



国防科技图书出版基金

板壳非线性 流体弹性力学

白象忠 郝亚娟 田振国 著

Nonlinear Hydroelasticity of Plate and Shell



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

板壳非线性流体弹性力学

Nonlinear Hydroelasticity of Plate and Shell

白象忠 郝亚娟 田振国 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

板壳非线性流体弹性力学 / 白象忠, 郝亚娟, 田振国著. —北京: 国防工业出版社, 2016. 7

ISBN 978 - 7 - 118 - 10853 - 8

I. ①板... II. ①白... ②郝... ③田... III. ①壳体(结构) - 非线性力学 - 流体力学 - 弹性力学 - 研究 IV. ①TU33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 123080 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 19¼ 字数 298 千字
2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需

要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

流体弹性力学是用来描述液体、气体的运动与弹性结构相互作用的学科,是流体力学与弹性力学互相交叉而形成的一门力学分支。直到 20 世纪中叶,特别是在 80 年代后期才迅速发展起来。流体弹性力学不仅涉及人类日常生活的方方面面,而且在许多学科和工程领域中,竟然成了主要的研究内容。毋庸置疑,这是一门宽广、多研究领域且互相交叉的学科。

流体弹性力学研究内容的重要特征是两相或多相介质之间的相互作用效果,即弹性体在流体作用下产生变形或运动,而弹性体的变形或运动又反过来影响到流场,从而改变流体载荷的分布与大小。流体弹性力学理论的交叉性质,在不同的工程领域中,如航空、航天、海洋、船舶、核动力、土木建筑、机械、生物工程、石油化工、动力工程等方面均有应用。由于应用广泛,研究对象复杂,流体弹性问题的深入研究,特别是对非线性流体弹性问题的研究,促进了计算技术、应用数学和实验技术的不断发展。

同液体、气体相互作用的薄壁结构,多具有壳、壁板和薄板的形式,它们具有大的抗拉刚度,但在载荷作用下,很容易发生弯曲变形,这必将导致物体附近的流体速度场及压力场的改变,因而作用于弹性体上的载荷本身也要发生变化。正因如此,介质运动方程的解和接触表面的变形必须相互吻合。可见,流体弹性力学是以介质变形的运动学、动力学、流体力学及壳体的非线性弹性力学为基础的,其课题所研究的范围十分广泛,内容也非常丰富。多数情况下的弹性薄壁物体的变形为几何非线性,因此应该加强对由于结构变形而引起的流体非线性运动问题的研究。

19 世纪,关于固体力学的研究仅局限于解决线性弹性理论和与其平行发展的计算技术;20 世纪,产生了变形体力学的新分支,即塑性理论和黏弹性、黏塑性理论;二三十年来,随着工程实际应用的需要,科学技术的进步与发展越来越快,促使耦合场理论的研究也有了飞速的发展,特别是机械场和电磁场,机械场、温度场和电磁场相互间的耦合作用,流场与弹性变形体的相互作用等,在现代工程力学发展中占有更加重要的位置。非线性问题和耦合场理论的研究具有相当广阔的应用前景,它对促进工业技术革命和实现科学技术现代化都将起到重要作用。

当前,变形固体同液体或气体相互作用的理论,是连续介质力学中十分流行的研究内容,特别显著的成就是求解液流和气流承压面的动力学和静力学问题。然

而,绝大部分文献仅仅提供了相互作用的线性理论。在应当考虑非线性时,描述结构的变形竟成为最主要的内容,这恰好说明在大多数情况下,对薄壁物体中的几何非线性给予了重视,不过却很少注意到由于结构变形引起的流体非线性运动。

为了使读者在掌握非线性弹性力学、板壳大变形理论及流体力学等知识的基础上,了解耦合场理论中流体与弹性体相互作用下的流固耦合问题的基本概念、基本原理和计算方法,进而掌握解决耦合场作用下的非线性弹性变形问题的解题方法,本书在流体弹性力学所研究的问题中,将重点介绍以下几方面内容:

(1) 给出流体弹性力学问题的非线性状态方程,以解决可变形物体的大变形问题,并进一步给出简化的关系式。

(2) 介绍描述相互作用的任意拉格朗日-欧拉法、相容拉格朗日-欧拉法、单一拉格朗日法、单一欧拉法,以及求解时需要的各种条件。

(3) 给出流体弹性力学的分类及其简化的方程组,其分类的基础是弹性体的变形场、流体的速度场及压力场的可变性;在求解各类构件的流固耦合问题中,重点介绍相容拉格朗日-欧拉法的算法,并给出相应的算例。

(4) 将非线性流体弹性动力学问题深入到混沌、分岔的研究领域中。研究流固耦合的典型问题,如气缸缸底、管状柔性弹性体中的混沌运动分析与分岔现象。

本书在写作过程中,部分基础理论内容参考了国内外公开出版的书籍和文献;一些章节中的理论推导和数值计算结果,是本书第一作者曾经指导过的研究生杨阳、周小利、卜小花、曹文斌、朱洪来、王星、宋小娟、刘纯、李小宝、陈柏成等的学位论文的研究成果。相关详细内容,读者可进一步参阅相关的学位论文和参考文献。

在本书即将出版之际,对国防工业出版社的热忱帮助,精心编辑直至付梓,致以诚挚的谢意!

特别要感谢国防科技图书出版基金给予的大力资助。

由于作者水平有限,书中难免出现疏漏甚至谬误之处,敬请读者批评指正。

作者

2015年11月于燕山大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 非线性流体弹性力学与流固耦合	1
1.1.1 线性流体弹性力学与非线性流体弹性力学	1
1.1.2 非线性流体弹性力学的特征	2
1.1.3 非线性流体弹性力学的研究内容	3
1.1.4 流体弹性力学分类原则与分类方法	3
1.2 非线性流体弹性力学的研究方法	4
1.2.1 描述介质相互作用的四种方法	5
1.2.2 理论分析法	6
1.2.3 实验分析法	6
1.2.4 半解析法	6
1.2.5 数值分析法	7
1.3 工程领域中的非线性流体弹性力学问题	8
1.3.1 非线性气动弹性力学问题	8
1.3.2 非线性水弹性力学问题	9
1.3.3 非线性生物流体弹性力学问题	10
1.3.4 环境流体弹性力学问题	10
1.3.5 微尺度流体弹性力学问题	11
1.3.6 涡激振动问题	11
1.4 非线性流体弹性力学发展所面临的任务	11
参考文献	12
第 2 章 流体力学基本方程	14
2.1 流体运动学基础	14
2.1.1 拉格朗日法(质点法)	14
2.1.2 欧拉法(空间点法)	15
2.1.3 拉格朗日描述与欧拉描述的互为转换	17

2.1.4	连续方程	19
2.1.5	流函数与速度势	22
2.1.6	源或汇	25
2.1.7	偶极	26
2.2	理想流体动力学基本方程	26
2.2.1	欧拉运动微分方程	26
2.2.2	伯努利积分(定常运动沿流线的积分)	27
2.2.3	拉格朗日积分(非定常无旋运动的积分)	29
2.2.4	定常流动中的动量和动量矩定理	29
2.3	用应力表示的运动微分方程	30
2.4	纳维尔-斯托克斯方程(N-S方程)	31
2.5	任意变形坐标系下的公式	32
2.6	突变表面的边界条件	34
	参考文献	35
第3章	板壳力学基本方程	36
3.1	弹性壳体变形的基本关系	36
3.1.1	坐标系的建立	36
3.1.2	弹性壳体变形的基本关系式	36
3.1.3	弹性壳体表面的变形	39
3.2	微分单元体的应力状态及力学基本方程	43
3.2.1	微分单元体的应力状态	43
3.2.2	广义胡克定律	44
3.2.3	弹性关系	45
3.2.4	边界条件	46
3.3	弹性壳体的平衡方程	47
	参考文献	49
第4章	非线性流体弹性力学的理论基础	50
4.1	介质相互作用的描述方法	50
4.2	求解流固耦合问题的四种方法	52
4.2.1	相容拉格朗日-欧拉法(ULE法)	52
4.2.2	任意拉格朗日-欧拉法(ALE法)	53
4.2.3	单一拉格朗日法(SL法)	54
4.2.4	单一欧拉法(SE法)	54

