坐标系基矢量间满足如下关系:
$$e_i(s) = \Re_0(s)E_i, t_i(t, s) = \Re(t, s)e_i(s)$$

 $i = 1, 2, 3$ (1)

式中,t代表时间,s为参考弧长, \mathfrak{R}_0 与 \mathfrak{R} 是正交张 量算子,满足 $\mathfrak{R}\mathfrak{R}^{\mathrm{T}} = I_0$ 其中 \mathfrak{R}_0 为初始转动张量算 子,表征从固定空间坐标系 { e_i }到材料坐标系 { E_i }的转换关系; \mathfrak{R} 为当前转动张量算子,表征从 材料坐标系 { E_i }到运动坐标系 { t_i }的转换关系。

$$\Re = \mathbf{I} + \frac{\sin\psi}{\psi} \, \tilde{\boldsymbol{\Psi}} + \frac{1 - \cos\psi}{\psi^2} \, \tilde{\boldsymbol{\Psi}}^2 \tag{2}$$

式中 $\psi = \|\Psi\|$,即是脐带缆截面总转动矢量 Ψ 的 长度, $\tilde{\Psi} = \Psi \times$ 为矢量 Ψ 对应的反对称张量。脐 带缆内任意材料点的运动学关系为

$$\mathbf{x}(t, s) = \mathbf{x}_{c}(t, s) + X_{2}\mathbf{t}_{2}(t, s) + X_{3}\mathbf{t}_{3}(t, s)$$
$$= \mathbf{x}_{c}(t, s) + \mathbf{R}\mathbf{E}$$
(3)

式中, $E = X_2 E_2 + X_3 E_3$, $x_e(t, s)$ 是空间坐标系下的 脐带缆中轴线位置矢量, 其对应的空间虚位移为

$$\delta \boldsymbol{x} = \delta \boldsymbol{x}_{c} + \boldsymbol{R} \delta \boldsymbol{\Theta} \cdot \boldsymbol{E}$$
(4)

式中 Ø称为转动矢量增量。对式(3)求二阶导数, 可得:

$$\ddot{\boldsymbol{x}} = \ddot{\boldsymbol{x}}_c + \boldsymbol{R}\widetilde{\boldsymbol{\Omega}}\widetilde{\boldsymbol{\Omega}}\boldsymbol{E} + \boldsymbol{R}\widetilde{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{E}$$
(5)

其中, $\tilde{\boldsymbol{\Omega}} = \boldsymbol{R}^{\mathrm{T}} \dot{\boldsymbol{R}}, \tilde{\boldsymbol{A}} = \tilde{\boldsymbol{\Omega}}, \boldsymbol{\Omega}$ 为材料角速度矢量, \boldsymbol{A} 为材料角加速度矢量。

将 Reissner-Timoshenko 运动学关系代入连续介质力学的线动量与角动量方程,应用分析力学范畴的虚功原理,得到脐带缆的非线性连续运动方程的等效弱形式,为后续的有限元模型的建立提供基础条件^[12-13]。虚功原理可表述为

$$G(q, \dot{q}, \ddot{q}, \delta q) = G_{ext}(q; \delta q) - G_{int}(q; \delta q) - G_{acc}(q, \dot{q}, \ddot{q}; \delta q) = 0$$
(6)
式中, $q = (d, \psi)$ 为广义位置, G_{ext} 为外力作用虚功
项, G_{int} 为内力作用虚功项, G_{acc} 为惯性力作用虚功

2.2 弱形式的完全拉格朗日列式

项。

全海深 ROV 非金属铠装脐带缆动力学方程的 弱形式为高度非线性方程,很难得出直接的数学解 析解,通常采用迭代校正的方法,来逐步逼近真实 解,因此必须对完全拉格朗日列式进行线性化。通 过对式(6)求导,可得整个虚功项的线性部分:

