

# 上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

## 学士学位论文

BACHELOR'S THESIS



论文题目： 波浪场细长体入水过程数值模拟研究

学生姓名： 解昊焱  
学生学号： 518021911249  
专业： 工程力学  
指导教师： 陈瑛  
学院(系)： 船舶海洋与建筑工程学院

# 上海交通大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

# 上海交通大学

## 学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于  公开论文

内部论文， 1年/ 2年/ 3年 解密后适用本授权书。

秘密论文，\_\_\_\_年（不超过10年）解密后适用本授权书。

机密论文，\_\_\_\_年（不超过20年）解密后适用本授权书。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名： 指导教师签名：

日期： 年 月 日 日期： 年 月 日

# 波浪场细长体入水过程数值模拟研究

## 摘要

入水是指航行体从空气进入水面的过程。在航行体入水时，会携带一部分气体进入水中，或者会使水汽化成水蒸气，这便是入水空泡/空化现象。入水问题是当前科研领域的一个关键问题，研究由来已久。当前阶段，空泡入水是入水问题研究的热点方向。空泡入水问题在波浪场环境下的研究相对不够充分，因此本论文研究了波浪场环境下的空泡入水问题。

入水空泡这一问题的研究是一个悠久问题，并且一直是流体领域的研究热点和难点。早在 20 世纪初期，入水时受到的冲击就已经有了许多研究，随后至 20 世纪后半页，入水空泡和空化问题逐渐引起了研究的重视。对于入水问题，早期的研究方法包括理论求解，实验验证等，后来逐步开始采用有限元，PIV 或者 CFD 数值模拟的方法。本论文使用的是 CFD 方法对入水空泡问题进行数值模拟。

航行体进入波浪场时，航行体和波浪场中水和空气的行为都可由物理学和流体力学基础数学模型描述。包括流体的连续性方程，动量方程以及能量守恒方程。之后，又论述了多相流环境下的流体力学基本方程的相关变化。最后又论述了入水空泡模型。这些数学模型是进行数值模拟的基础。

为了实现数值模拟，本文借助流体力学计算软件 Fluent 进行数值模拟。首先，本文介绍了采用的几何模型和网格划分，其次，给定了各个边的边界条件，并论述了具体的消波方法。为了防止出水区边界造成波浪反射现象，在波浪场中增加一部分消波区，并且在该区域内采用动量源项消波法的方法。为了更好地捕捉界面，采用 VOF 方法进行捕捉。航行体入水过程中，为了让航行体周围的流场情况更加精确，采用重叠网格技术，将包裹航行体的动网格和环境的静态网格可以融合在一起进行流场求算。最后论述了本次实验的具体设置实验设计，根据不同入射角度和入射相位，总计进行了 9 组实验。

最后，本文对 9 组数值模拟实验进行分析和现象归纳。首先展示了稳定的波浪场结果，其次大致描述了不同入水阶段的密度分布。之后以  $60^\circ$  入水和  $90^\circ$  入水的各一个算例为例，详述了入水过程中的密度场，压力场和速度场。最后分析和论述了各算例下航行体入水过程的特点。

**关键词：**入水，空泡，波浪场，数值模拟

# NUMERICAL SIMULATION STUDY OF WATER ENTRY PROCESS OF SLENDER BODY IN WAVE FIELD

## ABSTRACT

Water entry refers to the process in which a vehicle enters the water surface from the air. When the vehicle enters the water, it will carry a part of the gas into the water, or it will vaporize the water into water vapor, which is the phenomenon of water entry cavitation/cavitation. The problem of water entry is a key issue in the current scientific research field, and the research has a long history. At the current stage, cavitation into water is a hot research direction of water entry. The research on the problem of cavitation into water in the wave field environment is relatively insufficient, so this paper studies the problem of cavitation into the water in the wave field environment.

The study of water entry cavitation is a long-standing problem, and has always been a hot and difficult research topic in the field of fluids. As early as the early 20th century, there have been many studies on the impact of water entry, and then to the second half of the 20th century, the problems of water entry cavitation and cavitation gradually attracted research attention. For the water entry problem, the early research methods include theoretical solution, experimental verification, etc., and then gradually began to use finite element, PIV or CFD numerical simulation methods. In this paper, the CFD method is used to numerically simulate the water entry cavitation problem.

When a vehicle enters the wave field, the behavior of water and air in both the vehicle and the wave field can be described by mathematical models based on physics and fluid mechanics. Including fluid continuity equation, momentum equation and energy conservation equation. Afterwards, the related changes of the basic equations of fluid mechanics in the multiphase flow environment are discussed. Finally, the water entry cavitation model is discussed. These mathematical models are the basis for performing numerical simulations.

In order to realize the numerical simulation, this paper uses the fluid mechanics calculation software Fluent to carry out the numerical simulation. Firstly, this paper introduces the adopted geometric model and mesh division. Secondly, the boundary conditions of each edge are given, and the specific wave elimination method is discussed. In order to prevent the wave reflection phenomenon caused by the boundary of the water outlet, a part of the wave absorbing area is added to the wave field, and the method of the momentum source term wave absorbing method is used in this area. In order to better capture the interface, the VOF method is used to capture. In the process of entering the water, in order to make the flow field around the vehicle more accurate, the overlapping grid technology is used, and the dynamic mesh surrounding the vehicle and the static mesh of the environment can be integrated to calculate the flow field. Finally, the specific experimental design of this experiment is discussed. According to different incident angles and incident phases, a total of 9 groups of experiments are carried out.

Finally, this paper analyzes and summarizes the phenomena of 9 groups of numerical simulation experiments. First, the stable wave field results are shown, and second, the density distribution at

different water entry stages is roughly described. Then, the density field, pressure field and velocity field in the process of water entry are described in detail by taking one example of 60° entering water and 90° entering water as examples. Finally, the characteristics of the water entry process of the vehicle in each case are analyzed and discussed.

**Key words:** water entry, cavity, wave field, CFD

## 目 录

第一章 研究背景	1
1.1 波浪场入水过程的物理现象	1
1.2 航行体入水过程的研究方法	2
1.3 国内外发展现状	3
第二章 空泡入水问题的数学模型	6
2.1 多相流数学模型	6
2.2 入水空泡模型	6
2.2.1 自由面空气和气体空泡模型	6
2.2.2 空化模型	7
第三章 数值计算方法	8
3.1 几何模型和网格划分	8
3.2 造波方法与边界条件	9
3.3 动量源项消波法	9
3.4 数值方法	9
3.5 界面捕捉的 VOF 方法	9
3.6 重叠网格技术	10
3.7 入水数值模拟方案	11
第四章 数值模拟结果与分析	13
4.1 稳定的波浪场结果	13
4.2 不同入水阶段的密度分布	13
4.3 入水过程的流场状态细节分析	15
4.3.1 60° 入水条件下的入水过程流场状态细节	15
4.3.2 90° 入水条件下的入水过程流场状态细节	18
4.3.3 45° 入水条件下的入水过程流场状态细节	20
4.4 不同算例的航行体入水全过程动力学特性分析	22
4.4.1 不同波浪相位的入水过程的对比	22
4.4.2 入水过程的位移	24
4.4.3 入水过程的速度	24
4.4.4 入水过程中的角度变化	25
4.4.5 入水过程中的受力情况	26
4.4.6 入水过程中受到的最大压力	27
全文总结	29
参考文献	30
致 谢	36

## 第一章 研究背景

随着全球各军事强国科技实力的不断增强，海洋日趋成为各国竞相争夺的现代战争主战场。作为现代海战武器装备的重要组成部分，空投鱼雷、反潜导弹、火箭深弹、高速射弹等水下武器的发展一直是各国非常重视的热点问题。自上世纪后期以来，俄罗斯“暴风雪”超空泡鱼雷和美国“RAMICS”超空泡射弹系统的出现更是将国际尖端水下武器的研制带入了新的研究热潮。我国要在未来成为海上军事强国就必须重视这些先进水下航行体的水动力特性和机理的研究。

水下航行体从机载或舰载平台发射后，必须经历穿越自由水面的入水过程。入水过程作为水下航行段的开始，是限制超空泡武器研发的一个关键瓶颈。首先，为了便于水下超空泡的形成宜采用高速入水，而高速入水冲击会造成航行体结构和器件的破坏；其次，入水空泡对入水后航行体的弹道稳定性产生很大影响。总之，入水过程是整个航行过程中流动现象和载荷最复杂、航行体姿态和弹道最不确定的非受控阶段，同时也为紧接着的水下航行阶段提供初始条件，其对于水下航行的可控性和末段攻击的有效性具有至关重要的作用。因此，入水过程是发射过程中最重要的环节，也是决定发射成败的关键所在。

### 1.1 波浪场入水过程的物理现象

入水过程涉及航行体和空气-水表面，在航行体的运动过程中，空气和水的流体特性占据主要影响。入水过程会发生航行体与空气-水表面的接触，因而会发生受力，受力矩等的突变，再考虑到流体本身的湍流特性和复杂性，整体是高度非线性问题。在波浪场中进行运动，波浪场本身也是一个时变系统，入水过程的具体动力学特性也与航行体入水时波浪场所处的相位息息相关。入水过程会发成空泡现象<sup>[1, 2]</sup>，具体地，包括航行体携空气入水和空化现象。当航行体运动速度较低时，航行体会携带一部分空气进入水中，形成空泡；当航行体运行速度更高时，在普通空泡的基础上，还会发生空化现象：由于运动速度很高，使得局部压力变得很低，使得水发生了蒸发，这些水蒸气形成了空化的气泡。

航行体入水的科学问题涉及介质密度突变、瞬间极端载荷、流体压缩性、移动接触线、自由面大变形、入水空泡演化、多相间作用、湍流流动等诸多物理效应，具有多因素耦合作用的高度非线性、非稳态和多尺度的特点。由于从空气到水的介质密度突跃，航行体撞击水面时瞬间产生巨大的砰击载荷，严重威胁航行体的结构安全性和入水弹道稳定性，特别是斜向入水时易发生跳弹、忽扑、甚至沉底等严重后果。高速入水瞬间还会产生向水体中辐射的冲击波，须考虑液体压缩性的影响。由于气液动态接触角所代表的航行体表面亲疏水性（沾湿性）的不同，入水现象可分为无空泡入水和带空泡入水。接触角的大小决定了能够产生入水空泡的临界毛细管数  $Ca$ （或临界速度），而航行体入水速度一般远高于其临界速度，因而大多表现为带空泡入水。入水后的头部沾湿面积增长至一个稳定的空泡分离线为止，而航行体构型和入水条件等则共同影响着变化多端的入水空泡形态。入水空泡根据空泡生成物理机制的不同又可分为两类<sup>[2]</sup>，如图1-1所示：（I）一般高速入水时，空泡膨胀抽吸水面空气形成高速气流，泡内气流压力低于大气压，形成携带空气的气体空泡。（II）超高速入水（ $O(10^3)m/s$ ）时，泡内空气远远偏离平衡态而造成极低压，自然空化效应形成含水蒸汽的两相超空泡。航行体带空泡入水过程虽然短暂，但可细分为水面抨击、流动形成、空泡敞开开发

展、空泡闭合、空泡溃灭、全湿航行等几个阶段，图 2 以圆球入水为例给出主要过程示意图。抨击作用将动量传输给水体并建立起扰动流场，同时航行体携带空气形成敞开发展的空泡。在周围水体的约束作用下，空泡膨胀迫使流动向无约束的自由水面发展，形成自由面隆起，继而产生分离液鞘和飞溅液滴。航行体在泡内运行的尾拍和滑行等模式还会与空泡相互作用形成二次干扰泡。空泡膨胀吸入的高速气流（甚至在空泡收缩喉部达到超声速<sup>[3]</sup>）造成泡内压力降，随着空泡径向惯性动能的持续消耗、以及泡内与周围环境压差的不断增大，空泡在自由面附近或中段发生闭合和断裂。空泡闭合现象存在表面闭合、深闭合、浅闭合、准静态闭合等多种形式。空泡闭合瞬间产生两股反向高速射流，射流冲击空泡壁面和航行体尾部，破坏空泡形态及造成弹道失稳。当首次闭合后的空泡较长时还会发生多次闭合脱落现象，不断干扰航行体的运动。空泡完全闭合后，航行体带局部附着空泡航行，局部空泡会由于水流的挟带作用而发生的非稳态脱落、突发不对称滑脱等现象，引起航行体运动方向的不稳定。



图 1-1 航行体入水空泡，(a): 细长航行体入水空泡；(b): 高速入水的多相超空泡

## 1.2 航行体入水过程的研究方法

入水过程是一个非常复杂的非线性问题，尽管我们已经有了非常丰富的对流体各问题的数学描述，但想要单纯通过理论对具体的入水过程进行求解接近于不可能。早期对于入水问题的研究的一个重要问题是想要通过理论分析计算出入水过程中物体受到的最大冲击力，但被证明是非常困难的。尽管实验是研究该过程的最可靠方法，但在实践中，通过实验评估航行体上的水压是不现实的，因为这需要安装大量压力传感器来覆盖所有敏感的航行体上的区域。因此，测量只能在有限的位置进行，这意味着评估不会是全面的。或者，建模方法可以克服传感器数量的限制，但很难准确预测航行体上的水致压力。以有限元分析法 (FEA) 为例，它需要在航行体表面的特定位置输入压力来进行相关的结构分析，但 FEA 本身并没有可靠的来源来提供该压力输入。因此，之前对入水航行体的有限元分析研究是基于准静态假设建立的，其中水压可以从实验中获得（同样是有有限的位置），或者根据重力加速度和动压公式估算，即  $H = 1/2gt^2$ ,  $v = gt$ ,  $P = 12\rho_{water}v^2$ ，其中  $H$  是航行体的下落高度， $P$  是可以标定并输入 FEA 的水压。因此，不可靠的水压源在以下有限元分析结构评估中增加了相当大的不确定性。进水问题的另一种方法是面板积分法，它依赖于势流理论，其中离散化方法用于将物体划分为有限数量的表面，然后可以获得 Froude-Krylov 力。Zhao 和 Faltinsen<sup>[4]</sup> 使用这种方法进行了具有代表性的进水研究，该方法至今仍被广泛用作基准。尽管如此，他

们的解决方案是针对零重力条件提出的，这意味着它可能仅与允许忽略重力的进水过程物理匹配。然后将该方法扩展到包括重力<sup>[5]</sup> 和非线性速度属性<sup>[6]</sup>。然而，这种类型的势流解决方案不能解释粘性和湍流的流体行为，仍然限制了它的工程适用性。

最广泛的航行体入水的研究方法是使用基于网格的 CFD 方法，或称为有限体积法，这种方法应用广泛且成熟。CFD 已广泛应用于预测流体行为<sup>[7]</sup> 和流体引起的结构载荷、运动和变形<sup>[8-10]</sup>。据研究，CFD 的准确性对于固体与包含自由表面的多相流相互作用的流体动力学问题非常好<sup>[11-13]</sup>，对粘性和湍流进行了很好的建模<sup>[14]</sup>。本文使用成熟的商业软件 Fluent 进行航行体入水过程的模拟。

### 1.3 国内外发展现状

纵观物体入水问题的研究历史，其研究方向主要沿着入水冲击和入水空泡这两条主线展开，彼此之间是相互联系和交织的，两者又各有试验研究、理论建模和数值计算等几种研究手段。从国内外的研究历程来看，大体可分为早期（19世纪末20世纪初）、中期（第二次世界大战后至20世纪末）和近代（20世纪90年代迄今）三个发展阶段。

关于入水冲击问题，最大冲击载荷的理论预报和试验测量都是非常困难的，理论难点在于必须考虑自由面的非线性变形，试验难点则在于试验装置难以承受巨大冲击载荷和实现快速动态响应。入水冲击问题最早的先驱性理论工作是 Von Karman<sup>[15]</sup> 提出的附加质量方法，其后国际上的理论研究大多都是该理论的延伸。Wagner<sup>[16]</sup> 在此基础上针对小斜升角二维楔形体的垂直入水问题提出了近似平板理论，为入水冲击的研究奠定了重要的理论基础，后人的很多理论方法都是 Wagner 问题的改进和拓展。入水冲击的最早试验研究则是由 Watanabe 开展的圆锥、圆球和圆板等的入水试验，为后人理论模型的发展提供了关键的验证数据。迄今为止，国内外在这些先驱工作的基础之上围绕入水冲击开展了大量研究探索<sup>[4, 17-44]</sup>。鉴于本项目的主要内容在于入水空泡，因此入水冲击的研究现状和发展动态这里不多赘述。

