

舰船水下拖曳缆索的回转构形研究

张天宇¹, 朱克强^{1*}, 荆彪¹, 徐为兵¹, 张洋¹, 苗永超²

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211; 2. 沪东中华造船集团有限公司设计所, 上海 200129)

摘要: 采用柱坐标系建立舰船水下拖曳缆索回转构形问题的数学模型, 推导得到表征拖缆在回转拖曳过程中形状及张力的拖缆运动方程组. 使用 Matlab 编制计算程序, 采用四阶 Runge-Kutta 法对拖缆运动方程组进行数值积分, 并对拖缆空间构形进行仿真. 计算分析了舰船不同参数变化下, 拖缆首尾端点回转半径及拖缆尾端深度值的变化规律. 数值计算结果表明, 舰船拖曳回转半径、拖曳缆索缆长、舰船拖曳速度对拖缆空间回转构形有显著影响.

关键词: 拖曳缆索; 定常回转; 稳态响应; 数值积分

中图分类号: U675.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 03-0122-05

水下拖曳系统由拖缆、深海拖曳体或声纳线列阵构成. 拖曳缆索是一类具有挠性且极端细长的挠性部件, 易受波浪、流等外界环境条件影响^[1], 研究拖缆的力学现象、运动规律对于拖曳系统的合理设计、提高作业效率等具有极其重要的意义^[2].

朱克强等^[3-5]采用集中质量法对海洋缆索进行了动态分析和仿真研究. Choo 等^[6]及 Chapman^[7]曾先后对拖船做回转机动的水下拖曳系统进行了稳态分析, 并且 Chapman 在拖速一定的情况下给出了临界半径的概念. Mark^[8]对拖曳系统三维定常回转的瞬态特性进行了详细分析, 且从动力学角度对缆索构形进行分析进而重新定义了临界半径的概念. Kordkheili^[9]提出一种升级的拉格朗日有限元方程用于三维挠性管线的动力分析.

1 柱坐标系下拖缆定常回转数学模型

在研究拖曳系统三维定常回转问题时采用柱坐标系可使计算更为简便. 如图 1 所示建立柱坐标系 $O\psi RZ$, 原点 O 固定于海底某处, OZ 轴方向垂直向上. 图中舰船绕轴 OZ 做回转机动. 如图 2 所示建立局部直角坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 固连于缆索上的点 P , 其单位向量依次为 i, j, k . 在缆索末端建

立直角坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$.

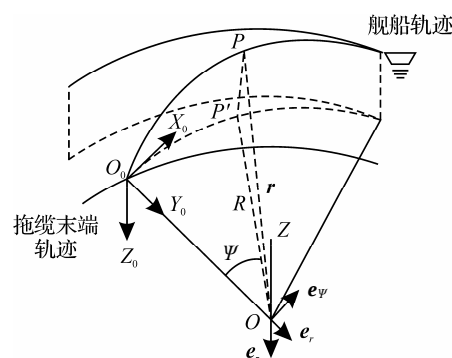


图 1 柱坐标系下舰船拖曳回转数学模型

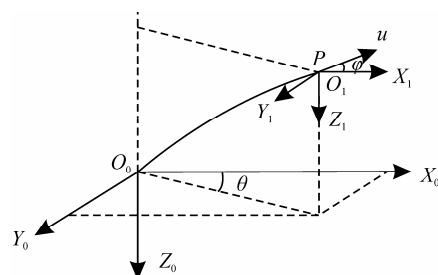


图 2 局部直角坐标系

在柱坐标系单位坐标矢量 e_ψ, e_r, e_z 中, e_ψ 和 e_r 沿拖缆随缆长 s 而变化, 所以由其定义可得:

$$de_r / d\psi = e_\psi, de_\psi / d\psi = -e_r, \quad (1)$$

收稿日期: 2014-04-22.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11272160); 国家自然科学基金青年项目(51309133); 浙江省自然科学基金(LY13A020006); 宁波大学研究生科研创新基金(G13069).

