

基于 CFX 数值模拟的 XBT 内部传感器布置研究

吕文龙^{1,2}, 王永杰^{1,2*}, 李 芳^{1,2}

(1. 中国科学院半导体研究所 传感器技术国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘 要: XBT 是可投弃式温深剖面测量仪的简称, 用以测量海水不同深度的温度。为了研究 XBT 探头内部光纤传感器的合理布放位置, 以尽可能减小温度与压力测量的误差, 针对探头在水中的主要运动状态, 运用 CFX 软件做瞬态温度响应模拟, 包括阶跃温度响应和线性温度响应; 然后对不同运动速度的 XBT 探头做稳态数值模拟, 着重分析了其导流腔内水流速度与压力分布。模拟结果表明, 线性响应引起的温度测量误差要小于阶跃响应, 温度传感器宜放在导流腔中靠前的位置, 同时导流腔后端存在水流静压为 0 的位置, 适合压力传感器的布放。本文针对光纤 XBT 探头所做的流体仿真, 为内部温度、压力传感器的布置提供了理论指导, 对于同类传感器的设计也具有一定的参考价值。

关键词: 可投弃式温深剖面测量仪(XBT); CFX; 光纤传感器; 温度; 压力

中图分类号: P715.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-2029(2020)02-0047-06

可投弃式温深剖面测量仪(XBT)是一种测量不同深度海水温度的仪器, 在海洋科学研究、海洋环境调查及军事领域有广泛应用, 具有简便、快速及廉价等优点。XBT 探头是鱼雷形状, 如图 1 所示, 探头通常从船尾投放, 可完成水温的快速测量。热敏电阻安放在头部内的导流腔中, 探头下落的同时, 热敏电阻感应周围海水的温度, 并将数据传送给船上的接收系统^[1]。

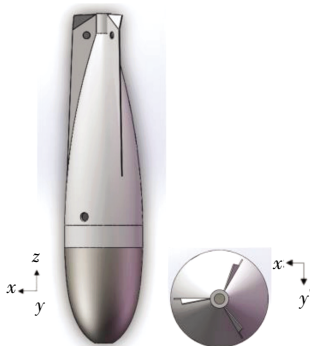


图 1 XBT 探头的主视图及俯视图

过去的数十年间, 学者们对 XBT 进行了大量的研究工作。1984 年, 美国学者 Green^[2]考虑了探头质量、阻力系数、导线损耗等因素, 提出了 XBT 下落运动方程。后来, 有学者开始使用 CFD 方法研究 XBT 在水中的流动状态和运动状态。为了得到阻力系数, 2012 年, Abraham^[3]利用 CFX 软件对以一定速度旋转的 XBT 进行了数值模拟; 2012 年, 国内肖鸿等^[4]用 VOF 方法模拟了 XBT 的下落过程, 以研究其运动规律; 近些年, 有学者提出用光纤光栅来取代其内部的热敏电阻, 通过光纤光栅来测量不同深度海水的温度和压力^[5]。2017 年, 徐金随等^[6]对光纤 XBT 进行了流体仿真, 研究了不同外形设计的探头。学者们对 XBT 的研究, 多是基于探头的运动状态及外部流场情况, 很少关注其内部结构设计。现有文献虽然有对于 XBT 的主要外形尺寸的描述^[7], 但对探头内传感器的布放细节探讨的较少。考虑到传感器的布放位置会影响测量的准确度, 本文通过 CFX 软件对 XBT 探头进行了流体仿真, 通过模拟其入水后

收稿日期: 2019-12-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA11040201); “科学”号高端用户资助项目(KEXUE2018G08)

作者简介: 吕文龙(1994-), 男, 硕士, 主要研究方向为光纤传感技术应用。E-mail: lwl@semi.ac.cn

通讯作者: 王永杰(1979-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光纤传感技术与应用研究。E-mail: wyj@semi.ac.cn

