水下拖曳航行器水动力和拖缆姿态仿真分析

侯二虎1,杜敏1,汪小勇1,吴国伟1,秦玉峰1,2

(1. 国家海洋技术中心 天津 300112;2. 海洋能源利用与节能教育部重点实验室 大连 116024)

摘要:水下拖曳航行器是被广泛应用的水下监测平台。为掌握水下拖曳航行器的水动力及其拖揽 姿态,文章通过 CFD 仿真分析计算其零攻角下的阻力系数,并通过多刚体一球铰模型建立其运动 数学模型,分析不同航速下拖曳系统的总拉力、拖缆长度和航行器位置等的参数变化。研究结果 表明:随着船舶航速的变化,拖曳系统各项参数变化的差别很大;在 200 m 深度时,6 kn 航速相比 4 kn航速的总拉力增加 73%,而所需的拖缆长度仅增加 1%。该数学模型可对不同航速下的水下 拖曳系统的总拉力和拖缆姿态等做出预测,为拖曳系统设计提供技术支撑。

关键词:水下拖曳系统;拖缆;水下姿态;仿真分析;航速 **中图分类号:**P715.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-9857(2020)02-0074-04

Simulation Analysis of Hydrodynamics of Underwater Towing Aircraft and the Attitude of Towed Cable

HOU Erhu¹, DU Min¹, WANG Xiaoyong¹, WU Guowei¹, QIN Yufeng^{1,2}

(1. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China;

2. Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian 116024, China)

Abstract: The underwater towing vehicle is a widely used underwater monitoring platform. In order to study its hydrodynamic and attitude prediction problems, the drag coefficient under the zero angle of attack of the aircraft was obtained through CFD simulation analysis, and the mathematical model of its motion was established by the "multi rigid body-ball joint" model, the parameters such as the total pulling force, the length of the cable and the position of the aircraft at different speeds were analyzed. The results showed that the different parameters of the towing system varied greatly with the ship's speed changed. Under the depth of 200 m, with ship speed of 6 knots, the total pulling force of the towing system increased by 73% and the required length of cable increased by only 1% compared to ship speed of 4 knots. The mathematical model proposed in this paper can predict the total pulling force of the towing system and the shape of the cable at different speeds, and provide technical support for the design of the towing system.

Key words: Underwater towing system, Towed cable, Underwater attitude, Simulation analysis, Speed

作者简介:侯二虎,工程师,硕士,研究方向为水动力仿真分析和海洋能利用

收稿日期:2019-07-26;修订日期:2020-02-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFE0132000);海洋赤潮灾害立体监测技术与应用项目(MATHAB201807).

0 引言

水下拖曳航行器亦称水下拖曳系统,被广泛应 用于海洋、内河和湖泊的水下监测,在水下环境调 查和监测中发挥多种用途。随着海洋开发的日益 深入,水下拖曳航行器发挥的作用越来越重要,海 洋拖曳系统的相关研究成为现代海洋开发与应用 的重要课题之一^[1]。

拖曳系统通常由拖曳拖缆以及被动或可控的 水下拖曳体组成,准确描述拖缆和拖曳体的水动力 姿态是准确模拟拖曳系统水动力性能的关键^[2]。皮 德福等[3]通过建立拖曳系统水下拖缆的平面形状和 张力的二维数学模型,计算水下拖曳系统在不同航 速下的姿态;苑志江等[4]针对海洋拖曳系统建立运 动计算模型,提取影响系统稳定姿态的4个关键因 素,并分析各因素对系统稳定姿态的影响;杨智栋 等^[5]采用集中质量法建立拖缆的运动方程,分析水 下航行器运动过程中拖缆的长度及其作用力的变 化;李志印^[6]对水下拖曳系统的流体动力参数进行 CFD 分析,通过 Fluent 语言和 Fortran 语言的混编 和对接,实现对拖曳体的水下动态模拟。本研究针 对水下拖曳航行器的流体动力参数和不同航速下 的拖缆姿态进行仿真分析,对不同深度下的运动工 况给出所需缆长和拖缆姿态等结果,为水下拖曳系 统设计提供技术支撑。

1 数学模型

1.1 坐标系

本研究采用多刚体一球铰模型对水下拖曳系统进行动力分析^[7-8]。将水下拖曳系统拖缆离散成 N段,将每个单元视作"柔性"和具有"球铰"特性的 微元(E_i)。以船舶拖曳点为原点,竖直向上为 Z 轴,按右手规则建立空间坐标系。其中, T_i 和 T_{i+1} 分别为来自上方和下方的线缆的拉力,与 Z 轴的夹 角分别为 ϕ_i 和 ϕ_{i+1} ,在X-Y 平面的投影与X 轴的 夹角分别为 θ_i 和 θ_{i+1} ^[9](图 1)。