第一作者: 张天宇(1989-), 男, 山西太原人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 海洋工程结构动态响应. E-mail: zhangty.1989@163.com

*通信作者: 朱克强(1956-), 男, 安徽合肥人, 博导/教授, 主要研究方向: 船舶与海洋工程结构动态响应. E-mail: zhukeqiang@nbu.edu.cn

则:

$$\begin{cases} d\mathbf{e}_r/ds = (d\mathbf{e}_\psi/d\psi) / (d\psi/ds) = \mathbf{e}_\psi d\psi/ds, \\ d\mathbf{e}_\psi/ds = (d\mathbf{e}_\psi/d\psi) / (d\psi/ds) = -\mathbf{e}_r d\psi/ds. \end{cases} \quad (2)$$

位置矢量 $\mathbf{r}$ 可记为: $\mathbf{r} = -R\mathbf{e}_r - Z\mathbf{e}_z$, 则:

$$\mathbf{i} = d\mathbf{r}/ds = \mathbf{e}_\psi \cos \varphi + \mathbf{e}_r \sin \theta \sin \varphi - \mathbf{e}_z \cos \theta \sin \varphi = -R(d\mathbf{e}_r/ds)(d\psi/ds) - \mathbf{e}_r dR/ds - \mathbf{e}_z dZ/ds, \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式, 可得柱坐标系中的方向导数为:

$$\begin{cases} d\psi/ds = -\cos \varphi / R, \\ dR/ds = -\sin \theta \sin \varphi, \\ dZ/ds = \cos \theta \sin \varphi. \end{cases} \quad (4)$$

柱坐标下, 定常回转拖曳系统的缆索运动方程可由直角坐标系下的直航拖曳缆索运动方程 $m\partial u/\partial t = \partial T\mathbf{i}/\partial s + f_w\mathbf{e}_z - f_t\mathbf{i} + f_s\mathbf{j} - f_n\mathbf{k}$ 经修正得到. 添加附加质量力 f_{am} 后有^[10]:

$$m\partial u/\partial t = (mR\dot{\psi}^2)\mathbf{e}_r = \partial T\mathbf{i}/\partial s + f_w\mathbf{e}_z - f_t\mathbf{i} + f_s\mathbf{j} - f_n\mathbf{k} + f_{am}\mathbf{e}_r, \quad (5)$$

其中, $\partial T\mathbf{i}/\partial s = Td\mathbf{i}/ds + \mathbf{i}dT/ds$, $d\mathbf{i}/ds = \sin \varphi \cdot (d\theta/ds)\mathbf{j} - (d\varphi/ds)\mathbf{k}$, $\mathbf{e}_r = \mathbf{i} \sin \theta \sin \varphi + \mathbf{j} \cos \theta - \mathbf{k} \cos \varphi \sin \theta$, μ_{ij} 为附加质量系数, $f_{am}\mathbf{e}_r = -(\mu_{ij}m) \cdot \dot{\psi}^2 R\mathbf{e}_r$. $f_n = R_t f_n \varphi$ 为垂向流体力, $f_t = R_t \cdot f_t \varphi$ 为切向流体力, 其中, $f_n \varphi$ 和 $f_t \varphi$ 为载荷函数, $R_t = \rho u^2 t c_r / 2$ 为 $\varphi = 90^\circ$ 时单位缆索长度所受阻力, t 为缆索在运动方向投影宽度, c_r 为阻力系数. $f_s = \rho u^2 c c_y / 2$ 为流体侧向力, 其中, c_y 为侧向力系数, c 为缆索侧向投影宽度.

