



# 流固耦合动力学

Fluid-Structure  
Interaction Dynamics

张阿漫 戴绍仕 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 流固耦合动力学

张阿漫 戴绍仕 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书全面地阐述了流固耦合动力学的最新研究现状;系统、详细地讲述了流固耦合问题的求解方法和基本理论。全书共分7章,主要内容包括流固耦合的有限元法、边界元法、SPH方法、瞬态流耦合分析方法和小尺度物体的流固耦合振动及水下气泡与边界的耦合效应等。本书在讲述过程中还辅以相关的算例,便于学者学习和理解。

本书可以作为高等学校的研究生教材,也可作为希望在这一领域进行研究和应用的科技工作者的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的部分或全部内容。

### 图书在版编目(CIP)数据

流固耦合动力学 / 张阿漫,戴绍仕编著. —北京:  
国防工业出版社,2011.8  
ISBN 978-7-118-07588-5

I. 流... II. ①张... ②戴... III. ①船舶-  
动力学 IV. ①U661.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 172874 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 12½ 字数 283 千字  
2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422  
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474  
发行业务:(010)68472764

# 前 言

随着船舶与海洋工程技术的快速发展,以及对高性能船舶与海洋平台的迫切需求,瞬态载荷作用下的流固耦合问题日益突出,尤其是具有空穴效应的流体结构大变形、冲击波和气泡与边界的相互作用、自由液面效应等问题越来越受到业界学者和工程研究人员的高度重视。而采用经典的流固耦合方法却难以解决此类问题,相关的著作也较少,由此本人及团队在多年研究和积累的基础上撰写了本教材。

本书作为研究生教材从不同角度采用不同的方法对流固耦合问题进行了广泛研究,并将零星分散的最新研究成果和最新研究进展进行总结,重点讲述了流固耦合求解方法及其应用。本书在编写过程中注重“厚基础、宽专业、重创新”的原则,希望能够丰富船舶结构力学和船舶流体力学知识。

全书共有7章。第1章为流固耦合概述。第2章至第4章详细深入地讲解了流固耦合中的各类分析方法,其中包括有限元法、边界元法、SPH及谱单元方法等。为了解决目前船舶与海洋工程领域内瞬态强非线性流固耦合问题,在第5章详细阐述瞬态载荷作用下的流固耦合方法,如延迟势法、双渐近法和改进的双渐近法;第6章讲解小尺度物体的流固耦合振动。第7章讨论了流固耦合中出现水下气泡时的研究方法及其与边界的耦合效应。本书可作为船舶与海洋工程专业和相关专业的研究生教材,以及相关学科研究人员的参考用书。

本书中第1,2,3章和第6章等内容由戴绍仕主笔完成,第4,5章由张阿漫主笔完成,第7章由张阿漫和王诗平博士共同编写,全书由张阿漫统稿。在全书的编写过程中孙士丽博士也做出了很大的贡献。

本书的出版得到了哈尔滨工程大学研究生教材基金的资助,在撰写过程中参考了较多学者的相关著作,并得到姚熊亮教授的悉心指点,在此表示诚挚的感谢!

同时本书在国家自然科学基金(50939002,50809018,10976008,51009035,11002038)、第十二届霍英东教育基金(121073)、国库基本科研业务费(GK2010260108)等项目资助下完成。特此表示深深的谢意!

由于流固耦合问题的复杂性,并涉及多个学科,因此,我们认为本书呈现给读者的不可能是一部完整的总结性研究成果,再加上作者的水平有限,难免存在不妥之处,迫切恳请读者对本书以及我们的工作予以批评和指正。

张阿漫

于哈尔滨工程大学

2010.12

# 目 录

<b>第 1 章 流固耦合概述</b> .....	1
1.1 流固耦合基本概念 .....	1
1.2 流固耦合问题应用 .....	3
1.3 流固耦合分析方法 .....	7
1.3.1 线性流固耦合分析方法 .....	7
1.3.2 非线性流固耦合分析方法 .....	8
1.3.3 物态变化时流固耦合分析方法 .....	8
参考文献 .....	9
<b>第 2 章 流固耦合的有限元法</b> .....	13
2.1 流体运动方程与流体元 .....	13
2.1.1 流体运动方程 .....	14
2.1.2 流体元 .....	18
2.2 结构运动方程 .....	23
2.3 时域与频域求解 .....	24
2.4 湿模态法与干模态法 .....	26
2.4.1 湿模态法 .....	26
2.4.2 干模态法 .....	27
2.5 杂交子结构法 .....	30
参考文献 .....	34
<b>第 3 章 流固耦合的边界元法</b> .....	35
3.1 流体控制方程 .....	35
3.2 Green 方程 .....	36
3.3 Hess-Smith 方法 .....	38
3.4 干模态法 .....	39
3.5 湿模态法 .....	43
3.6 边界元法的应用 .....	46
参考文献 .....	48
<b>第 4 章 流固耦合的 SPH 方法与谱单元方法</b> .....	49
4.1 概述 .....	49

