

Numerical Analysis to Inflow Changes Model of Single-Cabin-Broken Submarine in Large Depths

Dawei Han*, Dongjun Zhang, Tianzhong Wang, Hongming Li, Lei Zhang

The No. 92337 Troop of PLA, Dalian Liaoning
Email: *handawei1112@163.com

Received: Apr. 16th, 2019; accepted: May 7th, 2019; published: May 14th, 2019

Abstract

A criterion of the dynamic anti-sinking effectiveness is given based on the pressure-containing ability of the plane bulkhead, and the inflow changes model of single-cabin-broken submarine is established, as well as the calculating process and method of the maximum floatable depth. The influence of the broken area and the vertical speed to the maximum floatable depth is researched by numerical simulation. The results reveal that the maximum floatable depth linearly corresponds well to the vertical speed, and the summary diagram of maximum floatable depths calculating formulas to different vertical speeds is established on the basis of this regular, which can offer support to commander's rapid decision when the submarine is broken in war.

Keywords

Submarine, Broken, Dynamic Anti-Sinking, Maximum Floatable Depth, Numerical Analysis

潜艇单舱大深度破损进水模型数值分析

韩大伟*, 张东俊, 王天忠, 李宏明, 张磊

中国人民解放军92337部队, 辽宁 大连
Email: *handawei1112@163.com

收稿日期: 2019年4月16日; 录用日期: 2019年5月7日; 发布日期: 2019年5月14日

摘要

本文提出一种基于平面舱壁承压能力的动力抗沉有效性判据, 建立了潜艇单舱大深度破损进水模型和最大可浮深度的数值计算流程与方法, 通过数值仿真计算分析了不同破口面积和潜艇升速对最大可浮深度

*通讯作者。

的影响, 研究表明最大可浮深度与潜艇升速具有良好的线性对应关系, 并在此基础上建立了不同破口面积下潜艇最大可浮深度随升速变化的公式汇总表, 为潜艇战损时指挥员的快速决策提供支持。

关键词

潜艇, 破损, 动力抗沉, 最大可浮深度, 数值分析

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代水中兵器尤其是智能鱼雷和聚能战斗部的不断发展, 潜艇在水下遭受攻击后破损进水的概率大大提高。不同于水面舰艇, 潜艇在大深度破损后舱外水压要大得多, 使潜艇损管堵漏变得异常困难, 而最有效的手段就是迅速封舱上浮, 以尽量降低艇毁人亡的概率。潜艇在大深度单个耐压隔舱破损时, 随着海水迅速灌入舱室, 舱内气体体积被压缩, 压力升高, 当舱内压力超过耐压隔舱平面舱壁承载能力时, 海水会通过平面舱壁进入相邻耐压隔舱, 给潜艇生命力带来致命危害, 潜艇在此之前机动上浮至平面舱壁承压能力所对应的安全深度是其维持生命力的关键所在。潜艇破损进水后加速上浮无疑对动力抗沉是有利的, 但高航速不但会对破损潜艇的安全操纵带来巨大挑战, 且往往会由于潜艇噪声的提高引来敌方的二次攻击, 因此, 研究舱室大深度破损进水模型, 分析其特点规律以及各航速不同破口面积下潜艇的最大可浮深度, 对指挥员做出兼顾操纵性、隐身性与动力抗沉的最优决策来说至关重要。