由于舰船为定常运动, 则有 $m\partial u/\partial t = 0$, 将以上各式代入(5)式并进行适当整理后, 最终可得:

$$\begin{cases} dT/ds = f_w \sin \varphi \cos \theta + f_t + mR\dot{\psi}^2(1 + \mu_{11}) \sin \varphi \sin \theta, \\ d\theta/ds = \{[mR\dot{\psi}^2(1 + \mu_{22}) - (T/R)\cos^2 \varphi] \cdot \cos \theta - f_w \sin \theta - f_s\} / (T \sin \varphi), \\ d\varphi/ds = \{[mR\dot{\psi}^2(1 + \mu_{33}) - (T/R)] \cos \varphi \cdot \sin \theta + f_w \cos \varphi \cos \theta - f_n\} / T. \end{cases} \quad (6)$$

至此, (4)式和(6)式联立构成了非线性常微分联立方程组, 该方程组为柱坐标下表征拖曳在定常回转拖曳过程中形状及张力的拖曳运动方程.

为便于计算, 采用圆柱体附加质量系数且因缆索不可拉伸, 则:

$$\mu_{11} = 0, \mu_{22} = \mu_{33} = \rho \pi d^2 / 4. \quad (7)$$

对(4)式和(6)式联立构成的非线性常微分方程

组采用四阶 Runge-Kutta 法进行数值积分, 可得拖曳在给定边界条件下, 定常回转时的缆索构形及张力.

2 数值模拟算例

当舰船定常回转时, 其拖曳系统的主要参数见表 1.

表 1 舰船拖曳回转主要参数

参数名称	数值
拖缆长度 L/m	8 000
拖缆直径 d/m	0.017 3
拖缆单位长质量 $m/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	0.751
拖缆单位长湿重 $f_w/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	5
法向阻尼参数 C_d	2.0
切向阻尼参数 C_t	0.02
舰船拖曳回转半径 R/m	300
舰船拖曳速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	4

使用 Matlab 对给出的拖曳运动方程进行数值积分, 可得如图 3 所示的拖曳在表 1 参数条件下的缆索空间构形仿真图. 图 4 为缆索空间构形曲线在水平面的投影曲线. 图 3 及图 4 中 A 点为舰船与缆索的连接点即缆索的首部端点, B 点为缆索的尾部端点(图 5 与图 6 与此相同).

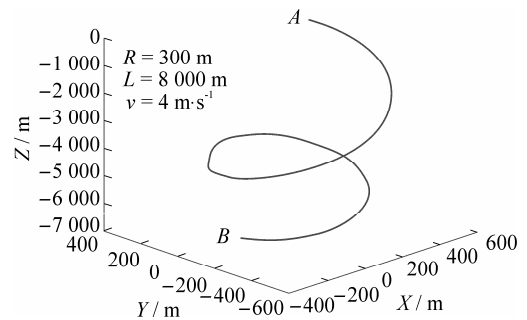


图 3 拖曳缆索空间构形仿真图

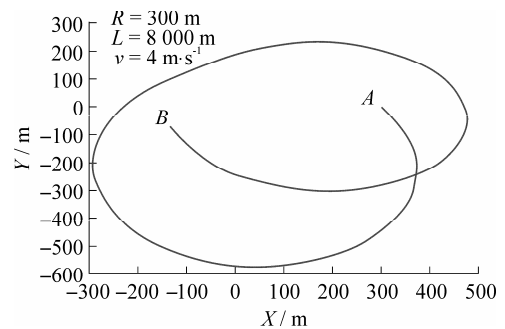


图 4 $R = 300 \text{ m}$ 时的拖曳缆索空间构形俯视图

3 仿真分析

3.1 改变舰船拖曳回转半径

在拖曳船舶做回转机动时,拖船的回转半径不尽相同.通过改变拖船定常回转半径 R 可得拖缆缆长 L 一定时,不同回转半径 R 下的拖缆空间构形曲线.为研究方便可进一步得到如图5和图6所示的不同回转半径时拖缆空间构形曲线的俯视图.