 $lin(G) = G_0 + D_q G_0 \cdot \Delta q + D_q G_0 \cdot \Delta \dot{q}$ (7) 式中,下标0表示在 $t = t_0$ 时刻的状态量,等号右边 第1项为给定状态下的残值,等号右边第2、3项为 相对于给定状态的线性增量。

2.3 完全拉格朗日列式的线性化

本节对弱形式的线性化表述采用有限单元进行 离散,采用 n_e = 2 节点线性插值等参单元,对广义位 移矢量进行离散,得到:

$$\boldsymbol{\Psi} \approx \boldsymbol{\Psi}^{h} = \sum_{I=1}^{n_{e}} N_{I} \boldsymbol{\Psi}_{I}; \boldsymbol{d} \approx \boldsymbol{d}^{h} = \sum_{I=1}^{n_{e}} N_{I} \boldsymbol{d}_{I}$$
$$\boldsymbol{x}_{c} \approx \boldsymbol{x}^{h} = \sum_{I=1}^{n_{e}} N_{I}(\boldsymbol{\xi}) \boldsymbol{x}_{cI}; \boldsymbol{x}_{c}^{'} \approx \boldsymbol{x}_{c}^{'h} = \sum_{I=1}^{n_{e}} N_{I}^{'}(\boldsymbol{\xi}) \boldsymbol{x}_{cI}$$
(8)

弱形式
$$G(\delta q, q, \dot{q}, \ddot{q})$$
 线性主部为
 $lin(G_e^h) = G_{e,0}^h + D_q G_{e,0}^h \cdot \Delta q + D_{\dot{q}} G_{e,0}^h \cdot \Delta \dot{q}$
(9)

由式(7)可得对应的单元有限元方程为

$$\boldsymbol{R}_{e} + \boldsymbol{K}_{e} \Delta \boldsymbol{q}_{e} - \boldsymbol{C}_{e} \Delta \dot{\boldsymbol{q}}_{e} = \boldsymbol{M}_{e} \ddot{\boldsymbol{q}}_{e} \qquad (10)$$

进而由单元有限元方程进行组装,方法与线性 有限元中的组装方法是一样的,组装后得到的总体 有限元方程,也即运动方程,记为

$$\overline{R} + \overline{K}\Delta q - \overline{C}\Delta \dot{q} = \overline{M}\ddot{q}$$
 (11)
其中, \overline{R} 是总体残余力列阵, \overline{K} 为总体刚度矩阵, \overline{M}
为总体质量矩阵,上面加横线"-"表示在给定状态
点 q_0 处的值, Δq 为总体位移增量列阵, \ddot{q} 为总体加
速度列阵。

3 全海深脐带缆动力学性能分析

ROV 的作业环境较为复杂,影响其安全使用的 因素较多,特别是恶劣海况下,脐带缆内部会出现高 低张力波动的情况,可能达到缆索的破断强度,从而 导致其断裂。ROV 在布放过程中,铠缆刚度也会随 着 ROV 下潜深度的增加逐渐降低,当脐带缆的固有 频率逐渐进入母船升沉频率范围之内,将引发共振, 影响 ROV 收放的安全。

影响水下脐带缆安全工作的因素较多,主要包括:(1)支持母船的升沉运动;(2)铠缆自身参数变化;(3)海流流速变化等。由于各影响因素之间存在相互耦合,综合分析将很难发现影响规律,因此本 文对单个因素影响规律进行研究,在此基础上,开展 多因素耦合影响。

3.1 全海深脐带缆系统参数描述

全海深脐带缆截面材料基矢量 *E*₁、*E*₂ 与惯性主轴平行,根据材料力学知识可得^[14-16]:

$$I_3 = I_2 = \frac{1}{2}I_\rho = \frac{\pi D^4}{64}$$
(12)