1.2 受力分析

每个微元在各方向受到的流体阻力为:

$$Q_j = \frac{1}{2} \rho_w C_{Di} A_j U U_j \tag{1}$$

式中: ρ_w 为水体密度; C_{Di}为阻力系数; A_i为当前微



图 1 拖曳系统的坐标系和受力分析

元处的横截面积;U为当前微元处的流速;U_j为当前微元处的流速;U_j为当前微元处的流速在j(x,y或z)方向上的流速分量。

对每个微元进行受力分析,得到平衡方程为:

 $Q_{xi} + T_i \cos \theta_i \sin \psi_i = T_{i+1} \cos \theta_{i+1} \sin \psi_{i+1}$ (2)

 $Q_{yi} + T_i \sin \theta_i \sin \psi_i = T_{i+1} \sin \theta_{i+1} \sin \psi_{i+1} \quad (3)$

 $B_{ig} + Q_{zi} + T_{i} \cos \psi_{i} = T_{i+1} \cos \psi_{i+1}$ (4)

式中: Q_{xi} 、 Q_{yi} 和 Q_{zi} 分别为微元流体阻力在 3 个方向上的分量; B_i 为微元的浮力。

拖曳系统的每个微元均有 3 个方程和 6 个未知 量,由于船舶最上方的拖曳点没有来自上方微元的 拉力,可求解来自下方的拉力和倾角,进而确定拖 曳系统所有微元的拉力和倾角。

1.3 位置确定

假设每个微元的长度为 L_i ,空间坐标系中的坐标为(X_i , Y_i , Z_i),则有:

$$X_{i+1} = X_i + L_i \cos \theta_i \sin \psi_i \tag{5}$$

$$Y_{i+1} = Y_i + L_i \sin \theta_i \sin \psi_i \tag{6}$$

$$Z_{i+1} = Z_i + L_i \cos \psi_i \tag{7}$$

式中: X_{i+1} 、 Y_{i+1} 和 Z_{i+1} 分别为第 i+1个部件的 3个坐标。

由于船舶最上方的拖曳点的坐标是已知的,当 计算每个微元的张力和倾角后,可按照从上到下的 顺序,迭代计算每个微元的空间位置,直到最终确 定航行器的位置。

2 阻力系数

运用 CFD 仿真得到水下航行器的流体动力参数,主要参数为航行器阻力系数。CFD 分析方法是

计算流体力学的建成和基于离散化的数值计算方法,其利用电子计算机对流场进行数值模拟和分析^[10],在现代航天航空、汽车设计、石油天然气和涡轮机设计等方面都有广泛的应用。

通过有限体积法求解雷诺时均方程,三维流场 的控制方程包括连续性方程和动量守恒方程。

(1)连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{8}$$

(2)动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho U_{i})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_{i}U_{j})}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial P}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\mu \left(\frac{\partial U_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial U_{j}}{\partial x_{i}} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(-\rho \overline{u'_{i}u'_{j}} \right) + \rho g_{i} + S_{i}$$
(9)

式中: ρ 为水的密度;P为静压; $-\rho u'_{i}u'_{j}$ 为雷诺应 力项,通过湍流模型求解; μ 为水的动力黏性系数; S_i 为动量方程的附加源项。

由于航行器关于纵平面对称,计算区域取航行器的 50%,并采用对称模型计算,计算区域长为 35 m、 半径为 5 m。求解器采用基于压力式的定常算法。 湍流模型为标准 k-epsilon 模型,该模型是目前应用 最为广泛的湍流模型。近壁面处理选择标准壁面函 数法。海水密度视为均匀密度,即 1 025 kg/m³。

在靠近航行器的区域采用加密网格处理方法, 加密区域为包裹航行器的直径为1m的圆柱体,长 度选取航行器的前1m和后4m,加密区域内的最 小网格间距为1mm。

入口处边界条件设为速度入口,出口为压力出口¹0,具体边界条件设置如表1所示。

边界	类型	参数
人口	速度入口	定常速度
出口	压力出口	定常压力
模型表面	壁面	无滑移壁面
远场	壁面	滑移壁面

表1 边界条件

航行器在计算区域内的计算工况为零攻角,采 用航行器的 50%进行仿真计算,得出所受阻力为 26 N,全部阻力即为 52 N,可得出航行器在零攻角 下的阻力系数为 0.17。

3 拖缆姿态

分别计算 6 kn 和 4 kn 航速的不同下放深度的 拖缆姿态。未考虑海流速度,拖缆参数按钢缆计 算。下放深度分别为 50 m、100 m 和 200 m,坐标原 点位于海平面,船舶沿 X 轴正向航行,Z 方向为水 深,船舶拖曳点位于原点铅垂上方 5 m 处。

6 kn 航速时拖曳系统的状态如表 2 所示,拖缆 姿态如图 2 所示。

表 2 6 kn 航速时拖曳系统的状态

资 庄 /	拖缆长度/m	与船	航行器	总拉力/kg
休良/ III		夹角/(°)	横坐标/m	
50	60.4	33.8	-23.6	372.4
100	123.6	39.2	-62.2	588.7
200	255.7	41.4	-148.1	1 012.3



