

文章编号: 1007-7294(2025)09-1343-09

基于 MWorks 的主压载水舱系统注排水仿真研究

蒋竹凌^{1,2}, 李滔滔^{1,2}, 羿琦^{1,2}, 林博群^{1,2}, 张万良^{1,2}

(1. 中国船舶科学研究中心 深海载人装备全国重点实验室, 江苏 无锡 214082; 2. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214082)

摘要: 主压载水舱是潜浮系统的重要组成部分。为准确仿真潜浮系统工作过程, 本文开展基于 MWorks 的主压载水舱建模与仿真分析。首先基于 MWorks 构建主压载水舱的注水、常规吹除、应急吹除系统模型, 然后与 CFD 仿真结果对比, 验证模型的可靠性, 最后分析背压、通海孔面积对主压载水舱注排水过程的影响。结果表明: MWork 仿真的主压载水舱吹除时间与 CFD 结果误差在 10% 以内; 背压增加会提高吹除时间, 降低水舱结构强度要求; 通海孔面积增大会降低注排水时间和水舱结构强度要求。基于 MWorks 构建的主压载水舱系统模型计算速度快且规律特性准确, 便于快速调试工程设计参数以确定设计输入。

关键词: 主压载水舱; 数理模型; MWorks; 注排水特性; 水舱结构强度要求

中图分类号: U674.76 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.09.001

Simulation of injection and drainage systems for main ballast tank based on MWorks

JIANG Zhu-ling^{1,2}, LI Tao-tao^{1,2}, YI Qi^{1,2}, LIN Bo-qun^{1,2}, ZHANG Wan-liang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Deep-sea Manned Vehicles, China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China;
2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, China)

Abstract: The main ballast tank is an important component of a submarine submerging and surfacing system. To correctly simulate the working process of a submerging and surfacing system, modeling and simulation analysis of the main ballast tank based on MWorks were carried out. Firstly, the models of water injection system, conventional blowdown system and emergency blowdown system were built using MWorks. Then, the model's reliability was verified by comparison with CFD simulation results. Finally, the impact of factors such as back pressure and sea opening area on the injection and drainage process of the main ballast tank was analyzed. The results show that the relative error of main ballast tank blowing time between the MWorks simulation results and the CFD simulation results is within 10%; increasing back pressure will increase the blowing time and reduce the structural strength requirements for the main ballast tank; increasing the sea opening area will reduce the filling time, blowing time and the structural strength requirements for the main ballast tank. The main ballast tank system models built with MWorks have fast calculation speed and accurate regularity characteristics, which facilitates the rapid adjustment of engineering design parameters to determine design input.

收稿日期: 2025-03-27

基金项目: 国家重大专项支持项目

作者简介: 蒋竹凌(1993-), 女, 硕士, 工程师, 通讯作者, E-mail: 1021573414@qq.com。

Key words: main ballast tank; mathematical model; MWorks; injection and drainage characteristics; structural strength requirement

0 引言

潜浮系统是潜艇的重要组成部分,主要功能是使潜艇从水上状态或半潜状态转为水下状态,以及在正常或应急情况下由水下状态转为半潜状态或水上状态^[1]。主压载水舱是潜浮系统的重要组成部分,构建准确的主压载水舱注排水模型,不仅有助于研究潜浮系统运行规律、评估高压气吹除能力^[2]和提供水舱结构强度设计依据^[3],还有助于模拟潜艇的压载变化、重心位置变化^[4],提高潜艇操纵性预报评估的准确性。

目前,关于主压载水舱的研究主要分为数理模型研究、CFD 仿真和试验验证^[5]。Bystrom^[6]假定气体等熵流动并利用拉瓦尔喷管公式建立高压气吹除主压载水舱的数理模型。Font 等^[7-8]优化了主压载水舱吹除数理模型,给出了两种流态下高压气瓶气流计算公式,并基于模型研究了主压载水舱质量变化对潜艇操纵性的影响;王晓峰等^[9]考虑重力对吹除过程的影响改进了数理模型,并使用该模型分析影响吹除效率的因素;刘辉等^[10]对常规吹除和短路吹除工况分别建立了吹除模型,认为拉瓦尔喷管模型更适用于短路吹除。CFD 仿真较数理模型精度更高,羿琦等^[11]用 Realizable $k-\varepsilon$ 和 SST $k-\omega$ 模型研究水舱气液两相流动过程和水舱气体压力变化历程;张建华等^[12]用 VOF 模型研究了水舱内气水界面的生成与发展规律。此外,国内还开展过小比例模型原理试验验证仿真计算结果,刘辉^[13]、王晓峰^[9]、羿琦^[11]等均通过试验验证其仿真结果的真实性。小比例的原理试验由于尺度效应对实际设计指导意义不大,CFD 仿真相对数理模型仿真时间较长且其结果更关注气液两相流过程,目前优化后的数理模型已经能较好描述高压气流动过程且省时省力。但常用的数理模型简化了潜浮系统阀类、管件设备,且缺乏注排水全过程分析,其结果应用于工程设计阶段仍不够精确。