物体入水空泡的研究最早始于19世纪末 Worthington 的开创性工作。他运用闪光摄影技术研究了球体垂直入水过程，首次系统阐述了水面喷溅、空泡闭合和射流等流动现象。尽管受当时试验条件所限，他的研究思路和关于入水现象的定义仍然被后来的研究者沿用，如 Bell 和 Maccoll<sup>[45]</sup> 分别开展了一系列圆球垂直入水试验，对入水空泡的形成机理和发展过程给出了更为明确的物理描述。这些研究只是出于对物理现象本身的兴趣，在当时并没有明确的应用背景。20世纪第二次世界大战后，由于水下武器发展的迫切需要，人们开始重新开展入水空泡的基础研究。Gilbarg 和 Anderson<sup>[46]</sup> 针对入水速度、大气压力和密度对入水空泡发展规律的影响开展了大量试验研究。May 和 Woodhull<sup>[47]</sup> 利用高速相机拍摄了球体入水过程，计算并建立了入水阻力与弗劳德数和雷诺数的函数关系。Richardson 等<sup>[48]</sup> 研究了流体密度和粘度对球体垂直入水空泡演化的影响，同时结合势流理论对空泡发展过程进行了理论描述，并分析了球体倾斜入水的水面弹跳现象的机理。May 和 Woodhull<sup>[49]</sup> 选取不同材质的球体研究了球体与水的相对密度、表面材料性质等对入水附加质量的影响。Birkhoff 等对物体入水流场运动规律、入水空泡瞬态特性、空泡闭合射流以及泡内压强等进行了试验研究。Abelson<sup>[50]</sup> 开展了射弹垂直入水空泡内部压力分布的试验研究。结果表明：空泡发生表面闭合之前的泡内压力降低量远大于预期，并且压降随入水角的减小而迅速减小。Logvinovich<sup>[51]</sup> 基于能量守恒提出的空泡截面“独立膨胀原理”是最早描述空泡发展过程的理论，一直是入水空泡壁面运动理论研究的重要思想之一。May<sup>[52, 53]</sup> 通过总结美国海军军械实验室长期的入水空泡试验结果，发展出了预测垂直入水空泡轮廓的“理想空泡模型”。总体来说，入水

空泡的瞬态特点对于试验设备和试验技术的要求非常高，因此这一时期国内外还只有少数研究机构在国家军事需求的支撑下开展入水空泡研究。

进入 21 世纪之后，流体力学测试技术的进步大大促进了入水空泡研究的活跃度，大量研究成果在流体力学国际顶级学术刊物上持续发表。哈佛大学的 Glasheen 和 Macmahon<sup>[54]</sup> 在研究美洲蜥蜴的水面快速行走时发现其脚底打击水面产生入水空泡，并将该过程简化为圆盘入水问题开展试验研究<sup>[55]</sup>，分析了低雷诺数下圆盘匀速垂直入水产生的空泡及其阻力变化。Gaudet<sup>[56]</sup> 则在低弗劳德数下数值模拟了圆盘垂直入水空泡和阻力系数的发展过程，发现了空泡深闭合位置与弗劳德数的对应相关。Gekle 等<sup>[57]</sup> 则针对圆柱入水空泡总结了空泡深闭合与弗劳德数之间的关系，表明在不同速度范围内出现不同的变化趋势。Lee 等<sup>[58]</sup> 运用能量守恒原理建立了高速入水空泡生成和溃灭过程的空泡动力学理论模型，研究了高速入水空泡的生成、发展以及深闭合和表面闭合的发生过程与影响因素，给出了发生这两种空泡闭合的弗劳德数范围 ( $20 < Fr^2 < 70$  和  $Fr^2 > 150$ )。Gordillo<sup>[59]</sup> 等运用势流理论研究了高雷诺数下入水空泡最小半径及闭合点空泡形态随时间的变化关系，选择不同变化关系时可得到不同的闭合点形状。Oger 等<sup>[60]</sup> 采用 SPH 方法计算了楔形体入水过程中的流固相互作用，得到了与试验吻合良好的压力场和物体运动特性。Duclaux 等<sup>[61]</sup> 在高雷诺数和高韦伯数下试验研究了圆球和圆柱入水空泡，总结了不同入水速度和物体直径条件下的深闭合位置和时间的规律，又采用势流理论并借鉴经典 Besant-Rayleigh 空泡溃灭问题，建立了泡径随时间变化的数学模型。Duez 等<sup>[62]</sup> 以及 Snoeijer 和 Andreotti<sup>[63]</sup> 关于表面沾湿性对气液分离影响的研究表明，对于任何气液接触角都存在一个生成入水空泡的临界毛细管数  $Ca$  ( $Ca > 0.1$  时任意接触角均能产生入水空泡)。Aristoff 等<sup>[64]</sup> 试验研究了低邦德数下的入水空泡，指出空泡外形取决于表面张力与惯性力之比。Aristoff 和 Bush<sup>[65]</sup> 总结了入水空泡闭合的四种类型（深闭合、表面闭合、浅闭合和准静态闭合）的形态特征和发生条件。Antkowiak 等<sup>[66]</sup> 则详细研究了空泡闭合过程中产生的两股反向射流（包括著名的 Worthington 射流）的形成过程以及形状和大小。麻省理工学院的 Truscott 在 Techet 指导完成的博士论文<sup>[67]</sup> 以及系列研究论文中，系统地开展了圆球垂直入水<sup>[68, 69]</sup>、亲疏水性圆球旋转入水<sup>[70-72]</sup> 和高弹性圆球倾斜入水<sup>[73]</sup> 等方面的试验研究，利用粒子图像测速仪 (PIV) 测量了入水空泡流场，详细讨论了空泡形态演化及空泡对流体动力的影响。Truscott 等<sup>[74]</sup> 还开展了细长圆柱弹体高速倾斜入水的试验研究，分析了不同头型和材质弹体的入水弹道稳定性（包括跳弹现象）。Backer 等<sup>[75]</sup> 试验研究了圆锥体垂直入水的流动分离和空泡演化过程，讨论了物体入水后的速度、加速度和阻力系数的变化过程。Gekle 等<sup>[3]</sup> 在圆盘入水空泡试验中发现，空泡颈缩闭合时的泡内气流速度随着空泡截面的缩小而迅速增加，喉部速度甚至达到超声速状态。Grumstrup 等在物体高速入水试验中观察到闭合后空泡壁面的规则波动现象，通过测量空泡附近流场中的瞬间声信号变化，证实这种空泡脉动是由深闭合夹断瞬间的压力扰动所引起的声共振。Bodily 等<sup>[76]</sup> 在试验中采用物体内嵌加速度仪的方法，研究了各种头型和表面亲疏水性的细长航行体以不同倾角入水的过程，通过加速度积分计算和分析了水中运动阻力以及轨迹、速度、加速度和偏转角度与各种入水参数之间的关系。试验还发现，光滑头型的入水空泡大小不足以包裹细长航行体时，空泡深闭合会首先发生在航行体上。Enriquez 等<sup>[77]</sup> 的试验也显示了航行体外形对空泡闭合行为的改变。他们开展了各种周向开槽圆盘的入水空泡扰动试验，发现形成菠萝状的非轴对称入水空泡，激发空泡面的高阶谐波振动，进而引发非常规的复杂深闭合现象。

国内学者长期以来关于入水空泡问题也开展了大量的研究工作。张庆明和陈九锡<sup>[78]</sup> 采用高速相机开展了半球头圆柱体垂直入水空泡试验，分析了入水深度、速度和加速度随时间

的变化过程。陈九锡和颜开<sup>[79]</sup>采用 MAC 方法计算了不同头型航行体的垂直入水过程，并分析了空泡从产生到溃灭的过程。叶取源<sup>[80, 81]</sup>基于非线性自由面理论，采用欧拉-拉格朗日混合边界元法和时间步进法，对锥头和平头航行体入水空泡的发展过程及表面闭合、深闭合等流动现象进行了数值计算，分析了弗劳德数和航行体质量对空泡演化的影响。李森虎、何友声和鲁传敬<sup>[82]</sup>采用质点网格法（PIC）开展了超音速平头航行体垂直入水全过程的数值模拟，直观清晰地展现了入水气垫效应、水中激波传播以及入水空泡和自由面演化过程。进入 21 世纪后，国内的入水空泡研究也在向高精度、高分辨率试验测量和流场模拟的精细化方向发展。施红辉等<sup>[83]</sup>采用高速摄像手段研究了射弹以 300m/s 以上的超高速入水形成的超空泡，精细地观测了水面剧烈喷溅、表面闭合和深闭合的先后发生、以及水中气泡流等一系列有趣流动现象。施红辉等<sup>[84, 85]</sup>又通过试验测量了钝头体入水的水下声场特性，还分析了细长体头型等因素对入水空泡形态演化和自由面波动特性的影响规律<sup>[86]</sup>。顾建农和张志宏等利用高速摄像研究了球形弹和手枪子弹的入水问题，分析了两种弹丸在不同入水条件下的空泡形态以及水中弹道变化规律。易文俊等<sup>[87]</sup>采用基于 RANS 的单一介质可变密度混合模型，对水下射弹空泡进行了数值模拟研究。魏卓慧和王树山等<sup>[88]</sup>针对球体入水过程的空泡形态和速度变化开展试验研究，分析了不同入水角度的空泡深闭合特性。金大桥<sup>[89]</sup>对细长圆柱体以 100m/s 以下速度水平入水时的超空泡进行了试验和数值模拟，给出了超空泡形态和流体动力的变化规律。张伟等<sup>[90-92]</sup>也研究了多种不同头型细长体的水平高速入水过程，通过研究空泡特性获得了阻力与弹道的关系。曹伟等<sup>[93]</sup>数值模拟研究了航行体以 110m/s 高速入水形成的空化数连续变化的自然超空泡，通过建立简化运动方程分析了航行体的水弹道稳定性。王聪等<sup>[94]</sup>采用多相流模型和 VOF 方法数值模拟了锥头圆柱航行体的中等速度入水过程，分析了空气压强对入水空泡的影响规律。魏英杰和王聪<sup>[95]</sup>又采用 VOF 方法对锥头航行体高速入水空泡进行流场模拟，研究了空泡深闭合特性并得到了航行体弹道规律。王聪<sup>[96]</sup>、张伟<sup>[97]</sup>指导的学位论文中采用试验结合数值和理论建模的手段，系统地研究了球体和柱状航行体以 10m/s – 500m/s 的速度垂直和倾斜入水的多相空泡流场和弹道稳定性，研究了头型、入水速度和入水角等因素的影响，并率先探索了航行体并行和串联入水的空泡和流场特性。

## 第二章 空泡入水问题的数学模型

空泡入水过程是一个多介质且时变的流体问题，其基本理论可由多相流数学模型和入水空泡模型进行阐述。在本文的环境中，航行体的速度远不能达到超空泡现象的条件，即很难发生空泡现象。但为了让模型整体具有更好的通用性，在本章的基本理论部分将涉及到包含空化原理在内的整个过程的全部理论知识。

### 2.1 多相流数学模型

在航行体空泡进入波浪场的环境下，整体环境为气-液-汽三相的波浪场环境，空气与水均满足流体基本的连续性方程，动量方程以及能量守恒方程，

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( p + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (2-3)$$

上式为连续性方程，动量方程以及能量守恒方程的张量表示法，其中  $\rho$  为流体密度， $\mu$  为动力学粘性系数， $p$  为压强， $E$  为内能与动能之和。 $u_i$  为流体速度，是一个三维向量。

实际的入水过程都需要借助湍流模型表述<sup>[98]</sup>，对于流场中的气体和液体，均满足

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (2-4)$$

其中  $\phi$  是流场中关于  $\mathbf{x}$  和  $t$  的连续函数。

在气-液-汽三相流的环境下，需要引入各相的体积分数，满足，

$$\sum_{q=1}^3 \alpha_q = 1 \quad (2-5)$$

由于三相流模型中气液汽均满足相同形式的控制方程，因而混合介质下的各物理量可表达为以下形式：

$$\phi = \begin{cases} \sum_{q=1}^3 \alpha_q \phi_q & \phi = \rho, \mu \\ \sum_{q=1}^3 \alpha_q \phi_q \rho_q & \phi = E, T \end{cases} \quad (2-6)$$

而各相还需要满足输运方程：

$$\frac{\partial(\rho_q \alpha_q)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_q \alpha_q u_i)}{\partial x_i} = \begin{cases} 0 & q = gas \\ S & q = vapor \end{cases} \quad (2-7)$$

### 2.2 入水空泡模型

#### 2.2.1 自由面空气和气体空泡模型

本项目的入水问题采用 Mixture 模型，对于航行体入水时形成的空泡，其中气相体积也满足方程2-7，故有，

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \alpha_g) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_g \alpha_g u_i) = 0 \quad (2-8)$$

## 2.2.2 空化模型

当物体超高速 ( $10^3 m/s$ ) 入水时, 会发生显著的自然空化现象, 其中蒸汽相满足以下形式的输运方程:

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \alpha_v) = S_e - S_c \quad (2-9)$$

其中  $S_e - S_c$  为相变速率, 典型的空化模型中, 有,

$$S_e = C_e \rho_v \alpha_l \frac{\max(p_v - p, 0)}{(1/2 p_l U_\infty^2) t_\infty} \quad (2-10)$$

$$S_c = C_c \frac{\rho_v}{t_\infty} (\alpha_l - \alpha_g)^2 (1 - \alpha_l \alpha_g) \quad (2-11)$$

其中  $C$  为经验系数, 下标  $l$ 、 $v$ 、 $g$  分别代表液相、蒸汽相和气相,  $\alpha$  为各相的体积分数。

## 第三章 数值计算方法

为了实现对细长航行体进入波浪场的模拟，本文借助流体力学计算软件 Fluent 对不同的入水条件进行数值模拟。本文首先确定了计算的几何模型和区域，进行恰当的网格划分，给予合适的 UDF 边界条件，选用适当的数值方法，从而实现了波浪场的模拟。之后借助界面捕捉的 VOF 方法以及重叠网格技术，实现了航行体入水的方案设计。

### 3.1 几何模型和网格划分

本文为了模拟五级海况<sup>[99]</sup>的环境，选取的环境场背景网格为  $300\text{m} \times 60\text{m} \times 10\text{m}$  的长方体区域。模拟水深 40m，波长 40m，波高近 3m。由于水面附近的计算精度要求高，故以水面所在平面为最精细的网格，两侧以一定比例按等比数列扩大其网格间距。入水过程发生在波浪船舶方向的  $0 < x < 200$  范围内，后半区域  $200 < x < 300$  为消波区。工作区划分为均匀网格，每个波长内大约 80 个网格，消波区采用快速增大的粗糙网格，总体网格量为 84 万，可以足够精细地描述波浪场环境。

运动网格为围绕入水细长航行体的圆柱体网格。细长航行体的长度 5m，直径 0.5m。网格沿圆柱体轴线方向采用等距划分，沿径向方向从外至内按照等比数列距离缩小，以增强靠近物体表面部分的精度。在模拟过程中，动网格始终环绕着入水物体，与入水物体之间的相对位置保持不变，并使用重叠网格技术以进行区域内的数值模拟。在初始状态下，背景网格与运动网格如图 3-1 所示

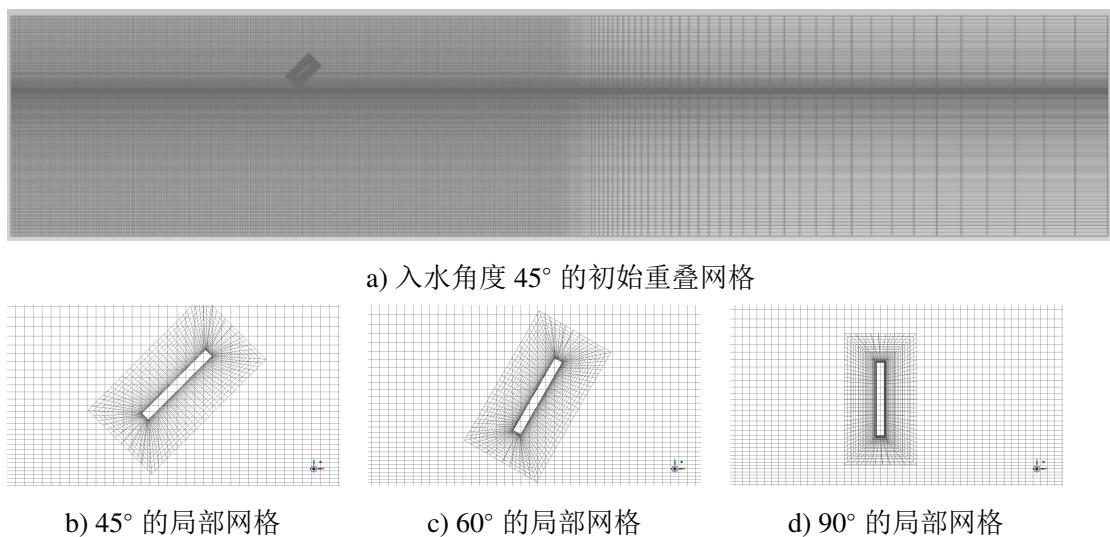


图 3-1 初始重叠网格

## 3.2 造波方法与边界条件

采用速度边界作为输入的造波方法进行二阶 Stokes 波的模拟，入口处实时给定波高  $\eta$  以及  $x$  方向和  $y$  方向的水质点速度  $(u, v)$ <sup>[100]</sup>。