的瞬态热响应及稳态流场情况,来探讨导流腔内不同位置对温度、压力测量准确度的影响,从而为光纤传感器的布放提供参考。

1 方法

本文采用了数值模拟的方法,对 XBT 探头进行了研究,其剖面形状如图 2 所示,关键参数在表 1 中给出。在本研究中,海水可认为是粘性不可压缩的流体,探头在水中受流体控制方程的制约,如连续性方程、N-S 方程,同时为使方程封闭可解,需引入湍流模型。另外,若涉及热交换,还要考虑能量守恒方程。

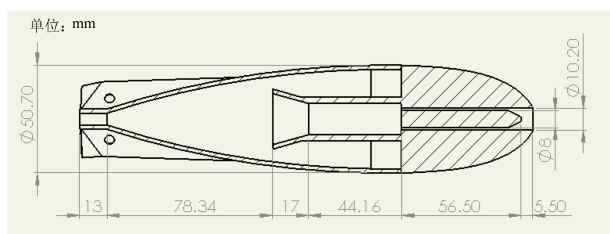


图 2 XBT 探头剖面尺寸

表 1 本研究 XBT 探头参数

质量/g	最大直径/mm	尾翼弯折角度/(°)	长度/mm
680.72	50.7	20	214

1.1 控制方程

XBT 探头在海水中的下沉运动,周围流体的运动满足连续性方程和 Navier-Stokes 方程^[8]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(\vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (2)$$

式(1)中: ρ 表示流体密度; t 表示时间; div 代表散度; $\vec{u}$ 表示流体微元团的速度矢量。

式(2)中: u_i 和 u_j 代表速度分量, $i=1,2,3$, $j=1,2,3$; p 代表单位体积流体的静压; f_i 是流体微元团所受的其他外力分量。其中粘性项可表示如下:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(u_j)}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

1.2 湍流模型

探头周围环境是粘性、不可压缩的非稳态流场,这里采用 SST 模型,它是在 Menter 提出的标准 $k-\omega$ 模型基础发展而来的^[9],结合了 $k-\varepsilon$ 模型在主

流模拟与 $k-\omega$ 模型在近壁模拟的优点基础上,考虑了湍流剪应力的输运,能对各种来流进行准确的预测。SST 模型的控制方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (5)$$

式中: $\tilde{G}_k$ 和 G_ω 分别代表 k 和 ω 的产生项; Y_k 和 Y_ω 分别代表 k 和 ω 的湍流耗散项; 同时, Γ_k 和 Γ_ω 代表 k 和 ω 的有效扩散系数。

1.3 能量守恒方程

对测量仪进行瞬态温度响应模拟时,涉及到温度的变化,需要考虑能量守恒方程,在 CFX 软件的模拟中采用 Thermal Energy 模型^[10],仅考虑对流换热及热传导,忽略流体动能引起的变化,热控制方程为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \tau: \nabla U + S_E \quad (6)$$

式(6)中: 左边两项分别为瞬态项和对流项; $\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$ 代表热传导项; $\tau: \nabla U$ 代表粘性耗散项; S_E 代表流体的内热源。

2 模拟设置

2.1 几何模型建立与网格划分

采用 Solidworks 软件建立分析模型,如图 3 所示,计算域形状为一个大圆柱,长度为 XBT 长度的 10 倍,直径取为测量仪最大截面直径的 10 倍,以保证探头周围的流场充分发展。然后,将模型导入网格划分软件 Mesh,进行非结构化网格划分,共划分 2 802 056 个网格单元,如图 4 所示。