MWorks 软件是基于 Modelica 语言开发的系统仿真软件,其模型针对设备的数理模型构建,便于实现模型重用、重构和扩展。本文基于数理模型构建主压载水舱的 Modelica 模型,并基于 MWorks 组件库构建主压载水舱的注水、常规吹除、应急吹除系统模型,然后参照 CFD 仿真结果验证 MWorks 模型的准确性,并基于 MWorks 系统模型分析背压、通海孔面积等因素对主压载水舱注排水过程的影响。基于 MWorks 构建的主压载水舱系统模型可以快速预测各工况下主压载水舱的规律特性,对工程设计阶段参数确定有极大帮助。

1 水舱系统建模

1.1 系统模型

潜浮系统有正常吹除、应急吹除、注水下潜三种工作方式,主要由气瓶、阀件、主压载水舱、管路等部件组成。MWorks 的气动组件库已包含气瓶、单向阀、减压阀、电磁阀等基本气动组件,主压载水舱模型可基于数理模型构建。

正常吹除系统由主压载水舱、正常吹除管路和通气管路组成,其 MWorks 系统模型如图 1(a)所示。正常吹除时,水舱的通气阀关闭,吹除阀打开,高压气瓶内的高压气经减压后进入主压载水舱。当吹除阀关闭、排气阀打开时,图 1(a)系统模型也可用于主压载水舱注水仿真。

应急吹除系统由主压载水舱、应急吹除管路和通气管路组成,其 MWorks 系统模型如图 1(b)所示。应急吹除管路比正常吹除管路短得多,且应急吹除管路不用经过减压阀。应急吹除时,水舱的通气阀关闭,应急吹除阀打开,高压气瓶的高压气直接吹入主压载水舱。

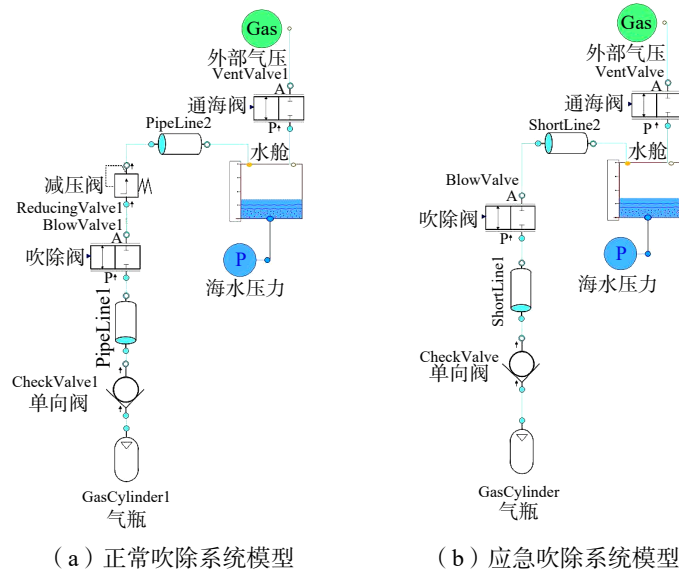


图 1 主压载水舱系统模型

Fig.1 Model of main ballast tank system

1.2 水舱数理模型

主压载水舱的注排水涉及气体与海水的体积平衡,当开启高压吹除系统,气瓶气压高于外部深海环境压力时,舱室海水受到压力的影响,内部海水流出,当舱室海水完全流出且气瓶继续开启时,气瓶气体会从通海孔进一步泄出;当气瓶不工作且打开通海孔和通气孔时,受深海环境压强影响,外部深海环境的海水会流入舱室,直至舱室达到满舱。目前 MWorks 无可模拟主压载水舱的类似组件,需根据数理模型自行构建。