由于试验风险和试验成本等方面原因, 潜艇大深度破损进水实艇试验难以有效开展, 而随着计算机科学技术的发展, 数值仿真逐渐成为研究潜艇大深度破损与动力抗沉的重要手段[1]-[7]。文献[1]用模拟仿真方法分析了吹除不同主压载水舱对潜艇潜浮率与纵倾的影响及挽回效果, 给出了不同舱室进水的吹除建议。文献[2]用仿真方法分析了高压气吹除时机对潜艇动力抗沉主要运动参数的影响, 提出了动力抗沉中高压气使用时机的建议。文献[3]建立了水下破损时的潜艇运动模型, 用数值仿真方法分析了航速对动力抗沉效果的影响, 提出了不同破损面积、不同深度下的增速措施。文献[4]对潜艇危险卡舵时的多种挽回方案进行了仿真计算, 分析了航速、反应时间、不同挽回方式对动力抗沉的影响, 提出了一种衡量危险卡舵挽回成功与否的标准。文献[5]以破损潜艇初始深度与越深深度之和不大于极限深度为动力抗沉计算的判据, 通过对潜艇运动方程进行数值计算, 绘制了潜艇动力抗沉性能曲线图。以往研究在动力抗沉计算准则方面均未考虑潜艇大深度舱室破损进水对平面舱壁承压能力的影响, 也没有给出不同破口面积各航速下潜艇最大可浮深度的快速计算方法。

本文提出一种基于平面舱壁承压能力的动力抗沉有效性判据, 建立了潜艇单舱大深度破损进水模型和最大可浮深度的数值计算流程与方法, 通过数值仿真计算分析了不同破口面积和潜艇升速对最大可浮深度的影响, 建立了不同破口面积下潜艇最大可浮深度随升速变化的公式汇总表, 为潜艇战损时指挥员的快速决策提供支持。

2. 潜艇单舱大深度破损动力抗沉有效性准则

2.1. 潜艇战时大深度损管操纵原则

潜艇发现鱼雷来袭后, 在机动规避的同时, 应立即封舱、加速、操舵造成尾倾, 形成上浮态势, 提高潜

艇动力抗沉能力；高压气备便，一旦破损进水，通过吹除部分主压载水舱抵消进水产生的负浮力。需要说明的是，在潜艇深度较浅时，可以采取向舱室供气建立反压力的方法以阻止或减缓海水进入，但在潜艇深度超过平面舱壁承压能力所对应的深度时，向舱室供气不但会缩短有效抗沉时间而且会减少高压气储备，对潜艇动力抗沉是不利的，此种方法本文不予考虑；同时忽略潜艇变深运动过程中海水密度变化和高压气吹除压载水舱产生的正浮力，计算仅考虑车、舵实现变深，结果是偏于安全的。潜艇在垂直面的运动如图 1 所示。

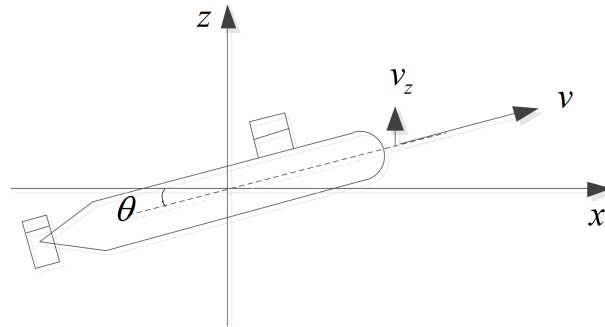


Figure 1. Vertical motion of the submarine
图 1. 潜艇在垂直面的运动示意图

由图 1 可知，潜艇在垂直面的运动平衡方程为

$$dv_z = d(v \sin \theta) \tag{1}$$

该运动方程可用来求解潜艇变速上浮到达平面舱壁承载能力对应的安全深度需要的时间。

2.2. 潜艇单舱大深度破损动力抗沉有效性判据

潜艇耐压隔舱及主压载水舱大深度破损时如果不能及时有效处置，极易造成潜艇沉没，最大诱因可能就是舱室进水后压力升高超过平面舱壁的承压能力导致相邻隔舱横舱壁破损进水。舱室破损后须立即机动上浮至平面舱壁承载能力对应的安全深度 H_s ，假定所需时间为 t ，从舱室进水到舱内空气压力达到平面舱壁承载能力的临界上浮时间记为 t_{cr} ，则潜艇舱室大深度破损动力抗沉有效性判据可以写为