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t + \Phi_0) + \frac{kH^2 \cosh ky}{16 \sinh^3 kd} (\cosh 2kd + 2) \cos 2(kx - \omega t) \quad (3-1)$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(y+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) + \frac{3\pi H}{4T} \left( \frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2k(y+d)}{\sinh^4 kd} \cos 2(kx - \omega t) \quad (3-2)$$

$$v = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(y+d)}{\sinh kd} + \frac{3\pi H}{4T} \left( \frac{\pi H}{L} \right) \frac{\sinh 2k(y+d)}{\sinh^4 kd} \sin 2(kx - \omega t) \quad (3-3)$$

在确定了左侧入口处的速度边界条件后，为了保证入口和出口流量守恒，右侧出口给定与入口 Stokes 波的静漂移相对应的均匀速度。本模型模拟的是三维环境，但 z 方向的动力学特性是轴对称的，因而 z 方向的两个表面采用的是对称面边界条件。 $y = 0$  的边界为海底，给定固壁边界条件， $y = 60$  的边界为大气，给定压力出口边界。

## 3.3 动量源项消波法

单纯采用速度边界作为输入时，会发生波浪反射的现象，影响波浪场效果。对于这个问题，可以采用动量源项消波法使结果更准确<sup>[101-103]</sup>。本文使用动量源项消波法的区域为  $200 < x < 300$  的消波区。对于 Navier-Stokes 方程，增加一动量源项，有

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( p + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + S_i \quad (3-4)$$

其中  $S$  即为增加的动量源项，可采用如下形式确定：

$$S_i = [C(x) - 1] \left[ \frac{\rho}{\Delta t} (u_{iC} - U_i) - \rho u_{jC} \frac{\partial u_{iC}}{\partial x_j} - \frac{\partial p_c}{\partial x_i} + \rho f_i \right] \quad (3-5)$$

其中  $C(x)$  为任意光滑函数，下标  $C$  为计算值。在本次模拟场景下， $C(x)$  取值为

$$C(x) = 0.9985 + 0.0015t - 0.9985e^{-t/0.025}, t = 1 - \frac{x}{l} \quad (3-6)$$

其中  $x$  为质点距消波区左端的距离， $l$  为消波区长度

## 3.4 数值方法

数值模拟在上述网格划分和边界条件等的基础之上，借助商业计算流体软件 Fluent，设定具体地数值方法。模型整体是基于压力的时变迭代方法，考虑重力的影响。以水为主相，气为次相，水相为不可压缩流体，气相采用理想气体模型考虑其压缩性。采用 RNG k-epsilon 模型结合壁面函数的方法计算湍流效应。数值算法采用压力速度耦合算法。

## 3.5 界面捕捉的 VOF 方法

航行体入水过程涉及大变形自由面的液鞘分离和液滴飞溅、瞬态空泡的断裂和破碎等复杂现象。基于 Mixture 模型计算得到的流场中虽然已经包含各相界面，但是为了捕捉更加清晰的自由水面和空泡界面形状，VOF 在 Mixture 的基础上更增加了额外的界面构造算法，

更有利于清晰地捕捉高速入水过程的相间界面。因此，我们将选用 VOF 方法捕捉足够高分辨率的自由面和空泡形态演化过程。

VOF 方法完全与 CFD 网格计算方法相适配，他给每个网格定义各项体积分数  $\alpha_i$ ，并构造体积分数  $\alpha_i$  的发展方程，通过与流体运动耦合的流体体积输运，可以精细地确定该运动界面的位置、形状以及变化，从而可实现界面追踪。在二维情况下，交界面可以看成是由分段连续的直线段构成。使用 VOF 方法，已知界面网格以及相邻网格的目标流体体积分数，便可以通过重构来获得交界面的形状函数。

VOF 方法里确定具体的气液边界的位置和形状依赖于有效的格式。最简单的 VOF 方法是通过直线界面计算的 SOLA-VOF 算法，使用平行于网格的直线段近似界面（SLIC），因此在界面重构上的精度仅为一阶。更精确的界面重构技术是采用分段线性的直线和几何构造方法来重构界面，在本文中采用二阶PLIC 几何重构格式来重构气液边界和空泡，如图3-2所示。

这种 VOF 界面捕捉方法与前述的动量源项消波法完全兼容<sup>[102]</sup>。

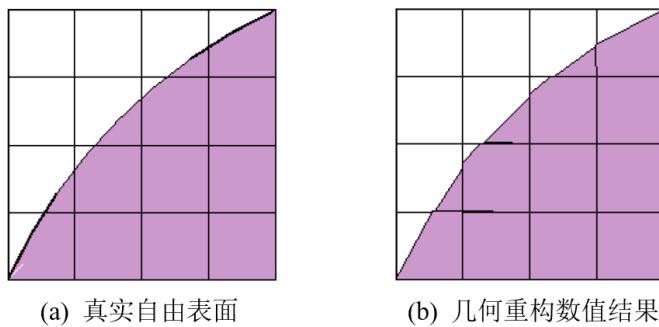


图 3-2 采用 VOF 方法的几何重构算法捕捉的相间界面

### 3.6 重叠网格技术

我们将航行体包裹在一小块子区域中，该子区域处于整个计算区域工作区的适当位置。针对子区域和外部计算域的不同疏密要求分别划分网格。子区域与外部区域的交界处通过滑移面相互匹配，并使网格尽量均匀过渡。由于入水问题的计算域是随时间变化的，我们将采用动网格技术实现不断变化的求解域。动网格的方法根据每个时刻边界的新位置对网格进行自动更新。存在移动边界的任意控制体上的某一标量  $\phi$  的守恒方程的积分形式可以写作：

$$\int_V \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_A \rho\phi(u_i - (u_g)_i) dA_i = \int_V S_\phi dV + \int_A \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} dA_i \quad (3-7)$$

其中  $u_g$  是网格移动速度。

边界的运动导致计算域的网格也要发生相应的运动和变形。动网格方法中，有一类区域的网格只发生一定的运动，构成单元的各个面的运动速度相同，因此网格本身并没有变形。此时，只要采用如上式的控制方程即可，而不必额外对网格进行调整。另一类区域的网格必须通过变形才能调整，它根据当前时刻的边界位置，速度和时间步长，确定下一时刻的边界位置，再在邻近的移动边界的局部区域对网格进行调整，在极端情况下会重新划分网格。弹簧平滑方法、动态分层方法、网格重构等方法都是较为常用的方法。针对航行体入水问题的

特点，我们在计算过程中将尽量采用动态分层方法，通过滑移面使包裹着航行体的子区域相对于外部区域向上运动。

在结构化网格中，所有与移动区域相邻的网格都是柱形网格，本文使用动态铺层方法进行网格构造。本文会根据动边界附近层的高度来添加或移除与移动边界相邻的网格层。

动态铺层法指定在每一个动边界附近的理想层高度。根据网格层  $j$  的高度，相邻于动边界的网格层  $j$  被分割或者与附近的网格层  $i$  合并。如果  $j$  层上的网格发生了拉伸了，那么网格高度也需要相应的变化，有

$$h_{\min} > (1 + \alpha_s)h_{\text{ideal}} \quad (3-8)$$

其中， $h_{\min}$  为  $j$  层网格的最小高度， $h_{\text{ideal}}$  为理想网格高度， $\alpha_s$  是分裂因子。若上述条件满足，网格将根据指定的固定高度或者固定比率进行分割。当指定固定高度时，网格层会分裂成两层，一层是固定高度  $h_{\text{ideal}}$ ，另一层则为  $h - h_{\text{ideal}}$ ；当指定固定比率时，新生成的网格高度比率为  $\alpha_s$ ，当  $j$  层上的网格被压缩时，压缩情况会满足下式：

$$h_{\min} < \alpha_c h_{\text{ideal}} \quad (3-9)$$

式中， $\alpha_c$  是溃灭因子。当达到上面的条件时，被压缩的层  $j$  就会和它之上的层  $i$  合并。

对于非结构化网格，本文采用局部网格重构法更新网格。将那些不满足倾斜度或者大小准则的网格标记，之后重新生成网格，并将计算得到的变量值插值到旧网格上：(a) 网格大于指定的最大网格尺寸。(b) 网格小于指定的最小网格尺寸。(c) 网格倾斜度大于指定的最大倾斜度。以简单的四面体网格构成的圆柱为例。当其底部移动时，采用与动态铺层法类似的方法，分析连接在边界上的网格高度，根据指定的理想面高和分离/合并因子来分离或合并网格。当第  $j$  层网格拉伸时，如果  $h_{\min} > (1 + \alpha_h)h_{\text{ideal}}$ ，网格面就根据预先设定的面高分裂，新的面高等于理想面高。当第  $j$  层压缩时，若满足  $h_{\min} < \alpha_h h_{\text{ideal}}$ ，被压缩的层  $j$  则与之上的层  $i$  合并。其中  $h_{\text{ideal}}$  为理想面高度， $\alpha$  是高度因子。

### 3.7 入水数值模拟方案

为了探究不同入射角度和入射相位对航行体运动的影响，在方案设计中会针对不同入射角度和入射相位进行数值模拟实验。在对航行体入水过程进行模拟之前，首先使航行体在水面上方以一定的姿态保持静止状态，以选取的波浪参数进行数值水池造波。然后，待工作区的波面形状趋于稳定状态之后，采用重叠网格方法和动网格技术使航行体的网格子区域开始向下（垂直或带倾角）运动。根据所需要的入水波浪相位，调整好恰当的航行体启动时刻，以指定的入水速度和入水角度运动至水面，之后的入水阶段采用完全自由运动。

针对航行体在不同波浪相位（ $0^\circ$  -  $270^\circ$ ）入水过程进行数值模拟时， $90^\circ$  相位表示航行体头部触及水面时位于波浪的波峰位置， $270^\circ$  相位表示位于波谷位置， $0^\circ$  和  $180^\circ$  相位表示位于波峰和波谷的中间位置，其中  $0^\circ$  为右侧高于左侧的相位（对应  $y = \sin x$  的原点）， $180^\circ$  则反之。

对于不同的波浪相位和航行体倾角，航行体在启动时刻之后的初始运动速度均统一为  $10m/s$ ，运动总时长  $t$  为  $2s$ ，每个时间步为  $0.001s$ ，每个时间步迭代 50 次。

空化作用是入水过程考虑空泡现象时需要重点考虑的一个现象，它会使在高速运动物体附近的水汽化成水蒸气。研究表明，只有当物体速度较高时才会具有显著的空化现象，本

次实验航行体运动速度均为  $10m/s$ ，空化现象不会非常显著。然而，为了保证本模型具有更强的通用性，在实验中依旧采用了空化模型，以便后续进行更高速入水实验时可以复用。

## 第四章 数值模拟结果与分析

本次实验共运行了 9 个样例，航行体入水角度分别为  $90^\circ$  垂直入水以及  $60^\circ$  和  $45^\circ$  入水。所有样例的均运行 2 秒，并保留了各运行时段的动力学状态。

### 4.1 稳定的波浪场结果

在进行完网格划分，边界条件设计，引入动量源项消波法之后，通过合适的数值方法，成功模拟了稳定的波浪场结果。下面为波浪传播某时刻的密度图，压强分布图和速度分布图。本文的算例是三维算例，但为了更直观地展示计算的结果，选取了在  $z$  方向为对称轴的剖面进行图形的绘制。如无特殊说明，本文中展示的二维流场图形（如密度图，流场速度图等）均为在  $z$  方向对称轴位置的流场结果。

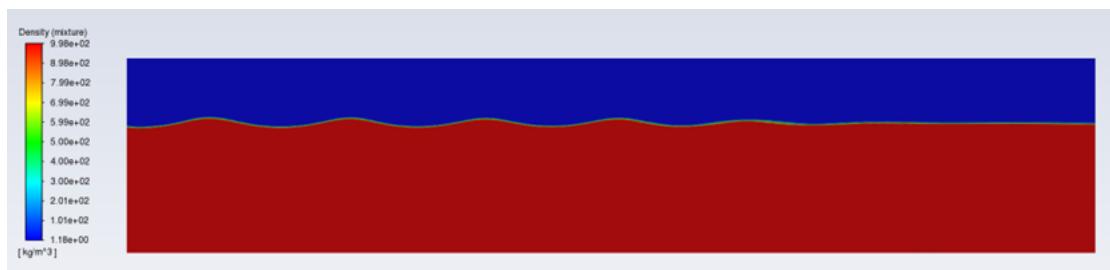


图 4-1 波浪场密度 ( $\rho$ ) 图

波浪场压强分布如图4-2所示，可以看到，空气和水体之间的压力区分明显，液体区域随深度增加压强逐渐升高。

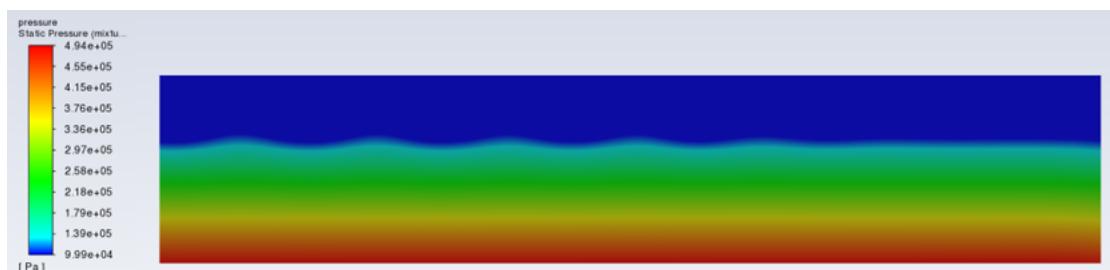


图 4-2 波浪场压强 ( $p$ ) 分布图

波浪场速度分布图如图4-3,4-4所示，在工作区呈现典型的波浪场速度分布特征，在消波区存在一定的  $u$  分布，也符合动量源项消波法的结果。

### 4.2 不同入水阶段的密度分布

在考虑并应用 VOF 捕捉方法和重叠网格技术后，可以顺利地进行入水数值模拟实验。数值模拟实验共进行  $t_{\max} = 2s$ 。以下是入射倾角为  $45^\circ$  时，运行  $0s$ 、 $0.5s$ 、 $0.7s$ 、 $0.9s$ 、 $2.0s$  的局部密度图。

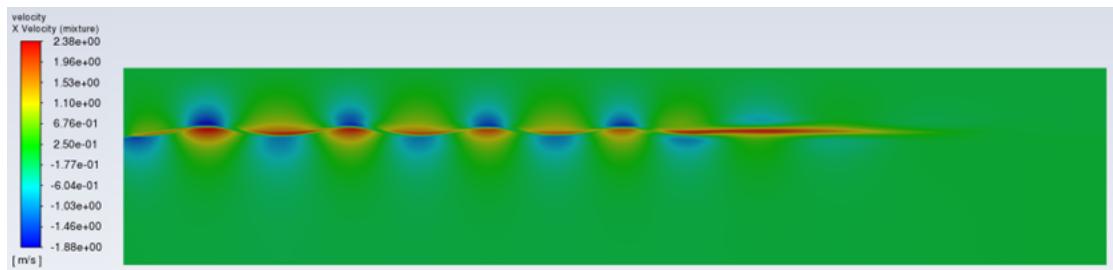


图 4-3 波浪场  $x$  方向速度 ( $u$ ) 分布图

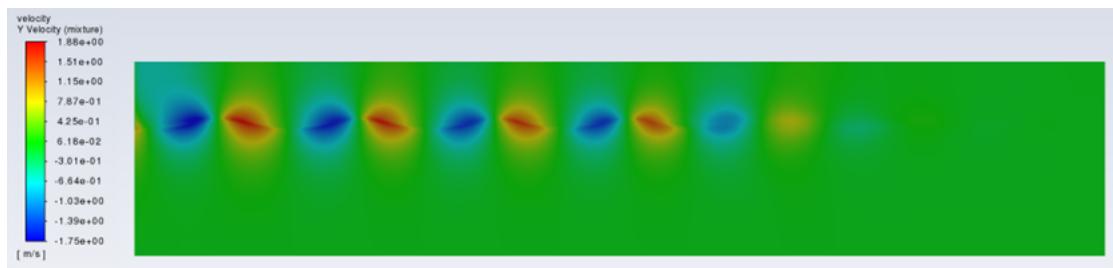


图 4-4 波浪场  $y$  方向速度 ( $v$ ) 分布图

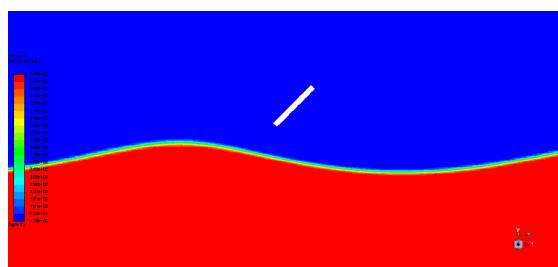


图 4-5  $t = 0s$  时局部密度图

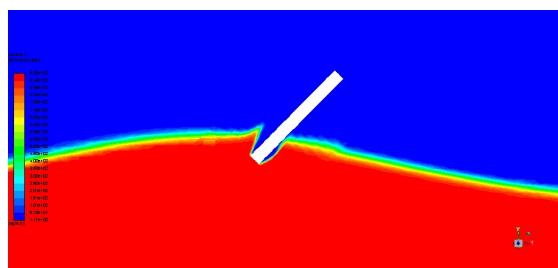
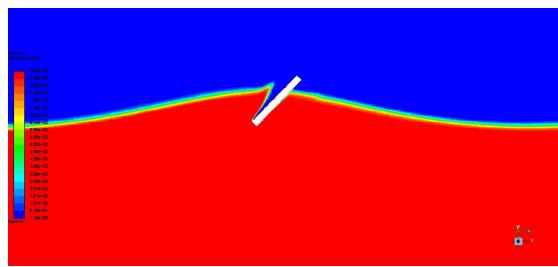