主压载水舱的吹除与注水过程涉及气液两相流过程,变化剧烈且相关原理方程复杂。为提高计算效率,对主压载水舱内部动态过程做如下假设:

- (1)气液交界面保持水平状态,不考虑气液混合层厚度,不考虑吹除后期压载水残留现象;
- (2)不考虑水舱内高压气体和压载水之间的热交换过程,默认气水之间已实现充分热交换;
- (3)气液交界面处气体压力等于液体压力。

根据以上假设可将主压载水舱的研究对象简化为气体、液体两部分,并根据实际水舱结构将水舱的接口分为吹除口、通气孔、通海孔(气液混合接口),水舱模型如图 2 所示。吹除口用于释放高压气瓶的气流,通气孔用于注水阶段释放水舱内空气,通海孔用于水舱注排水。

根据理想气体状态方程,水舱内气体模型为

$$p_{gas} V_{gas} = m_{gas} R_g T_{gas} \quad (1)$$

式中, p_{gas} 为水舱中气体压力, V_{gas} 为水舱中气体体积, m_{gas} 为水舱中气体质量, T_{gas} 为水舱中气体温度, R_g 为空气气体常数, $R_g = 287.06 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对上式两边求导,得气体质量变化方程为

$$\frac{d(m_{gas})}{dt} = \frac{d(p_{gas})}{dt} V_{gas} + p_{gas} \frac{d(V_{gas})}{dt} \quad (2)$$

取舱内水面和通海孔出口截面两个过流断面建立伯努利方程:

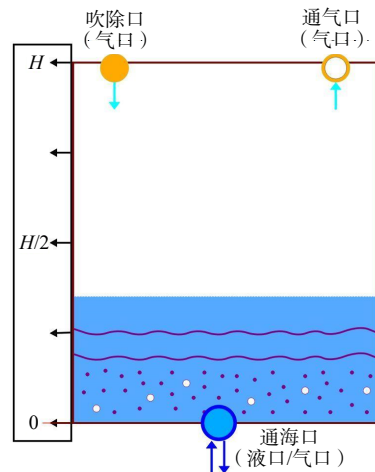


图 2 主压载水舱接口示意图

Fig.2 Diagram of main ballast tank interface

$$\rho g h_L + p_L + \frac{1}{2} \rho v_L^2 = p_w + \frac{1}{2} \rho v_B^2 \quad (3)$$

可得通海孔海水流速为

$$v_B = \sqrt{2gh_L + \frac{p_L - p_w}{\rho g} + v_L^2} \quad (4)$$

式中, ρ 为海水密度, g 为重力加速度, h_L 为水舱液面距通海孔高度, p_L 为舱内水面海水压力(根据水舱假设(3), $p_{\text{gas}} = p_L$), p_w 为海水背压, v_L 为舱内水面液位变化速度, $v_L = \frac{d(h_L)}{dt}$ (一般较小可忽略), v_B 为通海孔海水流速。

因此通海孔海水质量流量方程为

$$Q_B = C_f \cdot \rho \cdot A \cdot v_B \quad (5)$$

式中, Q_B 为通海孔海水质量流量, C_f 为通海孔流量系数, A 为通海孔面积。

2 模型仿真验证

基于 MWorks 建立的主压载水舱系统模型可以通过 CFD 仿真结果进行可靠性验证。

2.1 CFD 仿真设置

文献[14]开展了高压气底吹进气吹除主压载水舱的仿真,采用瞬态的压力基求解器,求解算法采用 PISO 算法,气液两相输运过程使用显式 VOF 模型。文献[14]中 CFD 仿真参数设置为:高压气瓶容积 1.14 m^3 ,管路路径 20 mm ,圆柱形水舱体积 1.75 m^3 ,海水背压 2 MPa ,初始温度 288.83 K ,各工况的区别在于气瓶压力和通海孔面积,如表 1 所示。基于 MWorks 建立的应急吹除主压载水舱系统模型可按相同的参数设置,与 CFD 仿真结果对比。

表 1 各工况设置

Tab.1 Setting of working conditions

	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6
气瓶压力/MPa	6	12	18	6	12	18
通海孔面积/ m^2	0.012 72	0.012 72	0.012 72	0.025 45	0.025 45	0.025 45

