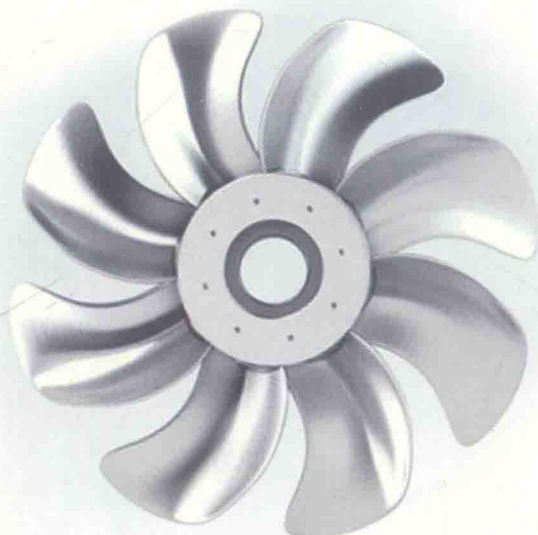


“十二五”国家重点图书出版规划项目

流体与结构砰击 水动力学

孙士丽 许国冬 倪宝玉 著

Hydrodynamics of
Fluid/Structure Impact



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

流体与结构砰击水动力学

孙士丽 许国冬 倪宝玉 著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本专著涉及的主要问题是:当流体与结构产生高速相对运动时,物体湿表面剧烈变化,自由液面产生复杂的卷曲变形,结构承受巨大的流体冲击力,同时整个砰击过程还可能伴随非常复杂的物理现象。因此当砰击发生时,海洋结构物的生命安全以及作业安全将受到威胁。以此为背景,本专著主要内容包括砰击问题的基本理论、流体与结构砰击的相似解问题、结构的自由入水砰击问题、结构在非线性规则波中的入水砰击问题、三维结构的入水砰击问题、水柱或液滴与结构的砰击问题以及物体出水问题等。

本书既可以作为研究生相应课程的教材,又可做为本科生相关教材的参考资料,还可以为从事船舶与海洋工程相关专业工作的科技人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体与结构砰击水动力学/孙士丽,许国冬,倪宝玉著.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2014. 11
ISBN 978-7-5661-0942-2

I. ①流… II. ①孙… ②许… ③倪… III. ①流体-
水动力学 ②砰击-水动力学 IV. ①TV131.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 271933 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 13
字 数 289 千字
版 次 2014 年 12 月第 1 版
印 次 2014 年 12 月第 1 次印刷
定 价 36.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

流体与结构的砰击是指流体与结构在短时间内相对运动而产生的剧烈相互作用。砰击过程十分短暂,砰击发生时,伴随结构湿表面的剧烈变化、流体的强非线性运动、自由液面的卷曲变形甚至破碎以及流体与结构的强非线性耦合等,更为重要的是结构物会受到强烈的冲击载荷。流体与结构的砰击问题在自然界中很常见,如海洋平台在恶劣海况下工作遭受到巨浪的砰击,高速船在波浪中航行时船首产生出入水砰击,巨浪或海啸砰击堤坝或建筑物,水上飞机在海面上降落产生砰击等。目前,流体砰击力是威胁各类海洋结构物生命安全的重要因素之一。本专著以《流体与结构砰击水动力学》为题,详细阐述流体与结构砰击问题的基本理论,建立流体与结构砰击数学模型,分析流体与结构砰击的数值计算结果和相关物理现象,力图揭示物理现象背后的力学机理。

本专著以理想流体假设为前提,专注于研究全非线性边界条件下的出入水砰击问题以及射流砰击壁面问题。全书分为8章:第1章对砰击问题进行定义和分类,并系统介绍了国内外研究现状;第2章介绍了砰击问题的理论基础和基本数学方程;第3章讨论了流体与结构砰击的相似解问题;第4章着重分析二维以及轴对称结构的自由落水砰击;第5章探讨结构在非线性规则波中的入水问题;第6章详细阐述物体入水的三维问题;第7章分析水柱或大液滴对结构的砰击;第8章讲述了刚性物体以及气团的出水问题。本书的第2章、第3章以及第4章主要由许国冬撰写(10万字),第5章、第6章以及第7章主要由孙士丽撰写(11.4万字),第1章以及第8章主要由倪宝玉撰写(7.5万字)。

本书着重分析了流体与结构砰击问题的数值实现过程,为希望在此领域学习的学生提供了一个详细的参考思路。本书既可作为研究生相应课程的教材,又可作为本科生相关教材的参考资料,还可为从事船舶与海洋工程相关专业工作的科技人员提供一些参考。

另外需要指出的是,流体与结构的砰击问题非常庞大,涉及很多复杂的物理现象,例如气垫效应、空泡初生、高速射流、流体薄层、极端压力载荷、加速度、结构变形以及流体可压缩性等。上述物理量随时间和空间剧烈变化,无论对实验还是对数值均提出了极大的挑战。本书仅包含上述物理现象的一部分,但上述物理现象也给予我们一些提示,我们还需要在以后对流体与结构的砰击问题进行大量的深入研究。

