

Theory and Technology
of Cavitation
in Centrifugal Pumps

离心泵 空化理论与技术

王 勇 袁寿其 刘厚林 著

非
外
借



科学出版社

离心泵空化理论与技术

王 勇 袁寿其 刘厚林 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

空化问题一直是离心泵行业的关键核心问题,空化的产生不仅会影响离心泵的运行效率,还会产生振动噪声,当空化严重时还会破坏离心泵的过流部件,影响离心泵运行的稳定性和可靠性。因此,对离心泵空化特性进行深入研究显得尤为重要。

本书以实验测试和数值计算相结合的方法系统研究了离心泵空化诱导不稳定特性和对策,主要内容包括:离心泵空化特性的同步测试方法、叶轮主要几何参数对离心泵空化特性的影响、离心泵空化性能预测模型、离心泵空化可视化测试与空蚀预测方法、离心泵空化流数值计算及计算模型改进、诱导轮设计方法及参数化软件开发等。

本书注重研究体系的完整性、系统性和实用性,提供了大量离心泵空化特性的实验测试图片和数据,可供从事流体机械技术和离心泵设计工作的工程技术人员及高校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

离心泵空化理论与技术/王勇,袁寿其,刘厚林著. —北京:科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-055543-4

I. ①离… II. ①王… ②袁… ③刘… III. ①离心泵—空化 IV. ①TH311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 286440 号

责任编辑:惠 雪 曾佳佳 邢 华 / 责任校对:彭 涛

责任印制:张克忠 / 封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 267 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着科学技术的发展,离心泵的应用领域不断扩大,已广泛应用于航空航天、核电站、城市供水、石油化工和船舶等国民经济的各个领域。然而,空化问题一直是离心泵领域的重大难题之一,空化的发生会引起离心泵性能下降、过流部件破坏、振动和噪声等一系列问题,不仅限制了离心泵的高效运行范围和小型化的实现,还影响了离心泵的安全稳定和可靠运行。在这种背景下,对离心泵空化特性进行系统深入的研究显得尤为重要。

本书系统总结空化流动、空蚀、空化诱导振动噪声和泵空化控制的研究进展;建立离心泵空化及其诱导振动噪声同步实验测试系统;提出基于神经网络的离心泵空化性能预测模型,研究叶片数、叶片进口冲角和包角等叶轮主要几何参数对离心泵空化特性的影响规律;建立离心泵进口空化可视化实验测试系统,测试离心泵空化初生、发展和溃灭的演变过程,发展离心泵空蚀预测方法,并通过实验验证方法的准确性;建立离心泵空化数值计算自动运行方法,提出离心泵空化流数值计算湍流模型和空化模型的改进方法;建立基于泵装置的诱导轮设计方法,研究叶栅稠密度和角度变化系数对诱导轮性能的影响规律,并开发诱导轮二维水力设计软件和三维造型软件。

本书得到了国家自然科学基金重点项目“水力机械空化特性与对策”(51239005)和江苏省高校优势学科建设工程项目的资助。全书由江苏大学王勇、袁寿其、刘厚林撰写。本书的撰写得到了江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心领导和同事的大力支持,王健、庄宿国、刘东喜、谈明高、王凯、董亮、罗凯凯为本书的编写和出版做了大量工作,在此一并致以由衷的感谢。

限于作者水平和研究条件,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正,作者邮箱 wylq@ujs.edu.cn。

作 者

2017 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 空化的概念	1
1.2 空化的分类	1
1.3 空化的发生机理、危害及利用	3
1.4 空化流的研究进展	4
1.5 空蚀的研究进展	11
1.6 空化诱导振动噪声的研究进展	13
1.7 泵空化控制的研究进展	14
参考文献	14
第 2 章 离心泵空化特性的实验研究	24
2.1 实验测试系统	24
2.1.1 实验装置	24
2.1.2 数据采集系统	27
2.2 实验方案与实验步骤	31
2.2.1 实验方案	31
2.2.2 实验步骤	32
2.3 实验结果及分析	32
2.3.1 空化性能	32
2.3.2 空化诱导振动特性	33
2.3.3 空化诱导噪声特性	35
参考文献	36
第 3 章 叶轮主要几何参数对离心泵空化特性的影响	37
3.1 基于神经网络的离心泵空化性能预测模型	37
3.1.1 网络结构的确定	37
3.1.2 训练样本及其归一化处理	39
3.1.3 预测模型的建立和训练	40
3.1.4 网络的仿真和回归分析	46
3.2 叶片数对离心泵空化特性的影响	48
3.2.1 叶片数对离心泵空化性能影响的实验研究	48