2.2 结果对比

表 2 对比了两种计算方法下吹除 50% 压载水的时间、吹除 99.5% 压载水的时间、水舱峰压和通海孔最大质量流量。在高压气吹除主压载水舱初期,由于水舱内初始压力较低,高压气进入后舱内压力会急剧上升,气源初始压力越大,压力的上升越明显。水舱峰压为吹除过程中水舱气体最高压力,水舱峰压与海水背压差值为水舱内外最大压差,该压差是水舱结构强度设计的重要依据。

表 2 两种计算方法的结果对比

Tab.2 Comparison of results between two calculation methods

工况	吹除50%压载水时间/s		吹除99.5%压载水时间/s		水舱峰压/MPa		通海孔最大质量流量/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	
	CFD	MWorks	CFD	MWorks	CFD	MWorks	CFD	MWorks
1	10.75	10.92	35.48	32.54	2.11	2.08	106.79	97.02
2	5.10	5.30	12.08	11.58	2.38	2.27	195.87	177.77
3	3.61	3.78	8.33	7.93	2.59	2.5	261.46	241.96
4	10.56	10.73	31.71	32.32	2.1	2.02	105.17	100.17
5	4.77	4.88	11.24	10.88	2.28	2.08	230.76	194.19
6	3.19	3.30	7.18	7.01	2.44	2.17	322.47	279.58

图 3 显示的是两种方法下各参数相对误差的对比, 相对误差计算公式为

$$\delta = \frac{|x_{CFD} - x_{MWorks}|}{x_{CFD}} \times 100\% \quad (6)$$

式中, x_{CFD} 为 CFD 仿真的结果, x_{MWorks} 为 MWorks 仿真的结果。

如图 3 所示, 吹除 50% 压载水时两种计算方法误差均不超过 5%。吹除 99.5% 压载水时通海孔面积越大误差越小, 所有工况误差在 10% 以内。在较高吹除压力与较大通海孔面积情况下, MWorks 计算得到的水舱峰压偏低, 最大误差可达 11.02%。所有工况下两种模型计算的通海孔最大质量流量误差都比较大, 工况 5 误差最大可达 15.85%。

2.3 结果分析

MWorks 模型在仿真吹除过程中, 吹除 50% 压载水的时间误差明显小于吹除 99.5% 压载水的时间误差。观察图 4 中工况 1 的水舱气体体积分数变化历程可知, 吹除后期舱内余水吹除较慢, CFD 仿真会考虑气液交界面的复杂变化, 吹除后期速度略慢于 MWorks 仿真结果, 使得完全吹除时间会偏长。因此, MWorks 模型计算的完全吹除时间偏短, 在工程设计时要考虑进去。

工况 4、5、6 计算的水舱峰压误差较大, 但从图 5 中可以看出, MWorks 计算的峰压更接近 CFD 仿真中的次峰压。因此, 在通海孔面积较大时, MWorks 计算的峰压值偏低, 工程设计中确定水舱强度时要略高于 MWorks 计算值。

