

# 空化泡和超空化泡 流动理论及应用

Cavitating and Supercavitating Flows Theory and Applications

王献孚 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 空化泡和超空化泡 流动理论及应用

Cavitating and Supercavitating  
Flows Theory and Applications

王献孚 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

空化泡和超空化泡流动理论及应用 / 王献孚编著. —北京:国防工业出版社, 2009. 2

ISBN 978 - 7 - 118 - 06121 - 5

I. 空... II. 王... III. 空泡流 IV. 0352. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 206145 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 $\frac{1}{4}$  字数 178 千字

2009 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 29.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

## 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

## 前 言

空化泡 (Cavitation) 和空蚀 (Cavitation Erosion), 最初是因为船舶螺旋桨突然失去推进力而被发现的。随后又不断地发现凡运转于液体中的装置, 不仅是船舶螺旋桨, 而且所有水力机械装置和液流通道 (如水泵、水轮机等), 都可能发生空化泡和空蚀现象。它是工程科学的一个重要论题, 人们对它的研究已有 100 多年的历史了。

从工程意义上说, 空化泡的发生, 意味着该装置的流体动力性能降低, 振动和噪声急增, 以及材料被剥蚀, 这些效应通常都是不希望出现的。空化泡作为工程中的一个负面效应, 自 19 世纪末以来, 许多研究者都已对空化泡的预测和控制做了大量的探讨<sup>[1,2]</sup>。国际船模拖曳水池会议 (International Towing Tank Conference, ITTC)、国际船舶流体力学学术讨论会 (Symposium on Naval Hydrodynamics, ONR)、国际空化泡学术讨论会 (International Symposium on Cavitation, CAV)、美国机械工程师协会 (The American Society of Mechanical Engineers, ASME)、国际水力学研究会 (International Association for Hydraulic Research, IAHR), 以及国际液固冲蚀会议 (International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, ELSI) 等学术组织仍在继续定期或不定期地举办对空化泡和空蚀研究的学术研讨会。由此可知, 空化泡论题的重要意义和复杂性。

值得注意的是, 在近些年来提出了许多空化流利用的技

术,如空化射流(Cavitating Jets)应用于清洁物面(除锈、除船体海生物)和冲蚀挖掘(切割)地面比机械方法更有效益。应用于环境保护方面,可利用空化泡的生成杀灭水中浮游生物和加快溢油在水面上的分散。通过空化还可使水中有机化合物氧化,对废水和船舶压舱水处理也很有成效。通过空化,还可使非牛顿流体的粘性降低<sup>[3]</sup>,可使多成分的乳剂混合均匀和颗粒物细化。空化在材料科学(加工成型和提高金属材料抗疲劳强度)和生物医疗工程上也已获得应用。

特别是近年来对超空泡问题和它的应用前景的探讨<sup>[4]</sup>:超空泡减阻船和超空泡武器(如鱼雷等)的研制,对国防建设具有重要意义,它们涉及到许多空化泡现象的研究,如超空泡发生器、超空泡物体运动稳定性、人工通气超空泡问题、模拟试验问题等。如果将空化泡的利用称为空化技术,那么在 21 世纪对空化泡问题的研究中,空化技术已成为研究的一个主题。

正是由于空化技术的出现,空化泡论题的研究进入一个新的发展时期。近年来发表的许多引人注目的演讲和论文,正在进一步促进空化技术的发展,如在 2001 年 Von Kármán 流体力学研究所的“超空泡流动”系列演讲(Special Course: Supercavitating Flows, von kármán Institute for Fluid Dynamics, 2001),和 2001 年第 4 次国际空化泡学术研讨会(CAV, 2001), 2003 年第 5 次国际空化泡学术研讨会(CAV, 2003)。本书所写的这一专题,就以这些资料为主要参考。作为专题论述,希望有助于读者能更快地进入本学科这一重要分支研究的前沿阵地,并开展有关课题的更深入研究。