图 4-6  $t = 0.5s$  时局部密度图



$t = 0.7s$  时局部密度图

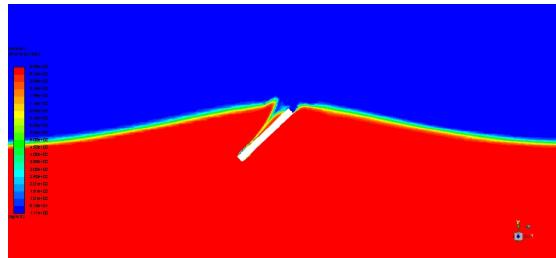


图 4-7  $t = 0.9\text{s}$  时局部密度图

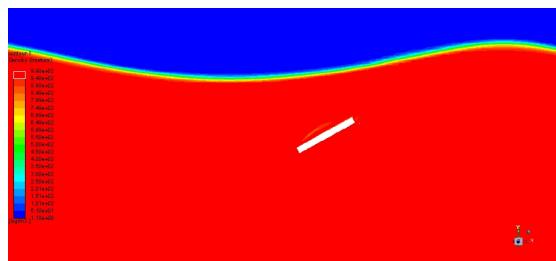


图 4-8  $t = 2.0\text{s}$  时局部密度图

可以看到入水过程发生了显著的空泡现象。将这些结果与理论分析和实验的结果进行对比，发现与实际符合良好，这也验证了模型的准确性。

### 4.3 入水过程的流场状态细节分析

为了更好地观察和描述入水过程中的现象，本文首先对入射角度与水面夹角为  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  和  $45^\circ$  的各一个算例（均为各入水角度的算例 3）的入水过程的详细情况进行了分析，从而得到航行体进入波浪场时的一般情况。

#### 4.3.1 $60^\circ$ 入水条件下的入水过程流场状态细节

本文首先对  $60^\circ$  的算例进行了分析，如图4-9所示。可以看到，从  $t = 0.3\text{s}$  航行体首次接触波浪场水面开始，大约总共进行了  $0.5\text{s}$  才使整个航行体全部没入波浪场中。航行体在进入波浪场中的同时，波浪场也在进行运动，在  $t = 0.3\text{s}$  时，航行体与波浪场的接触点约在相位  $\varphi = \pi$  左右，而当  $t = 0.8\text{s}$  航行体全部进入水中时，前述位置下波浪场已经运行至  $\varphi = \pi/2$  的相位。在  $0.5\text{s}$  的过程中，波浪场运行相位约为  $\pi/2$ ，这也与实验中预先给定的 Stokes 波的参数相符合。入水过程中有非常明显的空泡现象。在航行体刚进入水面时，空泡出现在航行体的四周，且从头部至水面都有空泡。随着航行体的不断运行，右下侧的空泡逐渐坍缩，且航行体头部附近的空泡逐渐消失，空泡聚集在了航行体的尾部。在整个航行体运行期间，尽管航行体进入水下并引起了空泡已经扰动，但明显可以发现整个流场还保持非常稳定的波浪场状态。这得益于流场区域在  $z$  轴方向具有比较大的深度，直径仅为  $0.5\text{m}$  的航行体不会对具有持续波浪的流场产生使整体改变波浪状态的影响。

航行过程中的压力图如图4-10所示，图 b) 至图 f) 的压力范围均取自  $0.8 \times 10^5 \sim 2 \times 10^5 \text{Pa}$ ，而图 a) 的压力范围为  $0.8 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5 \text{Pa}$ ，所以会使图 a) 的背景场看起来与其他场不同。使用不同的压力范围取值是因为图 a) 接触前端的压力很大。可以看到背景波浪场中，空气部分由于连接大气，其压强保持在  $10^5 \text{Pa}$  左右，而水内部则随着深度的增加压力逐渐增加。

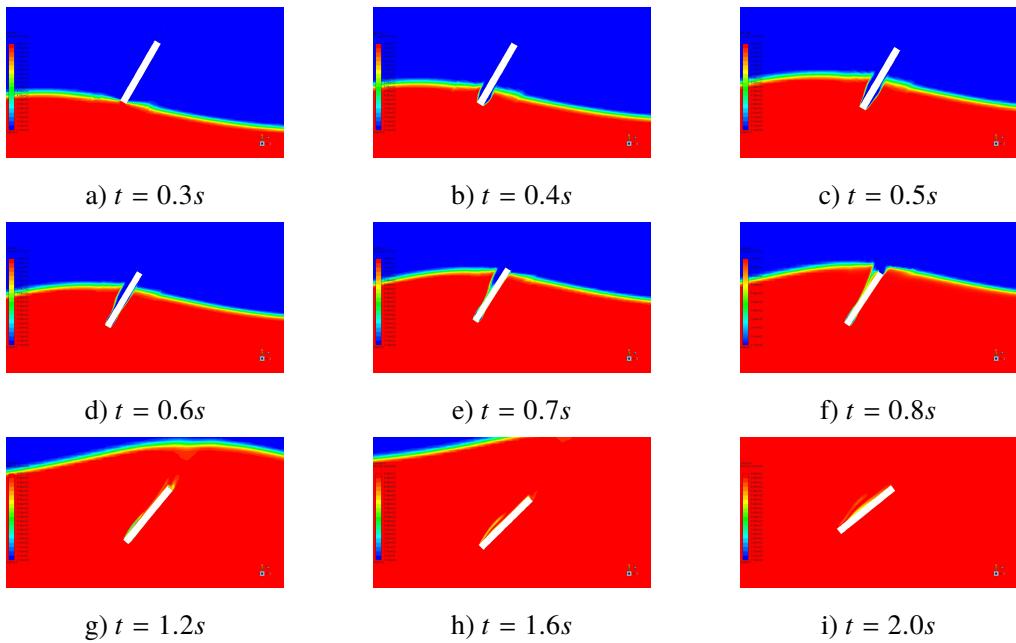


图 4-9 60° 入水角度下第三个算例的密度场

本次数值实验采用的航行体为圆柱体，可以明显看到其前端受到的阻力很大。前端压力最大的情况出现在刚接触水面的时候，在本算例中到达了接近  $4 \times 10^5 \text{ Pa}$  的压力。前端压力在物体刚接触到水面时迅速提升并达到最大值，在航行体前端已经浸入水面后，其前端压力依旧较高，且前端一定区域内都受高压影响，但相对于刚接触水面时保持相对较少水平，且在航行过程中没有太大变化。航行体两侧存在一定的低压区，低压区发生在存在空泡的区域，在  $t = 0.4s$  和  $t = 0.5s$  空泡时非常明显，这与空泡现象的理论分析和常规实验结果相一致。航行体前端的侧面是航行体压力最低的区域。在  $t = 0.6s$  和  $t = 0.7s$  时航行体右侧空泡已接近消失，右侧局部压力不降反升。

航行过程中的水平方向速度  $u$  图和垂直方向速度  $v$  图如图4-11和图4-12所示。这些图的坐标刻度都不相同。通过比较各流场时刻的速度分布，可以发现整个背景场的速度分布与二阶 Stokes 波的速度分布符合地很好。尽管受本身时变的波浪背景场的影响，但航行体附近的流场速度场依旧有许多规律，并且与一般的流体力学理论相符合。航行体与接触的流体之间形成固壁边界条件，其前端和尾端都是圆截面，在航行过程中受到较大的阻力。其前端前方和尾端后方的速度场都是与航行体的运行速度方向相一致的。在航行体附近的空泡区域，其运动速度比较大，且速度方向平行于航行体边缘的方向。在  $t = 0.4s$  和  $t = 0.5s$  的时刻在航行体的前端空泡处具有逆时针方向的速度。在  $t = 0.6 \sim 0.8s$  时，航行体右后方的空泡转移并消失，空泡转移至航行体左上侧，流场运动方向与航行体运动方向相反。

上面的分析基于航行体入射角度为 60° 的情形，航行体入射角度为 45° 的情形中，其动力学特性一定程度上与 60° 的相同。然而，当航行体入射角度为 90° 的情形下，其许多情况与具有较大倾斜角度的入射是不同的，因此对于垂直入射的情形，这里也打算对其进行分析。

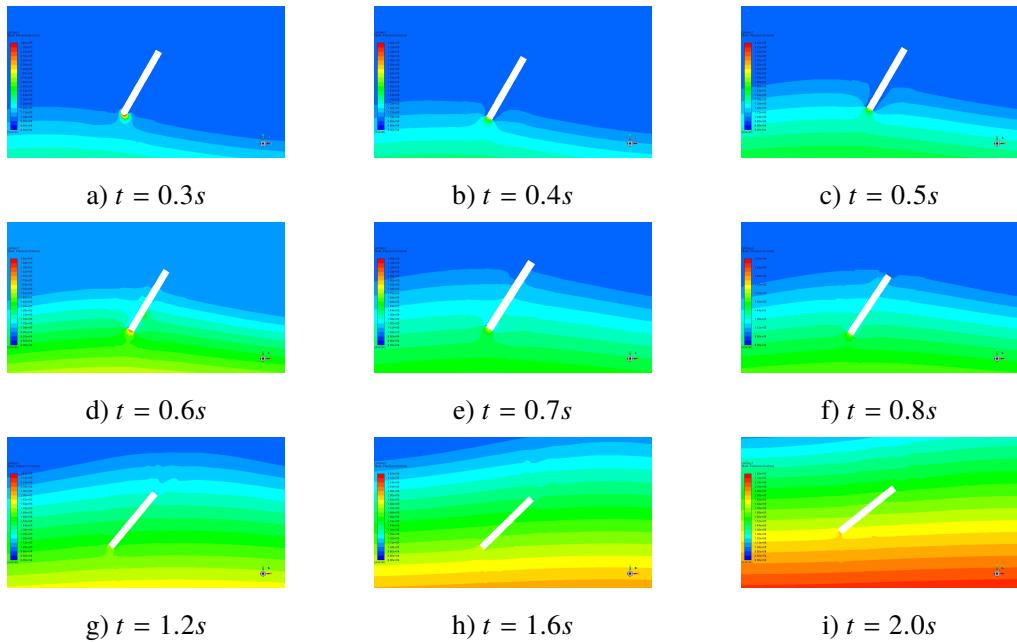


图 4-10  $60^\circ$  入水角度下第三个算例的压力场

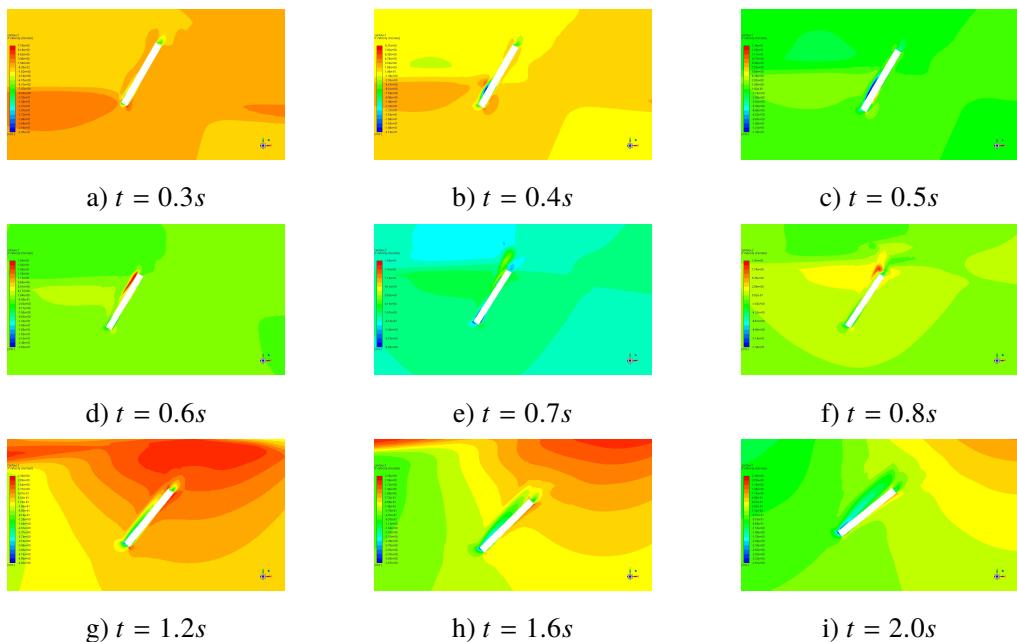


图 4-11  $60^\circ$  入水角度下第三个算例的水平速度场

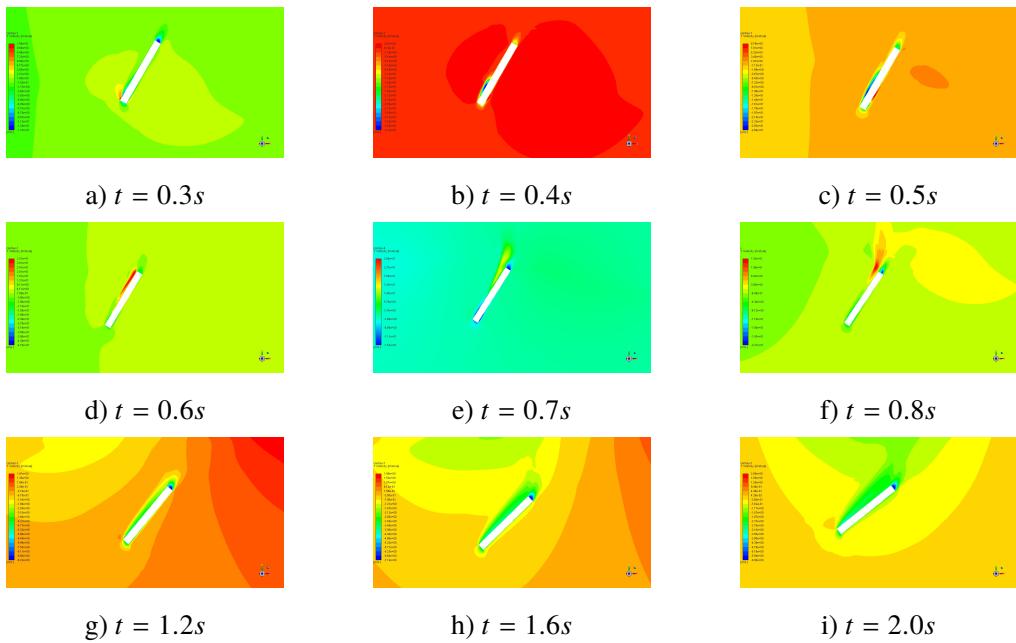


图 4-12  $60^\circ$  入水角度下第三个算例的竖直速度场

#### 4.3.2 $90^\circ$ 入水条件下的入水过程流场状态细节

航行体在  $90^\circ$  第三个算例下的入射的密度场如图4-13所示。本次航行的入水过程大概发生在  $t = 0.25s$  时，大约在  $t = 0.75s$  时完成入水过程。在与前一次的入水过程相似，在入水过程中具有明显的空泡现象，并且空泡现象持续地更加持久在本次入水的过程中，更多的空泡出现在航行体的右侧，这与倾斜入水时的结果略有不同，导致这一现象很重要的原因是初始速度场的方向向右，导致左侧的空泡会更快地消失。航行体在航行的过程中入射角逐渐减小。