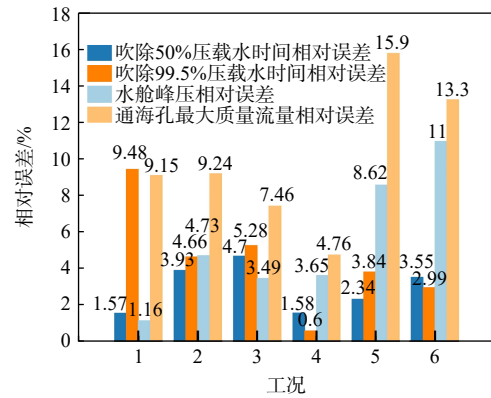


图 3 主压载水舱各参数相对误差

Fig.3 Relative error of main ballast tank parameters

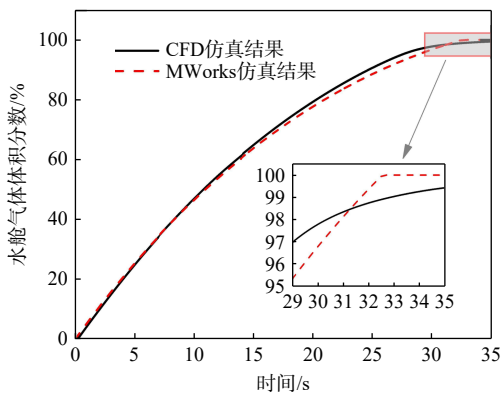


图 4 工况 1 水舱中气体体积分数随时间变化曲线

Fig.4 Air volume fraction of main ballast tank versus time under Condition 1

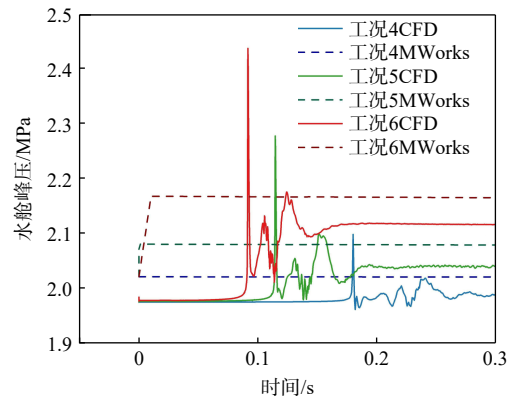


图 5 吹除前 0.3 s 主压载水舱气体压力随时间变化曲线

Fig.5 Air pressure of main ballast tank versus time from 0 to 0.3 s

两种计算模型得到的通海孔最大质量流量误差虽大, 但结合吹除时间误差考虑, 两种方法计算的通海孔平均质量流量误差其实相对较小, 因此尽管 MWorks 模型计算的通海孔最大质量流量偏小, 但其相对误差仍属于可接受范围。

总体来说, 基于 MWorks 的仿真模型结果与 CFD 仿真结果接近, 表现出一致的特性规律, 具有可信性。且 MWorks 模型求解速度快, 可以随意改变多种边界条件进行多次仿真, 更利于潜浮系统的工程设计。

3 仿真分析

基于主压载水舱的 Modelica 模型可以很方便地修改通海孔压力、通海孔面积等参数并进行多工况多状态仿真分析。

3.1 参数设置

表 3 展示了注水、常规吹除、应急吹除 3 种工作模式下的模型基本参数设置。一般注水和常规吹除都在近海面,因此限定注水过程在水下 5 m 以内,常规吹除在水下 25 m 以内。

表 3 参数设置

Tab.3 Parameters setting

初始温度/K	气瓶初始压力/MPa	管路通径/m	常规吹除管路	减压阀工作	应急吹除管路	水舱高度/m	水舱直径/m
			长度/m	压力/MPa	长度/m		
298.15	20	0.02	20	1.5	2	2	2

3.2 背压影响分析

注水状态下通气孔外部压力为背压,吹除状态下通海孔外部压力为背压。工况 1~5 仿真注水工作状态,工况 6~10 仿真常规吹除工作状态,工况 11~15 仿真应急吹除工作状态,背压设置和计算结果如表 4 所示。注水下潜工作模式下背压变化不大,因此注水时间几乎不受背压影响,水舱峰压和通海孔最大流量随背压同步上升。常规吹除和应急吹除工作模式下,背压越大,吹除时间越长,水舱峰压越高,通海孔最大流量越低。

表 4 不同背压下注排水过程计算结果

Tab.4 Calculation results of water injection and drainage process under different back pressures

工作模式	工况	背压/MPa	注、排水时间/s	水舱峰压/MPa	通海孔最大流量/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
注水下潜	1	0.11	104.17	0.111	130.79
	2	0.115	104.16	0.116	141.73
	3	0.12	104.12	0.121	151.88
	4	0.125	104.05	0.126	161.39
	5	0.13	103.97	0.131	170.38
常规吹除	6	0.15	31.50	0.201	208.50
	7	0.2	37.08	0.236	177.76
	8	0.25	43.38	0.277	152.07
	9	0.3	50.17	0.320	131.27
	10	0.35	57.29	0.365	114.64
应急吹除	11	3	32.20	3.047	207.41
	12	4	43.39	4.025	157.04
	13	5	55.19	5.015	126.03
	14	6	67.57	6.009	105.15
	15	7	80.83	7.006	90.17

常规吹除和应急吹除工作模式下,背压对水舱吹除时间和水舱内外压差的影响如图 6~7 所示。由图可知,背压增加会使吹除时间延长,水舱内外压差下降,且随着背压逐渐增加,吹除时间的相对增幅越大,水舱内外压差的相对降幅越小。背压越小,水舱内外压差增长越快,因此近水面吹除对水舱结构强度要求较高;背压越大,吹除时间越长,因此大潜深吹除难度高。