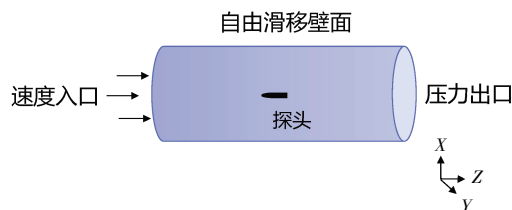


图 3 探头模型示意图

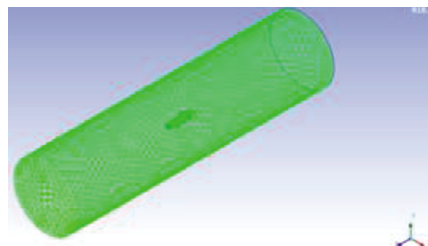


图 4 计算域网格划分示意图

2.2 边界条件设定及求解

(1) 瞬态温度响应模拟

在CFX软件中,边界条件如图3所示。探头各笛卡尔速度分量为0,计算域采用速度入口,迎流速度取6 m/s;对立面设为压力出口边界,平均压力设为1 atm;计算域外边界设为自由滑移壁面;取XBT固体域与流体域交界面边界为流固交界面,采用CFX隐式GGI界面设置^[1],通过设置速度入口温度对应不同瞬态温度响应模型。

计算域初始化设置,XBT探头与周围水体温度设为298 K,关于温度响应模拟采用瞬态模式,求解模式使用高阶,湍流模型选取SST模型,模拟总时长为0.5 s,时间步长为0.01 s,收敛残差RMS取 10^{-4} ,以保证求解精度。

(2) 稳态流场模拟

稳态流场模拟主要设置边界条件,如图3所示。探头同样无速度分量,设置计算域的速度入口、压力出口及自由滑移壁面,同上。计算域温度为288 K,探头外表面设为无滑移壁面,速度入口速度值对应探头下沉速度,最大收敛步数为100步,收敛残差同样取 10^{-4} 。

3 结果与讨论

从有关XBT文献来看,水面温度与XBT探头自身的温差会引起温度测量误差^[12],有必要分析不同情形下探头的温度响应误差。根据XBT探头投弃的情景,探头刚入水时,两者存在一定温差,可简化为阶跃温度响应模型;根据海水温度分布特点,温度近似随深度降低,温跃层水温变化较为明显^[13],会引起探头的温度测量误差,假设温度随深度线性减小,则探头稳定下沉时的温度变化可简化为线性温度响应模型。最后,针对稳定下沉的探头进行稳态流场仿真,并分析了迎流速度对其传感区域流场的影响。

3.1 阶跃温度响应

根据XBT探头刚入水这一情景,考虑用CFX软件模拟温差为10 K的阶跃温度响应,设置计算域初始温度为298 K,速度入口温度为288 K,模拟了0.5 s内整个流场的温度变化。在测量仪内外每隔0.025 m取一点,共5×2个点,如图5所示。通过取导流腔和外部同一深度的温度差值,以分析温度响应的误差,图6表示这些点的阶跃温度响应结果,整体来看,XBT导流腔内的温度在约0.35 s时,

才接近外面水体温度。样本点4和5处的温度响应较慢,推测是海水进入XBT空腔后形成紊流,减缓了流动速度。

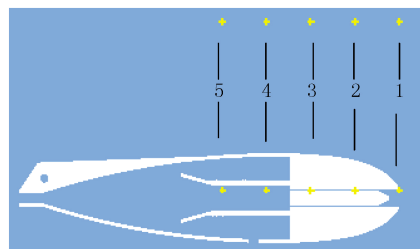


图5 测量仪内外5×2个样本点

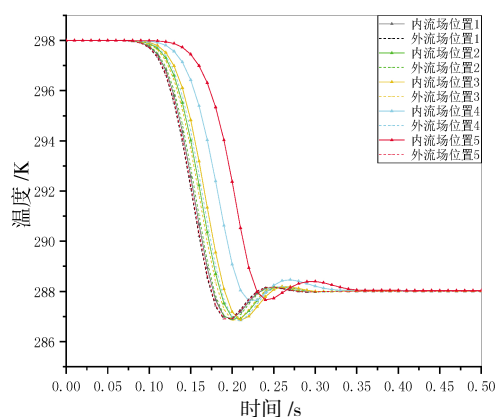


图6 不同样本点处阶跃温度响应曲线

3.2 线性温度响应

根据海水温度随深度降低这一特点,用CFX模拟XBT探头在水中线性温度响应。为方便起见,将计算域的温度初始化为298 K,速度入口温度设为(298-30 t) K,同样针对内外5个样本点进行温度分析。图7是其线性温度响应结果。