$$t \leq t_{cr} \tag{2}$$

3. 潜艇单舱大深度破损进水模型

3.1. 潜艇单舱大深度破损进水微分方程

对于潜艇大深度破损，舱室进水量与舱室净容积相比不是小量，舱室进水量对舱室气压变化的影响不可忽略。如图 2 所示，忽略舱室内空气温度变化的影响，由气体状态方程可得进水后舱室气压为

$$P_1 = \frac{P_0 V_0}{V_0 - V} \tag{3}$$

其中， P_0 为进水前舱室气压，近似为 0.098 MPa； V_0 为舱室净容积； P_1 为进水后舱室气压； V 为舱室进水量。式(3)中，令 P_1 为耐压舱壁可承受的最大压强，可求得舱室最大容许进水量 V_{max} 。

破损舱室进水体积 V 满足以下微分方程[5]：

$$\frac{dV}{dt} = \mu A \sqrt{2g \left(H - h_b - \frac{10V_0}{V_0 - V} + 10 \right)} \tag{4}$$

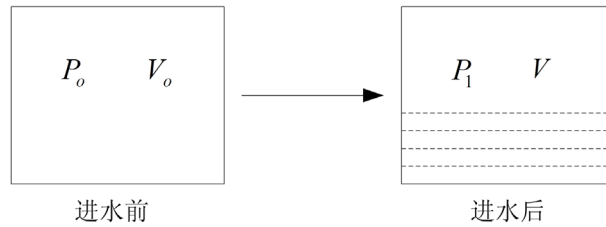


Figure 2. Pressure-change after the water entering the cabin
图 2. 舱室进水前后气压变化示意图

其中, V_o 为舱室净容积, m^3 ; H 为隔舱破口深度, m ; A 为破口面积, m^2 ; μ 为面积损耗系数, 通常取 0.6; h_b 为破口反压头, m , 在大深度下一般忽略不计。

3.2. 潜艇单舱大深度破损进水差分方程

采用向后差分公式, 则

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_{n+1} - V_n}{\Delta t} \tag{5}$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{H_{n+1} - H_n}{\Delta t} = -v_z \tag{6}$$

将式(5)、(6)代入方程(4), 忽略破口反压头 h_b , 整理后可得

$$V_{n+1} = \Delta t \cdot \mu A \sqrt{2g \left(H_n - \Delta t v_z - \frac{10V_o}{V_o - V_n} + 10 \right)} + V_n \tag{7}$$

上式中, 取时间步长为 1 s, $n=0$ 时, 进水体积 $V_0 = 0$ 作为初始条件, 对舱室进水量进行迭代计算, 依据本文动力抗沉有效性判据, 最大可浮深度计算流程如下: 第一步, 假定潜艇破损的初始深度 H_0 为 H_s , 在一定破口面积 A 和不同潜艇升速 v_z 下, 计算潜艇从舱室破损初始深度垂直面机动到达平面舱壁承载能力对应的安全深度 H_s 所需时间 t ; 第二步, 对式(7)进行迭代求解, 求解时间长度取为 t , 计算舱室进水量 V_{n+1} ; 第三步, 若 $V_{n+1} \leq V_{max}$, 则此破损深度满足前文建立的潜艇舱室大深度破损动力抗沉有效性判据, 即 $t \leq t_{cr}$, 增大 H_0 的值, 然后从第一步开始重复整个计算过程, 直到满足 $V_{n+1} > V_{max}$, 则前一步的 H_0 即为该模型下潜艇的最大可浮深度 H_{max} 。最大可浮深度的数值计算流程如图 3 所示。