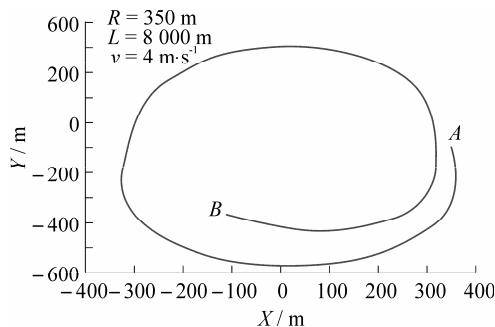


图5 $R = 350$ m 时的拖曳缆索空间构形俯视图

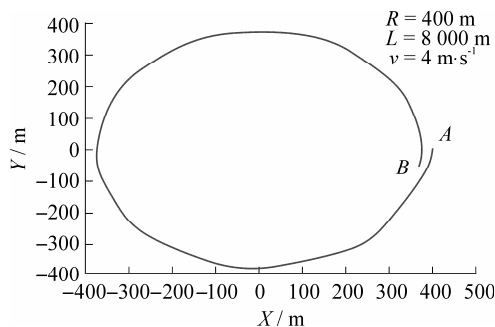


图6 $R = 400$ m 时的拖曳缆索空间构形俯视图

对比图4~图6可以看出,拖船定常回转半径 R 对拖曳缆索空间构形影响较大.在图4~图6算例

中保持拖缆缆长 $L = 8\,000$ m 不变,随着舰船拖曳回转半径 R 由300 m增大到400 m,缆索首部端点回转半径 R_A 与其尾部端点回转半径 R_B 间的差值越来越小.即随着回转半径 R 与拖缆缆长 L 的比值 R/L 由0.0375逐步增大到0.050,缆索首尾端点处回转半径的差值 $R_A - R_B$ ($R_A > R_B$)与首部端点回转半径 R_A 的比值 $(R_A - R_B)/R_A$ 越来越小.

当回转半径与拖缆缆长的比值 R/L 较小时,如图4算例中 $R/L = 0.0375$,部分缆索超出舰船拖曳回转圈.在舰船回转拖曳机动中应注意类似的问题,以避免碰撞.同时相较于瞬态分析方法,由于输出结果为拖缆最终达到稳定姿态时的结果,故无法在连续时间域上考察拖曳缆索达到稳定姿态前的机动变化历程,亦无法确定Chapman定义的舰船拖曳回转中“临界半径”的取值.

3.2 改变拖曳缆索长度

设定舰船拖曳回转半径 $R = 300$ m,拖曳回转速度 $v = 4$ m·s⁻¹,只改变拖曳缆索缆长 L .使用Matlab编制计算机程序辅助计算、作图,可以得到如图7所示的不同缆索长度下的拖曳缆索空间构形侧视图组.由图7可见,拖曳船舶做回转机动时的拖曳缆索构形姿态大致呈空间螺旋曲线状.此外,从拖曳缆索尾端处垂向位移坐标值可以看出,拖曳缆索缆长对拖曳缆索空间构形中拖缆尾端深度值影响较大.在该算例中,随着拖曳缆索缆长 L 由7 000 m逐渐减小为2 000 m,拖曳缆索尾端深度值逐渐减小且减小幅度较大.亦有随着拖曳缆索缆长的增大,拖曳缆索尾端深度值逐渐增大.

