

高压空气吹除压载水舱的关键技术仿真

袁东红¹,汪云²,幸福堂²,梅丹²

(1. 海军驻701军代表室,湖北武汉430000;2. 武汉科技大学资源与环境工程学院,湖北武汉430081)

摘要:高压空气吹除主压载水舱系统的性能决定着潜艇事故时的自救能力和轻壳体的吹除安全程度,先进的数值模拟计算仿真方案能够代替无法实现的深水实验,获取气瓶、管道及水舱中的流动特征,为潜艇的设计提供理论支持。采用非定常一维可压缩有摩擦绝热流动理论对气瓶和管道进行计算,得到了吹除过程中的气瓶、管道内的瞬时气体状态参数,并将之作为水舱模拟仿真的进口边界条件;使用欧拉-欧拉多相流模型,基于 $k-\omega$ 的剪切应力输运湍流模型,对压载水舱进行三维非稳态仿真计算,得到了水舱内压力随时间和空间的分布规律、吹除结束时刻舱内气液分布情况等数据。所有计算结果与实际实验结果对比吻合良好,说明了计算方案正确可行。

关键词:高压空气吹除系统;计算方案;非定常流动;气液两相流;数值模拟

中图分类号:U664.83⁺²

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2014.04.013

0 引言

高压空气系统是潜艇潜浮系统的重要组成部分。高压气吹除主压载水舱的性能决定着潜艇事故时的自救能力和轻壳体的吹除安全,因此有必要开展潜艇高压气吹除主压载水舱的理论研究、仿真研究和物理模型实验研究,通过不同研究手段获取高压气吹除主压载水舱的过程特性^[1-6]。本研究致力于探索可靠、可行的数学仿真方法用于潜艇高压系统的气-液流动计算,为潜艇的设计提供必要的支持和参考。

1 高压吹除物理模型

高压空气吹除压载水舱,通过压载水的排出实现潜艇的上浮。水舱在上浮过程中,出口背压不断变化,进口空气的压力也随着时间逐步减小。这一气-液两相流动过程是典型的三维、非定常、紊流流动,流动介质空气为可压缩流体,水为不可压缩流体。

1.1 可压缩空气流动

通常将潜艇上用于吹除的气瓶等效为一个大气瓶,整个管系用一根等效长度为 L_D ,等效直径为 D 的管路代替,被吹除的所有压载水舱合并成为一个大水舱,如图1所示。图1中, T_i 为气瓶内空气温度,在吹除过程中变化,初始值为 T_0 ; P_i 为

气瓶内空气压力,在吹除过程中变化,初始值为 P_0 ; ρ_i 为气瓶内空气密度,在吹除过程中变化,初始值为 ρ_0 ; m 为气瓶内空气质量,在吹除过程中变化; P_B 为压载水舱内压力,即吹除背压。

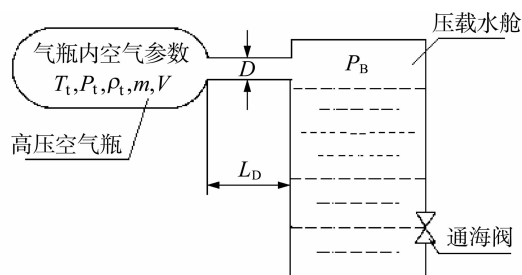


图1 应急吹除系统简化图

Fig. 1 Sketch of the emergency blowing system

高压空气从截面1到截面2的流动属于典型的可压缩流动,其特点包括:(1)放空短路较短,但压降极大;(2)在短距离、大压差条件下,管路沿途气体的温度、密度、流速差异极大;(3)管路中任意点的流动参数均随时间变化。气体在流动过程中几乎与外界没有热交换,整个流动过程可视为一维可压缩流体有摩擦绝热流动^[7-8]。

1.2 两相流模型

当高压水舱流入主压载水舱后,主压载水舱内混合了气和气,一方面气体不断膨胀将水排出舱外,另一方面水和气体不断混合,因此压载水舱中的流动是气-液两相流动,而依据单相流动建立

收稿日期:2014-04-08

基金项目:国家海军装备科研项目(40308)

作者简介:袁东红(1964-),男,四川犍为人,高级工程师。研究方向:船舶系统和装置。

的压载水舱排水模型不能真实反映压载水舱中气-液两相流动情况. 本文选取通用多相流模型中的VOF (Volume of Fraction) 模型进行数值模拟^[9].