本书中部分研究成果受到国家自然科学基金(Nos. 51479044, 11302057, 11302056),博

士后国际交流计划(No. 20140068),中国博士后基金(2014M560250),黑龙江省博士后研究经费(LBH-Z14507)以及英国劳氏基金会(Lloyd's Register Foundation)成立的“University College London-上海交通大学-哈尔滨工程大学深海工程水动力联合中心”的资助,作者在此深表谢意。英国劳氏基金会通过资助与工程有关的教育、公共设施和科研应用来保护人类生命和财产安全。另外,作者在撰写本书过程中,参考或引用了国内外一些专家学者的论著,在此表示感谢。

作 者

2014 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 流体与结构砰击的定义和分类	1
1.2 流体与结构砰击问题的难点	3
1.3 理论、数值和实验方法概述	4
第 2 章 理论基础与数学方程	11
2.1 控制方程与边界条件	11
2.2 流域边界值问题的求解	13
第 3 章 流体与结构砰击相似解分析	15
3.1 楔形体与楔形水柱砰击相似解	16
3.2 锥体垂向入水相似解	26
3.3 膨胀抛物面斜向入水相似解	36
第 4 章 二维及轴对称结构自由入水砰击	44
4.1 楔形体垂向自由入水	44
4.2 楔形体三自由度自由入水	53
4.3 圆锥体自由入水	64
第 5 章 非线性规则波中二维结构入水砰击	75
5.1 边界条件	75
5.2 数值实现	77
5.3 高阶非线性波	79
5.4 物体在波浪中入水现象分析	80
第 6 章 三维非轴对称结构入水砰击	93
6.1 三维问题的基本条件	93
6.2 控制方程的离散以及速度的求解	94
6.3 几种典型的三维入水模型及三维射流处理	96

6.4	物体表面压力计算	105
6.5	轴对称体匀速入水现象分析	106
6.6	非轴对称体变速入水现象分析	119
第7章	水柱、大液滴与结构砰击	132
7.1	轴对称水锥、大液滴正向砰击锥形结构	132
7.2	轴对称水锥斜向砰击壁面	139
7.3	非轴对称水锥斜向砰击壁面	147
7.4	水锥砰击壁面的相似解与类稳态解	150
第8章	物体出水	155
8.1	物体出水分分类	155
8.2	物体完全出水	157
8.3	气团破裂出水	174
参考文献		193

第1章 绪 论

1.1 流体与结构砰击的定义和分类

流体与结构砰击现象是自然界中的常见现象之一,广泛地存在于航空航天、水中兵器、船舶与海洋工程等领域中。诸如航空领域中飞机的水上着落、航天环境下的结构物遭遇超大液滴、兵器领域中鱼雷的出入水、船舶领域中快艇的船首出入水砰击、海洋工程领域中平台遭遇波浪砰击等都属于该范畴,在化工与体育运动方面亦有运用。砰击是流体与结构物在较短时间内大幅的相对运动、相互作用。砰击发生时,经常伴随着结构湿表面的剧烈变化,流体的强非线性,自由液面的卷曲变形甚至分离破碎,流固耦合等强非线性运动。并由此诱导产生巨大的砰击力,砰击力作用时间短暂但峰值巨大,有时足以使结构在短时间内遭受破坏,或者多次持续的砰击也会使结构产生疲劳破坏。20世纪60年代至90年代的相关数据表明,船舶结构破损有10%~12%是在恶劣海况下作业时发生的,其中水动力砰击是一个十分重要的因素^[1]。

对于船舶与海洋工程界水动力砰击的分类可参考“造船与轮机工程师学会”(Society of Naval Architects and Marine Engineers, SNAME)的解释。船舶水动力砰击可以分为四大类:艏底砰击,波浪拍击,艏外飘冲击及甲板上浪。艏底砰击描述船首在汹涛中拍击水面,如图1.1(a)所示。船首出水再入水时会以较高的速度拍击水面,这将产生巨大的水动力压力,该载荷作用于局部结构,随后将传至整个船体。巨大的脉冲压力必然引起局部结构的破坏与变形,整个船体也会产生高频振动响应。波浪拍击常用来描述波系与船首部结构的作用。很容易可以观察到入射波系向相对静止的船舶结构传递能量,波浪拍击常出现在船舶的水线面附近。船舶的艏外飘与来波相撞击时,即发生艏外飘冲击。与艏底砰击相似,艏外飘砰击会产生巨大的水动力并引发高频振动,与之不同的是艏外飘冲击作用时间更长,巨大的水动力砰击载荷作用在船舶的位置也不同,并且巨大的水动力压力会覆盖整个艏部。因此,对于艏底砰击适用的预报技术不一定适合预报艏外飘冲击。图1.1(b)是典型的艏外飘冲击和甲板上浪图。甲板上浪描述舰船穿行至入射波系的水面以下或者一头扎进来波,水波破碎并冲到船舶甲板上,形成甲板上浪,所产生的压力可以破坏甲板及其上部结构。图1.1(c)是一个甲板上浪的二维实验图。以上描述的船舶与海洋工程方面的水动力砰击现象常常是两到三种一并出现,如艏外飘砰击与甲板上浪常常一起出现。