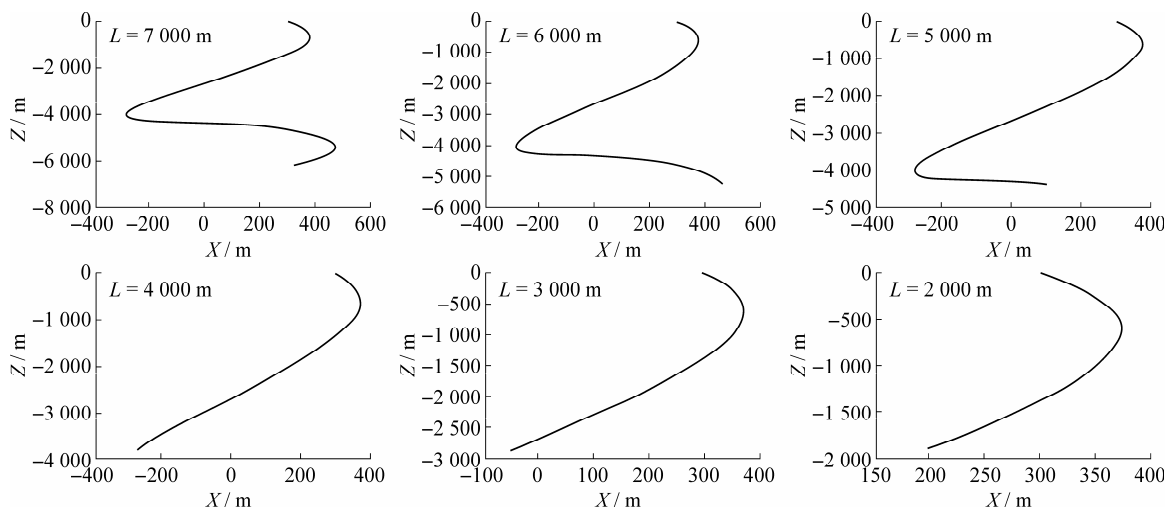


图7 不同缆索长度下拖曳缆索空间构形侧视图

3.3 改变舰船拖曳速度

为了研究舰船拖曳速度变化对拖缆空间构形尾端深度的影响关系,现重新给定拖缆缆长 $L = 6000\text{ m}$, 舰船拖曳回转半径 $R = 300\text{ m}$, 其余参数与前文规定相同. 仅改变舰船拖曳回转角速度值, 舰船拖曳回转半径及拖缆缆长保持不变, 使用相同的计算程序, 可以得到如图8和图9所示的不同拖曳速度下的拖曳缆索空间构形侧视图组及俯视图组(舰船拖曳回转角速度如图中所注).

由图8和图9可看出, 拖曳船舶做回转机动时拖曳缆索构形姿态大致呈空间螺旋曲线状. 根据

图8中各图标注的拖曳缆索尾端垂向位移坐标值可以看出, 舰船拖曳速度对拖曳缆索空间构形中拖缆尾端深度值影响较大. 随着舰船拖曳速度由 $0.03\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐增大至 $0.09\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, 拖曳缆索尾端深度逐渐减小. 且在算例中, $0.03\sim 0.05\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 时拖缆尾端深度值变化范围为 $5132\sim 4819\text{ m}$, 而 $0.07\sim 0.09\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 拖缆尾端深度值变化范围为 $4570\sim 2743\text{ m}$, 后者的变化范围相较于前者的变化范围增大了许多. 即当舰船拖曳回转角速度较大时, 拖曳缆索尾端深度值的减小变化量比拖曳回转角速度较小时的缆索尾端深度值减小变化量大.