4.2	SPH 方法	49
4.2.1	SPH 基本原理	50
4.2.2	SPH 方法的关键技术	53
4.2.3	SPH 方法的数值实现	63
4.2.4	SPH 方法在舰船接触爆炸中的应用	68
4.3	谱单元方法	73
4.3.1	谱单元方法简介	73
4.3.2	谱单元方法原理	74
4.3.3	一维谱单元方法的应用	78
4.3.4	三维谱单元方法的应用	80
4.4	流固耦合问题的其他分析方法	84
	参考文献	85
<b>第 5 章</b>	<b>瞬态载荷作用下的流固耦合分析</b>	<b>87</b>
5.1	延迟势法及其数值解法	87
5.1.1	延迟势法	87
5.1.2	延迟势法的数值解法	90
5.2	双渐近法	96
5.2.1	早期近似法	96
5.2.2	后期近似法	97
5.2.3	双渐近法的形成	99
5.2.4	声学近似 DAA 法	102
5.3	改进的双渐近法	106
5.3.1	改进方法的背景	106
5.3.2	求解思路	106
5.3.3	非线性双渐近法的有效性	108
5.3.4	非线性双渐近法的应用	110
5.3.5	冲击波对舰船结构的损伤	111
5.3.6	冲击波与气泡对舰船结构的损伤	113
	参考文献	115
<b>第 6 章</b>	<b>小尺度物体的流固耦合振动</b>	<b>116</b>
6.1	漩涡脱落与涡激振动	116
6.1.1	漩涡形成和脱落机理	116
6.1.2	漩涡脱落特性	118
6.2	细长弹性体的流固耦合振动预报	135
6.2.1	升力振子模型	136
6.2.2	升力相关模型	138
6.2.3	弹性双柱流固耦合振动预报方法	145

6.3	线内振动 .....	147
6.4	波流中小尺度物体振动分析 .....	147
6.4.1	莫里森公式 .....	148
6.4.2	莫里森公式中系数的讨论 .....	151
6.4.3	升力系数 .....	156
6.4.4	波浪中圆柱体的尾涡图形 .....	158
6.5	涡激振动的抑制方法 .....	160
6.6	深海立管与管线的涡激振动 .....	161
6.7	跳跃振动 .....	166
6.7.1	发生跳跃振动的条件和判断准则 .....	166
6.7.2	跳跃振动的稳态解 .....	168
6.7.3	减小跳跃振动的方法 .....	171
	参考文献 .....	171
<b>第7章</b>	<b>水下气泡与边界的耦合效应 .....</b>	<b>173</b>
7.1	水下气泡动力学特性数值模型 .....	173
7.2	水下放电气泡实验设计 .....	174
7.2.1	电火花气泡形成原理 .....	174
7.2.2	实验装置的安装与使用 .....	174
7.3	水下气泡的种种特性 .....	176
7.3.1	自由场中气泡 .....	176
7.3.2	水平壁面附近气泡 .....	178
7.3.3	自由面附近气泡 .....	179
7.3.4	舷侧附近气泡 .....	179
7.3.5	气泡融合效应 .....	180
7.3.6	气泡与复杂结构的相互作用 .....	182
7.3.7	气泡与边界相互作用的数值模拟 .....	187
	参考文献 .....	192

# 第 1 章 流固耦合概述

## 1.1 流固耦合基本概念

流固耦合动力学是流体力学与固体力学交叉而生成的一门力学分支,它是研究变形固体在流场作用下的各种行为以及固体位形对流场影响这二者相互作用的一门科学。由于流固耦合问题的交叉性,其从学科上涉及流体力学、固体力学、动力学等学科知识,从技术上与不同工程领域,如土木、航空航天、船舶、动力、海洋、石化、机械、微生物工程等均有关系,其研究问题涉及面甚广,因此在广泛的领域中都有着非常重要的作用。

流固耦合动力学的重要特征是两相介质之间的相互作用,变形固体在流体载荷作用下会产生变形或运动。变形或运动又反过来影响流体,从而改变流体载荷的分布和大小,正是这种相互作用在不同条件下产生了形形色色的流固耦合现象。例如,海底管跨因涡激振动而引起的共振失效,海洋输液立管在内部流体和外部环境载荷作用下的破坏问题等。从总体上来看,流固耦合问题按其耦合机理可分为两大类<sup>[1]</sup>:第一类问题的特征是耦合作用仅仅发生在两相的交界面处,在方程上的耦合是由两相耦合的平衡及协调关系引入,如海水与船体的耦合振动,油体与输油管道的耦合振动、气动弹性和水动弹性等;第二类问题的特征是两相域全部或者部分地重叠在一起,难以明显分开,使描述物理现象的本构方程要针对具体的物理现象来建立,耦合效应要通过描述问题的微分方程来体现,如渗流问题。

针对第一类问题,Zienkiewicz 与合作者 Bettes<sup>[2]</sup>按两相间相对运动的大小及相互作用性质将其分为三小类,图 1.1 示出了这三种问题。

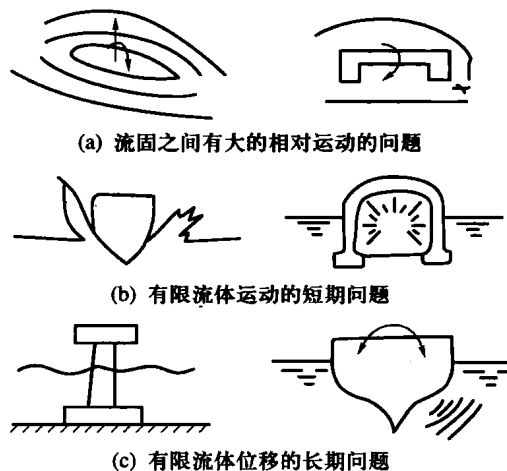


图 1.1 三类流固耦合问题



问题(a)是流体与固体结构之间有大的相对运动的问题,最为典型的例子是机翼颤振或悬桥振荡中发生的气固相互作用(称气动弹性力学问题)。问题(b)是具有流体有限位移的短期问题。这类问题由造成位形变化的流体中的爆炸或冲击引起,其特点是:人们极其关心的相互作用是在瞬间完成的,总位移是有限的,但流体的压缩性是十分重要的。问题(c)是具有流体有限位移的长期问题,如近海结构对波或地震的响应、噪声振动的响应、充液容器的流固耦合振动、船舶在水流作用下的响应等都是此类问题的典型例子。对于这类问题,人们主要关心的是耦合系统对外加动力载荷的动态响应。图 1.2 中给出了流固耦合中各种力之间的相互影响关系<sup>[3]</sup>。