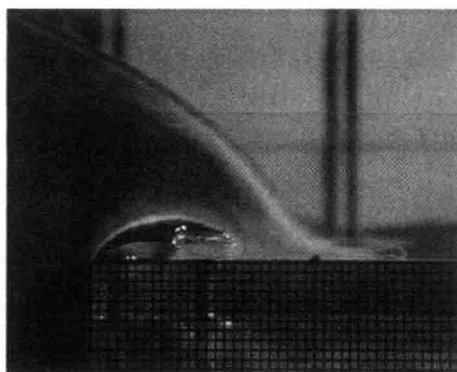
上面的划分方式主要是按照砰击发生的位置不同而划分的,本书将进一步依据流体与结构的作用方式,将流体与结构砰击主要划分为三类。上文提到的水上飞机海上降落、舰



(a)



(b)



(c)

图 1.1 几种水动力砰击现象示意图

(a) 船底砰击; (b) 船外飘冲击与甲板上浪; (c) 甲板上浪实验

船首底拍击和鱼雷的出入水等都有一个共同之处,就是结构物撞击较大水域,为此可称之为(出)入水砰击,为第一类砰击。航空航天环境下超大液滴与飞行器撞击、波浪砰击平台底部结构及波浪爬高后跌落甲板的情形也有共同的特点,即参与流体与结构相互作用的流体域是有限的,这里可称之为液柱砰击,为第二类砰击。介于以上两种情况之间的砰击称为第三类砰击,即参与作用的流体介于有限与无限之间,或是较大水域的局部参与又受整个水域的影响,包括船舶的船外飘冲击、波浪拍击、波浪冲刷海岸线等。通常适用于第一类或第二类砰击的计算方法对第三类问题不完全适用,因此对第三类砰击的计算方法需要对模型简化,抓住主要特点,以满足工程需要。这里特别提到液舱晃荡引发的砰击问题,对于LNG船的设计十分重要,液舱晃荡与船舶自身的运动发生共振时可能会引起液货对舱盖及

角隅形成剧烈的砰击。液舱晃荡引发的砰击与甲板上浪的流体对甲板上结构物的冲击有很多相似之处,然而晃荡引起的砰击问题关联整个液货舱室的流体。晃荡问题计算的运动周期更长,具有典型第三类砰击的特点。

之所以如此关心流体与结构的砰击水动力学,一方面是关心结构的存在对于流场的影响与改变,例如对于自由面的扰动、是否诱发液体分离和流体喷溅、压力场与速度场的重新分布等,这将有利于人们掌握不同结构(如楔形体、圆柱体)、不同出入水方式(如自由或定速出入水)等对于流场物理特性的影响规律;另一方面,更重要的是,人们关心流体对于结构的砰击压力和结构物遭受的砰击载荷分布,以及由此诱发的结构动态响应,这对于结构物的载荷评估和安全设计十分重要。

1.2 流体与结构砰击问题的难点

流体与结构砰击的力学变化过程非常复杂,涉及流体的瞬时强非线性、结构湿表面的剧烈变化、自由液面的卷曲变形甚至分离破碎,还有可能涉及气垫效应、捕获气泡或气穴、空化初生、高速射流或薄层水膜、极大的压力和加速度、结构的弹塑性变形以及液体的可压缩性等物理过程。尤其是在波浪或洋流存在时,还要涉及波浪或洋流与结构运动相互耦合作用的问题。砰击过程中许多物理参数随时间、空间剧烈变化,给流体与结构砰击问题带来了巨大的挑战。

为了从理论角度或者数学角度,从定性上进而从定量上进行分析,往往对实际的物理模型进行简化,使其成为在数学上可解,同时尽可能接近真实边界条件和实际物理状态的数学模型。例如,当假设砰击从很小的接触面开始发生,给气体以足够的时间逃离接触面,则当流体冲击物面时刻,可以不考虑气垫效应;类似地,只要流体与物面在冲击时刻没有形成封闭的空间,则可以忽略捕获气穴效应;尽管砰击的相对速度很大,但一般还是远小于流体中声音传播速度,故可以忽略流体的可压缩性;如果砰击时间持续较短,流体的黏性效应也可以不予考虑,因为黏性效应需要时间累积才能逐渐发展^[2](Batchelor, 1967);当结构的变形相对较小时,可假设结构为刚性体等。在合理的假设基础上,根据对数学模型定性或定量的分析,便于探究实际物理问题的受力特征。