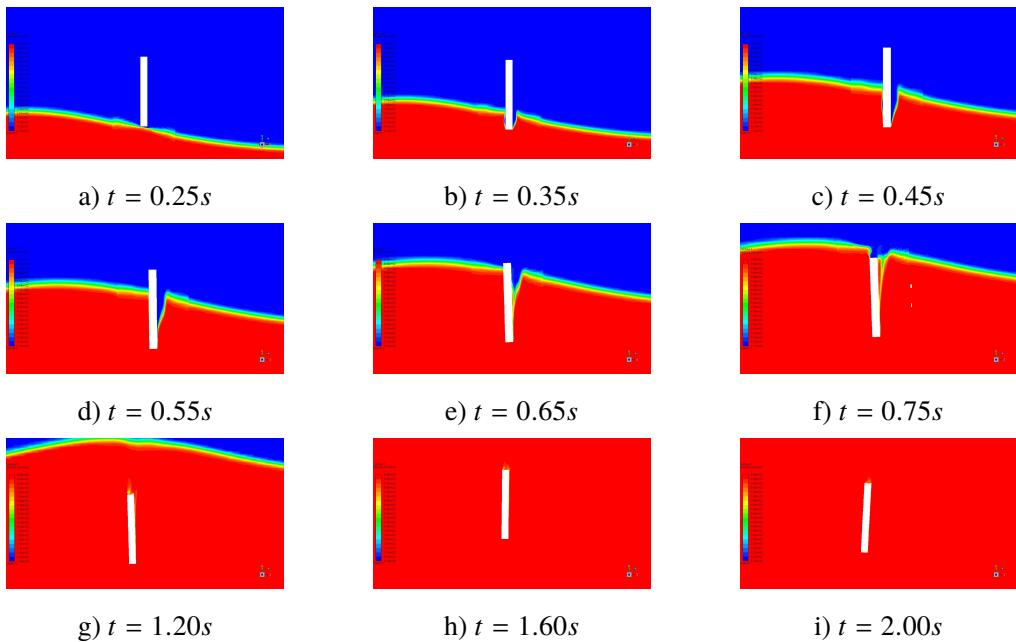


图 4-13  $90^\circ$  入水角度下第三个算例的密度场

航行过程的压力场如图4-14所示。在  $t = 0.25s$  时，航行体刚刚接触水面的一部分，受到的压力较小。随后的行进过程中，航行体两侧的空泡部分压力较小，航行体前端部分受到的压力较大，与前述的  $60^\circ$  时的压力分布较为相似。

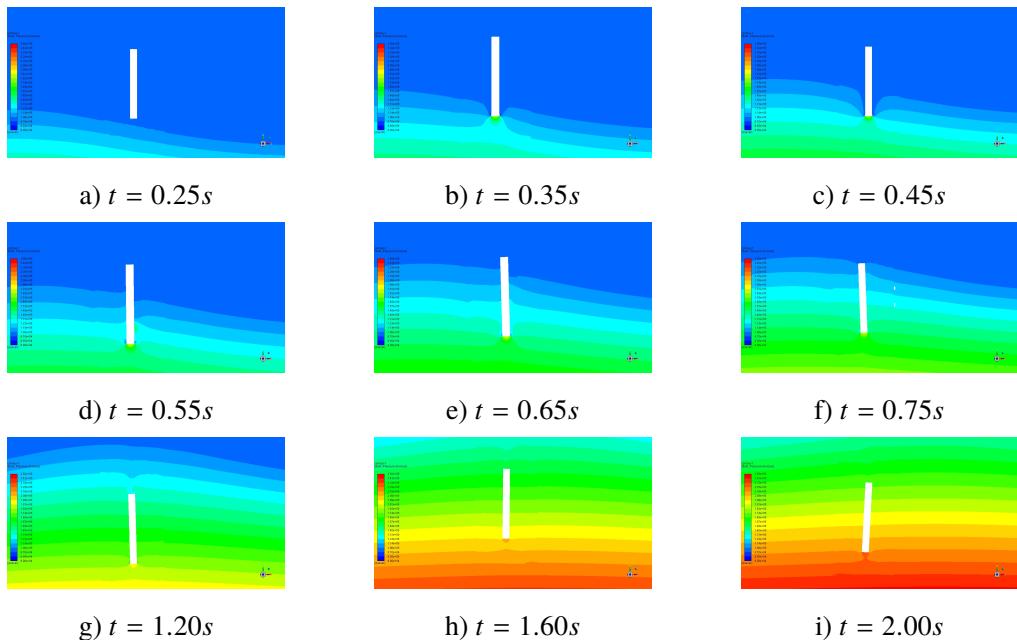


图 4-14  $90^\circ$  入水角度下第三个算例的压力场

$90^\circ$  下航行体运行的速度场如图4-15和图4-16所示，在  $t = 0.35s$  和  $t = 0.45s$  的入水阶段前段，航行体前端两侧部分流场速度向外，这是由于航行体前进过程前端对其的挤压造成的。航行体前进过程中的空泡内流体运动速度较快，运动方向向远离航行的方向以及与航行体运动方向相反。

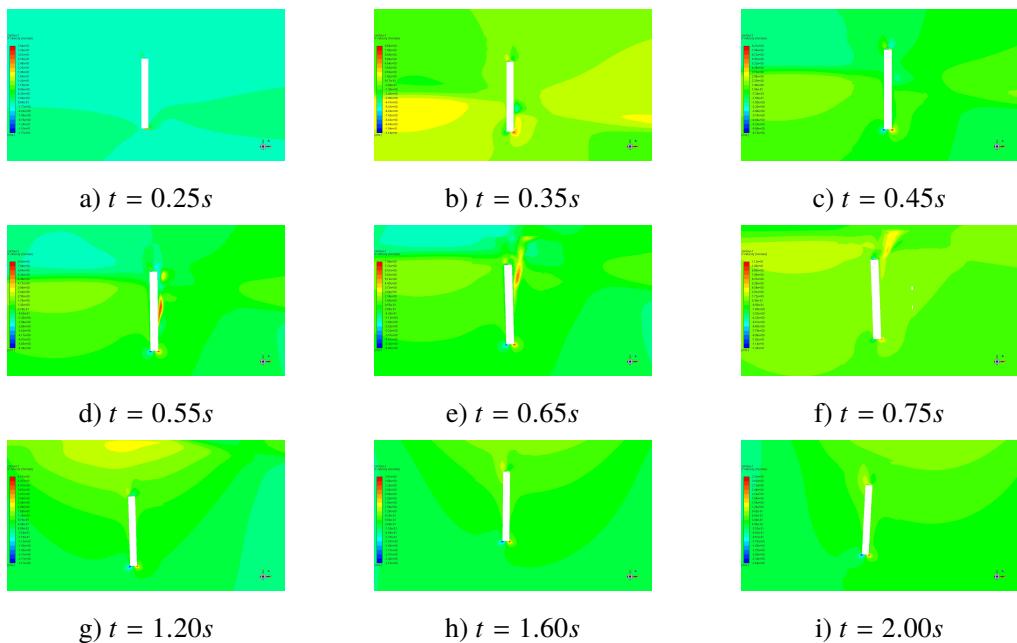


图 4-15  $90^\circ$  入水角度下第三个算例的水平速度场

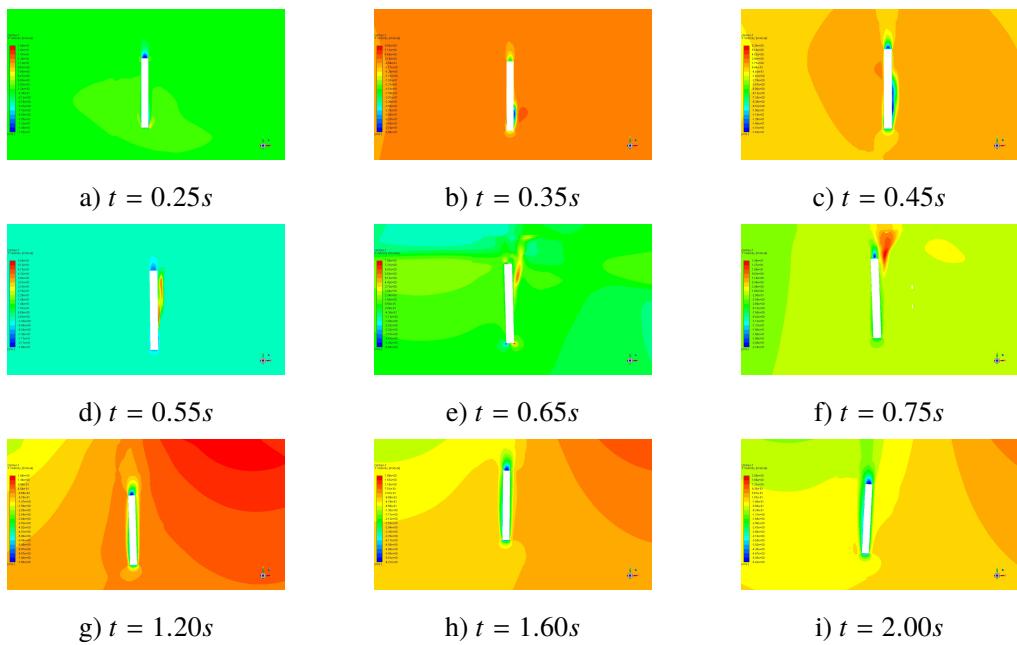


图 4-16 90° 入水角度下第三个算例的竖直速度场

### 4.3.3 45° 入水条件下的入水过程流场状态细节

45° 下的航行体的入水过程如图 4-17, 4-18, 4-19, 4-20 所示, 可以看到航行过程中空泡现象明显。航行体接触到水面后, 航行体前端正侧受到很大的压力, 而航行体前端两侧的压力有所下降。在存在空泡的流场区域, 流体运动速度上升。

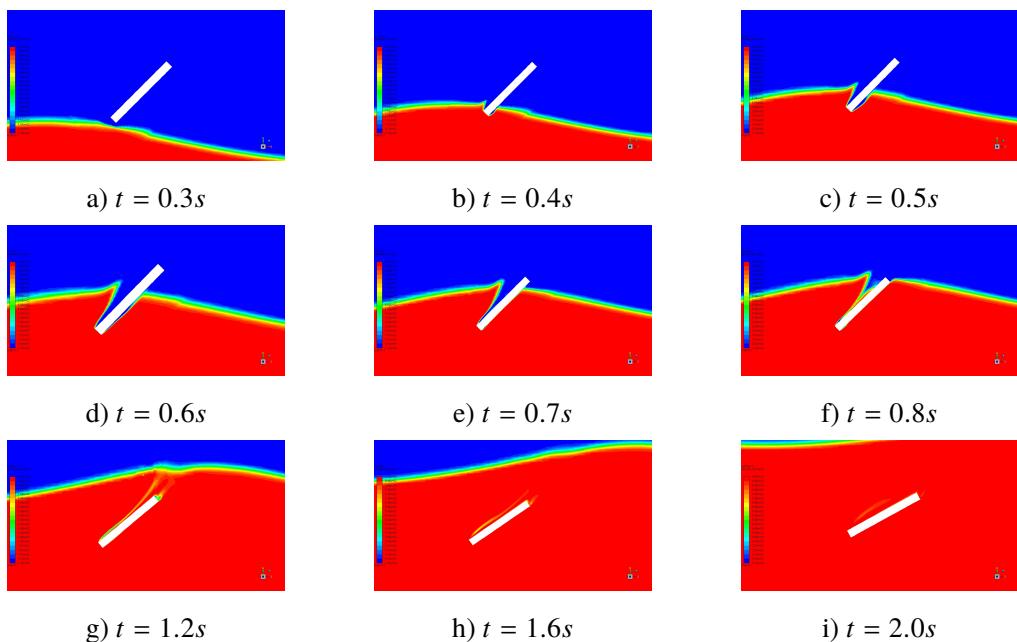


图 4-17 45° 入水角度下第三个算例的密度场

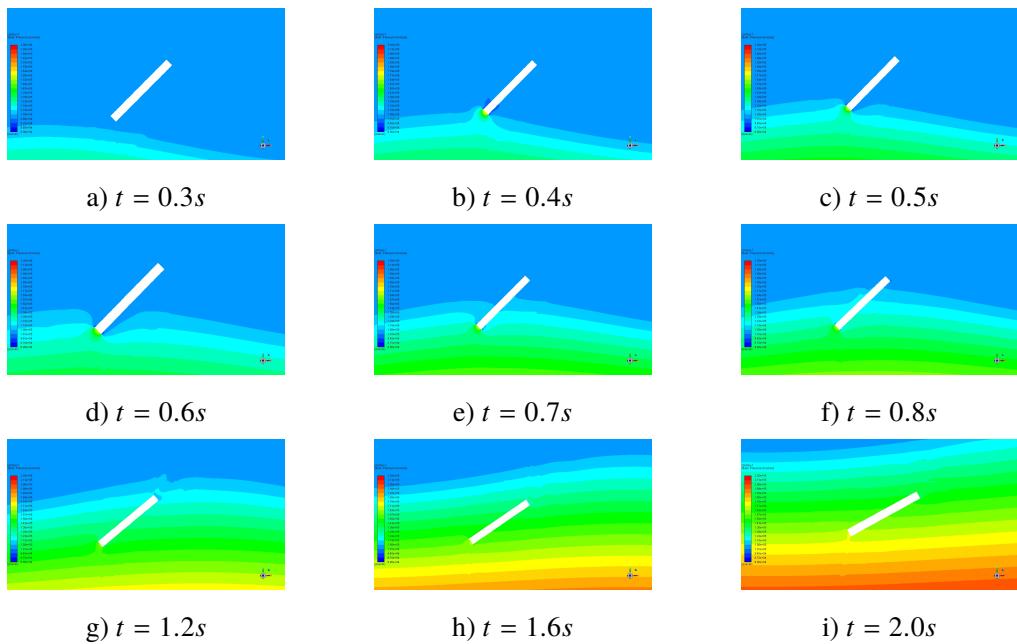


图 4-18  $45^\circ$  入水角度下第三个算例的压力场

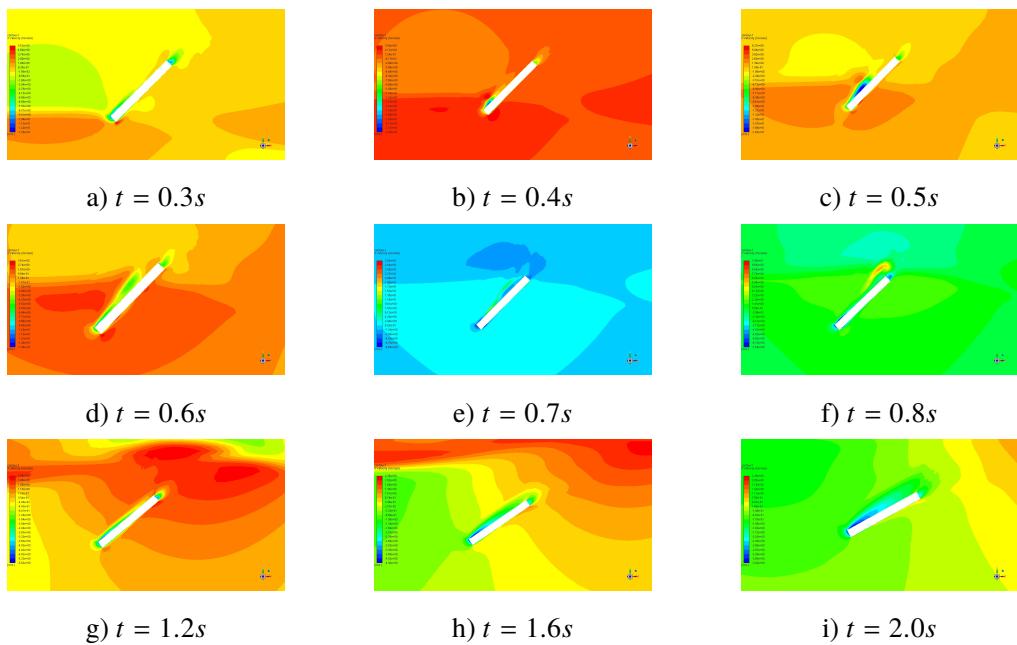


图 4-19  $45^\circ$  入水角度下第三个算例的水平速度场

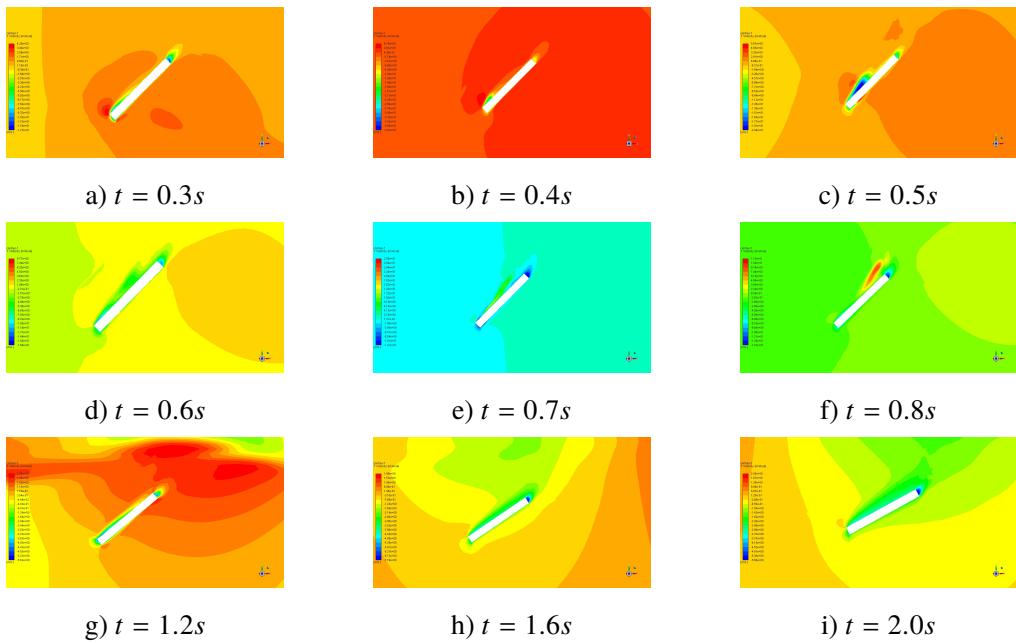


图 4-20  $45^\circ$  入水角度下第三个算例的竖直速度场

#### 4.4 不同算例的航行体入水全过程动力学特性分析

在上一节中，论述了经典的航行体入水过程中流场的若干特性，在改变了航行体的入水角度和入水相位后，航行体的运行过程会有一定程度的影响。本节中会论述不同参数变化造成的影响。本节主要论述航行体运行过程中航行体本身的各种物理特性随时间的变化，包括航行体的位移，速度，角度，受力，受动量，最大压力等等。本次实验共运行了 9 个样例，航行体入射角度分别为  $90^\circ$  垂直入射以及  $60^\circ$  和  $45^\circ$  入射。整个流场的其他状态均保持一致，不同入射角度下的区别仅为航行体的初始状态和其之后的入射方向有所区别。对于每个入射角度，选取了三个不同的入射起始时刻进行航行体入射，且接触水面时水面相位也不同。航行体入射的全过程中，其位移，速度，角度，受力，受动量以及最大压强等动力学要素都随时间变化。