1.3 湍流模型

研究中湍流模型选用SST (剪切应力输运) $k-\omega$ 模型. 该模型综合了 $k-\epsilon$ 和 $k-\omega$ 湍流模型在边界层内外计算的优点, 能够准确及时预测分离的特性. 且该模型具有以下优点: (1) 模型能适应压力梯度变化的各种物理现象; (2) 可应用黏性内层, 通过避免函数的应用, 精确地模拟边界层的现象, 无需使用较容易失真的黏性衰减函数.

2 三维非定常边界条件的确定

高压吹除过程中气体的流动过程是非稳态过程, 而其他研究者普遍采用定常条件作为三维仿真的边界条件, 不能真实的得到水舱内的流动细节. 水舱入口的非定常条件目前也未见成熟的计算方法. 本研究从高压吹除的基本物理过程入手, 细致的分析流动状态, 以可压缩有摩擦的绝热流动理论为基础, 结合数学归纳方法, 得到了水舱入口的非定常条件, 为后续精确地三维仿真计算奠定了基础. 气瓶绝热, 在高压空气从气瓶到气瓶出口流动过程中, 无热交换, 同时不存在机械能的耗散, 因此空气从气瓶内到截面1的流动为等熵流, 从截面1到截面2的流动 (即管路内气流) 为等截面摩擦绝热流. 吹除过程中, 假定 (1) 各气瓶内气状态参数变化是一致的; (2) 假设管道设计合理, 管道出口处马赫数为1; (3) 潜艇所处深度不同引起的压力损失与摩擦效应相比可以略去不计; (4) 管路沿程阻力系数为常数^[8].

尽管管道内气体状态是随着时间不断变化, 如将管道气体流动的总时间分为 N 个相同的时间段, 当 N 足够小的时候, 在每个时间段内, 管道各处气体状态可视为恒定, 即在每一个时间段内可以按照恒定流动的方法对气体状态进行计算.

在第一个 Δt 时间段内:

(1) 截面1处马赫数计算: 由等截面摩擦管流流动参数关系式^[7-8]:

$$\left(\frac{1}{a_1^2} - \frac{1}{a_2^2}\right) - \ln \frac{a_2^2}{a_1^2} = \frac{2k}{k+1} 4C_f \frac{L}{d} \quad (1)$$

式(1)中: C_f 为摩擦因数, k 为绝热系数, 空气取1.4; a_1 、 a_2 分别为截面1和截面2流动的速度因数.

$$Ma_1 = a_1 \sqrt{\frac{2}{(k+1) - (k-1)a_1^2}} = a_1 \sqrt{\frac{1}{1.2 - 0.2a_1^2}} \quad (2)$$

(2) 由气动函数算出截面1处的气体状态参数:

$$\frac{P_1}{P^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} a_1^2\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(1 - \frac{a_1^2}{6}\right)^{3.5} \quad (3)$$

其中 P^* 为滞止压强, 在气瓶静止的状态下 $P^* = P_0$.

(3) 由截面1处的气体状态计算截面2处的气体状态:

等截面摩擦管流气流参数关系式:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{Ma_1}{Ma_2} \left[\frac{1 + \frac{k-1}{2} Ma_1^2}{1 + \frac{k-1}{2} Ma_2^2} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{Ma_1}{Ma_2} \left[\frac{1 + 0.2 Ma_1^2}{1 + 0.2 Ma_2^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

(4) 上一个时间段内气瓶内气体减少的质量:

$$\Delta m = \rho_1 \cdot Ma_1 \cdot c \cdot A \cdot \Delta t =$$

$$\rho_0 \cdot \left(1 - \frac{a_1^2}{6}\right)^{2.5} \cdot Ma_1 \cdot c \cdot A \cdot \Delta t \quad (5)$$

(5) 第二个时间段内气瓶的初始状态:

定义第二个时间段内气瓶的初始状态为 P_{0t} , 空气从气瓶到截面1的流动为等熵流动, 则有等熵流动公式:

$$\frac{P}{\rho^k} = C \quad (6)$$

结合理想气体状态方程得到:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T}{m} (k-1) \frac{dm}{dt} \quad (7)$$

由式(7)求出在第一个时间段内的温度变化, 并结合质量变化, 得出气瓶在第二时间段时的状态.

$$P_{0t} V = (m - \Delta m) R (T - \Delta T) \quad (8)$$

通过以上算式, 得到每个时刻 ($\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, n\Delta t$) 截面2处 (即水舱入口) 的气体状态参数, 据此数据进行拟合, 得到气体的压力、温度、流速随时间变化的关系式, 作为后续三维仿真的边界条件.

3 模拟结果分析及实验验证

本研究针对图2所示的水舱进行了数值模拟及实验研究. 为了研究不同位置上压力随时间的变化, 在水舱壁面上均匀的取5个点, 如图3所示, 从上到下依次为 point 1、point 2、point 3、point 4、point 5.

计算需要的边界条件包括入口速度 346 m/s、空气入口压力 1.67 MPa, 空气入口温度 299 K, 背压 0.033 MPa, 另有壁面条件, 水和空气的物性参数等.

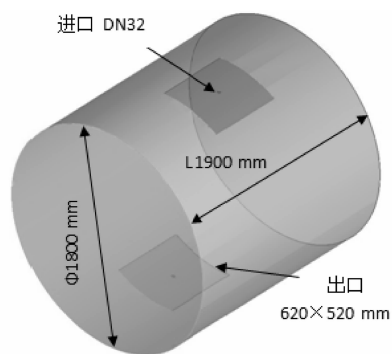


图 2 水舱几何结构示意图

Fig. 2 The geometry sketch of ballast tank

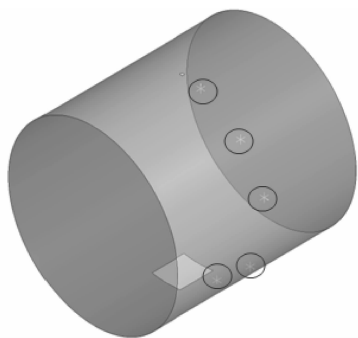


图 3 水舱上压力测点分布

Fig. 3 The distribution of

pressure measuring point on tank wall

计算采用 $sst\ k-\omega$ 紊流模型,应用高阶离散方法对微分方程进行离散和隐式求解,其残差控制在 1×10^{-4} 视为收敛。

3.1 测点压力随时间的变化

图 4 所示的是在表 1 所示工况下 5 个监测点压力随时间的变化情况。观察图 4,在吹除初期的 1~2 s 间,点 1 和点 2 位于气体区域,其压力值上下振荡,此时高压气体和水正进行着剧烈的传热和传质交换;点 3~5 处于液体区,其压力值平稳。待 3 s 以后,吹除状态平稳,5 个点的压力值随着时间的增加小幅变化。

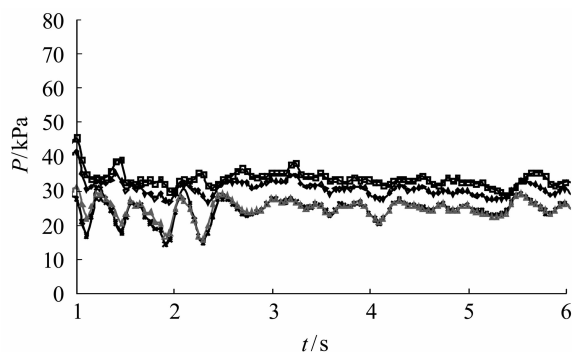


图 4 5 个测点的压力随时间的变化

Fig. 4 Time-varying pressure value of the 5 measuring points

注: —□— point 1; —△— point 2; —○— point 3; —◇— point 4; —×— point 5

3.2 吹除结束时刻舱内的气-液分布

在 5 s 时刻,舱内气-液交界面如图 5 所示。水舱体积比较小,进气正对着出口且相距较近,开始吹除后,气体直接从进口到出口形成射流,并未在水舱内完全膨胀,气流柱与舱内剩余的水在重力方向上形成高速的自由面剪切流动,舱内的水在重力和气流的作用下,剧烈翻滚,造成舱内气压大幅度波动。水舱内的水在 5 s 时早已经被吹穿,舱内大部分为气体,并且有大量离散的水体,舱内剩余的水受气体压力作用,贴在舱壁上,少量水沿着出口边缘随气体排出舱外,此仿真现象与实验现象相吻合。