本书也是针对不同问题中不同物理因素所占的比例,忽略次要因素,抓住主要矛盾。如无特殊说明,一般是假设流体无黏、无旋且不可压缩,这样则可以引入满足拉普拉斯方程的速度势,在自由面上满足全非线性的运动学和动力学条件,采用完全非线性的边界积分方程进行求解。

1.3 理论、数值和实验方法概述

砰击载荷预报方法大体可分为四大类:理论方法、数值模拟、实验方法和经验公式。各种方法各有利弊,相互补充。一般而言,理论方法较为精确,但是对于流体与结构的要求较为苛刻,引入的假设较多;数值模拟比较灵活,各种类型和出入水均可模拟,但是需要进行有效性验证;实验数据被认为是最可靠的,但花费昂贵,可重复性差,并且尺度效应明显;经验公式最为简便,但是其中的影响因子比较难取,相对精度较差。本书中主要采用的是理论方法和数值模拟结合的方法研究流体与结构砰击问题,故这里主要阐述理论方法和数值模拟的研究进展,简略地提及一下实验方法。

1.3.1 理论方法

较早的流体与结构砰击载荷的理论预报是 Von Karman^[3] (1929) 提出的预报水上飞机降落时其浮箱所受砰击载荷的简化方法。Von Karman 假定物体穿透水面瞬间,自由面保持静止,且自由面上 $\phi=0$, 这里 ϕ 为速度势,如图 1.2 所示。假定流体无黏、无旋、不可压,引入速度势理论计算物体的附加质量及其变化率,基于动量交换的思想来求解砰击载荷。Von Karman 取无限频率下的无界流中同等入水宽度平板的附加质量作为入水结构的附加质量,砰击力则取为附加质量的变化率 $d(m_{zz}V)/dt$, m_{zz} 为附加质量。这样的话,砰击载荷可以由瞬时附加质量与速度的乘积对时间的导数来确定。工程上认为 Von Karman 模型对于小底升角的物体入水问题较为适合。在此之后出现了很多基于 Von Karman 模型的匹配修正,如采用船型剖面,自由面的速度分布匹配成弧形、抛物形或者圆形。Chu 和 Abramson^[4] (1961) 等人认为修正技术对于较大底升角的结构砰击的后续阶段是有效的。事实上自由面的上升是不可忽视的,考虑自由面修正后的附加质量估算更为合理。Wagner^[5] (1932) 考虑楔形入水时水线附近自由面的升高,引入线性化自由面条件,在静水线处的速度势的垂向导数修正自由面形状(自由面上速度势 $\phi=0$),计算了压力分布、流体作用的总载荷。Armand 和 Cointe^[6] (1987) 等人的研究认为 Wagner 的线性修正在砰击的初始阶段是有效的,但在入水到一定深度之后则需要一些附加修正项。后续的很多研究都基于 Wagner 理论模型的思想进行修正,如 Scolan 和 Korobkin^[7,8] (2001, 2012), Moore 等人^[130] (2012)。

另一个源自 Wagner 理论模型的方法是渐近匹配法。该方法把流体分为内流域与外流域。在内流域,对在物面与自由面的交点附近的射流进行局部射流分析;在外部流域,物面边界条件和自由面边界条件转换成为一条线,物面对应为平板,将内部流与外部流进行匹配就可以得到完整的压力分布^[1] (Rosenblatt, 1995)。Armand 和 Cointe^[6] (1987), Howison

等人^[9](1991), Fraenkel 和 Mcleod^[10](1991), Zhao 和 Faltinsen^[11](1993) 都给出过这类计算结果。Wanatabe^[12](1986) 则基于多项式展开和局部射流分析给出了渐近匹配解, 但与上面提到的几种不同。Korobkin 和 Iafrat^[13](2005) 以渐近匹配解和数值方法(边界元法)研究了漂浮的带外飘物体突然加速的砰击模型, 并且 Korobkin 等人^[14](2006) 将渐近匹配解运用到结构与流体的水弹性分析中。