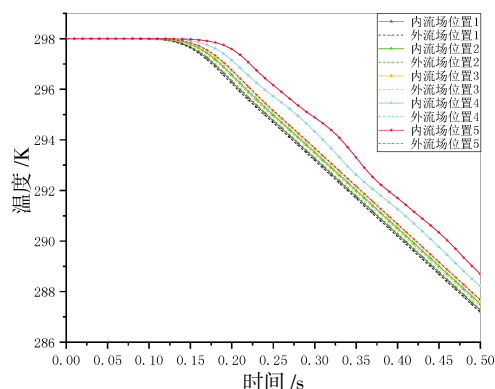


图7 不同样本点处线性温度响应曲线

图8对同一时刻两种温度响应做了对比,导流腔中越接近头部的的位置,温度响应误差越小,因此温度传感器宜放在腔内靠前的位置。对比两种温度响应的误差,线性响应的温度误差小于阶跃响应的误差。在实际投放前,将XBT探头放在与海水温度

接近的水桶浸泡,有利于减小温度传感器的响应误差。

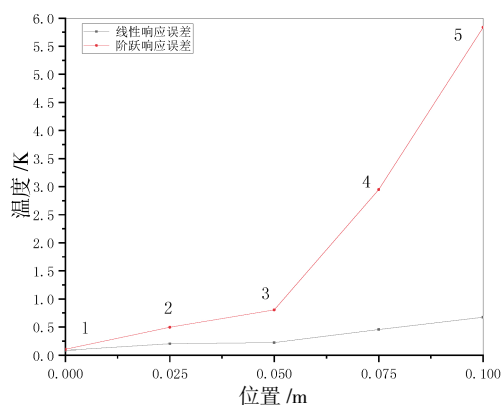


图 8 测量仪不同位置温度误差比较

3.3 XBT 稳态流场分析

参考之前学者对 XBT 的研究^[4],探头释放后经历了短暂的加速过程,之后速度就趋于稳定,直至测量结束。针对速度稳定阶段,采用 CFX 模拟其流场状态,假设其迎流速度为 6 m/s,探头保持静止,对流场稳态分析,得到其周围的流速与静压分布情况,如图 9~图 10 所示。

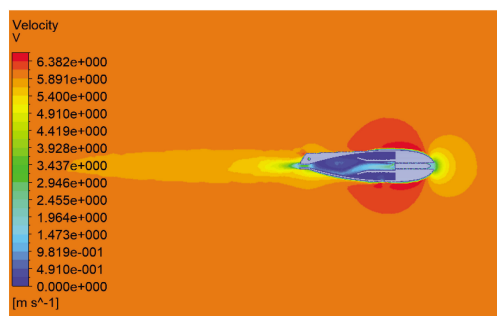


图 9 测量仪周围速度云图

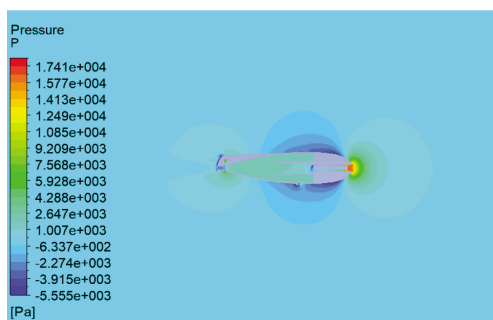


图 10 测量仪周围压力云图

从图 9 和图 10 的结果来看,探头周围的流速分布趋势大致与压力分布相反,头部前存在一个高压区,而头部的两侧水流流速较高,说明探头下沉时,周围流体沿头部分离,同时造成一定的压差阻力^[4]。