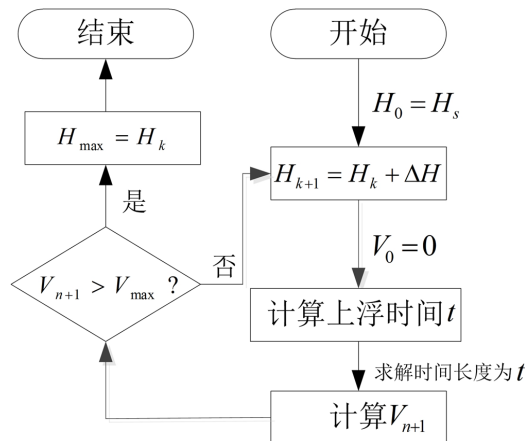


Figure 3. Numerical calculating flow diagram
图 3. 数值计算流程图

4. 数值解法算例及分析

4.1. 破口面积的影响

假定某破损舱室净容积为 240 m^3 , 与相邻隔舱的平面薄舱壁承压能力为 0.294 MPa , 对应安全深度 H_s 为 30 m , 潜艇升速为 0.3 m/s 保持不变(不考虑破损进水对潜艇升速的影响), 求解不同破口面积下的最大可浮深度 H_{\max} , 如图 4 所示, 不同破口面积下的舱室进水量时间历程如图 5 所示。

由图 4 可以看出, 当潜艇升速不变时, 潜艇单舱破损后的最大可浮深度 H_{\max} 受破口面积影响较大, H_{\max} 随破口面积的增大急剧减小, 当破口面积增大到一定程度后最大可浮深度 H_{\max} 减小速率变缓且趋近于安全深度 H_s , 这是由于随破口面积的增大, 舱室进水速度加快并迅速达到舱室最大容许进水量 V_{\max} , 使得潜艇机动上浮的时间变短而导致。

由图 5 可以看出, 当潜艇升速不变时, 不同破口面积下的舱室进水量曲线的斜率(即进水速率)均随时间的增加而减小, 这是由于随舱室进水量增加, 舱室内气压升高, 加之随潜艇的上浮运动, 潜艇所处深度逐渐减小, 导致舱室内外压差逐渐减小, 故而进水速率逐渐减小。