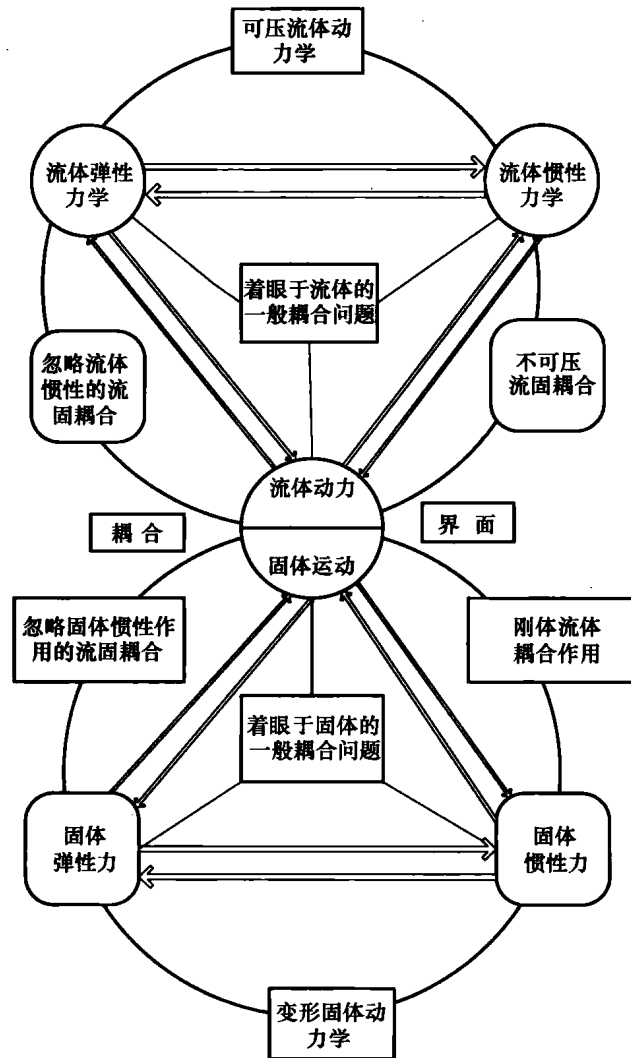


图 1.2 流固耦合问题中各种力之间的相互关系

通过耦合界面,流体动力影响固体运动,而固体的运动又影响流场的分布特性,在耦合界面上,流体动力和固体的运动是未知的,在求解整个耦合系统后才得以解答。若流固交界面上的流体动力或交界面上固体结构的运动规律为已知,则不存在耦合机理。原有的耦合系统将被解耦而成为单一固体在给定表面力作用下的动力问题及单一流体在给定

边界条件下的流体力学边值或初值问题。多数情况下,研究人员根据所研究问题的目的不同,分别着重于流场或固体结构两方面研究,并针对不同性质的问题,作相应的简化,从而有简化后的耦合问题。例如,在研究水与结构相互作用的非短期问题时,可忽略水体的可压缩性。若结构的弹性变形被忽略,则变为刚体同流体的相互作用问题。在某些问题中,忽略流体或固体的惯性效应,从而有忽略流体惯性的耦合问题及忽略固体惯性的耦合问题,如在空气弹性力学中的静力发散,舵面效率等问题即是重要的忽略结构惯性的流固耦合问题。若忽略流体惯性时的耦合问题,其本质就是将流体视为一个弹簧。

在界面耦合问题中,也可以从结构振动频率的角度进行分类。结构以不同的振频进行振动时,流固交界面处呈现出不同的物面特征。对于中频、低频振动(即有限流体位移的长期问题,也可称后期问题)的流固耦合问题在物面处满足动力学条件(力的平衡条件)及运动学条件(位移和速度的协调条件),即可采用结构动力学和水动力学的方法进行解决。典型实例,如船与水的耦合、流体引起的管道振动问题等;对于高频振动的流固耦合问题(有限流体运动的短期问题,也可称早期问题),物面条件发生了变化,其实质是水质点与物质质点间的相互作用,还常伴有流体的空化现象及同一物质液态、固态共存的现象。对于这类问题,经典的结构动力学方法已不再实用,必须采用冲击物理的方法进行研究。

典型的耦合问题在工程上又可分为四类<sup>[4,5]</sup>:

(1) 土木工程中的坝水耦合问题。如土木工程领域中地震载荷作用下的坝体与水的耦联振动。

(2) 流体引起管道振动的问题。它是指结构腔内充满流体时发生的耦合振动,如海洋工程领域与石化工程领域中管道内流体诱发振动和柔性腔内流体自振等。其主要研究输液管道的稳定性及动力特性,包括直管和曲管在多种支撑条件下的振动特性<sup>[10-13]</sup>。

(3) 船与水的耦合问题。处于流体区域中的结构振动或运动,在结构全部或部分被浸入在流体之中时,以结构为主的振动模态与运动响应就是耦合系统研究的重点。如船舶工程领域中船体与水的耦合,考虑水中船体弹性变形的水动弹性<sup>[14,15]</sup>及在冲击载荷作用下的船体与水的耦合作用,与此同时开展流—固—声的耦合振动<sup>[16]</sup>研究等。

(4) 储液容器的振荡问题。在液体没有充满柔性结构腔时会发生这一类耦合振动问题,此时液体的晃动将是主要的动力分析对象,如航空航天领域中储液容器晃动、储液罐的罐—液耦合系统的动力特性和地震响应问题、壳—液相互作用问题、在地震作用下储液罐的强度和稳定性问题等<sup>[17-19]</sup>。