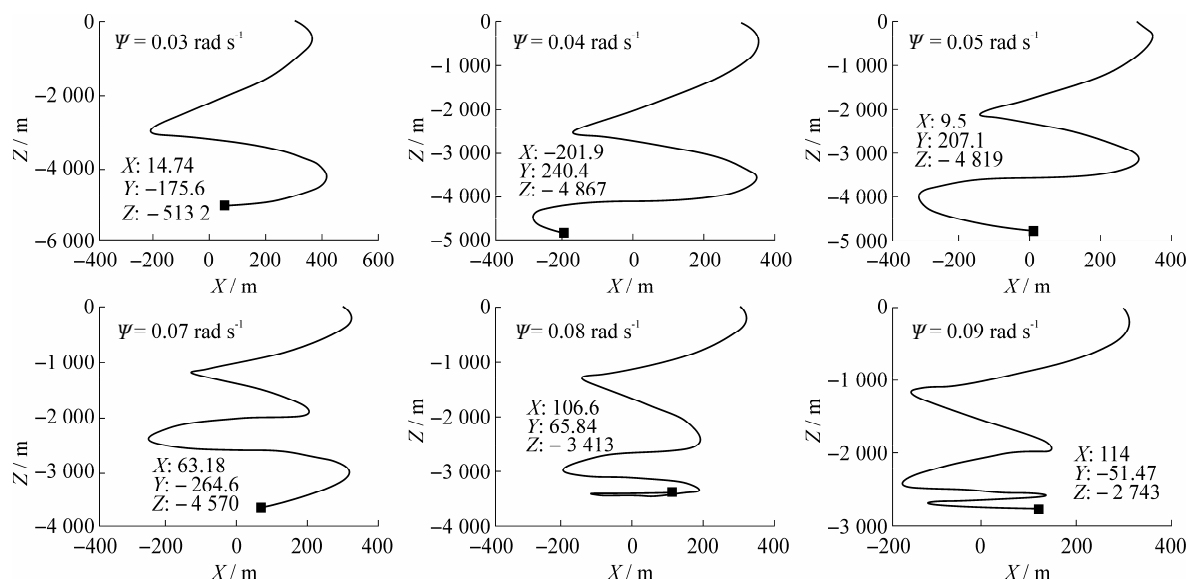


图8 不同拖曳速度下拖曳缆索空间构形侧视图

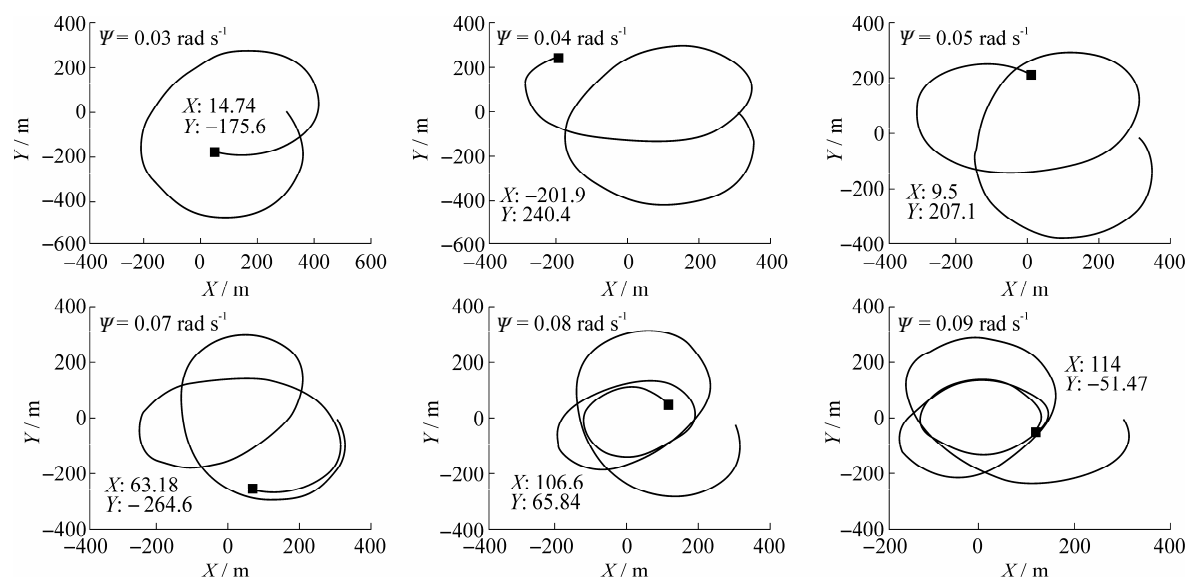


图9 不同拖曳速度下拖曳缆索空间构形俯视图

4 结语

研究了舰船水下拖曳缆索回转稳态构形问题,采用柱坐标系建立了研究该问题的数学模型并进行了数值仿真,根据仿真结果可以得到以下结论:

(1)在舰船拖曳定常回转机动中拖曳缆索姿态大致呈空间螺旋曲线状且拖缆首部端点回转半径大于拖缆尾部端点回转半径.