本书得到上海市应用数学和力学研究所刘高联教授(中科院院士)、中国人民解放军海军工程学院董祖舜教授的帮助,他

们的意见使作者进一步明确撰写本书的目的和意义。中国人民解放军总装备部国防科技图书出版基金评审委员会审查了本书的书稿,提出了许多宝贵意见,通过修改使本书质量有所提高。特此致以衷心的感谢。由于作者水平有限,难免会有错误和不足之处,恳请读者予以赐教。

编著者

2006年于武汉理工大学



# 目 录

第 1 章 空化泡现象引论 .....	1
1.1 空化泡现象和空化数 .....	1
1.2 游移空化气泡 .....	7
1.3 层状空化泡和云状空化泡 .....	11
1.4 超空泡 .....	15
1.5 涡空化 .....	17
1.5.1 梢涡空化 .....	18
1.5.2 剪切流中涡空化 .....	22
1.6 振动空化 .....	23
第 2 章 空化气泡动力学 .....	27
2.1 球形空化气泡的生长和溃灭 .....	27
2.2 近固壁面的空化气泡生长和溃灭 .....	35
附录: 轴对称格林函数的计算 .....	41
2.3 云状空化多个气泡的生长和溃灭 .....	44
2.4 利用气泡动力学对空化泡初生的预测 .....	53
第 3 章 超空泡流动理论及应用 .....	59
3.1 自然超空泡和人工通气超空泡 .....	59
3.1.1 概述 .....	59
3.1.2 人工通气超空泡产生的方法 .....	62
3.1.3 通气超空泡的不稳定性和气体泄漏 .....	64

3.1.4	超空穴闭合的理论模型 .....	67
3.1.5	定常轴对称超空泡流动的近似计算 .....	69
3.2	超空穴的控制和物体超空泡运动的稳定性 .....	72
3.2.1	超空穴尺度控制 .....	72
3.2.2	绕物体超空泡流动时其空穴的可能形式 .....	74
3.2.3	物体超空泡运动纵向(垂向平面)稳定性 分析 .....	76
3.2.4	物体超空泡运动横向(水平面)稳定性分析 .....	82
3.3	Logvinovich 独立原理及应用 .....	83
3.3.1	Logvinovich 独立原理 .....	83
3.3.2	重力场中超空穴 .....	88
3.3.3	非定常超空泡流 .....	94
3.4	超空泡流中边界元方法应用 .....	96
3.4.1	定常轴对称物体超空泡流 .....	96
3.4.2	三维定常超空泡流 .....	102
3.4.3	非定常三维超空泡流 .....	108
3.5	应用边界元法计算物体在超空泡运动时附加质量 和阻尼系数 .....	112
3.5.1	扰动势的运动学边界条件 .....	113
3.5.2	扰动势在空穴面上动力学边界条件 .....	116
3.5.3	扰动势的边界积分方程式 .....	118
3.5.4	附加质量系数 .....	119
3.5.5	轴对称空化器首荡(Surge)运动的算例 .....	121
3.6	超空泡流中细长体理论应用 .....	123
3.7	超空泡螺旋桨和穿透自由表面的螺旋桨 .....	131
3.7.1	超空泡螺旋桨流场计算(势流算法) .....	132
3.7.2	穿水式通气螺旋桨数值模拟 .....	138
第4章	试验空泡水洞 .....	141
4.1	相似律和尺度效应 .....	141