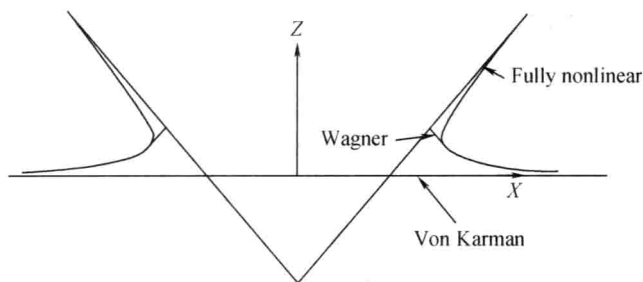


图 1.2 几种楔形入水模型的示意图

Mei 等人^[15](1999) 提出一种基于线性自由面条件的解析变换方法, 可以很方便地求解任意剖面的二维物体垂向穿透静止水面模型, 可以较好地给出压力分布和载荷的时历过程。Mei 等人采取的基本思想就是基于 Wagner 模型, 结合瞬时的物面边界条件求解各时刻的边界值问题, 求解过程中采用了投影映射的转换变换。Yettou 等人^[16](2007) 采用一般的 Wagner 公式来求解楔形的砰击问题, 具体研究了楔形体砰击过程中的减速过程, 给出砰击压力、砰击载荷, 与实验值比较吻合的较好。除了这些线性 Wagner 理论, Korobkin^[17](2007), Oliver^[18](2007) 等人给出了二阶渐近匹配的结果, 他们称二阶理论在预报砰击载荷方面有较大改进。

1.3.2 数值方法

计算流体的数值方法一般可分为有网格法和无网格法。典型的有网格法包括边界元法、有限元法、有限体积法、有限差分法等; 典型的无网格法包括光滑粒子法 (SPH)、移动粒子半隐式法 (MPS) 等。就砰击问题而言, 最为常用的也最具优势的当属边界元法。这是因为尽管砰击过程中物理量剧烈变化, 但是砰击影响的区域一般局限于相对较小的接触面积内。由于边界元仅在流体边界划分网格, 无需考虑内部流域的网格划分和更新问题, 大大节约了计算时间, 尤其对于接触边界面积相对较小或者具有尖锐射流和流体薄层的砰击问题。边界元法在流体边界上可实现全非线性边界条件, 也相对容易更新和重组网格。

早期的求解楔形水柱砰击结构物的全非线性解还存在一定的困难, 研究人员寻求一些

近似的方法得到近似解。Cumberbatch^[19] (1960) 尝试求解楔形水柱垂向砰击刚性板的相似解, 在自由面上引入线性近似, 进而得到与相似解接近的解。Dobrovolskiy^[20] (1969) 首先给出了比较完整的对称楔形入水的相似解, 并给出了数值求解的过程。Zhao 和 Faltinsen^[11] (1993) 依据其方法重新计算并得到更为准确的解。随着计算机技术的发展, 数值计算变得实际可行。Zhang^[21] (1996), Greco^[22] (2001) 等人以边界元法研究了楔形水柱砰击刚性墙模型的相似解, 自由面边界条件通过指数函数近似, 再采用边界积分方程求解边界值问题。Wu 等人^[23] (2004) 给出了相似解的另一种求解过程, 他们将自由面边界条件转换为其积分形式, 通过迭代积分得到稳定收敛的数值解。Semenov 和 Iafrati^[24] (2006) 给出了非对称楔形垂向入水的解析形式的相似解, 通过平面复势进行映射变换得到问题的解。Semenov 和 Wu^[25] (2013) 和 Semenov 等人^[26] (2013) 采用相同的方法分别计算了物体沿自由面滑行的定常流问题和两个楔形水柱碰撞的问题。需要注意的是, 一般而言相似解仅仅在忽略重力及楔形以匀速平动入水时才存在, 但也有特殊情况, 具体请参见本书第 3 章和第 7 章。

大多数的时域非线性数值求解方法都基于 Longuet-Higgins 和 Cokelet^[27] (1976) 采用的混合欧拉-拉格朗日法追踪自由面来实现, 每一时间步均需要求解速度势的边界值问题, 自由面上满足 Dirichlet 边界条件, 固定边界上满足 Neumann 边界条件。一般来讲可以通过面元法来离散求解边界值问题, 可以求得物面上的速度势及自由面上速度势的法向导数, 这样就可以计算自由面上的速度分量, 接着就可以通过时域步进更新每一时刻自由面的位置及自由面上的速度势。基于这个原理就可以实现时域数值模拟。Zhao 和 Faltinsen^[11] (1993) 首先将这个办法运用到楔形结构的入水问题。他们通过边界元法在时域内求解楔形体匀速入水过程。Lu 等人^[28] (2000)、Iafrati 等人^[29] (2000) 研究了楔形体匀速入水过程中结构弹性的影响。Battistin 和 Iafrati^[30] (2003) 等人求解了二维楔形、圆柱及轴对称物体的砰击问题的解, 采用非线性自由面边界及瞬时物面边界条件, 结合面元法在时域内求解, 给出了物面压力分布及总的砰击载荷。此外 Zhao 等人^[31] (1996) 还给出了流体与物面分离的近似解法。直接数值计算压力及载荷都易出现震荡现象, 其原因在于求解物面压力分布时需要用到伯努利方程, 速度势的时间偏导数项需要通过差分来获得, 但网格的移动及网格的重构都会造成求解的困难。Wu 等人^[23] (2004) 分析了楔形体的自由下落过程, 在分析求解的过程中引入拓展坐标系和辅助函数, 分析了楔形体与流体的耦合运动, 该方法计算稳定、有效。此后, 拓展坐标系和辅助函数被广泛应用于本书中介绍的各种砰击问题中, 例如 Wu^[56, 76, 90, 92] (2006, 2007a, 2012, 2007b), Duan 等人^[59] (2009), Xu 等人^[32, 33, 58, 61] (2010, 2011b, 2008, 2011), Sun 和 Wu^[75, 91, 97, 99] (2013a, 2013b, 2014a, 2014b) 以及 Wu 和 Sun^[67] (2014) 等。有关拓展坐标系和辅助函数的具体实现方法请参见本书第 3 章和第 4 章的相关内容。

