

自动返回式采水器的阻力系数计算与方法验证

龚德俊¹, 于建清^{1,2}, 张澎湃³

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国北车集团 四方车辆研究所, 山东 青岛 266031)

摘要: 应用有限元软件 ANSYS, 以与采水器外壳接触的周围水域为研究区域, 计算其总阻力系数及最大运动速度。采用相同的数值方法计算了圆球总阻力系数, 计算结果与经典实验结论吻合良好, 证明了该数值方法的准确性。利用 ANSYS 软件计算预报采水器或其他类似的海洋仪器在流体中的阻力系数, 可指导其尺寸参数设计。

关键词: 阻力系数; 采水器; ANSYS; 自动返回式

中图分类号: O357.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)08-0016-05

20 世纪 60 年代以来, 随着海洋开发从传统开发阶段向现代开发阶段转变, 海洋科学研究进入一个全新的时期, 各式各样的采水器纷纷问世并获得成功应用, 极大地促进了海洋环境污染监测、水文物理观测和海洋地球生物化学研究的发展。

有时需要在不同深度依次采样, 获取梯度剖面的现场水体信息, 以保证分析结果的统一性、规范性和类比性。电控多瓶采水装置、尼斯金采样瓶和船用吸泵等均为目前广泛使用的梯度水样采集装置^[1]。但使用电控采水器时须同时投放电缆, 电能消耗大; 尼斯金采样瓶等在使用中依赖绞车, 所系钢丝绳受海流的影响其倾斜是无法控制的, 容易带来采样深度不准的问题; 并且挂解采水瓶比较繁琐和耗时。另外, 系有缆绳的采水系统在较浅或有茂密生长物等特殊水域中采集水样时, 往往会遇到悬浮在水中的废弃物或植物根茎的牵绊^[2]。若使用泵, 那么泵的机械力还会破坏研究中关键的絮状物等^[3]。因此, 研制一种采样深度可精确控制, 洁净无污染的无缆自动返回式采水器在海洋研究中有较大的实用意义。

为保证无缆自动返回式采水器的采水精度及确保其工作安全, 需要不断改进其外形设计, 即改变其阻力系数, 令其在采水过程中运动速度不致太大 (2.5 m/s 左右)。总阻力系数的确定一般有两种方法, 一是物理实验, 二是数值计算^[4]。在采水器设计成形之前, 不宜进行实物试验。因此, 应用计算流体力学 (CFD) 方法, 利用通用有限元软件 ANSYS 计算自动返回式采水器的外流场, 即通过数值计算方法确定采水器阻力系数。为验证该数值计算方法的准确性, 计算了球体在流体中总阻力系数, 并与经典理论值进行对比。

1 自动返回式采水器简介及其运动基本方程

1.1 自动返回式采水器简介

该采水器为硬铝合金圆柱状防水耐压设计, 无须缆绳, 外挂 4 个卡盖式结构的采水瓶。外型简图如图 1 所示 (此处省略配重和外加采水瓶相应机械机构), 采水器高 602.5 mm, 总质量约为 21 kg, 排水质量为 30.2 kg, 设计最大工作深度为水下 1 000 m。其工作过程为: 首先加载适当配重, 并编程设定各瓶采水深度。将采水器自由投放, 在负浮力作用下下沉, 到达某深度后, 抛弃配重, 继续下沉一定深度后, 上浮; 上浮过程中, 诸原开启状态的采水瓶在预定深度依次闭合, 完成剖面采水动作。在采水器上装置无线电发射信标, 预计采水器到达水面的时间, 届时手持无线电接收机进行定位回收。

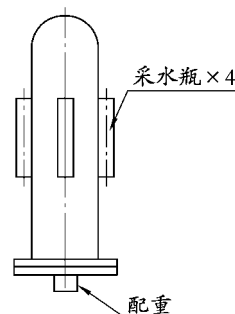


图 1 采水器外型简图

Fig. 1 The sketch map of the auto returned sampler

收稿日期: 2006-12-29; 修回日期: 2008-05-17

基金项目: 中国科学院海洋研究所创新基金项目 (ZL9)

作者简介: 龚德俊 (1946), 男, 山东临沂人, 责任研究员, 主要从事海洋仪器与系统集成领域的研究工作, 电话: 0532-82898738, E-mail: dejun@ms.qdio.ac.cn

采水器作为受控载体具有广泛的适用性,即悬挂不同的设备还可完成不同的剖面测量任务。如将采水瓶换成温盐深传感器,则可获取有深度定义的温盐剖面资料。若加装 GPS 定位接收机,便能检测海流信息。