本书主要着重于界面耦合问题中流固耦合问题的阐述,下文将阐述此类问题各领域的应用。

## 1.2 流固耦合问题应用

早在1933年,美国的H. M. Westergaard结合美国地震区建坝的需要,发表了题为“Water Pressure on dams during earthquakes”的著名论文,流固耦合(液固耦合,FSI)振动问题由此被提出来,但直到近20年才引起重视。在现代工程中,常常需要分析流体力学与固体力学交叉的一些重要问题,在此推动下逐渐形成了一门新的力学分支——流固耦

合动力学。同时与流体固体相关的各种形形色色的问题不断地在各行各业中涌现,并受到国内外学者的倍加关注。

在 20 世纪 80 年代中,该领域的研究取得了迅速发展,进入 90 年代末,随着计算机技术的飞速发展,FSI 问题的数值算法和实验技术都产生了飞跃的进展。在船舶与海洋工程领域,从早期的刚性浮体—水耦合问题<sup>[20]</sup>,到 Mays<sup>[21]</sup>与 Newnan<sup>[22]</sup>对船舶水动力学的理论贡献,及 Bishop 与 Price<sup>[23]</sup>所建立的考虑船体弹性变形的水动弹性理论,已形成了较为完整的体系。国内吴有生院士等也对水弹性有较深入的研究<sup>[24]</sup>。对于船舶结构的稳态响应和长期响应问题多采用 Green 函数构造船舶结构引起的速度势,并通过特殊的点源 Green 函数求解线性初边值问题;对于冲击响应(短期问题),尤其是爆炸冲击响应,多采用基于平面波假设的双渐近法<sup>[25,26]</sup>(DAA)来处理结构体与水体的耦合,并应用于实际中。例如,舰艇结构在水下爆炸冲击下的动响应研究。从 70 年代开始,随着计算技术的发展以及 DAA 方法等流固耦合处理技术的提出,同时由于水下爆炸试验的高昂费用,各种专业的数值方法和程序开始提出。其中对于潜艇的水下爆炸冲击分析比较成功的有 Weidlinger 协会开发的线性水下冲击分析程序(USA)和弹塑性壳体分析程序(EPSA)<sup>[27]</sup>。USA 程序是一个采用了 DAA 方法的边界元程序。EPSA 则是一个考虑了材料非线性的壳体弹塑性有限元分析程序。这些数值计算方法的出现为估算舰艇结构在水下爆炸冲击下的动响应提供了手段。1989 年,洛克希德 Palo Alto 研究实验室的 Jr. DeRuntz 和 Rankin<sup>[28]</sup>将对结构与流体进行线性冲击分析的 USA 程序与一般壳体结构非线性分析程序 STAGES 结合,并加入空化流体分析程序 CFA,从而形成一套完整的水下爆炸条件下的结构分析程序。对于水面舰艇的水下爆炸冲击响应,美国 Weidlinger 协会的应用科学分部在美国国防部核安全署(DNA)的主持下,开发了一套水下爆炸下水面舰艇响应(SRUE)程序<sup>[29]</sup>。该程序是将自由场的非线性计算程序与标准的有限元结构分析程序通过一个非线性的结构——介质耦合作用条件结合起来。它可以计算在各种载荷条件下的水面舰艇结构响应,从而为舰艇的设计分析提供参数并可为 DDAM 提供冲击输入。近年来,美国等国家的海军开始对现有的一些数值计算方法和程序进行进一步的完善和检验,为发现影响数值模型稳定性的因素、进一步了解舰艇对水下爆炸的动力响应和了解舰艇壳体在水下爆炸作用下破坏的机制提供参考。

在土木工程领域中,坝体与水的耦合研究是重要的一部分内容<sup>[30]</sup>。在水利工程中,一般认为 H. M. Westergaard 是最早涉足于坝水耦合问题的学者。早在 1933 年,Westergaard 对坝体与库水的相互作用问题进行了开创性的研究。他对河谷断面为矩形的坝面地震时的动水压力进行了理论推导,其结论至今仍为许多国家的坝工抗震设计规范所沿用。但是,他在研究中忽略了坝体的弹性振动因素,把问题归结为半无限液体层界面处刚性墙壁微幅振动的简单声学问题。Chopra<sup>[31]</sup>在 1970 年发表的论文中对考虑坝体变形的影响进行了研究,采用单自由度解法,分析了重力坝在四种不同情况下的位移和动水压力反应,使得这一问题真正成为了弹性结构与液体的耦联振动问题。针对坝体与水的耦合问题的线性问题多采用解析法、线性边界元法、有限元法及子域法进行研究,对于非线性问题多采用 ALE 法进行研究。关于地震载荷作用下地基—坝体与水耦合作用的动力特性及库底的吸收性对坝库耦合系统动力响应的影响也纷纷展开研究<sup>[32-34]</sup>。