近年 CFD 技术与计算机的性能发展迅速, 研究人员对流体与结构砰击模型做了很多新的尝试与努力。CFD 计算的优点在于考虑因素全面, 例如可考虑流体剧烈运动时出现的气

液混合,以及流体的黏性和可压缩性等,然而 CFD 在求解液舱剧烈晃荡、甲板上浪、艏底砰击、结构入水等方面的计算精度和效率还有待提高,亦需要严密的测试和验证。此外,由于需求解 N-S 方程,一般来讲 CFD 方法在求解强非线性流体与结构相互作用时比较耗时。

Hu 和 Kashiwagi^[34] (2004) 和 Zhu 等人^[114] (2005) 采用基于 CIP 技术 (Constrained Interpolation Profile) 的有限差分研究了砰击问题, Kleefsman 等人^[35] (2005) 通过求解 N-S 方程研究了溃坝及入水问题,其方程针对固定的坐标系下的网格进行离散,以 VOF 法结合局部高度函数来捕捉自由面。他们认为自由面边界条件的选取对计算的精度和可靠性影响较大。Sames 等人^[36] (1999) 基于平均雷诺数的 N-S 方程的有限体积法给出了一些船形剖面入水问题的计算结果,计算了入水过程中砰击压力及自由面的变形,并考虑了破碎波及捕获气泡效应。Oger 等人^{[37][38]} (2006, 2007) 采用 SPH 方法模拟了三维流体的剧烈运动,给出了艏部模型入水瞬时的砰击结果。Greco 等人^[39] (2008) 也采用 SPH 方法模拟了船舶甲板上浪并和实验数据进行了比较。SPH 技术计算在自由面的大变形,尤其是自由面破碎等方面具有优势,然而在压力计算方面,特别在粒子不均匀的局部,其效果不理想。Aquelet 等人^[40] (2006) 通过解 N-S 方程,结合任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 公式预报楔形入水的局部压力,流体与结构相互作用过程引入耦合算法进行模拟,并应用动网格和网格重构技术。这些较新的算法在反映砰击过程中的强非线性上差强人意,个别模型还不能给出较高精确度、稳定性好、收敛的结果,计算的准确程度受时间步长、网格大小、松弛因子的选取影响较大,还有待后续的深入研究。目前越来越多的 CFD 算法不断应用于出入水砰击问题中,如 VOF 法^[122] (Lin, 2007)、Level-Set 法^[117] (Zhang 等人, 2010)、浸入边界元法 (IBM)^[116] (Wang 和 Wang, 2009)、混合 IBM 与 Level-Set 法^[118] (Yang 和 Stern, 2009)、混合 IBM 与 VOF 法^[119] (Zhang 等人, 2013)、SPH 法^[121] (Liu 等人, 2014) 等,但某些算法还在不断完善之中,其准确性与有效性依然值得期待。

1.3.3 实验方法

在流体与结构砰击的研究方面,实验数据被认为是最可靠的,常见的有楔形体匀速或自由入水、二维船型剖面入水、锥形体出入水及球体出入水等,实验结果常用来验证理论计算和数值模拟的结果。还有一类是针对船舶砰击的实验,即在拖曳水池中规则波、不规则波条件下的耐波性砰击实验。实验的目的就是要得到特定结构在发生砰击瞬时的压力幅值与砰击角度、速度的关系。需要注意的是结构物弹性及尺度效应对压力有重要影响。

与入水砰击实验相关的开拓性研究工作是由 Von Karman^[3] (1929) 完成的,此后,许多学者采用不同的实验方法研究入水砰击问题。不同实验关注的重点有所不同,大体分三类,第一种实验是不考虑气泡以及空泡的入水砰击实验,这种实验关注最大的压力峰值;第二种实验侧重于研究平底结构入水时的气垫效应;第三种实验主要研究入水砰击过程中伴随的空化以及分离现象。