4.2.5	关于四种方法的应用	54
4.3	相容拉格朗日 - 欧拉法	56
4.3.1	接触面的运动学条件和动力学条件	56
4.3.2	初始表面接触条件	59
4.4	流体弹性力学问题的分类	61
4.4.1	参数 m, n, k 和 λ, δ 的引入	61
4.4.2	流体弹性力学问题的分类方法	61
4.4.3	大应变问题	62
4.4.4	小应变小转动, 且应变的大小与转动的平方同量级	63
4.4.5	小应变小转动问题	64
4.4.6	流体弹性力学分类的简化准则	66
4.5	流体与壳体的相互作用	68
4.5.1	壳体在大弯曲时的相互作用	68
4.5.2	壳体中等弯曲时的相互作用	69
4.5.3	壳体小弯曲时的相互作用	71
4.6	可渗透壳体和流体的相互作用	72
4.6.1	接触面上的运动条件	73
4.6.2	接触面上的动力条件	74
4.7	壳体和黏性流体之间的相互作用	75
4.8	单一拉格朗日法	76
4.8.1	单一拉格朗日法的特点	77
4.8.2	表面接触条件	79
	参考文献	81

第5章 相容拉格朗日 - 欧拉法求解弹性薄壳的变形

5.1	弹性圆柱薄壳绕流的小变形	83
5.1.1	问题描述	83
5.1.2	方程组的建立	83
5.1.3	方程组的求解	85
5.1.4	小弯曲问题中的壳体内力、流场压力系数与流场函数	87
5.2	弹性圆柱薄壳绕流的中等变形	88
5.2.1	方程组的建立	88
5.2.2	方程组的求解	89
5.2.3	中等弯曲问题中的壳体内力与流场函数	90
5.3	弹性圆柱薄壳绕流的大变形	91

5.3.1	方程组的建立	91
5.3.2	方程组的求解	92
5.3.3	大弯曲问题中的壳体内力与流场函数	94
5.4	圆柱壳绕流变形问题的算例	94
5.4.1	特定参数下壳体位移及内力	95
5.4.2	流场分布	96
5.4.3	壳体变形和表面流体压力系数随相关参数的变化	97
5.5	流固耦合问题的数值模拟	103
5.5.1	结构设置、界面标定及计算结果的后处理	103
5.5.2	数值解和理论解的比较分析	107
5.6	固支浅拱形弹性壳绕流的小弯曲变形	109
5.6.1	求解浅拱形弹性壳体在流场中的小弯曲变形	110
5.6.2	算例分析	114
5.7	固支浅拱形弹性壳绕流的中等弯曲变形	116
5.7.1	求解浅拱形弹性壳体在流场中的中等弯曲变形	116
5.7.2	算例分析	119
5.8	固支浅拱形弹性壳绕流的大弯曲变形	121
5.8.1	求解浅拱形弹性壳体在流场中的大弯曲变形	121
5.8.2	算例分析	126
5.9	简支浅拱形弹性壳绕流的大弯曲变形	129
5.9.1	基本方程组的建立	129
5.9.2	方程组的解析解	130
5.9.3	算例分析	132
5.10	弹性圆锥壳绕流的变形	134
5.10.1	刚性圆锥壳绕流	134
5.10.2	弹性圆锥壳流固耦合的解析解	140
5.10.3	算例分析	144
5.10.4	数值模拟	145
	参考文献	147