1964 年,美国的 Alaska 地震使众多石化容器在地震载荷下惨遭破坏,使国民经济受

到极大损失,促使科技工作者对含液容器进行研究。许多俄罗斯的学者,在 Moiseev 的两篇著名综述报告<sup>[35,36]</sup>中详述了有关基本理论和文献,在此之后,出现了一大批针对常/超重或微/零重力、不同的储箱形、不同激励方式等多种情形的研究成果。随着航天事业的发展,充液卫星、液体火箭、单级入轨充液航天器和空间站等,由于充液量的增大,液体的晃动会对其姿态控制和稳定性产生重大影响,储液容器的振荡问题成为航天等相关领域必须考虑的问题。Abramson 等<sup>[37]</sup>对液体燃料晃动的早期研究进行了全面、系统的综述,其中晃动分析多在线性范围内进行,常用变量分离法、Galerkin 法和基于变分原理的 Ritz 法等。基于小幅晃动的线性理论已相当完善,并成功地应用于工程实际问题。含液容器流固耦合问题经过几十年的发展,已经建立了几种行之有效的数值方法来解决液体大幅非线性晃动问题,其中包括液面大晃动的非线性、非定常带自由边界的初边值问题等,Amsden 在 20 世纪 60 年代发展起来的 MAC(Marker and Cell)方法<sup>[38]</sup>具有不同寻常的灵活性,但计算存储量大,很难推广到三维问题。VOF(Volume of Fluid)方法<sup>[39]</sup>改进了 MAC 方法的存储量大以及计算量大的缺点,特别适于三维计算,但 VOF 方法每一时间步都需要计算流体体积函数  $F$  的值,其重复计算量也较大。针对上述问题,浮点接力法<sup>[40]</sup>和 ALE 方法可用来解决。尽管 ALE 方法提供了一个有效的途径将固体中常用的拉格朗日坐标系与流体中常用的欧拉系相联系,但要真正地将二者各自有效的方法结合解决各种流固耦合问题,还要求深入地研究 CFD 方法,如动态网格控制技术、无结构网格技术等,同时也要掌握固体力学中的有限元分析技术,任务仍然十分艰巨。

就流体—结构耦合数值计算方法而言,其模型经历了由简单到复杂、从解耦到弱耦合(或耦合)再发展到强耦合这样一个过程,此发展过程大致将各种方法分为三类<sup>[41]</sup>:古典分析法、交错积分耦合法、整体积分法。古典分析法假定结构以给定的频率和幅值进行振动,通过计算非定常力来判断系统的稳定性。它将一个原来内部耦合的非线性问题分解成两个独立的解耦问题,因此不能用来预测非线性极限环振荡现象,且它们之间存在封闭的反馈,因而不能准确反映两种连续界之间的能量传递。严格说,古典分析方法不能称之为一种流体—结构耦合方法;交错积分耦合法中,流体和结构用各自的求解器在时域积分,交错时间推进,其典型过程是:先在流体力作用下结构响应进行积分,推进至下一时刻,再将结构的边界位移和运动传递给流体系统,然后更新流体动态网格,流体积分,计算新的流体压力和应力场,最后将流体压力和应力转换成结构载荷,传递给结构。该方法的主要缺点是由于积分是交错进行的,流体、结构的时间推进积分总是存在时间滞后,耦合界面上的能量不能保持守恒,无法满足动平衡,因此该算法是一种弱耦合过程。整体积分法是将流体和结构看作通过耦合界面连接的单一连续介质,用单一的算子来描述控制方程,因时间积分完全同步,且不存在时间滞后和能量不守恒现象,因此是一种具有相当吸引力的完全的强耦合方法<sup>[42-44]</sup>。

数值研究方法的局限性使得在一定条件下流固耦合问题的内在机理和认识还不十分明确,从而不能准确地反映一些新的现象,因此实验研究成为流固耦合分析的一个重要的手段。它不仅能为理论模型的建立提供第一手资料,而且能对理论与数值计算结果进行验证。在船舶与海洋工程领域,例如,破损舰艇的运动特性问题,由于强烈的非线性,要给出解析解是不可能的,即使是数值分析,也一般要基于大量的假设,其结果的可靠性也值得怀疑。因此,试验研究是必需的手段。又如,水下爆炸对潜浸结构物的冲击问题,尽管

数值仿真已经进行了很长时间,但目前也只能做到量级精度,如果没有试验数据的支持,仿真结果的可信度不高。因此,试验也成为必需的辅助研究手段与验证性手段。

例如,水下爆炸的机理以及它对舰艇结构和设备的破坏作用的研究也属于流固耦合问题的一个重要应用方面,同时一直是世界上主要海军国家的重要课题。早在 20 世纪 40 年代—50 年代,美国海军在太平洋比基尼群岛对从日本俘获的大量舰船进行了一系列爆炸冲击试验,如代号为“面包师”、“火树”等大规模实船爆炸试验。到 20 世纪末,意大利海军、美国海军、澳大利亚海军等相继开展了全尺度的水下爆炸试验(图 1.3、图 1.4、图 1.5)<sup>[45-48]</sup>,以研究舰船冲击波作用下的舰船的动态响应特性和舰船与设备的抗冲击性能。我国对舰艇的水下爆炸试验、研究工作起步较晚,20 世纪 80 年代<sup>[49,50]</sup>,我国某海军部队做了水雷爆炸试验和实舰的破坏研究(图 1.6),提出了抵御水下爆炸的设计方法。近几年来,我国有关水下爆炸方面的研究得以开展,但因涉密等原因最新研究成果的发表数量并不多<sup>[51-55]</sup>。



图 1.3 美国驱护舰海上实船爆炸试验



图 1.4 意大利海上实船爆炸试验

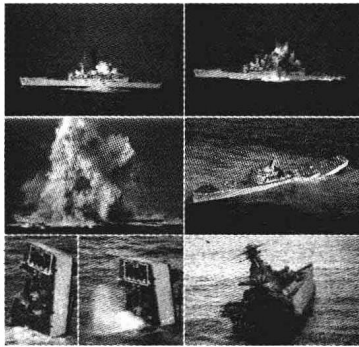


图 1.5 澳大利亚、美国海军联合实船爆炸试验



图 1.6 我国某次大规模实船水下爆炸试验

目前储液箱流固耦合的实验研究主要集中在三个方面:①储液箱内液体晃动问题的研究。②地震载荷作用对储液罐的影响研究<sup>[56-59]</sup>。③地震作用下土—箱—水的相互作用研究。文献[60]等人对菱形液舱模型在不同充装水平的晃动进行了实验研究。实验测量了液体晃动运动的液面高度和对舱壁的冲击压力。文献[61]中研究了弹性圆柱壳在简谐激励下壳与液体的运动状况,文献[62]采用可视化观测了弹性容器受激励下其内液体的表面波、涡流运动及高频激励下产生的低频大幅重力波;P. DENISENKO<sup>[63]</sup>利用激光技术测量了弹性圆柱壳内液体液面在不同幅度的共振状态下所出现的