式中, I_1 、 I_2 为截面的惯性矩, I_a 为极惯性矩。

— 1295 —

假设全海深脐带缆模型截面各向是同性的,则 弹性模量与剪切模量之间的关系为

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \tag{13}$$

其中,泊松比 $\mu = 0.1$,其为脐带缆横向变形的弹性 常数;将剪切模量 G 结合截面面积 A 与截面惯性矩 I_{ρ} 就可分别得到剪切刚度 GA 与扭转强度 GI_{ρ} 。脐带 缆界面的惯性张量分量可表示为

$$J = \rho_0 \begin{bmatrix} I_{\rho} & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} = \rho_0 \begin{bmatrix} \frac{\pi D^4}{32} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\pi D^4}{64} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\pi D^4}{64} \end{bmatrix}$$
(14)

式中,参数D表示脐带缆截面直径。

若假设脐带缆材料模型是线弹性关系,则弹性 张力用分量形式表示的矩阵为

$$\begin{cases} C_n = \operatorname{diag}(\boldsymbol{E}\boldsymbol{A}, \, \boldsymbol{G}\boldsymbol{A}_2, \, \boldsymbol{G}\boldsymbol{A}_3) \\ C_m = \operatorname{diag}(\boldsymbol{G}\boldsymbol{I}_n, \, \boldsymbol{E}\boldsymbol{I}_2, \, \boldsymbol{E}\boldsymbol{I}_3) \end{cases}$$
(15)

式中截面面积关系为

$$A = A_2 = A_3 = \frac{\pi D^2}{4}$$
(16)

由式(12)~式(15),全海深 ROV 非金属铠装 脐带缆系统主要参数如表1 所示。

符号	名称	参数值
EA	轴向刚度	4.32×10^7 N
GA	剪切刚度	1.40×10^7 N
EJ	弯曲刚度	1.56×10^3 Nm ²
GJ	扭转刚度	$1.63 \times 10^3 \text{ Nm}^2$
D	缆索直径	0.040 m
$m_{ m c}$	缆索单位长度空气中重量	1.600 kg/m
$M_{ m c}$	缆索单位长度水中重量	0.500 kg/m
$C_{\rm D1}$	切向水阻系数	0.02
C_{D2}	法向水阻系数	2
$C_{\rm D3}$	副法向水阻系数	2
C_m	附加质量系数	1.5

表1 全海深脐带缆主要机械性能参数

3.2 脐带缆动力学建模方法验证

为了验证所建立脐带缆动力学模型的正确性,

结合加拿大深海 ROV 系统 ROPOS 进行实测数据验证。ROPOS 是带有中继器的 ROV 系统,最大潜深 5000 m,空气中重 26 700 N,尺寸为 2.6 m×1.45 m×1.7 m。连接中继器与 ROV 的是一段长约 300 m的系缆,ROV 在回收时可以停靠在笼式中继器内。

以实测母船运动位移、速度和加速度数据为输入,计算脐带缆末端的中继器的位移、速度和加速度,并与实测的中继器运动数据进行对比,以此验证本文所建立的脐带缆模型、相应的算法和自编有限元程序的正确性。由图3可知,计算值与实测值在100s内的时段内有相当好的吻合,初步验证了所建立脐带缆动力学模型的正确性。



图 3 有限元程序计算结果与实测数据的对比曲线

3.3 无母船升沉和无海流时的静态分析

为了获得全海深脐带缆系统动态力学性能分析 的初始值,有必要对脐带缆系统进行静态分析。静 态分析问题是分析在静态力和力偶作用下脐带缆的 响应,与时间无关。脐带缆静态分析时的假设条件 是母船静止,即母船升沉的位移、速度与加速度均为 零,脐带缆由初始无拉伸状态释放,在外力作用下最 终到达平衡状态。

在海平面上某点建立固定的空间坐标系 Oxyz, 对应的空间基矢量分别为 e_1 、 e_2 、 e_3 ,材料坐标系 OXYZ与空间坐标系重合,对应的基矢量分别为 E_1 、 E_2 、 E_3 。分析深度分别取 2000、4000、6000、8000 和 10 000 m,水下铠缆初始位于 X 轴上,初始缆索单元 长度均为 10 m,采用 2 节点线性等参插值。仿真获 得脐带缆三维空间位置和形状如图 4 和图 5 所示。