图 2 6 kn 航速时的拖缆姿态

由表 2 可以看出,6 kn 航速时,随着航行器深 度的增加,拖曳系统各部分的状态均发生变化。由 于船速的存在,所需拖缆的长度随深度的增加而增 加:50 m 定深时,拖缆长度比深度增加 20.8%;100 m 定深时,拖缆长度比深度增加 23.6%;200 m 定深 时,拖缆长度比深度增加 27.9%。所需拉力也有很 大幅度的增加,200 m 定深时所需拉力比 50 m 定深 时增加 171.8%。变化程度最小的是拖缆与船夹 角,200 m 定深时夹角比 50 m 定深时增加 22.5%。 由图 2 可直观地获取拖缆的最终姿态,结合航行器

77

的横坐标即可确定航行器的最终位置。

4 kn 航速时拖曳系统的状态如表 3 所示,拖缆 姿态如图 3 所示。

深度/m 拖缆长度/m	与船	航行器	台 持 力 /1	
	他现て度/m	夹角/(°)	横坐标/m	応1⊻刀/Kg
50	56.5	22.5	-13.2	269.8
100	113.5	31.4	-40.4	372.3
200	253.4	36.7	-109.9	586.7



由表 3 可以看出,4 kn 航速时拖曳系统的整体状态与 6 kn 航速时类似。由于航速减小,拖缆长度、与船夹角和最终拉力等参数均有不同程度的减小。随着深度的增加,总拉力由 50 m 定深时的 269.8 kg 增加至 200 m 定深时的 586.7 kg,增加 117.5%。拖缆长度在 50 m 定深时为 56.5 m,相比深度增加 13%, 而在 200 m 定深时相比深度增加 26.7%。

对比 6 kn 航速和 4 kn 航速下的计算结果可以 看出,随着航速的增加,船舶拖曳点处的总拉力和 拖缆长度等参数均有变化。50 m 深度时,6 kn 航速 比 4 kn 航速所需拉力增加 38%,拖缆长度增加 7%;100 m 深度时,6 kn 航速比 4 kn 航速所需拉力 增加 58%,拖缆长度增加 9%;200 m 深度时,6 kn 航速比 4 kn 航速所需拉力增加 73%,拖缆长度增 加 1%。3 种深度下航行器横坐标的增加幅度分别 为 79%、54%和 35%,与船夹角的增加幅度分别为 50%、25%和 13%。因此,航速变化对拖曳系统总拉 力变化的影响最显著,且总拉力的增加幅度随航速增加而增加,其余参数的增加幅度随航速增加而减小。

4 结语

本研究建立水下拖曳航行器拖缆流体水动力 和拖缆姿态的数学模型,并通过该模型对 6 kn 和 4 kn航速下拖曳系统的姿态和受力进行仿真分析, 研究结果表明:①随着航速的增加,拖曳系统的各 项参数均有所增加,但增加幅度不同,其中总拉力 的增加幅度增加,而拖缆长度、与船夹角和航行器 横坐标的增加幅度减小;②总拉力的增加幅度非常 明显,在 200 m 深度时,6 kn 航速相比 4 kn 航速的 总拉力增加 73%,而拖缆长度仅增加 1%。

本研究建立的数学模型可对水下拖曳航行器 在不同航速时的流体动力及其所处位置做出预测, 为拖曳系统的设计工作提供技术支撑。需要说明 的是,本研究仅针对匀速航行时的拖曳系统,且将 海水视作均匀密度的介质。未来研究工作应考虑 实际海洋环境的潮流、波浪、温度和盐度等因素的 变化对拖曳系统的影响。

参考文献

- [1] 苑志江,金良安,田恒斗,等.海洋拖曳系统的水动力理论与控 制技术研究综述[J].科学技术与工程,2013,13(2):408-415.
- [2] 李志印,吴家鸣.水下拖曳系统水动力特性的计算流体力学分 析[J].中国造船,2007,48(2):9-19.
- [3] 皮德福,宋保维,李正,等.水下拖曳系统稳定姿态仿真计算
 [J].系统仿真学报,2005,17(10):2358-2359.
- [4] 苑志江,金良安,迟卫,等.海洋拖曳系统稳定姿态的影响因素 研究[J].科学技术与工程,2013,13(5):1127-1134.
- [5] 杨智栋,潘光,杜晓旭.变缆长拖缆 AUV 纵向运动建模与仿真[J].水下无人系统学报,2014,22(1):14-19.
- [6] 李志印.水下拖曳系统的流体动力 CFD 分析[D].广州:华南理 工大学,2005.
- [7] 陈永华.波浪驱动式海洋要素垂直剖面测量系统关键技术[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2008.
- [8] 姜静波.海洋剖面测量系统形态模拟及仿真研究[D].青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2008.
- [9] DEWEY R K. Mooring design and dynamics: a Matlab[®] package for designing and analyzing oceanographic moorings [J].Marine Models,1999,1(1/4):103-157.
- [10] 朱红钧,林元华,谢龙汉.Fluent 流体分析及仿真实用教程 [M].1版.北京:人民邮电出版社,2010.