表面波、周向张力波和重力波。文献[64]实验研究了容器内的晃荡问题和剪切层自持振荡特性。

近几年来,在流固领域,各种新问题层出不穷,学科领域的交叉性越来越明显。对于非线性流固耦合问题中的固体,考虑材料的非线性与材料的破坏等问题是所研究的重点;流体中采用 N-S 方程,考虑流体的黏性、分层、漩涡、晃动、空化、飞溅的复杂流动现象以及流固耦合所诱发的噪声问题也是所研究的难点。随着武器装备的发展和海空联合作战武器的开发,流固耦合问题中自由液面对此类问题的影响也尤显重要。同时流固耦合问题与其他学科的交叉性还有待于进一步扩大与加强;在应用中进一步完善并建立新的数学模型。

## 1.3 流固耦合分析方法

### 1.3.1 线性流固耦合分析方法

经典的流固耦合求解方法为解析法和半解析法,如分析水中柱体弯曲振动问题所采用的湿模态展开法。但解析法只适用于研究区域形状比较简单情况,因而限制了其应用范围。随着计算技术的发展,有限元、边界元(BEM)等数值计算方法在流固耦合分析中被普遍采用。

有限元法是目前应用最广的求解偏微分方程的数值计算方法。在流固耦合分析中经常被采用的有限元格式有两类<sup>[65]</sup>:一类是结构和流体均以位移矢量为场变量的位移—位移格式<sup>[66]</sup>;另一类是以结构位移矢量和流体标量为场变量的混合型格式,如位移—压力格式<sup>[66]</sup>或位移—位移势格式<sup>[67]</sup>。位移—位移格式的有限元方程是对称的,流固界面的协调关系易于处理,可以应用标准的有限元程序,适用面广,是一种较简单而有效的方法。但待求未知数多于场变量模式的混合型格式,且由于流体刚度矩阵奇异,在频域分析时出现大量伪模态,给实际应用带来困难。在近期研究中,采取一些措施,如单元数值积分的降阶<sup>[68]</sup>、改进流体元的插值函数<sup>[69]</sup>等,可以克服上述困难。位移—压力格式和位移—位移势格式的有限元方程是非对称的,直接求解困难较大,一般需要采用下文所述的交替迭代法。

有限元法计算流固耦合问题,引入的流固界面耦合条件使最终方程阶数和带宽猛增,并常常使得方程的对称性破坏,很多情况下,人们不得不用大型计算机处理这类高阶、大带宽、非对称方程,计算费用直线上升。因此边界元法引入流固耦合分析中,并采用固体和流体的位移—压力格式,最终的 FE-BE(即固体用有限元、流体用边界元的混合法)耦合方程组阶数显著降低,所需机时成倍节省,并且很快推广到了三维问题<sup>[70-72]</sup>。用边界元法求解流场,具有降低求解问题的空间维数(仅需在边界上进行离散),且自动满足远场辐射条件的优点,单元数目少、计算量小,因此该法特别适用于求解流体与结构的相互作用问题。不足之处在于系统矩阵满元、奇异积分处理等。

但针对低阶单元形函数的限制,数值计算结果一般只能适用于低频范围,近年来发展的半数值半解析法,在研究高频声—弹耦合问题中发挥了重要作用。由于纯数值技术本身的缺陷,一般而言,FEM,BEM和FE-BE混合法只能分析低频或中低频激励下

的结构响应。为提高计算精度,近年来发展起来了半数值半解析分析手段,在数值方法中引入解析表达式。例如,在潜艇等水下结构的声振问题研究中,将结构简化成圆柱壳、非圆柱壳和加肋壳体等,应用传递矩阵法研究其声振特性<sup>[42]</sup>。不同于常规的数值方法,上述研究中的几个主要步骤均有解析表达式,因此提高了计算精度,适用于高频和较高频的响应问题。

瞬态载荷冲击作用下的线性流固耦合问题的计算主要采用二阶双渐近法(DAA2)<sup>[73-77]</sup>,该方法是在延迟势法<sup>[78,79]</sup>的基础上得到的,在早期反映湿表面高频振动的特征,在后期振动频率较低,相当于虚质量假设。DAA法取早期近似解ETA和后期近似解LTA作为两个单边渐近表示式,用渐近展开匹配方法导出一种既满足早期近似解又满足后期近似解的方程,使该方程适用于从低频到高频各种频段内的流固耦合问题计算。

### 1.3.2 非线性流固耦合分析方法

线性耦合问题的理论及求解方法相对比较成熟<sup>[80]</sup>。非线性耦合分析,如充液容器内的大幅度晃动问题常采用ALE方法进行研究,ALE方法<sup>[81]</sup>一是提供了一条有效的途径将固体中的拉格朗日坐标系与流体中的欧拉坐标系相联系;二是两相界面的协调问题比线性分析更为复杂。但由于是非线性问题,叠加原理失效,在动力分析中常用的振型叠加方法原则上不能使用,必须探索全场求解的途径。