— 1296 —



图 5 静态条件下水下脐带缆的位置和形状

为了初步验证所建立有限元模型的正确性,下 面给出静态条件下水下缆索的静态伸长量。若设浸 没于水下的缆索长度 *L* = 2000 m,已知缆索的轴向 刚度 *EA* = 4.32 × 107 N,则整个缆索的弹性刚度 *k* = *EA*/*L*(N/m)。水下缆索力的平衡方程为

$$k\Delta d = F_{\rm G} - F_{\rm B} \tag{17}$$

式中, $F_{\rm G}$ 表示水下缆索与 ROV 的有效总重力, $F_{\rm B}$ 表示水下缆索与 ROV 的有效总浮力,分别表示为

$$\begin{cases} F_{\rm G} = g\left(m_{\rm ROV} + \frac{1}{2}\overline{m}L\right) \\ F_{\rm B} = \rho_{\rm w}g\left(V_{\rm ROV} + \frac{1}{2}AL\right) \end{cases}$$

图 6 是经有限元程序求解出的缆索末端 4 个节 点的位移值。由图可知缆索最末端节点的位移为 0.240 637,与理论解析解 0.240 74 非常接近,说明 了有限元程序静态条件下分析的正确性。其他深度 静态分析结果及与解析解的对比结果如表 2 所示。

由图7可知,静态条件下水下缆索各节点的位

节点:		位移:	
198	0.240424E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
199	0.240467E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
200	0.240640E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
201	0.240637E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

图 6 有限元程序输出的缆索末端 4 个节点的位移分量

表 2 有限元程序输出的缆索末端 4 个节点的位移分量

静态分析深度/m	数值解/m	解析解/m
2000	0.240637	0.24074
4000	0.935 017	0.935 19
6000	2.083 440	2.083 33
8000	3.684 940	3.68519
10 000	5.741 300	5.74074

移与对应的节点间的关系并不符合线性关系,由于 缆索首端承受的重量最大而末端承受的重量最小, 缆索上面越靠后的节点变形越小,对应着图上各曲 线逐渐变小的斜率变化。由于缆索节点变形量是逐 节点积累的,因此缆索末端的节点位移是最大的。





3.4 无母船升沉和有恒定海流时的静态分析

海流对水下脐带缆系统的安全工作性能会产生 不可忽视的影响。为获得海流对水下脐带缆的影 响,将海流进行一定的简化,假定海流恒定,且从海 面到海底逐渐减小,海底处为零。分析在不同深度 和不同海流流速下的水下脐带缆的稳态构型。分析 深度分别为4000、6000、8000 和10000 m,在每个深 度下的海流流速分别取为0.1、0.3、0.5 和0.7 m/s。 图 8 所示为下潜深度1000 m、海流速度 0.1 m/s 时, — 1297 — 脐带缆水下构型随时间的变化规律。由图可知,仿 真初始阶段,脐带缆中上部(1000 m 深度)沿着海流 方向发生水平偏移,末端位移较小;随着时间的推 移,脐带缆末端位移逐渐增大,缆构型逐渐趋近稳定 状态;当仿真时间达到1000 s 时,基本达到稳定状 态;此时缆末端的竖直偏移量为10 m,水平位移约



图 8 铠缆水下构型随时间变化曲线(深度 1000 m、海流速 度 0.1 m/s 时)