1.2 采水器水下受力分析及运动方程

假设海水为定常、不可压、黏性流体,密度均匀。采水器水下运动规律可用三维不可压缩黏性运动的数值方法考察^[5]。计算中只考虑垂直方向的运动,其上浮过程受力示意图见图 2。

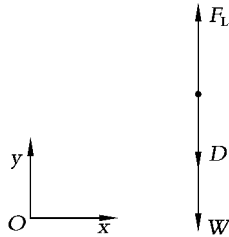


图 2 采水器上浮过程受力示意图

Fig. 2 The sampler's force system in its rising process

采水器上浮过程中的位移和速度可用下述微分方程描述:

$$m \frac{d^2s}{dt^2} = F_L - D - W \quad (1)$$

$$F_L = \rho g V \quad (2)$$

式中, s 为图 2 所示 y 方向上的位移; W 为采水器自重; F_L 为在海水中所受浮力; D 为运动过程中所受海水阻力,与运动方向相反; ρ 为海水密度, $\rho = 1\,026.8 \text{ kg/m}^3$; V 为采水器排水体积; g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

采水器自重 W 和排水体积 V 均已知,若要确定其最大上浮速度,需计算采水器上浮时所受海水阻力 D 。

2 采水器所受阻力的计算方法

采水器所受阻力是摩擦阻力与形状阻力之和。

2.1 摩擦阻力

摩擦阻力是黏性流体作用在物体表面上的摩擦切应力合力在运动方向上的投影^[6,7]。

$$P_f = \int_s \tau_0 \cos(\tau_0, x) ds \quad (3)$$

式中, P_f 为摩擦阻力; s 为物体(采水器)外壳的曲面面积; τ_0 为由于流体存在黏滞性而作用在物体(采水器)壁上的切应力; (τ_0, x) 为切应力和流动方向之间的夹角。

其中,根据牛顿(摩擦)定律^[8]:

$$\tau_0 = \mu \frac{du}{dy} \quad (4)$$

式中, μ 为运动黏性系数,取 $\mu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $\frac{du}{dy}$ 为壁面法线方向上速度梯度。

2.2 形状阻力

形状阻力是黏性流体作用在物体表面上的压力合力在运动方向上的投影,是一种压差力^[6,7]。

$$P_w = \int_s p_n \cos(n, x) ds \quad (5)$$

式中, P_w 为形状阻力; s 为物体(采水器)外壳的曲面面积; p_n 为物体(采水器)周界上的法向动压强; (n, x) 为法向动压强和流动方向之间的夹角。

2.3 总阻力及总阻力系数

总阻力与采水器的运动状况有关,用下述公式计算^[9]:

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho U_0^2 A = P_f + P_w \quad (6)$$

式中, U_0 为采水器的运动速度; ρ 为运动介质(海水)密度; A 为采水器的迎风面积(在垂直于无穷远处流的平面内的投影面积); C_D 为采水器总阻力系数,在不考虑物体表面粗糙度及环境流体的脉动时,总阻力系数是无量纲系数,只与雷诺数有关。

当采水器所受浮力与重力、阻力平衡时,运动加速度为零,即 $D = F_L - W$ 时,采水器达到最大速度。在计算出总阻力系数 C_D 情况下,便可计算上升过程的最大速度 U_{\max} ,即:

$$U_{\max} = \frac{\sqrt{F_L - W}}{\sqrt{\frac{1}{2} \rho C_D A}} \quad (7)$$

3 总阻力系数 C_D 的计算

总阻力系数 C_D 一般用试验方法确定,但试验方法不易实现。而使用有限元分析软件可模拟各种试验方案,减少试验时间和经费,在产品制造前预先发现潜在问题,实现优化设计。

作者采用大型通用有限元软件 ANSYS 对采水器的流场进行分析,有以下几个主要步骤:(1) 确定待分析流场范围并建立流域模型;(2) 设置必要的分析参数,包括计算参数和物性参数;(3) 生成有限元网格;(4) 施加边界条件;(5) 求解并进行后处理操作,检查计算结果是否合理。

3.1 流域模型的确定

空气动力学研究中,对于飞机及汽车外流场的数值计算,通常的处理方法是选取模型(飞机或汽车)尺寸倍数的距离作为计算流域^[10]。与其类似,本文选取与采水器外壳接触及周围海域为研究区域。由于采水器为轴对称体,可选用二维流场专用单元 FLUID141,通过设置单元的关键字使该单元具有轴对称算法。