双渐近法成为处理非线性流固耦合问题的一种新手段,但需在双渐近法的基础上加以改进。将运动非线性,即速度势的空间导数,引入到双渐近法计算的一种数值计算方法,即非线性双渐近法(NDAA)<sup>[82]</sup>。该方法不仅考虑了流场的可压缩性,同时计及了结构的运动非线性。该方法在解决瞬态载荷作用下航行态结构(做大幅运动的结构)的非线性流固耦合问题时取得了很好的效果。

### 1.3.3 物态变化时流固耦合分析方法

固体和流体的区别在于其具有两大特征:一是长程有序的晶格结构,在宏观上表现为具有确定的熔化温度;二是抵抗剪切加载的能力,在宏观上表现为强度。强度在本质上反映材料在平面载荷下抵抗剪切加载的能力,当材料中的剪应力等于零时,材料的受力状态就与流体静水压完全一样<sup>[83]</sup>。

在高压物理的研究中,爆炸产生的冲击波压力可达数吉帕,此时,冲击波的加载应力达到材料强度极限的数十倍,剪切应力远远小于冲击加载应力,它对材料整体受力状态的影响往往可以忽略不计。再考虑到冲击加载作用伴随着材料温度显著升高产生的“软化”效应,通常认为在数十吉帕冲击压缩下,材料中的剪应力近似为零。在强冲击压缩下,可以把材料的受力状态近似当作流体静水压状态看待,并且把物态方程计算得到的压力直接用于流固耦合计算中<sup>[84]</sup>。上述流体模型在高压流固耦合计算中具有很好的近似性。

流体模型对于精细的状态方程是不够的,虽然它能较好地描述材料在冲击压缩下的应力与比体积、比内能的关系,但是它不能正确描述材料从冲击压缩状态卸载时的响应特性。只要材料没有发生冲击熔化,材料从冲击压缩状态卸载时表现出典型的弹塑性卸载

特征:在冲击波压力高达 100GPa 时,铝、铜、钨等材料的屈服强度仍可以达到几吉帕<sup>[85]</sup>。为了正确描述材料在动高压下弹性—塑性响应特征及塑性流动规律,需要研究它们的本构关系或本构方程(即材料的屈服强度与冲击加载应力、应变、温度、应变率等力学和热力学量之间的关系)。

如爆炸等高压物理问题,物态的变化使得流固耦合问题异常复杂,爆炸或冲击产生的高压冲击波往往使同一结构的区域呈现流体、弹性、塑性等不同的力学状态,此时需采用本构方程决定物态变化对材料强度的影响,并配合高压物态方程完成流固耦合问题的求解。SPH 方法在物态变化的流固耦合问题中获得了较大成功,该方法采用粒子近似描写问题域的各物理量,采用守恒方程描述动量、能量等在问题域的传播,采用本构方程描述温度、应变率等物态对强度的影响,对高速冲击、水下爆炸等强非线性瞬态流固耦合问题的求解具有独到优势。

## 参 考 文 献

- [1] 邢景棠,周盛,崔尔杰.流固耦合力学概述.力学进展,1997(1):19-38.
- [2] Zienkiewicz O C, Bettess P. Fluid-structure dynamic interaction and wave forces. An introduction to numerical treatment Int J. Num. Meth Engrg., 1978, 13(1):1-16.
- [3] Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes. Trans. A. S. C. E., 1933, 418-433.
- [4] 苟兴宇,马兴瑞,黄怀德.流固耦合动力学与航天工程中的流—固—控耦合问题.航天器工程,1996,5(4):1-14.
- [5] 苏东海.分析流固耦合的新方法及其应用研究.武汉:华中科技大学,2006.
- [6] Chopra A K. Earthquake Response of Concrete Gravity Dams. AD 709640. Berkeley: California University, 1970.
- [7] 居荣初,曾心传.弹性结构与液体的耦联振动理论.1版.北京:地震出版社,1983.
- [8] 张悉德,张文.部分埋入水中圆柱体的弯曲自由振动.应用数学与力学,1986,7(9).
- [9] 金涛,黄玉盈.地面运动激励下水中圆柱体的弯曲响应.海军工程学院学报,1998(1):17-21.
- [10] Paidoussis M P. Flow-induced Instabilities of cylindrical structures. Applied Mechanics Reviews, 1987, 40:163-175.
- [11] Paidoussis M P, Li G X. Pipes conveying fluid: a model dynamical problem. Journal of Fluids and Structures, 1993, 8: 853-876.
- [12] 黄玉盈,等.输液管的非线性振动、分叉与混沌—现状与展望.力学进展,1998,28(1):30-42.
- [13] 倪樵.输液管稳定性与动力特性分析及算法研究.武汉:华中科技大学,2000.
- [14] Bishop R E D, Price W G. Hydroelasticity of Ships. Cambridge: Univ. Press, 1979.
- [15] Bishop R E D, Price W G, Wu Y. General linear hydroelasticity theory of floating structure's moving in a seaway. Phil. Trans. R. Soc. Lond, 1985, A 316:375-426.
- [16] 余建星,余永清,李红涛,等.海底管跨涡激振动疲劳可靠性研究.船舶力学,2005,9(2).
- [17] Moiseev N N, Petrov A A. The calculation of free oscillations of liquid-containing bodies. Advances in Applied Mechanics, 1964, 8:233-289.
- [18] Moiseev N N, Petrov A A. The calculation of free oscillation of a liquid in a motionless container. Advances in Applied Mechanics, 1964, (9):91-154.
- [19] 温德超,郑兆昌,孙烯纯.储液罐抗震研究的发展.力学进展,1995,25(1):60-76.
- [20] Haskind M D. The hydrodynamic theory of ship oscillations in rolling and pitching. Tech Res Bull, Soc Nav Archit MarEng, 1953(1-2):45-60.
- [21] Mays J H. Wave Radiation and diffraction by a floating slender body, Cambridge, Massachusetts: MIT, 1978.
- [22] Newman J N. The theory of ship motions. Advances in Applied Mechanics, 1978, 18:221-283.



