

基于参数化方法的水下拖缆微元阻力分析

孙现有¹, 刘显龙²

(1. 海军驻昆明七五〇试验场军事代表室;
2. 中国船舶重工集团公司七五〇试验场, 云南 昆明 650051)

摘要 采用将拖缆直径参数化, 可以由 Workbench 一键化建模并由 ICEM 的脚本语言自动生成结构化网格。采用计算流体力学方法 (CFD) 计算少量不同攻角时拖缆微元的阻力性能, 并由三次样条插值的方法计算拖缆微元在特殊攻角下的阻力性能。

关键词 参数化; CFD; 三次样条插值; 结构化网格

中图分类号 U674.18 **文献标识码** A

Analysis for Resistance of Underwater Rowing Cable's Infinitesimal Element Based on Parameterized Method

SUN Xianyou¹, LIU Xianlong²

(1. The Military Representative Office of PLA Navy in Kunming No. 750 Proving Ground;
2. No. 750 Proving Ground, CSIC, Kunming 650051, China)

Abstract To realize parameterization of towing cable's diameter, modelling is carried out by Workbench, and the structured grids are automatically generated by scripting language of ICEM. This paper calculates the resistance performance of towing cable's infinitesimal at some different attack angles by computational fluid dynamics (CFD) method, and computes the resistance performance of towing cable's infinitesimal element at specific attack angles by cubic spline interpolation method.

Key words parameterization; CFD; cubic spline interpolation; structured grid

0 引言

拖缆作为水面及水下武器的承载设备发挥着巨大的作用。常见的拖缆拖曳形式有水面舰拖曳航行体, 水下航行体拖曳声学线列阵等。为了计算整个拖缆的阻力性能, 需要将其参数化, 计算各个的阻力性能, 并将其整体矢量求和。

以往常采用经验公式法来计算拖缆微元的阻力性能^[1]。经验公式是将来流速度按拖缆的切向、法向 2 个方向进行分解, 再由公式计算切向力和法向力^[2]。采用这种方法由于未考虑切向与法

向速度相互干扰因素, 结果不够准确, 连琏等人^[3]通过试验的方法严格说明了此种方法带来的误差, 本文不再赘述。随着计算流体力学 (CFD) 技术的发展, 采用 CFD 方法能够快速地计算流体性能。另外, CFD 方法仅能计算有限个攻角时拖缆的阻力性能, 为了得到实际不同攻角的速度, 需要采用三次样条插值的方法来插值求得。

1 流体力学基础理论

1.1 控制方程

不可压缩粘性流体的连续性方程和动量方程

为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{p}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho u'_i u'_j \right) \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; μ 为流体粘性系数; \bar{p} 为平均压力; \bar{F}_i 为外力项; \bar{u}_i 为时均速度; u'_i 为脉动速度; $-\rho u'_i u'_j$ 为雷诺应力项。

1.2 湍流模型

要使上述方程封闭, 须引入新的湍流模型方程, 把应力项中的脉动值与时均值联系起来。RNGk- ϵ 方程中湍流动能 k 和湍流脉动强度 ϵ 的输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (4)$$

式中: $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; $G_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}$; $R_\epsilon =$

$$\frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k}; \eta \equiv \frac{S_k}{\epsilon}; S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}; S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); S_k \text{ 和 } S_\epsilon \text{ 是自定义源项。}$$

常数为: $G_{1\epsilon} = 1.42$; $G_{2\epsilon} = 1.68$; $C_\mu = 0.0845$;

$\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\epsilon = 1.3$; $\eta_0 = 4.38$; $\beta = 0.012$ 。

2 CFD 模拟

2.1 流体计算域

拖缆微元与迎流速度的夹角(即攻角)从 0° 到 90° 范围变化。 0° 及 90° 情况较为简单, 可以较快地得到结构化网格, 较为复杂的是 0° 至 90° 之间的情况。对于此种情况, 将速度入口由平面改为弧面, 可以较好地解决这一问题^[4], 其流体计算域及边界设置情况见图 1。