(2)拖曳缆索缆长对拖曳缆索尾端深度值的影响较大.当舰船拖曳回转半径及拖速一定时,随着拖缆缆长的减小,拖缆尾端深度值逐渐减小.

(3)舰船拖曳速度对拖曳缆索尾端深度值的影响较大.当舰船拖曳回转半径及拖曳缆长一定时,随着舰船拖曳速度的增大,拖曳缆索尾端深度逐渐减小.且当舰船拖曳回转角速度较大时,拖曳缆索尾端深度值的减小变化量较大.

(4)由于输出结果为拖曳缆索最终达到稳定姿态时的结果,故无法捕捉 Chapman 定义的“临界半径”,即造成拖缆尾端深度值在时域上摆动的舰船最大拖曳半径.

参考文献:

- [1] 张峰,朱克强.拖船操纵运动中水下拖缆的数值模拟分析[J].港工技术,2009,46(6):39-42.
- [2] Yang Bingka, Zhu Keqiang. Dynamic response of towed

line array[J]. Journal of hydrodynamic, Ser B, 2013, 25(4):616-619.

- [3] Zhu Keqiang, Miao Guoping. A multi-body space coupled motion simulation of hydrodynamics on a deep-sea tethered remotely operated vehicle[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser B, 2008, 20(2):210-215.
- [4] 朱克强,郑道昌,周江华,等.采用凝集参数法对海洋缆索系统进行动态分析[J].中国航海,2007(3):10-12.
- [5] 朱克强,郑道昌,张玉松,等.随机波浪下遥控潜水器强非线性耦合空间运动与缆索安全性研究[J].海洋工程,2010,28(2):95-99.
- [6] Choo Y, Casarella M J. Configuration of a towline attached to a vehicle moving in a circular path[J]. Journal of Hydronautics, 1972, 6(1): 51-57.
- [7] Chapman D A. Towed cable behavior during ship turning maneuvers[J]. Ocean Engineering, 1984, 11(4):327-361.
- [8] Mark A G. Transient behavior of towed cable systems during ship turning maneuvers[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(11/12):1532-1542.
- [9] Kordkheili H S A. An updated Lagrangian finite element formulation for large displacement dynamic analysis of three-dimensional flexible riser structures[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(5/6):793-803.
- [10] Calkins D E. Hydrodynamic analysis of a high-speed marine towed system[J]. Journal of Hydronautics, 1979, 13(1):10-19.

Shape and Structure Configuration of Underwater Towed Cable for Ship Turning Maneuvers

ZHANG Tian-yu¹, ZHU Ke-qiang^{1*}, JING Biao¹, XU Wei-bing¹, ZHANG Yang¹, MIAO Yong-chao²

(1. Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Design House of Hudong Zhonghua Shipgroup Co., Ltd., Shanghai 200129, China)

Abstract: A mathematical model in cylindrical coordinate is presented for investigating the shape and structure configuration of underwater towed cable for ship turning maneuvers. A new motion equation for towed cable in cylindrical coordinate is derived. The space configuration of towed cable is obtained using the numerical integration of motion equations which are solved with Matlab program and fourth-order Runge-Kutta method. The relationship between radii of the head and the end of towed cable and the depth change of cable end are computed and analyzed by varying the influencing parameters. The numerical results indicate that the proposed configuration is influenced obviously by ship-turning radius, cable length and tow speed of ship.

Key words: towed cable; steady turning; steady-state response; numerical integration

(责任编辑 章践立)