第一种实验即不考虑空泡以及气泡效应的实验比较传统。Bisplinghoff 和 Doherty^[42] (1952) 进行了楔形体底升角从 10° 变化到 50° 时的入水实验, 测量了加速度并提取了附加质量系数, 将其与理论解进行比较。Carcattera 和 Ciappi^[43] (2004) 进行了无限长对称楔形体的入水实验, 在入水实验中和力成比例的峰值加速度出现在楔形体上边界入水以前, 同时产生了巨大的高频噪声, 并且这个峰值加速度低于线性 Wagner 方法的理论解 15% ~ 20%。Wu 等人^[23] (2004) 开展了长 0.6 m, 宽 0.2 m, 无上边界对称楔形体的入水实验。他们给出了底升角为 20° 以及 45° 时加速度的实验值, 将其与通过边界元法得到的数值解进行了比较, 他们发现底升角为 45° 时, 数值解和实验解吻合很好, 但是在 20° 时, 实验值低于数值解 30%。上面的实验都仅关注楔形体上边界入水之前, 如图 1.3 (a) 所示。Tveitnes 等人^[41] (2008) 研究了伴随脊部入水的楔形体入水问题, 他们测量了力和速度, 发现在脊部入水之前, 附加质量和浸没深度呈平方关系增加, 脊部入水之后附加质量继续增加, 最终达到一个最大值, 这个值大于脊部入水瞬间的 20% ~ 80%。

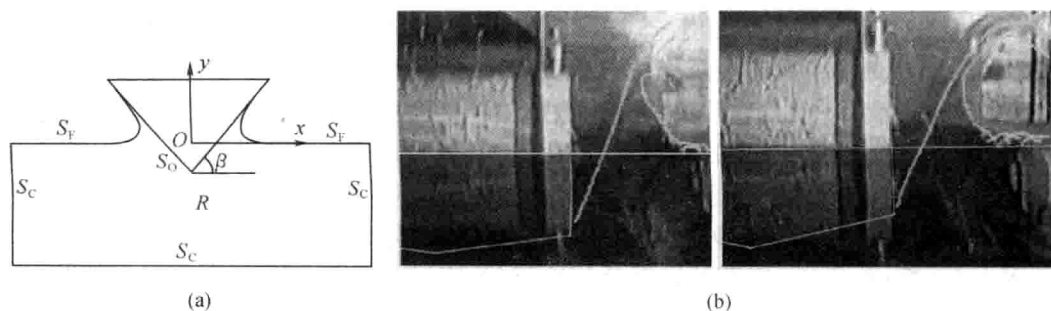


图 1.3 楔形体入水示意图

(a) 脊部没有入水^[23] (Wu, 2004); (b) 脊部入水^[41] (Tveitnes, 2008)

入水实验中, 楔形体入水是学者进行得比较多的实验, 还有一些学者进行过圆柱或圆球入水的实验。Duez 等人^[44] (2007) 研究了圆球入水问题, 如图 1.4 所示, 他们通过实验展示了入水速度必须达到某一特定的临界速度才能产生水花, 这种现象在人们的意料之中。他们真正值得人们称赞的发现是流体与固体之间的分子作用力可以控制这个临界速度。因此, 不同表面材料的球体落入水中时的物理现象包括自由液面的变形以及噪声等都可能完全是不同的。

第二种实验侧重于研究平底结构的入水问题。平底结构入水的特点是可能会伴随气垫效应, 而气垫效应有时对入水冲击压力的影响是非常大的。Chuang^[45] (1966) 进行了平板结构自由落水实验, 得到了板中心最大压力与冲击速度基本呈线性关系。Chuang^[46] (1967) 为了克服渐进理论解无法解决 0° 底升角结构的入水冲击问题, 进行了更多的楔形体

入水实验,检测了流体与结构之间的空气层,记录了板表面压力,实验结果表明压力曲线上的第一个脉冲可能是由于空气层引起的。郑际嘉和岳亚丁^[47](1992)分析了圆形平板的自由落水问题,并考虑了板与流体之间空气层的可压缩性。Lin 和 Shieh^[48](1997)通过进一步的实验研究空气层的形成,他们认为压力的脉动现象是由空气层的膨胀和收缩引起的,并提出可用于估算空气层厚度的方程。Huera - Huarte 等人^[49](2011)也进行了一系列平板入水实验,底升角从 0.3° 变化到 25° ,实验涵盖了存在气垫效应和不存在气垫效应两种情况。