4.1.1	空化初生和局部空泡流的试验研究 .....	142
4.1.2	自然超空泡流的试验研究 .....	145
4.1.3	人工通气超空泡流试验研究 .....	146
4.2	试验研究的设备 .....	147
4.3	高速自航船模和高速航行体试验设备的研制 .....	152
4.4	空泡水洞设计 .....	155
4.4.1	洞体外形及其通解 .....	155
4.4.2	收缩段、扩散段的设计对流动品质影响 .....	156
4.4.3	拐角导叶、蜂窝器和整流器的应用 .....	159
4.4.4	快速除气系统的应用 .....	161
<b>第5章</b>	<b>数值空泡水洞 .....</b>	<b>163</b>
5.1	超空泡流的筒壁干扰 .....	163
5.2	数值空化水洞的研制 .....	165
5.3	空泡流中相变模型的讨论 .....	169
5.3.1	Singhal 等人提出的相变模型 <sup>[64]</sup> .....	169
5.3.2	Chen & Heister 伪密度方程式 .....	174
5.4	局部空泡流和超空泡流的多相 CFD 模拟 .....	175
<b>第6章</b>	<b>空化技术 .....</b>	<b>181</b>
6.1	应用于清洁和切割的空化射流 .....	181
6.2	空化技术在环境保护中的应用 .....	186
6.2.1	利用空化杀灭水中的浮游生物 .....	186
6.2.2	利用空化射流分散海面溢油 .....	188
6.2.3	利用空化可氧化水中有机化合物 .....	188
6.3	空化技术在材料科学中的应用 .....	191
6.3.1	乳剂(多成分物质混合物)的均匀化 和其中颗粒物的细化 .....	191
6.3.2	利用空化射流冲击可增强金属材料 .....	

的抗疲劳强度 .....	192
6.4 其他应用 .....	195
参考文献 .....	198
主题词索引 .....	203

Chapter 1: An introduction to cavitation phenomena

1.1 Cavitation phenomena and cavitation number .....	1
1.2 Traveling Cavitation bubble .....	7
1.3 Sheet cavitation and cloud cavitation .....	11
1.4 Super-cavitation .....	12
1.5 Vortex cavitation .....	17
1.5.1 The vortex filament .....	18
1.5.2 Vortex cavitation in shear flow .....	19
1.6 Vortex cavitation .....	23

Chapter 2: Hydrodynamics

2.1 A spherical bubble growth and collapse: Rayleigh-Plesset equation .....	23
2.2 Cavitation bubble growth and collapse near boundaries .....	27
Appendix: Berman's integral models for cavitation bubbles .....	31
2.3 Cloud cavitation: bubble growth and collapse .....	34
2.4 Prediction of cavitation inception near bodies: dynamics .....	35

# CONTENTS

<b>Chapter 1</b>	<b>An introduction to cavitation phenomena</b>	1
1.1	Cavitation phenomena and cavitation number	1
1.2	Travelling Cavitation bubble	7
1.3	Sheet cavitation and cloud cavitation	11
1.4	Supercavitation	15
1.5	Vortex cavitation	17
1.5.1	Tip vortex cavitation	18
1.5.2	Vortex cavitation in shear flows	22
1.6	Vibratory cavitation	23
<b>Chapter 2</b>	<b>Bubble Dynamics</b>	27
2.1	A spherical bubble growth and collapse. Rayleigh-Plesset Equation	27
2.2	Cavitation bubble growth and collapse near boundaries	35
	Appedix: Boundary Integral Methods for cavitation bubbles	41
2.3	Cloud cavitation bubbles growth and collapse	44
2.4	Prediction of cavitation inception using bubble dynamics	53

## Chaper 3 Theory and Application of Supercavitating

<b>Flows</b> .....	59
3.1 Natural vapor cavities and ventilated cavitation .....	59
3.1.1 Introduction .....	59
3.1.2 Artificial ventilation supercavitation methods ...	62
3.1.3 Ventilated supercavitation unstability and gas-supply .....	64
3.1.4 Cavity (supercavity) theoretical closure models .....	67
3.1.5 Comparatively simple analytical method of the Supercavitating axisymmetric flow (Approximate calculation of the steady axisymmetric supercavitating flows) .....	69
3.2 Control of supercavitation flow and stability of supercavitating motion of bodies .....	72
3.2.1 Main scale and parameters governing the supercavitation process .....	72
3.2.2 Possible cavity schemes of supercavitating motion of bodies .....	74
3.2.3 Studies on the stability of a super-cavitating projectile in the vertical plane .....	76
3.2.4 Studies on the Stability of a super-cavitating projectile in the horizontal plane .....	82
3.3 Application of the Loginovich independence principle of the cavity expansion .....	83
3.3.1 Loginovich independence principle .....	83
3.3.2 Taking into account of gravity effect on the Supercavity .....	88