本次实验主要针对的都是低速入水的情形，物体的初始移动速率均为  $10m/s$ ，物体为圆柱体，直径约  $0.5m$ ，长度约  $5m$ 。在一定程度上非常类似鱼雷的实际运行情况，因此探究入水过程中的速度变化，位置变化以及角度变化便至关重要，因为对于鱼雷，我们非常希望它可以命中目标。海浪的具体情况是变化莫测的，在远程进行鱼雷投放时完全不清楚投放点入水时具体的波浪相位情况，因而入水点的相位是完全未知的。近程投放鱼雷时则可以控制入水时的相位。在本次航行体入水模拟实验中航行体头部为平面，因此会受到很大的阻力影响，实际的鱼雷头部都会设计更好的抗阻力的外形，因此航行体不会这么快速的减缓移动速度。本文不过多探究航行体完全入水后的动力学特性，更聚焦于入水过程中航行体受到的影响以及流场的特性。

##### 4.4.1 不同波浪相位的入水过程的对比

在航行体入水的过程中，入水点的波浪场相位会对航行体的整体的运行过程产生非常大的影响。如图4-21所示，这里是航行体入水姿态角为  $45^\circ$  时，三个算例在刚刚入水的  $0 < \Delta t < 0.5s$  时间内的航行情况，从左至右，其初始进入时的波浪场相位依次大约为  $0$ ， $\frac{5}{4}\pi$ ，和

$\frac{3}{4}\pi$ 。在本数值模拟实验中，航行体接触到波浪场表面所需的在空气中的运行时间不同。不同的入水相位会对入水空泡的形状产生很大的影响，在入水  $0.5s$  后， $\varphi_0 = 0$  以及  $\varphi_0 = \frac{5}{4}\pi$  下的入水空泡已经接近消失，而  $\varphi_0 = \frac{3}{4}\pi$  下的入水空泡依旧保持一定的形状。不但如此，前两者的入水空泡更大，空气-水的分界面更陡峭，空泡更宽，主要分布在航行体上方。而后的空泡相对较小，空气-水的分界面更贴近航行体，空泡更狭窄，空泡分布在航行体的上方和下方。由于波浪相位的不同， $\varphi_0 = 0$  以及  $\varphi_0 = \frac{3}{4}\pi$  的算例中，在  $\Delta t = 0.5s$  时恰好刚覆盖至航行体尾部，而  $\varphi_0 = \frac{5}{4}\pi$  的算例已经没入了波浪场一定的深度。可见入水相位的不同对空泡的位置，形状，空泡持续时间等都有显著的影响。

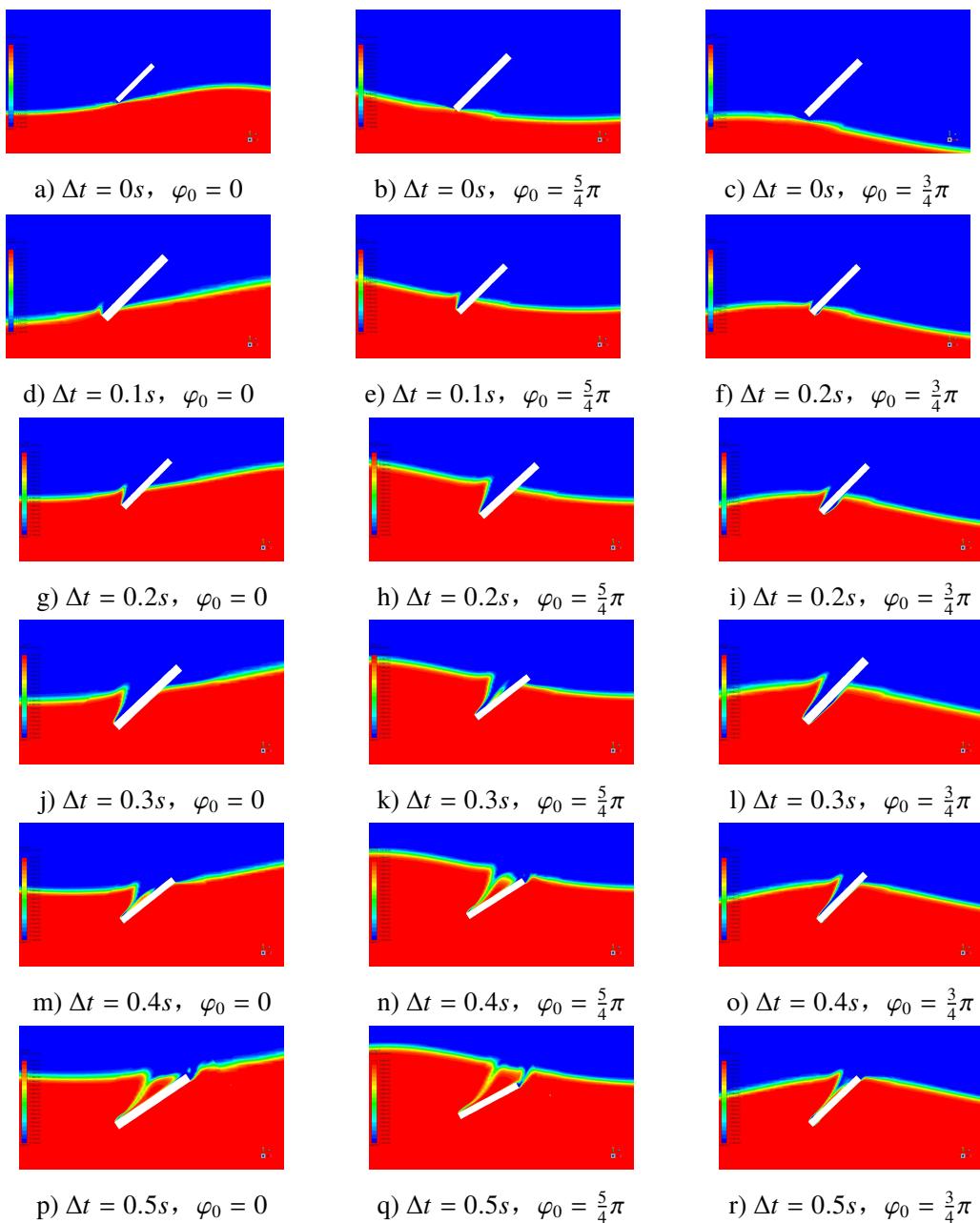


图 4-21 45° 入水角度下不同入水相位的流场密度图

#### 4.4.2 入水过程的位移

各个算例的位移变化如图 4-22 所示，可以看到整个过程中位移变化光滑。在入水过程中会发生入水冲击的过程，这个过程中航行体会受到很大的力的作用，其加速度可能发生突变，同时巨大的动量也会使其速度发生突变，但其位移一定是关于时间的连续函数。由于实验设计精确合理，所以可以看到位移是光滑的对时间连续函数，符合实际情况。实验设计时物体一开始处于静止状态，随后逐渐加速至预设速度，然后才逐渐进入入水过程。通过观察入水过程的位移曲线，可以发现，当航行体以  $45^\circ$  进行航行时，其  $y$  方向位移增大，而  $x$  方向没有较大的影响。对于全部算例，在航行一段时间后，其航行速度都有所减缓。

对于入水角度为  $90^\circ$  的入水过程，我们更关心入水后航行体在水平方向上是否偏离了原位置，即关心水平位移。对于本实验的三个算例，第 1 个算例航行体水平方向略向前偏移，第 2 个算例航行体水平方向略向后偏移，第三个算例航行体水平方向向前偏移了很多。

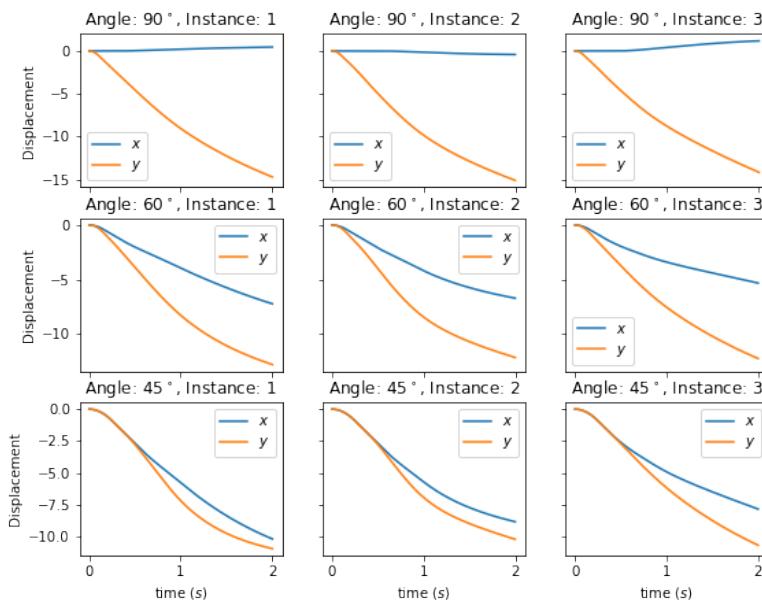


图 4-22 不同算例的位移变化

#### 4.4.3 入水过程的速度

各算例入水过程中航行体的速度随时间变化曲线图如图4-23所示。根据本模型的设计，各航行体均先进行一段时间的匀加速直线运动，到达给定速度时则开始匀速运动。可以看到各算例的开始部分都是一段速度绝对值上升的直线，这代表了匀加速直线运动过程。接下来是一小段速度保持不变的水平直线，这代表了航行体运动时的匀速运动过程。随后则根据航行体的受力情况（包括重力和表面力）进行自由运动。由于有重力的影响，航行体在随后的一段时间内竖直方向速度的绝对值进入一段匀加速状态，表现为航行体速度按时间均匀地增加。随后发生入水冲击过程。由于入水冲击过程中物体受到很大的冲量，因此速度可能发生突变。在实验的 9 个算例中，有 7 个算例都发生了明显的速度突变。其中  $90^\circ$  算例 1 的情况航行体很快进入水中，速度变化较为平缓，航行体进入水中时水面相位恰好为  $\varphi = \pi$  左右。 $45^\circ$  算例 1 的情况航行体进入水中时，航行体受到的冲击也保持在较少水平，且一段



时间内来自流场的力未能抵消重力的作用，航行体依旧加速下降了一段时间。在此算例中，航行体与水面接触点的波浪相位恰好为  $\varphi = 0$  左右。在所有倾斜入水算例中，航行体入水后都受到了明显的水流阻力左右，航行体的水平运行速度都存在一定量的减小。但入水过程完毕后的一段时间内不再减小。但由于在航行体入水完毕之后，航行体运行速度逐渐减小，航行体入水完成后速度逐渐减小的一个重要的原因是本航行体的头部为一个圆截面，这会导致其在前进的过程中遇到很大的阻力。改变航行体头部的形状，可以有效缓解航行体在完全浸入水中后的阻力。

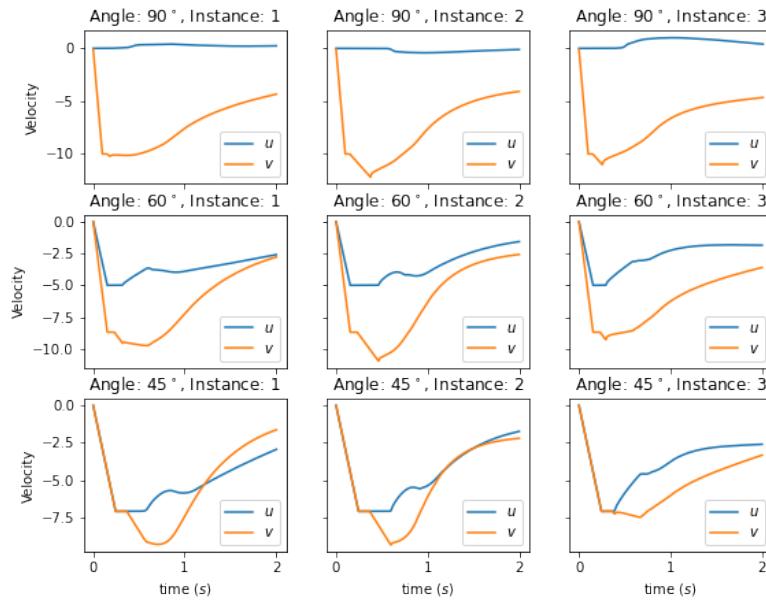


图 4-23 不同算例的速度变化

#### 4.4.4 入水过程中的角度变化

入水过程中航行体的姿态角如图4-24所示，这里将物体原本的姿态角进行归零处理，因而图中的姿态角实际为航行过程中的姿态角变化。在本文中  $45^\circ$  和  $60^\circ$  的算例都是向左运行，而我们也可以看到，当航行体进入水面后，其姿态角都有一定的减少，意味其下潜角度都有所上扬。考虑到控制航行体角度的角动量守恒定律，我们可以发现多数算例中，航行体都是在刚进入水面时受到了较大的冲量矩作用，并发生角速度的改变，并且在之后的航行过程中大致均保持力矩平衡的状态，角加速度变化不大。冲量矩的作用时间都较短，在这几个算例中冲量矩作用的时长均小于  $0.1s$ 。这是因为在航行体刚刚接触水面时，水面给予航行体的冲量并非指向航行体质心，这导致刚接触水面的这段时间内给予航行体大量的冲量矩。当航行体入水角度为  $45^\circ$  或者  $60^\circ$  时，航行受到的冲量矩的方向指向航行体运行方向的右侧，这会导致航行体的角度减小，航行体会进行上扬。当航行体全部浸入水中时，引起航行体所受力矩则有如下公式：

$$M = \int_S (p_s + p_d) d_0 + \tau d_1 ds \quad (4-1)$$

其中  $p_s$  为静压,  $p_d$  为动压,  $d_0$  为表面上该微小片元的法线与航行体中心的距离,  $d_1$  为表面删该微小片元所在的平面与航行体中心的距离。在航行体航行的过程中主要是静压会导致对航行体产生力矩作用。可以看到, 当航行体刚进入水中的一段时间内, 航行体角度的二阶导数不为 0, 此时受到的力矩主要源于航行体刚入水时的扰动和空泡现象导致的流场环境不稳定。当航行体入水一段时间后 (1s 之后), 流场趋于稳定, 航行体角度匀速变化。需要指出的是, 这种航行体进入水中后的强烈角度变化是不利于鱼雷的定向打击的。角度变化会导致航行体的头部的运动方向与航行体角度不一致, 这会导致航行体遇到的流场来流方向并非航行体的运动方向, 很可能对航行体的精确打击有不利影响。由于动量矩守恒定律, 航行体会一直保持旋转的运动, 这将会使航行体航行过程中遇到的阻力更大。