3.2 紊流模型的选定

采水器流场为紊流,通过计算比较,选择零方程

紊流模型, 因其在系列模型中最简单、求解速度最快, 适合几何外形和流动特征都相对简单的问题的求解。

3.3 有限元网格划分

有限元网格划分在很大程度上影响分析结果的精确性。在对整个流域进行映射网格划分、自由网格划分的选择上进行了尝试和比较, 认为映射网格划分能够得到更精确结果, 并且生成的结构化网格适合流体力学紊流计算, 对区域边界的拟合较好。

由于紊流对网格要求更加严格, 并需计算采水器壁处的摩擦阻力和形状阻力, 因此采水器壁处要采用密集的网格。为减少计算规模, 在采水器外围区域划分稀疏的网格。因此, 整个流域的网格划分疏密不同。图 3(a) 为整个流域的网格图。

通过控制单元尺寸并细化网格, 多次计算采水器阻力系数, 直至得到与网格无关的解。

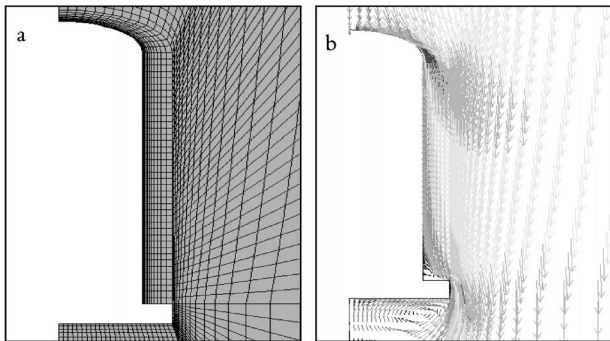


图 3 流域网格图(a)及速度矢量图(b)

Fig. 3 Mesh dividing for researched region (a) and its velocity vector plot (b)

3.4 边界条件的确定

计算流体力学中边界条件的确定将对流场计算结果产生重要影响。在相同有限元网格和求解算法的前提下, 若边界条件不同, 则计算结果相去甚远。因此, 合理确定边界条件是流场模拟计算的前提和表 1 上升速度 1.5 m/s 时不同计算流域范围下的总阻力系数

Tab. 1 Total resistant coefficient in different sizes of calculating region at 1.5 m/s

流域尺寸(采水器尺寸的倍数) 雷诺数 $Re = 9.04 \times 10^5$	摩擦阻力(N)	形状阻力(N)	总阻力(N)	总阻力系数
10	0.535	43.659	44.194	0.421
20	0.492	41.509	42.001	0.400
30	0.488	40.993	41.480	0.395
40	0.495	40.810	41.305	0.394
50	0.497	40.778	41.275	0.394
60	0.501	40.655	41.156	0.392
70	0.494	41.091	41.586	0.397
80	0.523	41.095	41.618	0.397
90	0.504	41.469	41.973	0.400
100	0.539	41.625	42.164	0.402

保证。

空气动力学常用的处理方法是, 假设机身(车身)相对地面静止, 流域入口施加物体运动时的相对速度, 采用滑移壁面假设, 其余流域边界施加“零”相对压力边界条件^[10]。参照空气动力学中的方法, 采水器流场边界条件施加为: 在流域入口和竖直边界上施加相对速度边界条件; 在对称轴上施加轴对称边界条件; 在流域出口施加相对压力边界条件; 采水器壁面上施加零速度边界条件。见图 4。

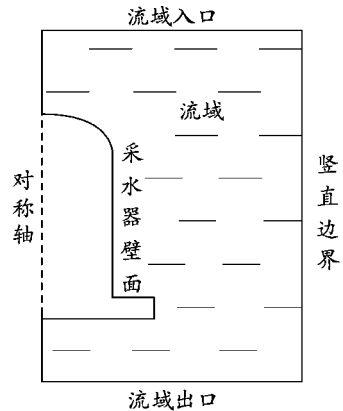


图 4 采水器流场边界条件施加示意图

Fig. 4 Boundary condition of the sampler's flow field

3.5 计算结果

应用 ANSYS 参数化设计语言 APDL 编程完成建模、分网、加载和计算参数设置。通过求解可得流域内压力场、速度场, 图 3(b) 为流域内速度矢量图。按式(3)~(7)进行后处理编程, 得到摩擦阻力、形状阻力、总阻力及总阻力系数。