为了分析迎流速度对其流场的影响,对迎流条件为 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s 的 XBT 探头, 分别做了稳

态模拟。

为了观察导流腔附近的海水速度与静压分布,如图 11 所示,在导流腔内作一条线段($z = -0.1 \sim 0.15$ m),通过 CFD-Post 进行数据处理,提取该线段上的速度与压力数据。

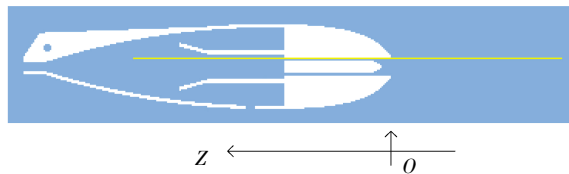


图 11 测量仪剖面示意图

导流腔附近的流速分布如图 12 所示,水流流速在入水孔处急剧减小,而由于探头头部前端有一高于来流静压的局部高压区,导致流速迅速上升,虽然探头的迎流条件有差异,但流速分布趋势类似,而且腔内传感区域流速平稳,说明流动顺畅,便于传感器的测量。但腔内流速均略低于外场流速,小将近 1 m/s,推测腔内水流交换的延迟可能造成传感器测量的误差。

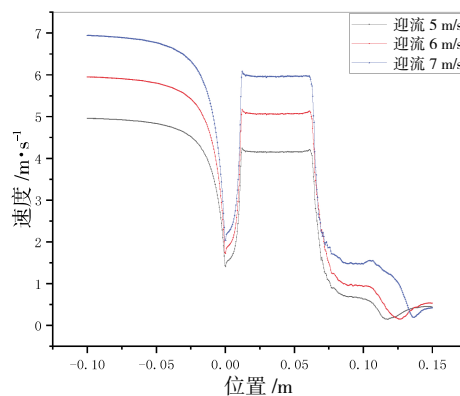


图 12 XBT 导流腔传感区域流速分布

而从图 13 模拟的压力结果来看,探头头部前原点附近存在一个压力“尖峰”,跟压力云图中头部前的高压区相对应。迎流速度的变化会引起头部前压力“尖峰”较大的差异,而导流腔内传感区域压力差别较小,均存在一个表压为 0 的“零点”位置,在 $z = 0.049$ m 附近,是压力传感器的最佳布放位置,而且迎流流速变化所引起“零点”位置的偏移可以忽略。若压力传感器要求来流引起的压力误差不超过 500 Pa,可将其布置于导流孔内 $z = 0.045 \sim 0.051$ m 处。

4 结论

(1) XBT 探头入水过程中,环境温度突变会使温度传感器产生响应误差,其中线性响应引起的温

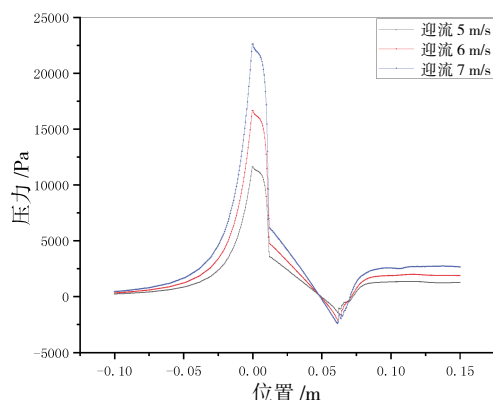


图13 XBT导流腔传感区域压力分布

度误差远小于阶跃响应,温度传感器宜放置在导流

腔中靠前的位置。

(2) 针对XBT探头在水中的稳定下落过程,水流的冲刷引起导流腔前端的压力“尖峰”,腔内后端存在水流静压为0的过渡区域,很适合压力传感器的布置,有利于减小来流引起的误差,较为准确地测量对应深度海水的压力。