3.3.3	Calculation of unsteady Supercavities .....	94
3.4	Application of the Boundary-Element Method to Supercavitating Flows .....	96
3.4.1	Steady axisymmetric Supercavitating Flows .....	96
3.4.2	Steady 3D Supercavitating Flows .....	102
3.4.3	Unsteady 3D Supercavitating Flows .....	108
3.5	Application of the Boundary-Element Method to calculation of the added mass and damping coefficients on supercavitating bodies .....	112
3.5.1	Kinematic boundary condition of the perturbation potential .....	113
3.5.2	Dynamic boundary condition of the perturbation potential .....	116
3.5.3	Boundary Intergral Equation of the perturbation potential .....	118
3.5.4	Added mass coefficients .....	119
3.5.5	Discussion to Surge motion of axisymmetric cavitators .....	121
3.6	Application of Slender-Body-Theory to supercavitating flows .....	123
3.7	Supercavitating propellers and Surface-piercing propellers .....	131
3.7.1	Inviscid cavity flow method for the prediction performance of Supercavitating propellers .....	132
3.7.2	Numerical techniques for the prediction performance of Surface-piercing propellers .....	138
<b>Chapter 4</b>	<b>Experimental cavitation tunnel .....</b>	<b>141</b>
4.1	Similarity law and Scale effects .....	141

4. 1. 1	Experimental investigation of cavitation inception and development (limited) cavitation flows .....	142
4. 1. 2	Experimental investigation of natural supercavitating flows .....	145
4. 1. 3	Experimental investigation of ventilated supercavitating flows .....	146
4. 2	Experimental equipment ( Water Tunnel) .....	147
4. 3	Experimental equipment for Self-propelled model testing and develop the high speed freely moving vehicle .....	152
4. 4	Some problems of design cavitation tunnel .....	155
4. 4. 1	Circuit current and its general solution of pressure drop .....	155
4. 4. 2	Design of constraction section and diffuser with relation to hydrodynamic performance Characteristics .....	156
4. 4. 3	Application of the corner vane ,honeycomb and straightener .....	159
4. 4. 4	Application of the quick degassing equipment ..	161
<b>Chapter 5</b>	<b>Numerical Cavitation Tunnel .....</b>	<b>163</b>
5. 1	Tunnel wall interference of the supercavitating flows .....	163
5. 2	Develop the numerical cavitation Tunnel .....	165
5. 3	Discussion to phase change rates models of cavitating flows .....	169
5. 3. 1	Singhal <i>et al</i> phase transition model .....	169
5. 3. 2	Chen & Heister pseudo-density equations .....	174



5. 4	Multiphase CFD modeling of developed and supercavitating flows .....	175
<b>Chaper 6</b>	<b>Cavitation Technology .....</b>	<b>181</b>
6. 1	Cavitating fluid jets application to cleaning and cutting .....	181
6. 2	Cavitation technology application to environmental protection .....	186
6. 2. 1	Using Cavitation to killing plankton in water ...	186
6. 2. 2	Using Cavitation to dispersing Oil Spillon the sea surface .....	188
6. 2. 3	Using hydrodynamic Cavitation to Oxidize Organic Compounds in water .....	188
6. 3	Cavitation technology application to material and manufacturing processing .....	191
6. 3. 1	Using hydrodynamic Cavitation for emulsifying and homogenizing processes (Separation of dissimilar Components and reduction of nonhomogeneous materials in the medium) .....	191
6. 3. 2	Using Cavitating jet peening on Stainless steel to improvement of fatigue Strength .....	192
6. 4	Another application .....	195
<b>References</b>	.....	<b>198</b>
<b>Index</b>	.....	<b>203</b>