为52m。与金属铠装脐带缆相比偏移量增大非常显著,可见海流对全海深ROV非金属铠装脐带缆系统有较大影响。

下潜深度 4000 m 时脐带缆在不同海流影响下 的稳态构型如图 9(a)所示。当海流 v₀ = 0.1 m/s 时 脐带缆末端的水平偏移只有 52 m,竖直偏移量为 3 m; v₀ = 0.3 m/s 时脐带缆末端的水平位移为 141 m; v₀ = 0.5 m/s 时脐带缆末端的水平位移为 264 m;当 v₀ = 0.7 m/s 时脐带缆末端的水平位移达到了 384 m。到了 6000 m 深度时,脐带缆末端的水平偏移 量大于 4000 m 时的情形,而 8000 m 时相同海流作 用下铠缆末端水平偏移量大于 6000 m 情形,而 10 000 m时相同海流作用下铠缆末端水平偏移量又 要大于 8000 m 情形,如图 9(b)、9(c)和9(d)所示。 其主要原因是水下脐带缆的重量会随着深度增加而 增加,而海流对缆索作用力的增加幅度明显要大于 脐带缆重量的增加幅度,所以铠缆的水平偏移量会 随着深度的增加而增大。



图 9 铠缆水下构型随时间变化曲线

脐带缆在稳态海流和无母船升沉条件下的稳态 分析是与时间无关的平衡问题,由于假设海流恒定, 作用时间无限长,由此得出的脐带缆末端偏移量与 实际动态结果相差较大,因而仅具有理论上的参考 意义。

3.5 母船升沉激励时铠缆系统动态特性

前节对水下脐带缆系统进行了静态分析,得到 的稳态平衡值可作为动态分析的初始值,包括水下 缆索的初始长度和初始节点位移等。水下脐带缆是 一个随时间不断变化的动态系统,受诸多内部和外 部因素的影响,其动态特性非常复杂。本节分析全 海深脐带缆在母船升沉激励下的动态响应。全海深 脐带缆动态特性主要包括铠缆内部张力及铠缆两端 的位移、速度及加速度随着时间的动态变化情况。

设母船仅做升沉运动,幅值为1m,周期为8s, 忽略母船在海上的水平位移与转动。将母船的升沉 位移、速度与加速度作为运动边界条件施加在缆索 的首单元节点上。深度分别为1000、2000、4000、 6000、8000、10000m。运行有限元程序,得到在四 级海况下正弦母船升沉激励不同深度下的脐带缆动 态响应,其中4000、6000和10000m仿真结果如 图10、图11和图12所示。

由图 11 可知,当下潜深度大于 4000 m 后,随着 深度增加运动相位滞后逐渐增加,但 ROV 升沉运动

幅值的放大幅度呈逐渐减小趋势。由图 12 可以看出,当释放深度达到 10 000 m时,ROV 的升沉运动幅度已经减小到与母船基本一致;铠缆首端的张力随着释放深度持续增加,当 ROV 下潜到 10 000 m最大潜深时,铠缆的最大张力均值为 49.2 kN,最大张力约为 57.9 kN,均小于铠缆的安全工作载荷 66 kN;因此在给定的母船升沉运动条件下,全海深 ROV 非金属铠装脐带缆可以满足安全使用要求。

母船的正弦升沉激励通过脐带缆传递给 ROV, 使得 ROV 也做上下升沉运动。在水下的某段深度 范围内,ROV 的振动幅度会被放大到最大,同时铠 缆张力波动幅值也增至最大,这样的深度范围为脐 带缆的共振区域,确定该区域对于深海 ROV 系统的 安全工作是至关重要的。本节的主要目的是通过正 弦激励时水下铠缆系统动态特性的分析,识别出在 该激励条件下整个系统的共振区域,从而为制定避 开共振区域的措施提供参考。

与母船升沉运动相比,不同潜深下 ROV 升沉运 动的滞后时间与升沉幅度放大比例如图 13 和图 14 所示。由图 10 可知,在 1000 m 潜深时 ROV 的平均



图 10 正弦升沉激励时母船与 ROV 升沉对比及铠缆首端张力波动(4000 m)





图 12 正弦升沉激励时母船与 ROV 升沉对比及铠缆首端张力波动(10 000 m)