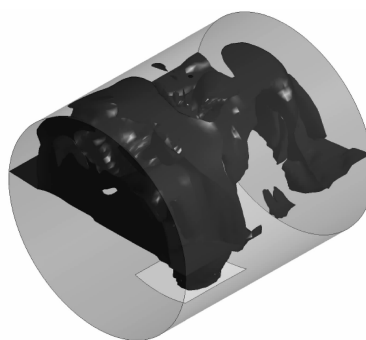


图 5 5 s 时刻,水舱内气液分布

Fig. 5 The water-gas distribution in the ballast tank at 5 second

3.3 计算结果验证

通过对实体水舱(结构尺寸同图 2 所示)在表 1 所示工况条件下进行高压空气吹除实验,得到了测点 1 和测点 5 压力随时间变化的实验数据,将实验数据与数值计算数据进行对比分析,得到两个测点压力计算值与测量值的对比图(如图 6、图 7 所示)。

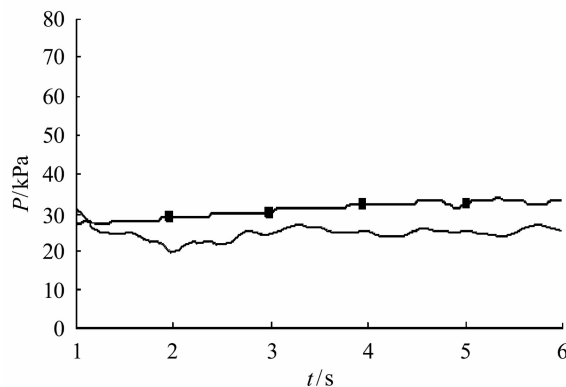


图 6 点 1 计算值与测量值对比

Fig. 6 Comparison between simulation value and measured value on point 1

注: —■— 实验值; — 计算值

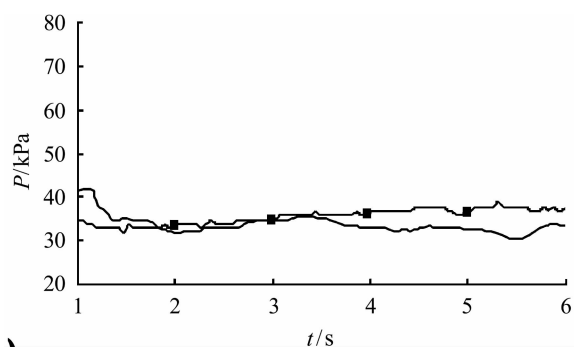


图7 点5 计算值与测量值对比

Fig. 7 Comparison between simulation value and measured value on point 5

注:■—实验值;—计算值

对两点平均相对误差进行统计,测点1的误差为 -18.8% ,测点2的误差为 -5.4% ,满足研究计算要求.说明利用CFX对水舱气-液两相流场进行的数值模拟,其结果能和实验值相互验证,说明计算方案正确可行,能进一步对其他类型水舱的吹除规律进行模拟研究.

4 结 语

高压空气吹除压载水的过程是非定常、可压缩的气-液两相紊流流动的复杂过程.本研究根据高压空气吹除的工作原理建立科学的物理计算模型;采用一维有摩擦绝热可压缩流动的计算方法确定水舱入口的气体随时间变化的状态;应用CFD技术对实验水舱的排水过程进行三维仿真,计算结果与实验值进行对比.结论如下:

a. 根据高压气体状态变化理论,本研究得到了气体入口条件的非定常表达式,与实际流动现象相吻合.非定常条件作为后续三维仿真计算的边界条件,具有创新性.

b. 利用CFX对一种水舱气-液两相流场进行的数值模拟,得到了水舱在不同工况下压力随时间和空间的分布规律;将不同点上计算压力值和实验值对比,误差在可接受范围内,说明计算方案正确可行,能进一步对其他类型水舱的吹除规律进行模拟研究.