需要说明的是, 拖缆微元在不同攻角时阻力性能是不同的, 而计算时又不可能由 CFD 的方法计

算每种攻角情况, 为了解决这一问题, 采用三次样条插值的方法^[5]。

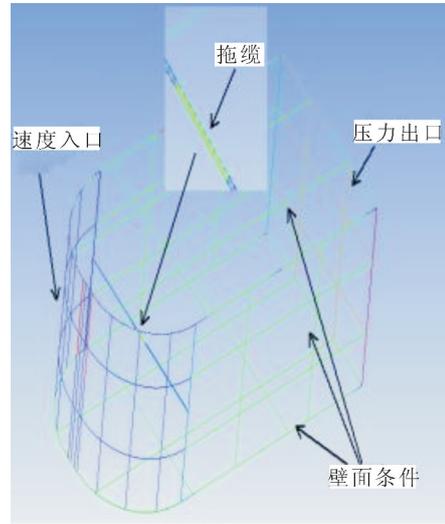


图 1 流体计算域及边界设置

Fig. 1 Computational fluid domains and boundary settings

2.2 网格划分

为了得到高质量的网格, 对整个计算域采取分块化处理, 再划分为结构化网格。在拖缆周围设置边界层网格, 第一层控制近壁面的网格高度和质量, 近壁面高度按估算公式(5)确定:

$$y^+ = 0.172 \left(\frac{\Delta y}{L} \right) Re^{0.9} \quad (5)$$

式中: Δy 为第一层边界层厚度; L 为长度值; Re 为雷诺数。实际取 y^+ 为 30, 整体网格数量为 90 万个。拖缆流场网格见图 2。

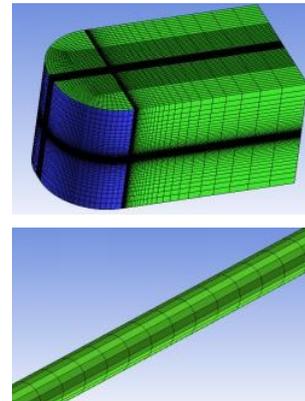


图 2 拖缆流场网格

Fig. 2 Grid of towing cable's flow field

2.3 边界条件

边界条件的设定是保证 CFD 实现的必要条件之一。本文计算域的边界条件设定见图 1,包括:速度入口、压力出口、壁面和对称面。

1)速度入口:在进流面设定迎流速度的大小和方向, $V_{in} = V_0$;

2)压力出口:在出流面设定相对于参考压力点的流体静压力, $P_{out} = 0$;

3)壁面条件:潜艇表面及圆柱表面设定为不可滑动边界条件, $u = v = w = 0$;

4)对称边界:经过附体轴线的面,垂直对称面的速度分量为零, $v_n = 0$ 。平行于对称面的速度分量的法向导数为零, $\partial \frac{v_\tau}{\partial n} = 0$ 。

2.4 数值计算

采用有限体积法离散控制方程和湍流模式,并用耦合隐式求解法计算。在差分格式中,压力项使用标准格式,动量项、湍流动能项以及耗散率项先使用一阶迎风格式迭代 500 次,再采用二阶迎风格式^[6]。

采用 RNGk- ϵ 湍流模型,并采用有限体积法对控制方程进行离散。压力-速度耦合迭代求解采用协调一致的 SIMPLEC 算法,压力项采用标准离散格式外,动量、湍流动能和湍流耗散率采用二阶迎风格式,亚松弛因子均采用默认值。近壁处区域采用壁面函数法^[7]。

3 三次样条插值

在实际计算过程中,通过 CFD 方法计算拖缆微元在攻角分别为 0° 、 10° 、 20° 、 \dots 、 90° 的阻力情况。实际计算时若碰到不同属于上述攻角情况时,采用三次样条插值的方法进行估算^[8]。

曲线插值一般有指数函数插值、拉格朗日插值、三次样条插值、B 样条曲线、NURBS 曲线等方法。这里采用三次样条进行插值。

在区间 $[a, b]$ 内给定一个分划 $\Delta: a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$,若函数 $y(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上满足:

1)每个子区间 $[x_{i-1}, x_i]$, $i = 1, 2, \dots, n$ 上为三次多项式;

2) $y(x)$ 在整个区间 $[a, b]$ 上二阶连续可导。

则称 $y(x)$ 为区间 $[a, b]$ 上关于分划 Δ 的三次样条函数,其中 x_i ($i = 0, 1, \dots, n$) 称为节点。插值点如表 1 所示。

表 1 三次样条曲线插值点

Table 1 Interpolation points of cubic spline curve

x	x_0	x_1	\dots	x_n
y	y_0	y_1	\dots	y_n

则三次样条插值函数为

$$s(x) = \frac{h_k + 2(x - x_k)}{h_k^3} (x - x_{k+1})^2 y_k + \frac{h_k - 2(x - x_{k+1})}{h_k^3} (x - x_k)^2 y_{k+1} + \frac{(x - x_k)(x - x_{k+1})^2}{h_k^2} m_k + \frac{(x - x_{k+1})(x - x_k)^2}{h_k^2} m_{k+1} \quad (6)$$