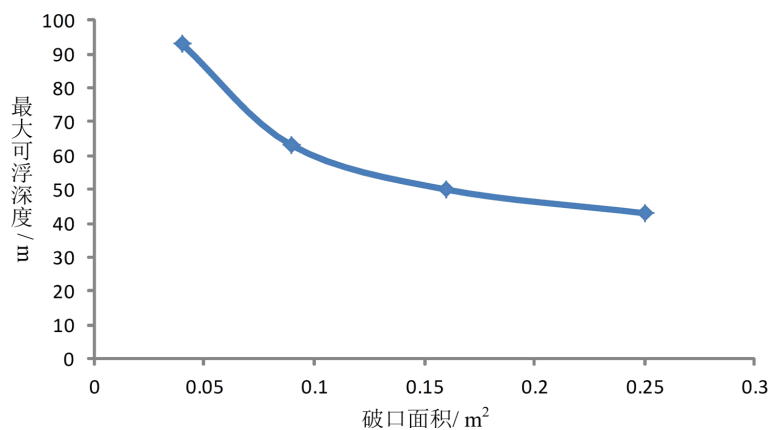


Figure 4. Maximum floatable depth to different broken areas

图 4. 不同破口面积下的最大可浮深度

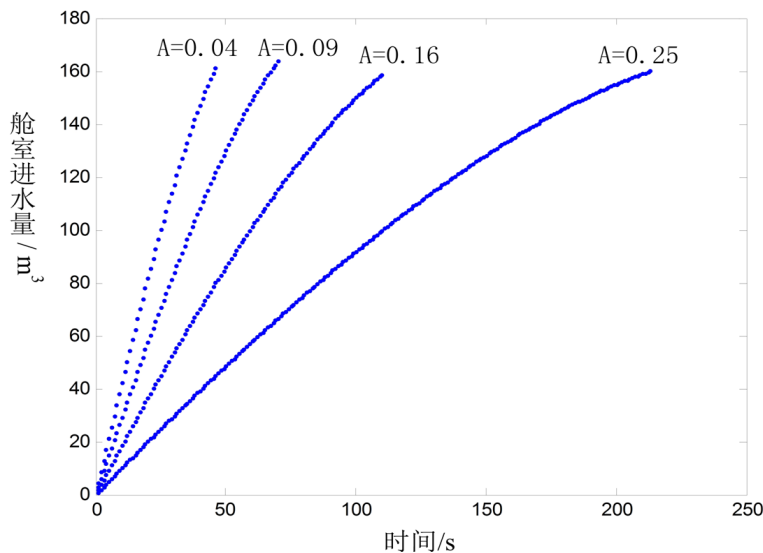


Figure 5. Inflow changes to different broken areas

图 5. 不同破口面积下的舱室进水量时间历程

4.2. 潜艇升速的影响

假定某破损舱室净容积为 240 m^3 , 与相邻隔舱的平面薄舱壁承压能力为 0.294 MPa , 对应安全深度 H_s 为 30 m , 舱室破口面积一定时, 求解不同潜艇升速下的最大可浮深度 H_{\max} , 如图 6 所示, 舱室破口面积为 0.04 m^2 时不同升速下的舱室进水量时间历程如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 当舱室破口面积一定时, 不同升速下舱室进水量随时间变化规律及原因跟图 5 是一致的。

由图 6 可以看出, 当舱室破口面积一定时, 潜艇单舱破损时的最大可浮深度随潜艇升速的增加而近似线性增加, 说明最大可浮深度受升速的影响同样较大, 通过对图 6 曲线拟合, 得到破口面积为 0.04 m^2 时最大可浮深度随升速变化的近似线性公式为