- [23] Bishop RED, Price W G. Hydroelasticity of Ships. Cambridge: Camb. Univ. Press, 1979.
- [24] 吴有生. 水弹性力学的研究发展. 辛一心先生逝世30周年纪念专刊. 上海: 中国造船学会, 1987: 24 - 47.
- [25] Wu Y S, Price W G. Advances in hydroelasticity of ships, Proc of ICAHE'93, Beijing: 1993.
- [26] 刘建湖. 舰船非接触水下爆炸动力学的理论与应用. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2002.
- [27] Daddazio R P, Atkash R S, Chan K K. Dynamic Inelastic Shock Analysis of Naval Structures Using EPSA. Weidlinger Associates, inc, 1989.
- [28] DeRuntz Jr J A, Rankin C C. Applications of the USA-STAGS-CFA Code to Nonlinear Fluid-Structure Interaction Problems in Underwater Shock of Submerged Structures. Shock and Vibration Bulletin, 1989, 60.
- [29] Smilowitz R, Kagel R. Three-Dimensional Response of Surface Ship to Underwater Explosions-The SRUE Codes, Weidlinger Associates, Shock and Vibration Bulletin, 1989, 60.
- [30] 王照林, 张乃恭. 微重力充液系统大幅晃动动力学及其在航天高技术中的应用: 一般力学(动力学、振动与控制)最新进展. 北京: 科学出版社, 1994.
- [31] Chopra A K. Earthquake response of concrete gravity dams. Berkeley: California University, 1970.
- [32] 陈江, 张少杰. 坝体—库水相互作用的流固耦合分析. 西南科技大学学报: 自然科学版. 2009, 24(1).
- [33] 杨令强. 高拱坝在库水地基坝体相互耦合情况下的动力特性. 天津: 天津大学, 2000.
- [34] 郑哲敏, 马宗魁. 悬臂梁在侧受有液体时的自由振动. 力学学报, 1959, 3(2): 111 - 119.
- [35] Moiseev N N. Introduction to the theory of oscillations of liquid-containing bodies. Advances in Applied Mechanics, 1964(8).
- [36] Moiseev N N, Perov A A. The calculation of free oscillation of a liquid in a motion container. Advances in Applied Mechanics, 1964(9).
- [37] Abramson H N. The dynamic behavior of liquids in moving containers. NASA SP - 106, 1966.
- [38] Tsungchow su. Nonlinear sloshing and the coupled dynamics of liquid propellants and spacecraft. ADA250023.
- [39] 王士敏. 充液系统的 Hamilton 结构与液体大幅晃动的数值模拟. 北京: 清华大学, 1991.
- [40] 王征, 吴虎, 贾海军. 流固耦合力学的数值研究方法的发展及软件应用概述. 机床与液压. 2008. 36(4): 192 - 195.
- [41] Bendiksen Q Q. A new approach to computational aeroelasticity. AIAA paper 91 - 0939, Proceedings AIAA/ASME/SACE/AHS/ASC31st Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Baltimore, U. S. A, 1991: 1712 - 1227.
- [42] Frederic J. Blorm. A monolithical fluid-structure interaction algorithm applied to the piston problem. Compute Methods Appl. Mech. Engrg, 1998, 167: 369 - 391.
- [43] Ge Cheng Zha, Ming Ta Yang. High Cycle Fatigue Prediction for Mistuned Bladed Disks with Fully Coupled Fluid - structural Interactions, F49620 - 03 - 1 - 0253, 2006.
- [44] 戴大农, 王勛成, 杜庆华. 流固耦合系统动力响应的模态分析理论. 固体力学学报, 1990, 11(4): 305 - 312.
- [45] United States, Naval Facilities Engineering Command. Shock testing the Seawolf submarine, ADA346334, 1998.
- [46] IL Kwon Parka, Jong Chul Kima, et al. Measurement of naval ship responses to underwater explosion shock loading. shock and Vibration, 2003(10): 365 - 377.
- [47] Hatt D F, Elischer P P, Campanella G, et al. Minehunter inshore shock trials. ADA207704, 1989.
- [48] NAVSEA. Ship post-delivery tests and trials guidance manual. NAVSEA 0900 - LP - 095 - 3010, Rev. 1, chap. 1989.
- [49] 陈继康. 舰艇接触爆炸冲击环境和近舰水下爆炸破口的模型实验. 舰船论证参考, 1992, 2.
- [50] 陈继康. 028G 实舰水下爆炸实验与舰船生命力研究. 舰船论证参考, 1991(3).
- [51] 李国华, 李玉节. 浮动冲击平台水下爆炸冲击谱测量与分析. 船舶力学, 2000, 4(2): 51 - 60.
- [52] 朱锡, 白雪飞, 黄若波. 船体板架在水下接触爆炸作用下的破口试验. 中国造船, 2003, 44(1): 46 - 52.
- [53] 张振华, 朱锡, 刘润泉. 潜艇典型结构在爆炸冲击载荷作用下开裂判据的试验研究. 爆炸与冲击, 2004, 24(6).
- [54] 李玉节, 张效慈, 吴有生, 等. 水下爆炸气泡激起的船体鞭状运动. 中国造船, 2001, 42(3).
- [55] 温华兵, 王国治. 水下爆炸作用下船舱浮筏系统的冲击响应试验研究. 华东船舶工业学院学报: 自然科学版, 2005, 19(4).
- [56] Manos G C, Clough R W. Further study of the earthquake response of a broad cylindrical liquid-storage tank model, Re-