第6章 相容拉格朗日 - 欧拉法求解弹性薄板的变形 148

6.1	简支梁式弹性薄板横向绕流的变形及应力分析	148
6.1.1	基本关系式	148
6.1.2	解析解	149
6.1.3	算例及参数分析	152

6.1.4	数值模拟	156
6.2	固支弹性圆平板的变形	158
6.2.1	解析解	158
6.2.2	算例及参数分析	162
6.2.3	数值模拟	165
6.3	弹性梁式薄板横向绕流的大变形	167
6.3.1	弹性悬臂梁式薄板大变形的解析解	167
6.3.2	算例及参数分析	170
6.3.3	数值模拟	173
	参考文献	174
第7章	相容拉格朗日 - 欧拉法求解渗透壳的变形	175
7.1	可渗透圆柱壳流固耦合分析	175
7.1.1	不考虑中性面曲率改变时的关系式	175
7.1.2	考虑中性面曲率改变时的关系式	177
7.1.3	可渗透圆柱壳体的内力	179
7.1.4	算例分析	180
7.1.5	数值模拟	182
7.2	可渗透球壳的流固耦合分析	183
7.2.1	渗透球壳在黏滞流体中的耦合方程	183
7.2.2	摄动法解可渗透球壳的流函数	185
7.2.3	球壳的位移及内力	190
7.2.4	算例分析	190
	参考文献	192
第8章	单一拉格朗日法的应用	193
8.1	贮箱隔层板的变形	193
8.1.1	隔层板的耦合方程	193
8.1.2	隔层板静态问题的解	194
8.1.3	算例分析	196
8.1.4	数值模拟	199
8.2	贮箱隔层板的振动	200
8.2.1	问题描述	200
8.2.2	位移解的函数形式	200
8.2.3	隔层板上下表面压力差的确定	201

8.2.4	动力方程的解	201
8.2.5	算例分析	202
8.3	气缸弹性缸底的混沌运动分析	206
8.3.1	气体运动方程	207
8.3.2	气缸弹性缸底运动方程的建立	208
8.3.3	混沌运动分析	210
8.4	双层圆筒的混沌运动分析	213
8.4.1	气体运动方程	213
8.4.2	外层圆筒运动方程	214
8.4.3	流固耦合运动方程的建立	214
8.4.4	混沌运动分析	216
	参考文献	221
第9章	椭圆柱壳的绕流分析	222
9.1	椭圆柱壳绕流函数的建立	222
9.1.1	椭圆柱绕流的复势	222
9.1.2	椭圆柱绕流和压力场的分析实例	223
9.1.3	绕拱形板的无环流动	226
9.1.4	椭圆柱壳面的压力分布	228
9.2	弹性椭圆柱壳的变形	228
9.2.1	椭圆柱壳的变形分析	229
9.2.2	圆柱壳的变形	230
9.2.3	圆柱与椭圆柱壳的变形比较	231
9.3	基于 Fluent 的椭圆柱壳绕流问题的数值模拟	232
9.3.1	椭圆柱绕流的数值模拟	232
9.3.2	数值解与理论解的比较	234
9.4	绕椭圆柱壳流动耦合问题的数值分析	235
9.4.1	弹性椭圆柱壳绕流耦合问题的描述	235
9.4.2	椭圆柱壳的变形及应力分析	236
9.4.3	弹性拱壳的绕流分析	238
	参考文献	238
第10章	柔性薄壁管的流固耦合非线性问题	240
10.1	柔性薄壁管的混沌运动分析	240
10.1.1	血液流动运动方程	240