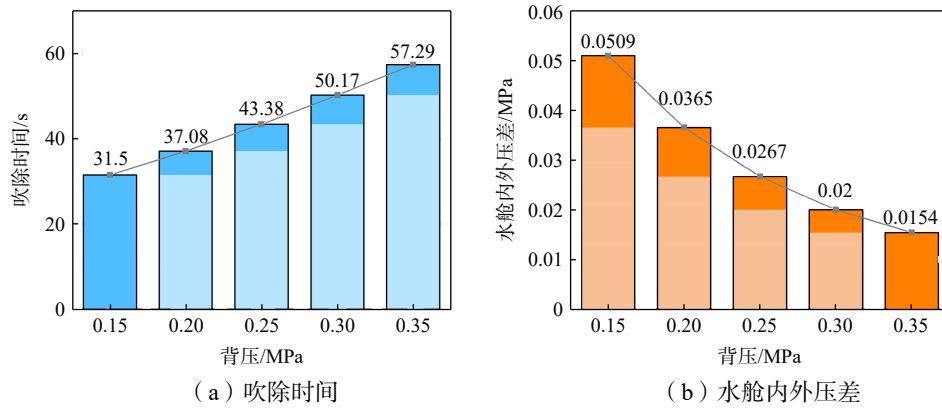


图 6 常规吹除工作模式下背压对各参数的影响

Fig.6 Influence of back pressure on various parameters under conventional blowdown

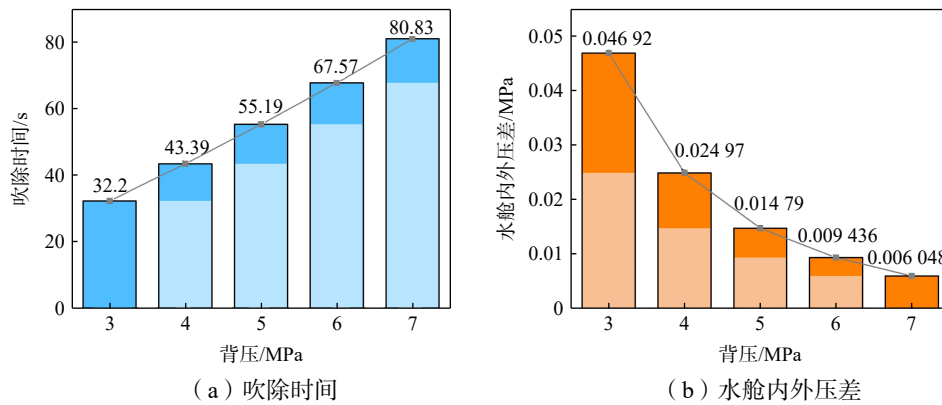


图 7 应急吹除工作模式下背压对各参数的影响

Fig.7 Influence of back pressure on various parameters under emergency blowdown

3.3 通海孔面积影响分析

水舱只设置一个通海孔,各工况下通海孔直径设置和计算结果如表 5 所示。由表中数据可知,通海孔面积越大,注排水时间越短,水舱峰压越小,通海孔最大流量越大。

表 5 不同通海孔面积下注排水过程计算结果

Tab.5 Calculation results of water injection and drainage process under different sea opening areas

工作模式	工况	通海孔直径/m	注、排水时间/s	水舱峰压/MPa	通海孔最大流量/(kg·s ⁻¹)
注水下潜	1	0.10	415.74	0.131	42.59
	2	0.15	184.79	0.131	95.84
	3	0.20	103.93	0.131	170.38
	4	0.25	66.51	0.131	266.22
	5	0.30	46.19	0.131	383.37
常规吹除	6	0.10	68.17	0.435	93.48
	7	0.15	49.64	0.317	130.54
	8	0.20	43.38	0.277	152.07
	9	0.25	41.06	0.262	162.81
	10	0.30	40.13	0.256	167.90
应急吹除	11	0.10	57.98	5.299	118.81
	12	0.15	55.57	5.050	124.89
	13	0.20	55.19	5.015	126.03
	14	0.25	55.36	5.006	125.79
	15	0.30	55.05	5.003	126.47

各工作模式下,通海孔直径对水舱注水时间、吹除时间和水舱内外压差的影响如图 8~10 所示。由图 8 可知,增大通海孔直径可以明显降低水舱注水时间,但对水舱内外压差几乎没有影响;由图 9 可知,增大通海孔直径可以降低水舱吹除时间和水舱内外压差;图 8 和图 9 中,随着通海孔直径的增大,其影响逐渐减弱;由图 10 可知,通海孔直径过小会急剧增加水舱内外压差,但通海孔直径大于 0.2 m 后,其影响极小可忽略。因此,主压载水舱设计时通海孔面积不宜过小,合适的通海孔面积可以降低注排水时间,减小水舱承压。