— 1300 —



图 14 正弦激励时不同潜深的铠缆首末两端张力均值与最值

滞后时间接近于零,说明该情形时 ROV 与母船的运 动几乎是同步的,随着深度的增加,ROV 的平均滞 后时间逐渐增加,5000 m时平均滞后时间约为1.4 s, 到 11 000 m 时 ROV 的平均滞后时间约为 3.1 s。从 图 10~图 12 中还可以看出,在4000 m 以下潜深时, ROV 的最大滞后时间要小于1s;而从4000~6000 m 深度范围内, ROV 的最大滞后时间则在1~2s内变 化。同时,ROV的升沉运动与母船升沉运动幅值之 比从 1000 m 开始逐渐大于 1。在 1000~5000 m 的 深度范围内, ROV 的平均放大倍数一直是递增的, 从 5000 m 后开始递减,到 10 000 m 时 ROV 运动幅 值几乎跟母船相同,从10000m开始,放大倍数小于 1。这一变化趋势也说明了水下铠缆系统在 5000 m 左右的深度发生了幅值较大的共振现象,当远离这 一共振深度范围时,ROV的升沉幅值会明显降低。 尽管 ROV 升沉幅值在水下是放大的,但并不是无限 放大的,在1000~10 000 m 深度范围内, ROV 升沉 运动的放大倍数始终在1~1.5单位之间变化,而超 过10000m后幅值放大效应基本消失。

不同潜深下铠缆顶端张力围绕着张力均值上下

波动,而顶端张力均值应等于实际的静态张力,它是 水下铠缆重量与 ROV 重量的总和。铠缆顶端张力 均值随着潜深的增加而线性增加,1000 m 时铠缆顶 端张力均值均为4.8 kN,而到11000 m 时均值已达 到了54.1 kN,是1000 m 时的11倍多,如图13所示。 顶端张力在11000 m 深度达到了最大,约为61.8 kN, 极为接近该铠缆的最大安全工作载荷(66 kN),因 此在该海况下工作需要有可靠的安全保障,如增加 升沉补偿系统等。而铠缆低端张力最值均相差不 大,由于铠缆底端仅与 ROV 相连,因此铠缆底端张 力均值非常接近 ROV 的水中重量,均值曲线基本呈 水平状。

如图 15 所示,顶端张力标准差与底端张力标准 差均在 5000 m 深度时达到峰值,说明此处的张力波 动幅度最大,原因正如前面所述——在 5000 m 左右 深度范围整个水下铠缆系统发生了幅度最大的共振 现象,因此在实际工作时深海 ROV 系统应快速穿过 5000 m 左右深度的共振区域,避免由共振所带来的 损坏。



4 结论

本文基于几何精确梁理论,建立了三维非线性 脐带缆的有限元模型,基于该模型对全海深 ROV 非 金属铠装脐带缆动力学性能进行了分析,得到以下 结论。

(1) ROV 下潜到 10 000 m 潜深时, 脐带缆的最 大张力均值为 49.2 kN, 最大张力约为 57.9 kN, 均 小于缆的安全工作载荷 66 kN。全海深脐带缆的设 计满足要求。