$$H_{\max} = 148v_z + 46.4 \quad (8)$$

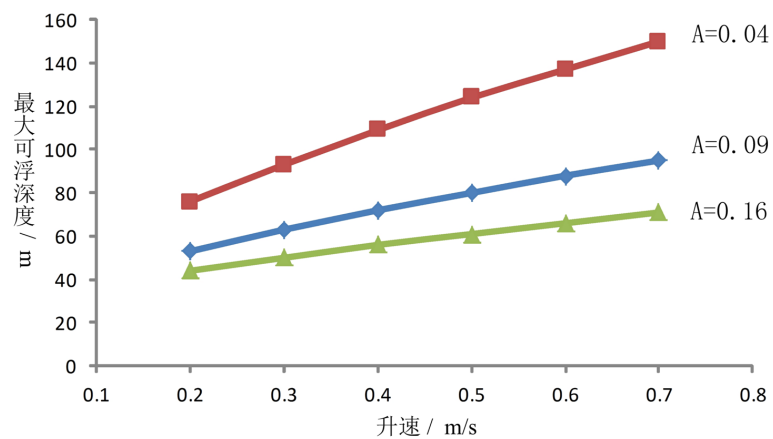


Figure 6. Maximum floatable depths to different vertical speeds

图 6. 不同升速下的最大可浮深度

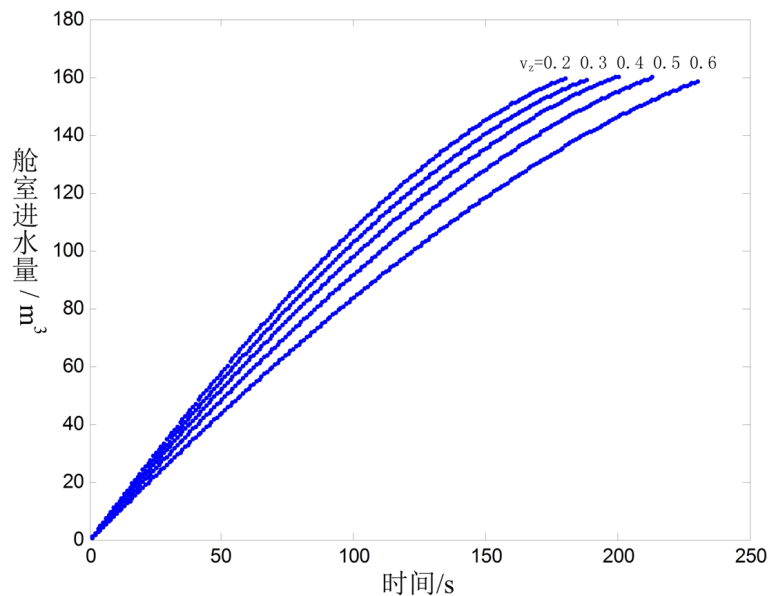


Figure 7. Inflow changes to different vertical speeds

图 7. 不同升速下的舱室进水量时间历程

4.3. 不同破口面积不同升速下潜艇最大可浮深度查询计算

鉴于最大可浮深度与潜艇升速的良好线性对应关系, 可将破口面积进行离散, 建立不同破口面积下潜艇最大可浮深度随升速变化的公式汇总表, 为潜艇战损时指挥员的快速决策提供方便。本节取破口面积为 0.04 m^2 、 0.09 m^2 和 0.16 m^2 进行举例说明, 此三种破口面积下潜艇最大可浮深度随升速变化公式汇总表如表 1 所示。根据实际需要可对破口面积进行细分, 依据本文数值计算方法建立更加详细的汇总表, 便于潜艇战损时快速估算潜艇所在破损深度下的最小升速需求。

Table 1. Maximum floatable depths calculating formulas to different vertical speeds of submarine

表 1. 潜艇最大可浮深度随升速变化公式汇总表

单舱破口面积(m^2)	潜艇最大可浮深度(m)
0.04	$H_{\max} = 148v_z + 46.4$
0.09	$H_{\max} = 84v_z + 36.2$
0.16	$H_{\max} = 54v_z + 33.2$

5. 结论

本文基于平面舱壁承压能力的动力抗沉有效性判据, 建立了潜艇单舱大深度破损进水模型和最大可浮深度的数值计算流程与方法, 通过数值仿真计算分析了不同破口面积和潜艇升速对最大可浮深度的影响, 研究表明破口面积和升速对潜艇单舱大深度破损时的最大可浮深度有重要影响, 且最大可浮深度与潜艇升速具有良好的线性对应关系, 在此基础上建立了不同破口面积下潜艇最大可浮深度随升速变化的公式汇总表。潜艇指挥员可依据本文数值方法和各舱净容积, 根据需要制定更加详细的汇总表, 便于潜艇战损时快速估算潜艇所在破损深度下的最小升速需求, 为指挥员选择兼顾潜艇隐身性与动力抗沉性的最优操纵决策提供支持。需要说明的是, 潜艇水下操纵与动力抗沉复杂影响因素众多, 不可能完全纳入分析, 本文研究结论仅作为辅助决策的参考之一。

基金项目

中国博士后科学基金项目(2017M613384)。

参考文献

- [1] 刘常波, 刘蓁, 黄海峰. 高压气吹除对潜艇动力抗沉影响分析研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(1): 91-98.
- [2] 徐亦凡, 陈丘岳, 胡坤. 高压气吹除时机对潜艇动力抗沉影响的仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(11): 114-115, 124.
- [3] 张建华, 胡坤, 徐亦凡. 航速对破损潜艇动力抗沉的影响分析[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(1): 51-53.
- [4] 王京齐. 潜艇的承载力与水下动力抗沉[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(4): 65-68, 72.
- [5] 朱军. 潜艇动力抗沉性能评估研究[J]. 船舶工程, 2003, 25(4): 43-46.
- [6] 林俊兴, 戴余良, 张涛, 黄华斌. 潜艇承载力分析和动力抗沉操纵方法研究[J]. 海军工程大学学报, 2004, 16(2): 27-29.
- [7] 陈水泉, 朱军, 曾广会. 潜艇动力抗沉运动特性分析[J]. 海军工程大学学报, 2010, 22(1): 51-61.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2324-7991，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aam@hanspub.org