通过CFX所做的关于XBT探头的瞬态温度响应模拟和稳态流场模拟,为温度、压力传感器的布放位置提供了参考。至于在实际中如何确定温度传感器与压力传感器布置的相对位置,以保证数据的同步性,以及如何对XBT探头内的光纤传感器封装,有待后续的深入研究。

参考文献:

- [1] Abraham J P, Baringer M, Brindoff N L, et al. A review of global ocean temperature observations: Implications for ocean heat content estimates and climate change[J]. Reviews of Geophysics, 2013, 51(3):450-483.
- [2] Green A W. Bulk dynamics of the expendable bathythermograph (XBT)[J]. Deep-Sea Research, Part A (Oceanographic Research Papers), 1984, 31(4):415-426.
- [3] Abraham J P, Gorman J M, Reseghetti F, et al. Drag coefficients for rotating expendable bathythermographs and the impact of launch parameters on depth predictions[J]. Numerical Heat Transfer Applications, 2012, 62(1):25-43.
- [4] Xiao H, Zhang X. Numerical investigation of the fall rate of a sea-monitoring probe[J]. Ocean Engineering, 2012, 56: 20-27.
- [5] Zhao Q, Chen S, Zhang K, et al. An optical fiber expendable seawater temperature/depth profile sensor [C]// Optical Information and Network (Optical Fiber Sensors). 2017.
- [6] 徐金随,程浩,相冰,等. XBT探头外形数值模拟及实验研究[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(2): 63-67.
- [7] Kizu S, Sukigara C, Hanawa K. Comparison of the fall rate and structure of recent T-7 XBT manufactured by Sippican and TSK[J]. Ocean Science, 2011, 7(2): 231-244.
- [8] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [9] Menter F. Two equation eddy-viscosity models for engineering applications[J]. AIAA J, 1994,32(8):1598-1605.
- [10] CFX 12.0 Help Documents. “Conjugate Heat Transfer” ANSYS CFX-Solver Theory Guide[M]. Canonsburg:ANSYS, Inc., 2009.
- [11] 王晓辉. 155 mm速射舰炮身管热响应分析及主动冷却系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [12] 张平,唐锁夫,屈科,等. 国产XBT海上测试及实际使用效果分析[J]. 声学技术, 2012, 31(6): 570-573.
- [13] 袁琳. 1871-2010年南海及毗邻的西北太平洋海温的时空变化分异[D]. 上海: 上海师范大学, 2017.
- [14] 刘孟德,陈维山,刘杰. 基于CFD的投掷式温深计探头流场分析[J]. 山东科学, 2012, 25(5): 22-24, 29.

Study on the Layout of Internal Sensors in XBT Based on CFX Numerical Simulation

LV Wen-long^{1,2}, WANG Yong-jie^{1,2}, LI Fang^{1,2}

1. *State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;*

2. *College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract: XBT, the abbreviated form of the Expendable Bathy-Thermograph, can be used to measure the temperature of seawater at different depths. In order to study the optimal placement of the fiber optic sensors in XBT probe and minimize the error of measuring temperature and pressure, this paper uses CFX software to simulate the transient temperature responses, including step temperature response and linear temperature response. Considering the main movement of the probe in water, the steady-state numerical simulation is made about XBT probe at different velocity, and the distribution of water velocity and pressure in diversion cavity is analyzed in detail. The simulation results show that the thermometric error caused by the linear response is less than the step response, the temperature sensor should be placed forward in the diversion cavity, and there is a position where the static pressure is 0 at the end of diversion chamber, which is suitable for the placement of the pressure sensor. The fluid simulation in this paper provides a reference for the layout of fiber optical temperature and pressure sensors in fiber XBT probe, and there is some reference value for the design of similar sensors.

Key words: XBT; CFX; fiber optic sensor; temperature; pressure