致 谢

感谢国家海军装备科研项目“海军舰船装备发展预先研究”的资助!

参考文献:

[1] 刘辉,浦金云,金涛. 潜艇高压气吹除主压载水舱系

统模型研究[J]. 舰船科学技术, 2010(9):26-30.

LIU Hui, PU Jin-yun, JIN Tao. Research on system model of high pressure air blowing submarine's main ballast tanks[J]. Ship Science and Technology, 2010 (9):26-30. (in Chinese)

[2] 张建华,徐亦凡,刘洁. 基于专家控制技术的潜艇高压气自动控制研究[J]. 计算机仿真, 2012(4): 19-21.

ZHANG Jian-hua, XU Yi-fan, LIU jie. Study on automatic control of submarine's compressed air based on expert control[J]. Computer Simulation, 2012(4): 19-21. (in Chinese)

[3] 刘辉,浦金云,李其修,等. 潜艇高压气吹除主压载水舱系统实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 34(1):34-39.

LIU Hui, PU Jin-yun, LI Qi-xiu, et al. Dynamic performance study of submarine low pressure deballast system[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(1):34-39. (in Chinese)

[4] 劳星胜,张克龙,曾宏. 潜艇柴油机废弃低压吹除系统动态性能研究[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(1): 82-85.

LAO Xing-sheng, ZHANG Ke-long, ZENG Hong. Dynamic performance study of submarine diesel exhaust low pressure deballast system[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(1):82-85. (in Chinese)

[5] 劳星胜,曾宏,张克龙. 潜艇低压吹除系统动态性能研究[J]. 舰船科学与技术, 2012, 34(11):42-45.

LAO Xing-sheng, ZENG Hong, ZHANG Ke-long. Dynamic performance study of submarine low power deballast system[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(11):42-45. (in Chinese)

[6] 叶剑平,戴余良,李亚楠. 潜艇主压载水舱高压气吹除系统数学模型[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(2): 112-115.

YE Jian-ping, DAI Yu-liang, LI Ya-nan. The mathematic model of the pneumatic blowing system of the submarine's ballast tanks[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(2):112-115. (in Chinese)

[7] 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2006.

WANG Xin-yue. The basic theory of gasdynamics [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006. (in Chinese)

[8] 邢国清. 流体力学泵与风机[M]. 北京:中国电力出版社, 2009.

XING Guo-qing. Fluid mechanical pump and fan [M]. Beijing: China Power Public, 2009. (in Chinese)

[9] 王福军. 计算流体力学分析:CFD软件原理与应用

[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

WANG Fu-jun. Computational fluid dynamics analysis: the principle and application of CFD software

[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

Key technologies of simulating high-pressure air blowing ballast tank

YUAN Dong-hong¹, WANG Yun², XING Fu-tang², MEI Dan²

(1. Office of military representatives in 701 research institute, Wuhan 430081, China;

2. College of resource and environment engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Properties of high-pressure air blowing system in a submarine determine the self-rescue ability in the case of accident and safety degree of light covering blowing. An advanced numerical simulation method can substitute physical experimental method in acquiring flow characteristics in cylinders, pipeline and ballast tanks, which provides theoretical support for the design of submarine. The computing scheme for the system was developed, in which the pipe air flow was considered as an unsteady one-dimensional adiabatic compressible flow with friction, and the unsteady gas parameters in the pipeline received from the considering were used as the inlet boundary conditions. The ballast tank was simulated with an Eulerian-Eulerian multiphase model and $k-\omega$ based shear stress transport turbulence model. The pressure distribution over time and space, distribution of gas and liquid in the tank at the end of blowing time and other key data were obtained. The agreement between simulation results and experimental results validates the feasibility and accuracy of the scheme.

Key words: high-pressure air blowing system; computing scheme; unsteady flow; gas-liquid two-phase flow; numerical simulation

本文编辑:陈小平