表 1 为假定采水器上升速度为 1.5 m/s 时, 连续改变流域尺寸, 计算得到的总阻力及总阻力系数。尽管尺寸变化幅度极大, 但计算结果趋于收敛, 说明该计算方法具有稳定性。但随着流域尺寸变大, 网格数量增大很多, 计算时间明显变长。

由表 1 知,当计算流域尺寸为采水器尺寸的 70 倍时,可认为计算结果为收敛解。连续改变采水器上升速度,得到总阻力系数随雷诺数变化曲线。如图 5 所示。

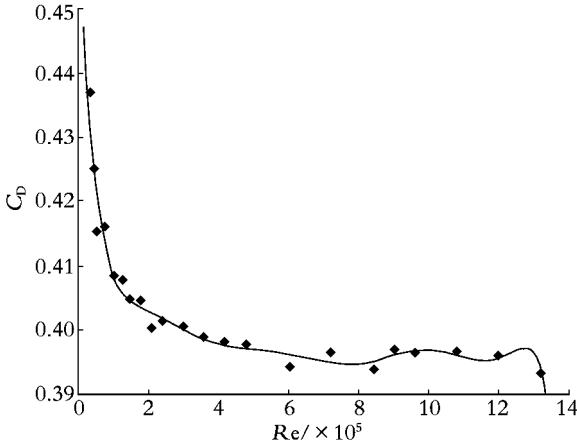


图 5 采水器总阻力系数和雷诺数的关系

Fig. 5 The relationship between the total resistant coefficient of the sampler and its Reynolds

按式(7)计算,可得采水器最大上升速度约为 2.3 m/s。

4 方法验证

对均匀来流绕球体的流动,国内外学者进行过大量的研究。不仅有典型的球体总阻力系数-雷诺数曲线图,更有基于实验基础上的经验公式。本文采用和采水器计算相同的数值方法计算球体在不同雷诺数下的阻力系数,并将计算结果与球体总阻力系数曲线图及经验公式估算值相比较,以验证该数值计算方法的准确性和可行性。

对于球体,阻力系数 C_D 与雷诺数 Re 间关系有以下结论^[11, 12]:

$$\begin{cases} Re \leq 1 \text{ 时, } C_D = \frac{24}{Re}; \\ Re = 1 \sim 8 \text{ 时, } C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right); \\ Re = 10 \sim 10^3 \text{ 时, } C_D = \frac{13}{Re}; \\ Re = 10^3 \sim 2 \times 10^5 \text{ 时, } C_D \text{ 几乎与 } Re \text{ 无关。} \end{cases} \quad (8)$$

式中, Re 为雷诺数, $Re = \frac{U_0 d}{\mu}$; U_0 为球体运动速度; μ 为运动粘性系数; d 为球体直径。

$$\text{球体的迎风面积: } A = \frac{1}{4} \pi d^2.$$

ANSYS 计算的球体总阻力系数和经验公式(8)的计算值,见表 2;图 6 为圆球阻力系数的 ANSYS 计算值和“圆球阻力系数与 Reynolds 的关系图^[12]”

的经典实验值的对比。

表 2 球体总阻力系数的 ANSYS 计算值和经验公式比较

Tab. 2 The comparison between ANSYS predicting results and experiment formula results of the ball's total resistance coefficient

Re	ANSYS 计算	经验公式 ^[11, 12]	差值(%)
2	15.014	16.500	9.01
20	2.747	2.907	5.50
400	0.661	0.650	1.69
1.6×10^3	0.476	0.480	0.83
4×10^3	0.433	0.420	3.10
4×10^4	0.419	0.480	12.71
6×10^4	0.416	0.420	0.87
4×10^5	0.271	0.260	4.23

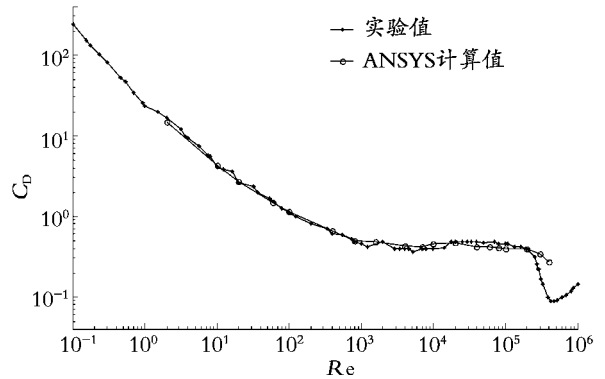


图 6 圆球阻力系数的 ANSYS 计算值^[12]和经典实验值与雷诺数关系图的对比

Fig. 6 The comparison between ANSYS predicting results and the experiment results of the ball's total resistance coefficient