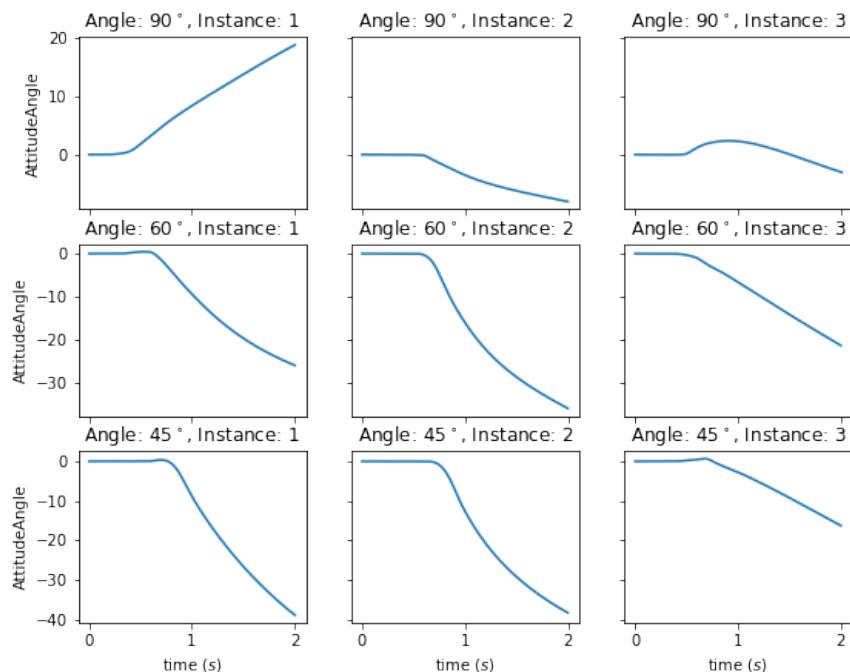


图 4-24 不同算例的角度变化

#### 4.4.5 入水过程中的受力情况

入水过程中的受力情况如图4-25所示, 受力图中的  $x$   $y$  曲线是航行体在  $x$  方向和  $y$  方向所受的力, 方向与  $x$ ,  $y$  轴方向一致, 且  $F_y$  并没有将重力  $G$  计算在内。可以看到在刚接触到水面的瞬间, 航行体会受到非常大的阻力作用, 且力的方向大致与航行体的入水方向相反。对于除 45° 第三个算例外的航行体入水算例, 其入水瞬间的突变阻力迅速下降, 即对航行体的强烈冲量阻力作用时间非常短。当航行体完全浸入水中后, 航行体  $y$  方向受到的流体作用力达到峰值, 随后缓慢下降。对于航行体 90° 入水的场景, 其  $x$  方向受力远小于  $y$  方向, 但力的方向是不确定的, 可能向左 (算例 2) 也可能向右 (算例 1 和 3)。

入水过程中的受力矩情况如图4-26所示。可以看到航行体在刚进入水中的一段较短的时间内受到的合力偶较大, 并且在倾斜算例中其合力偶都为负方向, 这也是导致航行体角度上扬的重要原因。在航行体刚进入水面的这段时间里受到的合力偶变化相对剧烈, 并且其



方向并非一直指向 $z$ 轴负向。在航行体完全进入水中后，航行体受到的合力偶保持在较小水平，并逐渐趋于零。

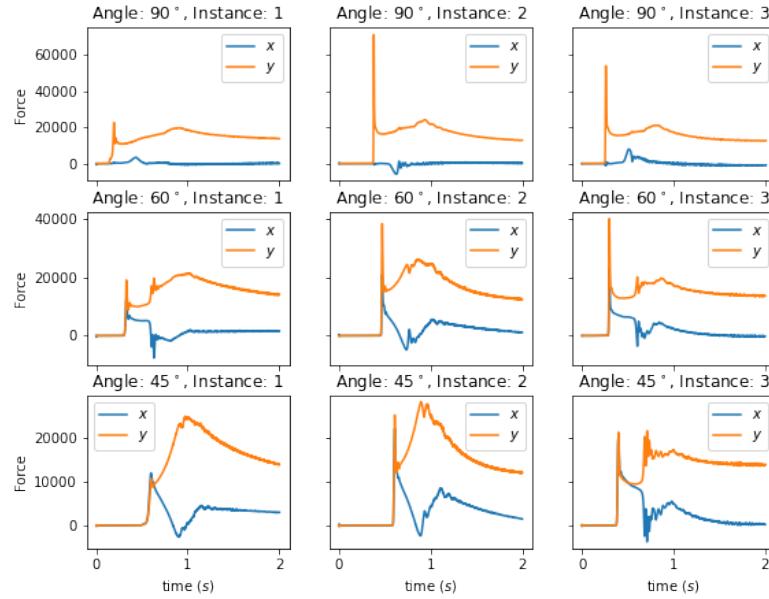


图 4-25 不同算例的受合力变化

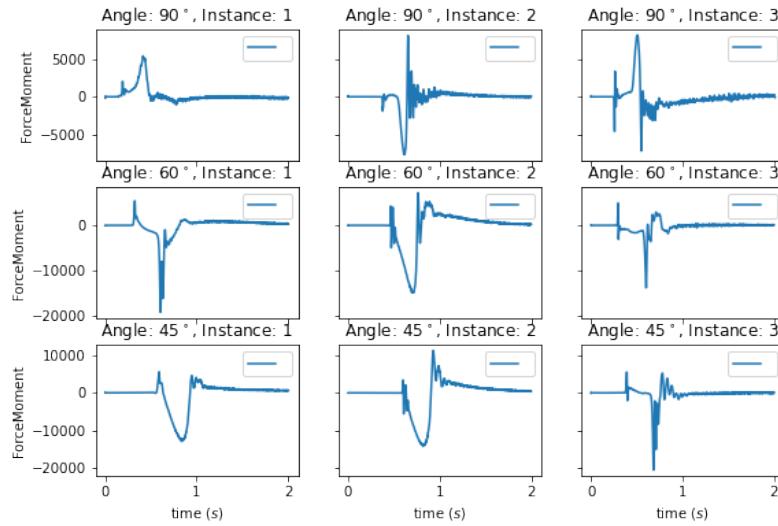


图 4-26 不同算例的受合力矩变化

#### 4.4.6 入水过程中受到的最大压力

航行体入水过程中航行体表面各位置压力的最大值如图4-27所示，对于任一时间 $t$ ，图中相应的 $P(t)$ 为 $t$ 时刻航行体表面全部位置中，压力的最大值。可以看到，航行体在行进过

程中受到的最大压力具有非常明显的特征：航行体会在刚接触到水表面的瞬间受到一个非常大的压力，随后航行体受到的最大压力迅速衰减。在其余时内航行体受到的最大压力会逐渐趋于 $2 \times 10^5 Pa$  根据不同的入水角度，航行体受到的最大压力会有变化， $90^\circ$  入水时可能受到的最大压力最大，会到达 $6 \times 10^5 Pa$ ，其次是 $60^\circ$  入水，最大压力超过 $4 \times 10^5 Pa$ ，最后则是 $45^\circ$  的情况，最大压力仅为 $3.5 \times 10^5 Pa$ 。航行体的入水相位也会对航行体入水时受到的最大压力产生巨大的影响。例如当航行体以 $90^\circ$  角度进入时，当进入点的波浪相位为 $\varphi = \pi/4$  时，其最大压力仅为 $2 \times 10^5$ ，当进入时的波浪相位为 $\varphi = 3\pi/2$  时，其最大压力为 $6 \times 10^5$ ，当进入时的波浪相位为 $\varphi = \pi$  左右时，其最大压力约为 $5 \times 10^5 Pa$ 。

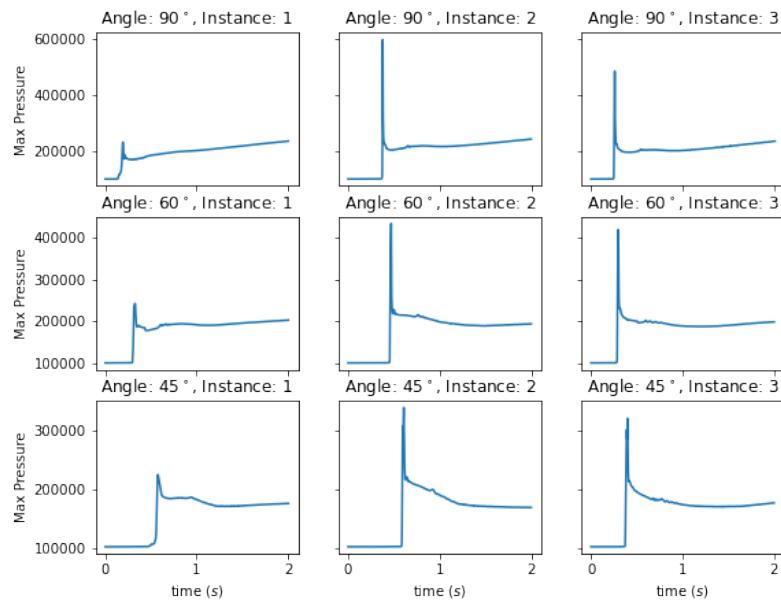


图 4-27 不同算例在运行过程中受到的最大压力

## 全文总结

入水问题是当前科研领域的一个关键问题，研究由来已久。当前阶段，空泡入水是入水问题研究的热点方向。空泡入水问题在波浪场环境下的研究相对不够充分，因此本论文研究了波浪场环境下的空泡入水问题。

本论文首先对入水空泡这一问题的国内外研究背景进行了详细论述。早在 20 世纪初期，入水时受到的冲击就已经有了许多研究，随后至 20 世纪后半页，入水空泡和空化问题逐渐引起了研究的重视。对于入水问题，早期的研究方法包括理论求解，实验验证等，后来逐步开始采用有限元，PIV 或者 CFD 数值模拟的方法。本论文使用的是 CFD 方法对入水空泡问题进行数值模拟。

在本论文的第二部分，介绍了航行体进入波浪场的部分原理。包括控制流体运动的基本原理，包括连续性方程，动量方程以及能量守恒方程。之后，又论述了多相流环境下的流体力学基本方程的相关变化。最后又论述了入水空泡模型。这些数学模型是进行数值模拟的基础。

在本文的第三部分，介绍了本实验使用的数值模型。本实验借助流体力学计算软件 Fluent 进行数值模拟。首先，本文介绍了采用的几何模型和网格划分，其次，给定了各个边的边界条件，并论述了具体的消波方法。为了防止出水区边界造成波浪反射现象，在波浪场中增加一部分消波区，并且在该区域内采用动量源项消波法的方法。为了更好地捕捉界面，采用 VOF 方法进行捕捉。航行体入水过程中，为了让航行体周围的流场情况更加精确，采用重叠网格技术，将包裹航行体的动网格和环境的静态网格可以融合在一起进行流场求算。最后论述了本次实验的具体设置实验设计，根据不同入射角度和入射相位，总计进行了 9 组实验。

本文的第四部分则对 9 组数值模拟实验进行分析和现象归纳。首先展示了稳定的波浪场结果，其次大致描述了不同入水阶段的密度分布。之后以  $60^\circ$  入水和  $90^\circ$  入水的各一个算例为例，详述了入水过程中的密度场，压力场和速度场。最后分析和论述了各算例下航行体入水过程的特点。

## 参考文献

- [1] YOUNG F R. Cavitation[M]. [S.l.]: World Scientific, 1999.
- [2] TRUSCOTT T T, EPPS B P, BELDEN J. Water entry of projectiles[J]. Annual review of fluid mechanics, 2014, 46: 355-378.
- [3] GEKLE S, PETERS I R, GORDILLO J M, et al. Supersonic air flow due to solid-liquid impact[J]. Physical review letters, 2010, 104(2): 024501.
- [4] ZHAO R, FALTINSEN O. Water entry of two-dimensional bodies[J]. Journal of fluid mechanics, 1993, 246: 593-612.
- [5] SUN H, FALTINSEN O M. The influence of gravity on the performance of planing vessels in calm water[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2007, 58(1): 91-107.
- [6] WU G X, XU G D, DUAN W Y. A summary of water entry problem of a wedge based on the fully nonlinear velocity potential theory[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(5): 859-864.
- [7] PENA B, MUK-PAVIC E, THOMAS G, et al. Numerical analysis of a leading edge tubercle hydrofoil in turbulent regime[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 878: 292-305.
- [8] HUANG L, REN K, LI M, et al. Fluid-structure interaction of a large ice sheet in waves[J]. Ocean Engineering, 2019, 182: 102-111.
- [9] DASHTIMANESH A, TAVAKOLI S, KOHANSAL A, et al. Numerical study on a heeled one-stepped boat moving forward in planing regime[J]. Applied Ocean Research, 2020, 96: 102057.
- [10] TAVAKOLI S, BABANIN A V. Wave energy attenuation by drifting and non-drifting floating rigid plates[J]. Ocean Engineering, 2021, 226: 108717.
- [11] WINDT C, DAVIDSON J, RANSLEY E J, et al. Validation of a CFD-based numerical wave tank model for the power production assessment of the wavestar ocean wave energy converter[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 2499-2516.
- [12] JAVANMARD E, MANSOORZADEH S, MEHR J A. A new CFD method for determination of translational added mass coefficients of an underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2020, 215: 107857.
- [13] HUANG L, LI M, ROMU T, et al. Simulation of a ship operating in an open-water ice channel[J]. Ships and Offshore Structures, 2021, 16(4): 353-362.
- [14] KHOJASTEH D, TAVAKOLI S, DASHTIMANESH A, et al. Numerical analysis of shipping water impacting a step structure[J]. Ocean Engineering, 2020, 209: 107517.
- [15] VON KARMAN T. The impact on seaplane floats during landing[J]., 1929.
- [16] WAGNER H. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces[J]. Z. Angew. Math. Mech, 1932, 12(4): 193-215.
- [17] SEDOV L. The impact of a solid body floating on the surface of an incompressible fluid[J]. CAHI Report, 1934, 187.
- [18] YU Y T. Virtual masses of rectangular plates and parallelepipeds in water[J]. Journal of Applied Physics, 1945, 16(11): 724-729.

- [19] SHIFFMAN N, SPENCER D. The force of impact on a sphere striking a water surface[J], 1945.
- [20] COURANT R, SHIFFMAN M, SPENCER D C. The force of impact on a sphere striking a water surface[R]. [S.l.]: NEW YORK UNIV NY COURANT INST OF MATHEMATICAL SCIENCES, 1945.
- [21] SHIFFMAN M, SPENCER D. The force of impact on a cone striking a water surface (vertical entry)[J]. Communications on pure and applied mathematics, 1951, 4(4): 379-417.
- [22] HILLMAN A. Vertical impact on a water surface by a 60 cone[Z]. 1946.
- [23] PIERSON J D. The penetration of a fluid surface by a wedge[R]. [S.l.]: STEVENS INST OF TECH HOBOKEN NJ EXPERIMENTAL TOWING TANK, 1950.
- [24] MONAGHAN R. A theoretical examination of the effect of deadrise on wetted area and associated mass in seaplane-water impacts[J], 1949.
- [25] BISPLINGHOFF R, DOHERTY C. Some studies of the impact of vee wedges on a water surface[J]. Journal of the Franklin Institute, 1952, 253(6): 547-561.
- [26] FABULA A G. Ellipse-fitting approximation of two-dimensional, normal symmetric impact of rigid bodies on water[C] // Proceedings of the 5th midwestern conference on fluid mechanics. [S.l. : s.n.], 1957: 299-315.
- [27] TRILLING L. The impact of a body on a water surface at an arbitrary angle[J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(2): 161-170.
- [28] SCHNITZER E, HATHAWAY M E. Estimation of hydrodynamic impact loads and pressure distributions on bodies approximating elliptical cylinders with special reference to water landings of helicopters[R]. [S.l. : s.n.], 1953.
- [29] FALTINSEN O, ZHAO R. Water entry of ship sections and axisymmetric bodies[J]. High Speed Body Motion in Water, 1998(827).
- [30] COINTE R. Two-dimensional water-solid impact[J], 1989.
- [31] MILOH T. On the oblique water-entry problem of a rigid sphere[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1991, 25(1): 77-92.
- [32] MILOH T. On the initial-stage slamming of a rigid sphere in a vertical water entry[J]. Applied Ocean Research, 1991, 13(1): 43-48.
- [33] HOWISON S, OCKENDON J, WILSON S. Incompressible water-entry problems at small deadrise angles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 222: 215-230.
- [34] LIN M, HO T. Water-entry for a wedge in arbitrary water depth[J]. Engineering analysis with boundary elements, 1994, 14(2): 179-185.
- [35] ANGHILERI M, SPIZZICA A. Experimental validation of finite element models for water impacts[C] // 2nd International KRASH Users' Seminar (IKUS2). [S.l. : s.n.], 1995: 1-9.
- [36] MEI X, LIU Y, YUE D K. On the water impact of general two-dimensional sections[J]. Applied Ocean Research, 1999, 21(1): 1-15.
- [37] PARK M S, JUNG Y R, PARK W G. Numerical study of impact force and ricochet behavior of high speed water-entry bodies[J]. Computers & Fluids, 2003, 32(7): 939-951.
- [38] 陈学农, 何友声. 平头物体三维带空泡入水的数值模拟[J]. 力学学报, 1990: 129-138.
- [39] 顾懋祥, 程贯一, 张效慈. 平头旋转壳撞水水弹性效应的研究[J]. 水动力学研究与进展 (A辑), 1991: 42-51.