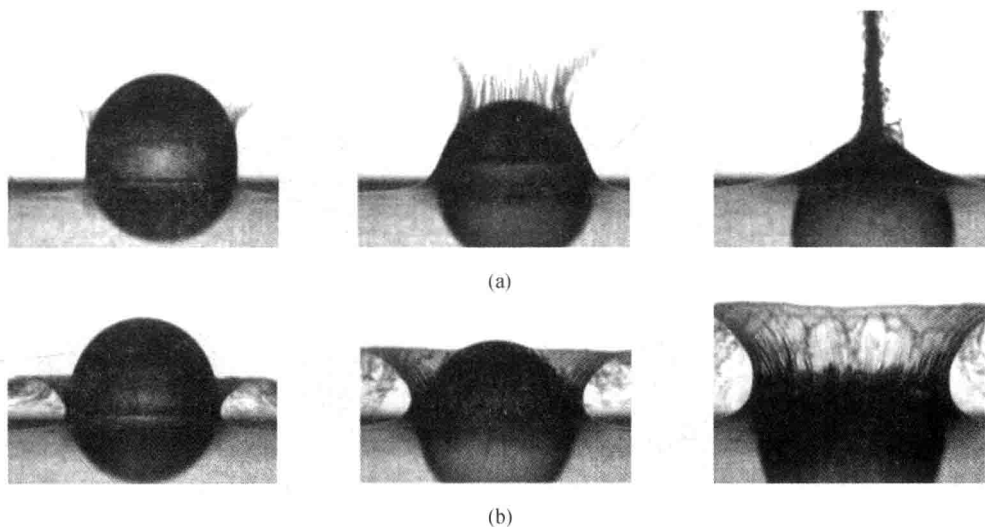


图 1.4 不同表面材料的球体入水过程示意图 (Duez 等人^[44], 2007)

第三种实验是伴随空化现象的入水砰击问题,这种现象一般发生于物体高速斜向入水时的背流面。Judge 等人^[50](2004)在楔形体斜向入水实验中捕捉到这一现象,如图 1.5 所示,在楔形体顶点左侧的背流区,流体从物体顶点处分离,也就是产生了空化现象。直到 2014 年,Gu 等人^[51](2014)才对这种物理现象进行了数值模拟。

与入水问题相对的就是结构物出水问题,关于出水的实验研究,国外公开发表的文献多关注于圆柱剖面或圆球。Greenhow 和 Lin^[53](1983)对初始完全浸没的二维圆柱体的出水问题进行了实验研究,他们让二维轻质圆柱体在初始静水中上浮,应用高速摄影仪记录圆柱体初始经历的加速过程和之后逐渐趋近于某一恒定速度上浮的过程。Miao^[54](1989)对物体的强迫出水进行了实验研究,通过摄影仪测量物体以恒定速度穿越水面过程,并应用压力传感器测量物体表面上流体动压力的变化过程。Liju 等人^[55](2001)采用发动机驱动一可向上运动的细支杆,在细支杆的上端可以安装不同尺寸和形状的轴对称体,在支杆

的推力作用下,将轴对称物体推出水面。应用此装置研究不同尺度、不同出水速度和不同流体介质条件下自由液面的变形情况。另一方面,他们采用轴对称边界元法,数值模拟该过程中自由液面的上升情况,数值解与实验值在前期吻合良好。Colicchio 等人^[52](2009)采用相当精细的实验装置模拟二维圆柱体的落水和出水过程。圆柱体的材质密度比水轻,在初始自由释放后将在浮力的作用下自由上浮,采用 PIV 技术获得物体周围流场的变化,如图 1.6 所示,并记录了圆柱体形心位置和速度曲线。

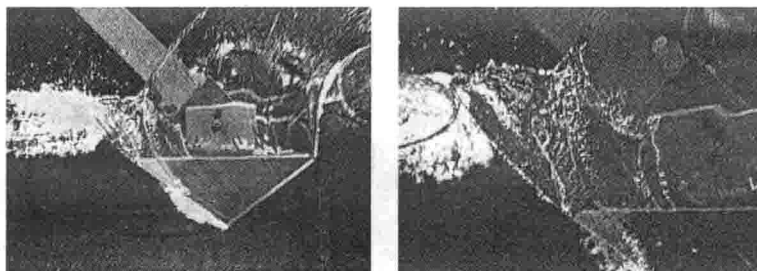


图 1.5 伴随空泡的楔形体斜向入水示意图^[50] (Judge 等人, 2004)

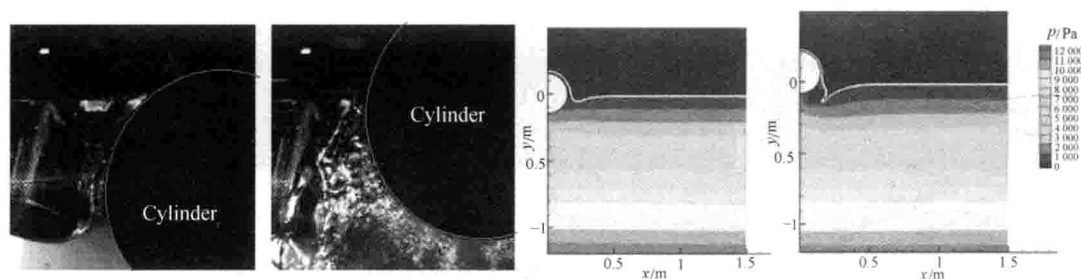


图 1.6 轻质圆柱体出水实验图片与数值模拟^[52] (Colicchio 等人, 2009)