(2)5000 m 左右潜深为全海深 ROV 非金属铠 — 1301 — 装脐带缆系统的共振区域,实际应用时应尽快穿过 该区域,避免共振带来的系统损坏。

(3)海流的作用对脐带缆空间动态形状的影响 至关重要,但不影响水下脐带缆系统的共振放大区 域的产生。

参考文献

- [1] 封锡盛,李一平,徐红丽.下一代海洋机器人——写在人类创造下潜深度世界纪录 10 912 m 50 周年之际
 [J].机器人, 2011, 33(1): 113-118
- [2] Inoue T, Katsui T, Murakami H, et al. Crawler system for deep sea ROVs[J]. Marine Technology Society Journal, 2009, 43(5): 97-104
- [3] Yoshida H, Aoki T, Osawa H, et al. A deepest depth ROV for sediment sampling and its sea trial result[C] // Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, Piscataway, USA, 2007: 28-33
- [4] 唐元贵,王健,陆洋,等."海斗号"全海深自主遥控水 下机器人参数化设计方法与试验研究[J].机器人, 2019,41(6):697-705
- [5] Kyo M, Hiyazaki M, Tsukioka S, et al. The sea trial of 'Kaiko', the full ocean depth research ROV [C] // OCEANS'95 MTS/IEEE Challenges of Our Changing Global Environment, San Diego, USA, 1995:1991-1996
- [6] Hashimoto K, Watanabe M, Tashiro S, et al. Missing of the ROV Kaiko vehicle-problem on the secondary cable [C]//OCEANS'04 MTTS/IEEE Techno-Ocean'04, Kobe, Japan, 2004:807-811
- [7] Nakajoh H, Takashi M, Noriyasu Y, et al. Development of deep sea ROV 'KAIKO7000II' [C] // Underwater

Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, Tokyo, Japan, 2007: 7-12

- [8] Momma H, Watanabe M, Hashimoto K, et al. Loss of the full ocean depth ROV Kaiko-Part 1: ROV Kaiko-a review [C] // International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, 2004: 191-193
- [9] Quan W C, Chen Q Q, Zhang Q F. Dynamics calculation for variable-length underwater cable with geometrically nonlinear motion [J]. Ocean Engineering, 2020,212: 1-19
- [10] Eidsvik O A, Schjolberg I. Time domain modeling of ROV umbilical using beam equations [J]. IFAC-Papers OnLine, 2016, 49(23): 452-457
- [11] Gonzalez F, Prada A, Luaces A, et al. Real-time simulation of cable pay-out and reel-in with towed fishing gears
 [J]. Ocean Engineering, 2017,131:295-307
- [12] Quan W C, Zhang Z Y, Zhang A Q. Dynamics analysis of planar armored cable motion in deep-sea ROV system
 [J]. Journal of Central South University, 2014 (12): 4456-4467
- [13] Quan W C, Liu Y S, Zhang A Q. The nonlinear finite element modeling and performance analysis of the passive heave compensation system for the deep-sea tethered ROVs[J]. Ocean Engineering, 2016, 127:246-257
- [14] Marjamäki H, Mäkinen J. Modelling a telescopic boomthe 3D case: Part II [J]. Computers and Structures, 2006, 84(29): 2001-2015
- [15] Mäkinen J. Total Lagrangian Reissner's geometrically exact beam element without sigularities [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007 (70): 1009-1048
- [16] Marjamäki H, Mäkinen J. Total Lagrangian beam element with C1-continuous slide-spring [J]. Computers and Structures, 2009, 87(9): 534-542

Research on dynamic characteristics of the non-metal armored umbilical cable for full ocean depth ROV

Wang Hailong^{* **}, Zhang Qifeng^{* **}, Quan Weicai^{***}, Cui Yuchen^{****}, Yan Xingya^{* **}

(*State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation,

Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(** Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169)

(*** National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment

and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(**** University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

In order to comprehensively evaluate the stress state of the umbilical cable of the full ocean depth unmanned remotely operated vehicle (ROV) in different mode configurations, operating depths and working conditions, and to improve the safety and reliability of the umbilical cable, the dynamic theoretical analysis and research on the non-metallic armored umbilical cable are carried out. In view of the geometric characteristics of the underwater motion of the armor cable system with small strain and large displacement, a three-dimensional non-linear finite element model of the non-metallic armor umbilical cable is established based on the geometric exact beam theory and virtual work principle. Based on the dynamic model, combined with the joint excitation of ship heave and the current, the dynamic characteristics such as torsion property and real-time operation state of the umbilical cable applied in full ocean depth environment are analyzed and studied. And the experimental results show that the resonance region of the umbilical cable is about 5000 m. Moreover, the conclusions can provide a theoretical basis for the safety application of non-metallic armored umbilical cable of full ocean depth ROV and the optimal design of the matching winch.

Key words: full ocean depth remotely operated vehicle (ROV), non-metal armored umbilical cable, dynamic characteristics, resonance zone

— 1302 —