- [40] 郑际嘉, 岳亚丁. 刚性圆板自由落体在水面上的冲击压力[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 1992, 7(2): 219-226.
- [41] 钱勤, 黄玉盈, 王石刚, 等. 任意的拉格朗日欧拉边界元-有限元混合法分析物体撞水响应[J]. 固体力学学报, 1994, 15(1): 12-18.
- [42] LU C, HE Y. Nonlinear fluid-structure interaction during two-dimensional water impact[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Nonlinear Mechanics, Shanghai, China. [S.l. : s.n.], 1998: 513.
- [43] 张军, 张志荣, 洪方文, 等. 楔形体入水初期流场的数值模拟[J]. 船舶力学, 2003, 7(4): 28-35.
- [44] 张于维, 王志东, 晋文菊, 等. 二维楔形体砰击载荷研究[J]. 中国舰船研究, 2010, 5(3): 34-37.
- [45] MACCOLL J W. Aerodynamics of a spinning sphere[J]. The Aeronautical Journal, 1928, 32(213): 777-798.
- [46] GILBARG D, ANDERSON R A. Influence of atmospheric pressure on the phenomena accompanying the entry of spheres into water[J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(2): 127-139.
- [47] MAY A, WOODHULL J C. Drag coefficients of steel spheres entering water vertically[J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(12): 1109-1121.
- [48] RICHARDSON E. The impact of a solid on a liquid surface[J]. Proceedings of the Physical Society (1926-1948), 1948, 61(4): 352.
- [49] MAY A, WOODHULL J C. The virtual mass of a sphere entering water vertically[J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(12): 1285-1289.
- [50] ABELSON H. Pressure measurements in the water-entry cavity[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1970, 44(1): 129-144.
- [51] LOGVINOVICH G V. Hydrodynamics of free-boundary flows[J]., 1972.
- [52] MAY A. Review of water-entry theory and data[J]. Journal of Hydraulics, 1970, 4(4): 140-142.
- [53] MAY A. Water entry and the cavity-running behavior of missiles[R]. [S.l.]: Navsea Hydroballistics Advisory Committee Silver Spring Md, 1975.
- [54] GLASHEEN J, MCMAHON T. A hydrodynamic model of locomotion in the basilisk lizard[J]. Nature, 1996, 380(6572): 340-342.
- [55] GLASHEEN J, MCMAHON T. Vertical water entry of disks at low Froude numbers[J]. Physics of Fluids, 1996, 8(8): 2078-2083.
- [56] GAUDET S. Numerical simulation of circular disks entering the free surface of a fluid[J]. Physics of Fluids, 1998, 10(10): 2489-2499.
- [57] GEKLE S, van der BOS A, BERGMANN R, et al. Noncontinuous Froude number scaling for the closure depth of a cylindrical cavity[J]. Physical review letters, 2008, 100(8): 084502.
- [58] LEE M, LONGORIA R, WILSON D. Cavity dynamics in high-speed water entry[J]. Physics of Fluids, 1997, 9(3): 540-550.
- [59] GORDILLO J M, SEVILLA A, RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ J, et al. Axisymmetric bubble pinch-off at high Reynolds numbers[J]. Physical review letters, 2005, 95(19): 194501.

- [60] OGER G, DORING M, ALESSANDRINI B, et al. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries[J]. Journal of computational physics, 2006, 213(2): 803-822.
- [61] DUCLAUX V, CAILLÉ F, DUEZ C, et al. Dynamics of transient cavities[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 591: 1-19.
- [62] DUEZ C, YBERT C, CLANET C, et al. Making a splash with water repellency[J]. Nature physics, 2007, 3(3): 180-183.
- [63] SNOEIJER J H, ANDREOTTI B. Moving contact lines: scales, regimes, and dynamical transitions[J]. Annual review of fluid mechanics, 2013, 45: 269-292.
- [64] ARISTOFF J M, TRUSCOTT T T, TECHET A H, et al. The water-entry cavity formed by low Bond number impacts[J]. Physics of Fluids, 2008, 20(9): 091111.
- [65] ARISTOFF J M, BUSH J W. Water entry of small hydrophobic spheres[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 619: 45-78.
- [66] ANTKOWIAK A, BREMOND N, LE DIZES S, et al. Short-term dynamics of a density interface following an impact[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 577: 241-250.
- [67] TRUSCOTT T T. Cavity dynamics of water entry for spheres and ballistic projectiles[M]. [S.l. : s.n.], 2009.
- [68] ARISTOFF J M, TRUSCOTT T T, TECHET A H, et al. The water entry of decelerating spheres[J]. Physics of fluids, 2010, 22(3): 032102.
- [69] TRUSCOTT T T, EPPS B P, TECHET A H. Unsteady forces on spheres during free-surface water entry[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 704: 173-210.
- [70] TRUSCOTT T T, TECHET A H. A spin on cavity formation during water entry of hydrophobic and hydrophilic spheres[J]. Physics of Fluids, 2009, 21(12): 121703.
- [71] TRUSCOTT T T, TECHET A H. Water entry of spinning spheres[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 625: 135-165.
- [72] TECHET A, TRUSCOTT T. Water entry of spinning hydrophobic and hydrophilic spheres[J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27(5-6): 716-726.
- [73] TRUSCOTT T T, WRIGHT M M, LANGLEY K R, et al. Holy balls! Balls that walk on water[J]. Physics of Fluids, 2012, 24(9): 091103.
- [74] TRUSCOTT T, TECHET A, BEAL D. Shallow angle water entry of ballistic projectiles[J]., 2009.
- [75] DE BACKER G, VANTORRE M, BEELS C, et al. Experimental investigation of water impact on axisymmetric bodies[J]. Applied Ocean Research, 2009, 31(3): 143-156.
- [76] BODILY K G, CARLSON S J, TRUSCOTT T T. The water entry of slender axisymmetric bodies[J]. Physics of Fluids, 2014, 26(7): 072108.
- [77] ENRIQUEZ O R, PETERS I R, GEKLE S, et al. Collapse and pinch-off of a non-axisymmetric impact-created air cavity in water[J]. Journal of fluid mechanics, 2012, 701: 40-58.
- [78] 张庆明, 陈九锡. 回转体垂直入水早期空泡的一个计算方法[D]. 1984.
- [79] 陈九锡, 颜开. 用 MAC 方法计算平头物体垂直等速入水空泡[J]. 空气动力学学报, 1986, 1.
- [80] 叶取源. 锥头物体垂直入水空泡的发展和闭合[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1989, 4(2): 33-41.

- [81] 叶取源. 用 EL 方法计算圆平头物体垂直入水空泡的面闭合和深闭合[J]. 应用力学学报, 1990, 7(4): 17-24.
- [82] 李森虎, 何友声, 鲁传敬. 超声速平头物体垂直撞水的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1992, 7(1): 72-78.
- [83] SHI H H, ITOH M, TAKAMI T. Optical observation of the supercavitation induced by high-speed water entry[J]. J. Fluids Eng., 2000, 122(4): 806-810.
- [84] SHI H, TAKAMI T, ITOH M. Measurement of the underwater acoustic field in water entry of blunt body[J]. Exp Meas Fluid Mech, 2001, 15(2): 78-84.
- [85] HONGHUI S, MAKOTO K. Underwater acoustics and cavitating flow of water entry[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 20(4): 374-382.
- [86] 施红辉, 周浩磊, 吴岩, 等. 伴随超空泡产生的高速细长体入水实验研究[J]. 力学学报, 2012, 44(1): 49-55.
- [87] 周家胜, 易文俊, 王中原, 等. 水下射弹的空泡形态特性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(3): 132-136.
- [88] 魏卓慧, 王树山, 马峰, 等. Experimental investigation of water-entry phenomenon[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 2.
- [89] 金大桥. 水下动能射弹空泡形态及流体动力特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [90] 张伟, 郭子涛, 肖新科, 等. 弹体高速入水特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 579-584.
- [91] GUO Z T, ZHANG W, WANG C. Experimental and theoretical study on the high-speed horizontal water entry behaviors of cylindrical projectiles[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(2): 217-225.
- [92] GUO Z, ZHANG W, XIAO X, et al. An investigation into horizontal water entry behaviors of projectiles with different nose shapes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 49: 43-60.
- [93] 曹伟, 魏英杰, 韩万金, 等. 自然超空泡航行体弹道稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(1): 26-30.
- [94] 王聪, 何春涛, 权晓波, 等. 空气压强对垂直入水空泡影响的数值研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(5): 14-19.
- [95] 马庆鹏, 魏英杰, 王聪, 等. 锥头圆柱体高速入水空泡深闭合数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(9): 1451.
- [96] 何春涛. 典型运动体入水过程多相流动特性研究[J]. 博士论文]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- [97] 齐亚飞. 弹体高速入水弹道稳定及空泡特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [98] KLIAFAS Y, HOLT M. LDV measurements of a turbulent air-solid two-phase flow in a 90° bend. 1987. <https://doi.org/10.1007/BF00776177>. DOI: 10.1007/BF00776177.
- [99] 夏征农. 辞海-军事分册[M] // . 上海: 上海辞书出版社, 1987.
- [100] 邹志利. 水波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [101] 周勤俊, 王本龙, 兰雅梅, 等. 海堤越浪的数值模拟[J/OL]. 力学季刊, 2005: 629-633(2005-12-30). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SHLX200504019&DbName=CJFQ2005>.

- 
- [102] 秦楠, 鲁传敬, 李杰. 数值波流水池构造方法研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2013, 28: 349-356.
  - [103] PERIC R, ABDEL-MAKSoud M. Reliable Damping of Free Surface Waves in Numerical Simulations[J]. Ship Technology Research, 2015, 63. DOI: 10.1080/09377255.2015.1119921.

## 致 谢

感谢 SJTU。

感谢学校中的老师和同学。

感谢家人和朋友。

# NUMERICAL SIMULATION STUDY OF WATER ENTRY PROCESS OF SLENDER BODY IN WAVE FIELD

Water entry refers to the process in which a vehicle enters the water surface from the air. When the vehicle enters the water, it will carry a part of the gas into the water, or it will vaporize the water into water vapor, which is the phenomenon of water entry cavitation/cavitation. The water entry process involves the vehicle and the air-water surface, and the fluid properties of air and water play a major role in the movement of the vehicle. In the process of water entry, the contact between the vehicle and the air-water surface will occur, so the sudden change of force and moment will occur. Considering the turbulent characteristics and complexity of the fluid itself, the whole is a highly nonlinear problem. Motion is carried out in a wave field, which itself is a time-varying system. The problem of water entry is a key issue in the current scientific research field, and the research has a long history.

At the current stage, cavitation into water is a hot research direction of water entry. And with the continuous enhancement of the scientific and technological strength of the world's military powers, the ocean has increasingly become the main battlefield of modern warfare that countries are competing for. As an important part of modern naval weapons and equipment, the development of underwater weapons such as air-dropped torpedoes, anti-submarine missiles, rocket depth bombs, and high-speed projectiles has always been a hot issue that countries attach great importance to. After the underwater vehicle is launched from the airborne or shipborne platform, it must go through the process of entering the water through the free water surface. The water entry process, as the beginning of the underwater voyage, is a key bottleneck restricting the development of supercavitating weapons. First, in order to facilitate the formation of underwater supercavitation, high-speed water entry should be used, and the impact of high-speed water entry will cause damage to the structure and components of the vehicle; secondly, the entry cavitation has a great impact on the ballistic stability of the vehicle after entry. In short, the water entry process is an uncontrolled stage with the most complex flow phenomena and loads, and the most uncertain attitude and trajectory of the vehicle during the entire navigation process. It also provides initial conditions for the subsequent underwater navigation phase. Controllability and the effectiveness of end-stage attacks are critical. Therefore, the water entry process is the most important link in the launch process, and it is also the key to the success or failure of the launch. The research on the problem of cavitation into water in the wave field environment is relatively insufficient, so this paper studies the problem of cavitation into the water in the wave field environment.

The study of water entry cavitation is a long-standing problem, and has always been a hot and difficult research topic in the field of fluids. As early as the early 20th century, there have been many studies on the impact of water entry, and then to the second half of the 20th century, the problems of water entry cavitation and cavitation gradually attracted research attention. For the water entry problem, the early research methods include theoretical solution, experimental verification, etc., and then gradually began to use finite element, PIV or CFD numerical simulation methods. The water entry process is a very complex nonlinear problem. Although we already have very rich mathemat-

ical descriptions of fluid problems, it is almost impossible to solve the specific water entry process purely through theory. An important problem in the early research on the water entry problem is to calculate the maximum impact force on the object during the water entry process through theoretical analysis, but it has been proved to be very difficult. Although experiments are the most reliable way to study the process, in practice it is not practical to evaluate the water pressure on a vehicle experimentally because it would require installing a large number of pressure sensors to cover all sensitive areas on the vehicle. Therefore, measurements can only be made in limited locations, which means that the assessment will not be comprehensive. Alternatively, modeling methods can overcome the limitation of the number of sensors, but it is difficult to accurately predict the water-induced pressure on the vehicle. Take Finite Element Analysis (FEA) as an example, it requires the input of pressure at a specific location on the surface of the vehicle to perform the relevant structural analysis, but FEA itself does not have a reliable source to provide this pressure input. The most widely studied approach to the entry of vehicular bodies into water is the use of grid-based CFD methods, or finite volume methods, which are widely used and well established. CFD has been widely used to predict fluid behavior and fluid-induced structural loads, motion, and deformation. In this paper, the CFD method is used to numerically simulate the water entry cavitation problem.

When a vehicle enters the wave field, the behavior of water and air in both the vehicle and the wave field can be described by mathematical models based on physics and fluid mechanics. Including fluid continuity equation, momentum equation and energy conservation equation. Afterwards, the related changes of the basic equations of fluid mechanics in the multiphase flow environment are discussed. Finally, the water entry cavitation model is discussed. These mathematical models are the basis for performing numerical simulations.

In order to realize the numerical simulation, this paper uses the fluid mechanics calculation software Fluent to carry out the numerical simulation. Firstly, this paper introduces the adopted geometric model and mesh division. Secondly, the boundary conditions of each edge are given, and the specific wave elimination method is discussed. In order to prevent the wave reflection phenomenon caused by the boundary of the water outlet, a part of the wave absorbing area is added to the wave field, and the method of the momentum source term wave absorbing method is used in this area. In order to better capture the interface, the VOF method is used to capture. In the process of entering the water, in order to make the flow field around the vehicle more accurate, the overlapping grid technology is used, and the dynamic mesh surrounding the vehicle and the static mesh of the environment can be integrated to calculate the flow field. Finally, the specific experimental design of this experiment is discussed. According to different incident angles and incident phases, a total of 9 groups of experiments are carried out.

Finally, this paper analyzes and summarizes the phenomena of 9 groups of numerical simulation experiments. First, the stable wave field results are shown, and second, the density distribution at different water entry stages is roughly described. Then, the density field, pressure field and velocity field in the process of water entry are described in detail by taking one example of  $60^\circ$  entering water and  $90^\circ$  entering water as examples. Finally, the characteristics of the water entry process of the vehicle in each case are analyzed and discussed. When the vehicle just entered the water surface, cavitation appeared around the vehicle, and there were cavities from the head to the water surface. With the continuous operation of the vehicle, the cavitation on the lower right side gradually

collapsed, and the cavitation near the head of the vehicle gradually disappeared, and the cavitation gathered at the tail of the vehicle. The maximum front-end pressure occurs when the object just touches the water surface, and the pressure rises rapidly and reaches the maximum value when the object just touches the water surface. Affected by high pressure, but remains relatively low relative to the first contact with the water, and does not change much during sailing. There is a certain low pressure area on both sides of the vehicle, and the low pressure area occurs in the area where there are cavities. In the part where there are cavities, the fluid moves faster. When the water entry phase is different, the displacement, velocity, angular velocity, and the resultant force and moment of the vehicle will change. The above results are in line with the general law of water entry cavitation, and reflect the influence of different water entry phases and water entry angles on the water entry process.