10.1.2	动脉管壁运动方程	241
10.1.3	流固耦合运动方程	242
10.1.4	混沌运动分析	243
10.2	血管狭窄处管壁变形及应力分析	250
10.2.1	局部狭窄脉动流的分析	251
10.2.2	狭窄血管管壁的变形及应力分析	254
10.2.3	狭窄处植入支架的分析	262
10.2.4	斑块与管壁材料特性对血管变形及应力的影响	264
10.2.5	局部狭窄处植入支架后的力学分析	272
10.3	颈动脉血管硬化的力学分析	274
10.3.1	颈动脉狭窄处的血压波动方程	274
10.3.2	血管壁沿轴向的变形与应力分析	279
10.3.3	血管壁材料参数对血管变形的影响	280
10.3.4	动脉硬化化学指标的建立	281
	参考文献	282

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Nonlinear Hydroelasticity and Fluid-solid Interaction	1
1.1.1 Linear and Nonlinear Hydroelasticity	1
1.1.2 Characteristic of Nonlinear Hydroelasticity	2
1.1.3 Research Contents of Nonlinear Hydroelasticity	3
1.1.4 Classification Principle and Method of Hydroelasticity	3
1.2 Research Method of Nonlinear Hydroelasticity	4
1.2.1 Four Methods Describing the Media Interaction	5
1.2.2 Theoretical Analysis Method	6
1.2.3 Experimental Analysis Method	6
1.2.4 Semi-analytical Method	6
1.2.5 Numerical Analysis Method	7
1.3 Engineering Problems of Nonlinear Hydroelasticity	8
1.3.1 Nonlinear Aeroelasticity	8
1.3.2 Nonlinear Hydroelasticity	9
1.3.3 Nonlinear Biological Hydroelasticity	10
1.3.4 Environmental Hydroelasticity	10
1.3.5 Micro-scale Hydroelasticity	11
1.3.6 Vortex-induced Vibration	11
1.4 Development Tasks of Nonlinear Hydroelasticity	11
References	12
Chapter 2 Basic Equations of Fluid Mechanics	14
2.1 Foundation of Fluid Kinematics	14
2.1.1 Lagrangian Method (Particle Method)	14
2.1.2 Eulerian Method (Spatial Point Method)	15

2.1.3	Transformation of Lagrangian and Eulerian Description	17
2.1.4	Continuity Equations	19
2.1.5	Stream Function and Velocity Potential Function	22
2.1.6	Source and Sink	25
2.1.7	Doublet	26
2.2	Basic Equations of Ideal Fluid Dynamics	26
2.2.1	Eulerian Differential Equations of Motion	26
2.2.2	Bernoulli Integral (Integral on Streamline for Steady Motion)	27
2.2.3	Lagrange Integral (Integral for Unsteady Irrotational Motion)	29
2.2.4	Momentum and Angular Momentum Theorems for Steady Flow	29
2.3	Differential Equations of Motion in Terms of Stresses	30
2.4	Navier-Stokes Equations (N-S Equations)	31
2.5	Formula in Arbitrary Coordinate System	32
2.6	Boundary Condition of Mutative Surface	34
	References	35

Chapter 3 Basic Equations of Plates and Shells Mechanics 36

3.1	Basic Relations of Elastic Shells Deformation	36
3.1.1	Establishment of Coordinate System	36
3.1.2	Basic Relations of Elastic Shells Deformation	36
3.1.3	Surface Deformation of Elastic Shells	39
3.2	Basic Mechanical Equations and Stress State of Differential Element	43
3.2.1	Stress State of Differential Element	43
3.2.2	Generalized Hooke's Law	44
3.2.3	Elastic Relations	45
3.2.4	Boundary Condition	46
3.3	Balance Equations of Elastic Shells	47
	References	49

Chapter 4 Theoretical Basis of Nonlinear Hydroelasticity 50

4.1	Describing Method for Media Interaction	50
4.2	Four Methods Solving Fluid-solid Interaction Problem	52
4.2.1	United Lagrangian-Eulerian Method (ULE Method)	52