式(6)中:

$$h_k = x_{k+1} - x_k \quad (k = 0, 1, \dots, n-1) \quad (7)$$

$$\lambda_k m_{k-1} + 2m_k + \mu_k m_{k+1} = g_k \quad (k = 1, 2, \dots, n-1) \quad (8)$$

其中:

$$\lambda_k = \frac{h_k}{h_k + h_{k-1}}, \mu_k = \frac{h_{k-1}}{h_k + h_{k-1}},$$

$$g_k = 3(\mu_k \frac{y_{k+1} - y_k}{h_k} + \lambda_k \frac{y_k - y_{k-1}}{h_{k-1}}) \quad (k = 1, 2, \dots, n-1)$$

4 拖缆计算方法简介

由于拖缆是柔性的,受力将发生变形^[8]。因此,各处拖缆的来流攻角是不同的。采用有限差分法,将拖缆处理成有限个小段,对各小段分别受力分析,由初始点的力、转角条件求出未知位置的力、转角及坐标点。

为了满足工程中的需要,且基本满足实际情况,做出以下几点假设:

1)拖缆在张力作用下的伸缩忽略不计;

2)拖缆为柔性的,不传递弯矩;

3)整个流动为二维流动;

4)作用于拖缆微元上的水动力系数等同于作用于无限长的拖缆。

将一小段拖缆微元进行受力分析,见图 3。

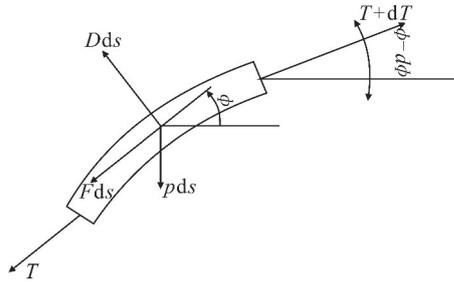


图 3 拖缆微元受力分析图

Fig. 3 Force analysis of towing cable's infinitesimal

按照切向力与法向力方向进行分解,由力的平衡可得:

$$(T+dT) \sin(d\phi) + pd\cos(\phi) = Dds \quad (9)$$

$$(T+dT) \cos(d\phi) = pd\sin(\phi) + Fds + T \quad (10)$$

式(9)、(10)中: T 为拉力; D 为单位长度拖缆法线方向的力(由 CFD 及三次样条插值计算); F 为单位长度拖缆切线方向的力(由 CFD 及三次样条插值计算); p 为单位长度拖缆在水中重力。

忽略二阶小量,由式(10)得:

$$ds = \frac{T}{D - p\cos\phi} d\phi \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)得:

$$dT = \frac{F + p\sin\phi}{D - p\cos\phi} T d\phi \quad (12)$$

由式(11)、(12)可求出不同位置拖缆拉力、转角等值。

另外:

$$dx = ds \times \cos\phi \quad (13)$$

$$dy = ds \times \sin\phi \quad (14)$$

由式(13)、(14)可求出相应位置点的坐标值。

5 计算结果分析

在实际计算时,可能会遇到不同直径的拖缆。众所周知,在 CFD 计算中,最为复杂的是采用 ICEM 来划分结构化网格,耗费了大量的人力、物力。目前,Workbench(15.0 版)后已经将 ICEM 集成进去,但是当修改拖缆直径后,ICEM 的拓扑分块处理并不能自动化解决,还是需要大量、重复性人工干预。为了较好地解决这一问题,采用 ICEM

自带的脚本语言,将划分网格中的建组、分块、划网格、导出网格全过程监控、录制并保存,当模型的直径发生变化时,重新读入一次脚本语言,即可一键化划分网格,将原本需要 2 h 左右的划分网格时间缩减至 1 min 以内。需要说明的是,建立模型的直径需要在 Workbench 中的 DM 模块下进行,建立好模型后,仅修改其直径等参数,以便于脚本语言无缝识别,否则在其它建模环境中,如 Pro/E、Rhino 等,脚本语言对点、线、面、体的识别极易出错。