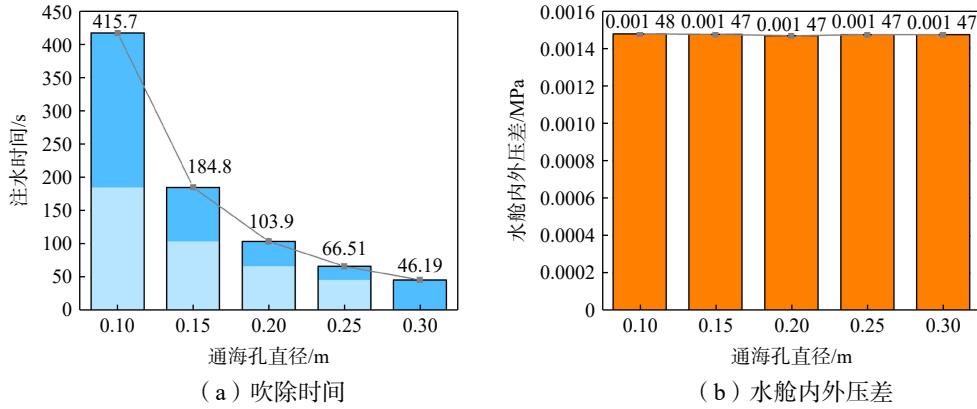


图 8 注水下潜工作模式下通海孔面积对各参数的影响

Fig.8 Influence of sea opening area on various parameters under water injection

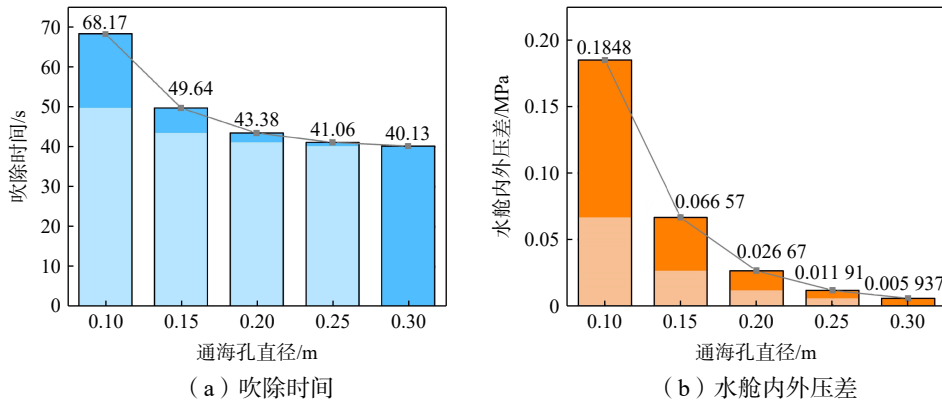


图 9 常规吹除工作模式下通海孔面积对各参数的影响

Fig.9 Influence of sea opening area on various parameters under conventional blowdown

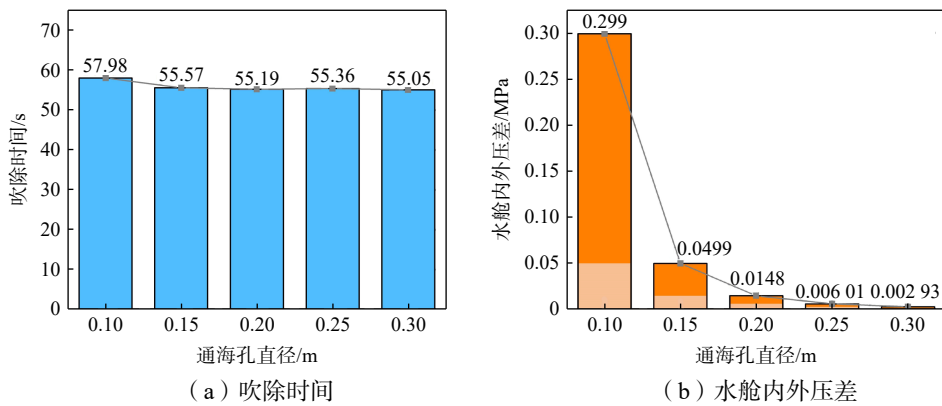


图 10 应急吹除工作模式下通海孔面积对各参数的影响

Fig.10 Influence of sea opening area on various parameters under emergency blowdown