由表 2 及图 6 可知,对于球体阻力系数计算,ANSYS 计算结果和上述经验公式及“圆球阻力系数与 Reynolds 的关系图^[12]”均吻合得较好,表明用 ANSYS 软件来计算预报采水器或其他形状简单实体在流体中的阻力系数是可行并且准确度较高的。考虑到经验公式有其局限性,实验结果亦受实验条件及实验经费影响,因此很多情况下还需要借助成熟 CFD 软件进行数值计算。

5 结语

本文应用 ANSYS 有限元软件对采水器的外流场进行了仿真计算,得到其总阻力系数随雷诺数变化的关系,为外形参数的设计和修正作参考。通过研究得到以下结论:(1) 最大上升速度是采水器采水

精度的重要影响因素, 采水过程中其他时刻的采水误差均小于等于最大上升速度时的采水误差。通过计算得到采水器最大上升速度为 2.3 m/s, 采水瓶盖关闭指令响应时间约 100 ms, 因此采水深度误差可控制在较小范围内。(2) 应用 ANSYS 计算得到的球体阻力系数结果与经验公式或实验值误差在 13% 以内或更小。运用数值方法预算采水器在海水中运动总阻力系数和最大上升速度具有较高的准确性。今后还将对成型产品进行试验验证。(3) 计算时没有考虑采水瓶, 会对仿真结果产生一定影响, 但考虑到采水瓶几何尺寸较小, 所以认为简化产生的影响不大。对采水瓶的更详细、更接近实体的三维有限元模型仿真计算是下一步研究的内容。

参考文献:

- [1] Wommack K E, Willamson S J, Sundbergh A, *et al.* An instrument for collecting discrete large volume water samples suitable for ecological studies of microorganisms [J]. *Deep Sea Research I*, 2004, 51: 1781-1792.
- [2] Paggi J C, Mendoza R O, Debonis C J, *et al.* A simple and inexpensive trap tude sampler for zooplankton collection in shallow waters [J]. *Hydrobiologia*, 2001, 464: 45-49.
- [3] Grayson R P, Plater A J. A low-cost, large volume general purpose water sampler [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2005, 33: 123-128.
- [4] 孙涛, 黄银水, 陶建华. 抛弃式温盐探头运动状态的数值模拟及其实实验验证 [J]. *海洋通报*, 2002, 21(2): 69-76.
- [5] 韩光, 陶建华. 新型航空海水温度、盐度、深度探头运动特性的计算方法和实验验证 [J]. *水动力学研究与进展*, 2001, 15(4): 467-471.
- [6] 许维德. 流体力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979. 266.
- [7] 赵学端. 水力学及空气动力学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1959. 463-464.
- [8] 普朗特 L. 流体力学概论 [M]. 郭永怀, 陆士嘉译. 北京: 科学出版社, 1984. 179.
- [9] 巴切勒 G K. 流体动力学引论 [M]. 沈青, 贾复译. 北京: 科学出版社, 1997. 392.
- [10] 吕明志, 高敦岳, 傅立敏. 计算机数值仿真在汽车外流场分析方面的应用研究 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2002, 14(2): 181-184.
- [11] 陈卓如, 金朝铭. 工程流体力学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1987. 449.
- [12] 施里希廷 (Schlichting H). 边界层理论上册 [M]. 徐燕侯译. 北京: 科学出版社, 1988. 16, 128.

Numerical calculation of the resistance coefficient of an auto-returned seawater sampler and its method verification

GONG De-jun¹, YU Jian-qing^{1,2}, ZHANG Peng-pai³

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. CNR Sifang Rolling Stock Research Institute, Qingdao 266031, China)

Received: Dec., 29, 2006

Key words: resistance coefficient; seawater sampler; ANSYS; auto-returned

Abstract: Taking the water around the sampler as research area, FEM software, ANSYS, is utilized to calculate the sampler's resistance coefficient and its maximum rising speed. Meanwhile, the same numerical calculation method is employed to calculate the ball's total resistance coefficient, and the results agree with existed experimental data quite well. The ANSYS is able to calculate and report the resistance coefficient of the sampler or other marine instruments to instruct the instrument design.

(本文编辑: 刘珊珊)