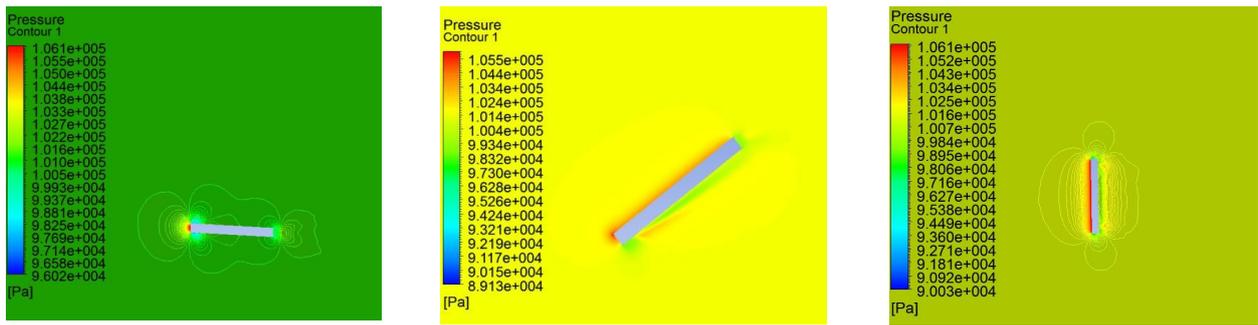
以直径为 10 mm 的拖缆(长度为 1 m)为例,其在迎流速度为 5 kn,其切向力及法向力见表 2。

表 2 10 mm 拖缆在不同攻角时切向力与法向力($v=5 \text{ kn}$)

Table 2 Tangential forces and normal forces of 10 mm towing cable under different attack angles ($v=5 \text{ kn}$)

攻角/(°)	切向力/N	法向力/N
0	0.50	0
20	0.34	6.58
25	0.28	8.58
30	0.24	10.71
35	0.20	12.72
40	0.17	14.68
45	0.14	16.60
50	0.11	18.54
55	0.09	20.24
60	0.07	21.88
65	0.05	23.06
70	0.03	24.25
90	0	32.00

以攻角为 0°、45°和 90°为例,其压力云图见图 4。需要说明的是,表 2 中攻角没有计算接近 0°和 90°的角度,因为此时网格斜角过大,划分网格质量不够好,影响了计算的精度,采用三次样条插值进行插值计算。攻角在 5°时,计算得到切向力 0.48 N,法向力 0.32 N。

图4 不同攻角拖缆微元压力云图($v=5\text{ kn}$)Fig. 4 Pressure nephograms of towing cable's infinitesimal element under different attack angles ($v=5\text{ kn}$)

6 结束语

上述计算表明,本文采用的方法有以下优势:

1)采用CFD的方法计算拖缆微元的阻力性能,考虑了切向速度与法向速度间干扰,优于以往经验公式;

2)采用参数化的方法建模、划分结构化网格,大大节省了前处理时间;

3)采用三次样条插值的方法,可以快速计算实际中任一攻角的阻力性能。

综合前三者优势,结合编程的方法,可以将整个拖曳系统(含多节点)在不同速度拖曳时的总阻力及姿态情况计算出来。

参考文献

- [1] 文邦春. 机械设计手册[M]. 5版. 北京:机械工业出版社,2010.
- [2] 连琏,高志希,沈国鉴. 水下圆形截面缆索的流体动

力性能的理论计算及试验研究[J]. 海洋工程,1987,5(2):27-35.

- [3] 连琏,郭春辉. 三维空间水下缆索性状计算初值问题的解[J]. 海洋工程,1992,10(2):56-59.
- [4] 王延辉,李晓平,王树新,等. 水下弹性缆索动力学分析[J]. 海洋工程,2005,23(3):56-59.
- [5] 张楠,沈泓萃,姚惠之. 阻力和流场的CFD不确定度分析探讨[J]. 船舶力学,2005,9(1):1-13.
- [6] 王远成,吴文权. 基于RNGk- ϵ 方程湍流模型钝体绕流的数值模拟[J]. 上海理工大学学报,2004,26(6):519-523.
- [7] 李光明,杨飞,朱学康. 水下拖缆稳态运动特性计算方法及应用分析[J]. 舰船科学技术,2011,33(8):3-6.
- [8] 王飞,黄国梁. 水下拖缆静态分析[J]. 上海交通大学学报,2008,13(2):239-244.
- [9] 潘光,杜晓旭. 鱼雷力学[M]. 西安:陕西师范大学出版社,2013.