4 结 论

本文采用 MWorks 软件建立了主压载水舱系统模型, 对主压载水舱的注排水过程进行了仿真模拟, 得到如下结论:

(1) MWorks 吹除仿真结果与 CFD 仿真结果具有相同的特性规律, 数据误差在 16% 以内, MWorks 的仿真模型具有可信性。且 MWorks 搭建的系统模型计算速度远快于 CFD 仿真, 便于开展工程设计阶段的影响因素分析与设计优化工作。

(2) 背压主要影响主压载水舱的吹除时间和水舱峰压, 背压增加会增大吹除难度但降低水舱结构强度要求。

(3) 通海孔直径过小会明显增大应急吹除时水舱内外压差, 因此设计时通海孔面积不宜太小。且通海孔面积越大, 注排水时间越短, 水舱结构强度要求越低。

参 考 文 献:

- [1] 马运义, 许 建. 现代潜艇设计原理与技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2012: 345–346.
Ma Yunyi, Xu Jian. Design principle and technology of modern submarine[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2012: 345–346. (in Chinese)
- [2] Zou W, Xiao Y, Zhang X, et al. Optimization and analyses of an organic Rankine cycle system utilizing cold energy of liquefied argon[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 781(4): 042022.
- [3] Wilgenhof J D, Conessa Giménez J J, García Peláez J. Performance of the main ballast tank blowing system[C]. Paper for UDT Europe, 2011.
- [4] Ivanov E O, Ungureanu C. Design of a submarine main ballast blowing systems[R]. Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle XI Shipbuilding, 2023, 46: 147–154.
- [5] 吕帮俊, 黄 斌, 彭利坤. 潜艇高压气吹除主压载水舱研究综述[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(3): 1–5.
Lü Bangjun, Huang Bin, Peng Likun. Review on high-pressure air blowing the submarine main ballast tanks[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(3): 1–5. (in Chinese)
- [6] Bystrom L. Submarine recovery in case of flooding[J]. SSPA Highlights, 2003, 3(2): 6–8.
- [7] Font R, García J, Ovalle D. Modelling and simulating ballast tank blowing and venting operations in manned submarines[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(20): 67–72.
- [8] Font R, García J, Murillo J A, et al. Modelling and control of blowing-venting operations in manned submarines[J]. Journal of Control Engineering & Technology, 2013, 4: 37–49.
- [9] 王晓峰, 王先洲, 张志国, 等. 考虑重力影响的高压气体吹除改进数理模型和试验对比分析[J]. 中国舰船研究, 2014, 9(6): 80–86.
Wang Xiaofeng, Wang Xianzhou, Zhang Zhiguo, et al. Experiment and mathematics model of high pressure air blowing[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(6): 80–86. (in Chinese)
- [10] 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, 32(9): 26–30.
Liu Hui, Pu Jinyun, Jin Tao. Research on system model of high pressure air blowing submarine's main ballast tanks[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(9): 26–30. (in Chinese)
- [11] 羿 琦, 林博群, 张万良, 等. 基于 CFD 的主压载水舱吹除仿真与试验验证[J]. 船舶力学, 2023, 27(2): 218–226.
Yi Qi, Lin Boqun, Zhang Wanliang, et al. CFD simulation and experimental verification of blowing process of main ballast tank[J]. Journal of Ship Mechanics, 2023, 27(2): 218–226. (in Chinese)
- [12] 张建华, 黄海峰, 刘广旭, 等. 基于 VOF 模型的潜艇主压载水舱吹除特性数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(7): 234–239.
Zhang Jianhua, Huang Haifeng, Liu Guangxu, et al. Numerical simulation of blowing characteristics of submarine main ballast tanks using VOF model[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(7): 234–239. (in Chinese)
- [13] 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, 2013, 34(1): 34–39.
Liu Hui, Pu Jinyun, Li Qixiu, et al. The experiment research of submarine high-pressure air blowing off main ballast tanks[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(1): 34–39. (in Chinese)
- [14] 羿 琦, 林博群, 张万良. 高压气底吹进气吹除主压载水舱过程分析[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(8): 60–63.
Yi Qi, Lin Boqun, Zhang Wanliang. Analysis of the blowing process of high pressure air from the bottom into the main ballast tank[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(8): 60–63. (in Chinese)