3.2.2	不同叶片数模型泵空化诱导振动特性	49
3.2.3	不同叶片数模型泵空化诱导噪声特性	50
3.3	叶片进口冲角对离心泵空化特性的影响	51
3.3.1	叶片进口冲角对离心泵空化性能影响的实验研究	51
3.3.2	不同叶片进口冲角模型泵空化诱导振动特性	52
3.3.3	不同叶片进口冲角模型泵空化诱导噪声特性	53
3.4	叶片包角对离心泵空化特性的影响	54
3.4.1	叶片包角对离心泵空化性能影响的实验研究	55
3.4.2	不同叶片包角模型泵空化诱导振动特性	55
3.4.3	不同叶片包角模型泵空化诱导噪声特性	57
	参考文献	58
第 4 章	离心泵空化可视化与空蚀实验研究	60
4.1	研究模型	60
4.2	实验测试系统	62
4.3	可视化实验结果及诱导振动噪声分析	64
4.3.1	水箱对模型泵性能的影响	64
4.3.2	空化性能	64
4.3.3	叶轮进口空化形态	65
4.3.4	空化诱导振动噪声特性	70
4.4	离心泵空蚀的研究	74
4.4.1	离心泵空蚀预测方法	74
4.4.2	离心泵空蚀结果分析	76
4.4.3	离心泵空蚀实验	77
	参考文献	78
第 5 章	离心泵内部空化特性的数值计算	79
5.1	空化数值模拟理论基础	79
5.1.1	控制方程	79
5.1.2	湍流模型	80
5.1.3	空化模型	83
5.1.4	边界条件	86
5.1.5	控制方程的离散与求解	87
5.2	空化常用数值计算软件与二次开发介绍	87
5.2.1	FLUENT 软件与 UDF 二次开发	88
5.2.2	ANSYS-CFX 软件与 CEL 二次开发	88
5.3	离心泵空化数值计算自动运行方法	89

5.4 离心泵网格划分方法	92
5.4.1 前期准备	93
5.4.2 进水管网格划分	98
5.4.3 叶轮网格划分	106
5.4.4 蜗壳网格划分	110
5.4.5 出水管网格划分	111
5.5 离心泵空化数值模拟方法	112
5.5.1 离心泵空化定常计算	112
5.5.2 离心泵空化非定常计算	129
参考文献	133
第 6 章 离心泵空化数值计算模型改进	136
6.1 离心泵湍流模型的改进	136
6.2 改进湍流模型性能评估	138
6.2.1 三维建模及网格划分	138
6.2.2 边界条件设置	140
6.2.3 计算结果及分析	140
6.3 Zwart 空化模型经验系数适应性评价	147
6.3.1 研究对象及研究方案	148
6.3.2 空泡半径	149
6.3.3 汽化经验系数	152
6.3.4 凝结经验系数	153
6.4 离心泵空化模型的改进	155
6.5 RZCM 空化模型的应用及验证	158
6.5.1 RZCM 空化模型离心泵扬程下降曲线预测分析	158
6.5.2 RZCM 空化模型空泡结构预测分析	161
参考文献	163
第 7 章 诱导轮设计方法及设计参数影响	165
7.1 诱导轮设计基础	165
7.2 诱导轮设计方法改进	169
7.3 叶栅稠密度对诱导轮空化性能的影响	172
7.3.1 计算模型	173
7.3.2 能量性能分析	174
7.3.3 空化性能分析	174
7.4 角度变化系数对诱导轮空化性能的影响	178
7.4.1 计算模型	178

7.4.2 能量性能分析	179
7.4.3 空化性能分析	180
参考文献	183
第 8 章 诱导轮参数化软件开发及应用	185
8.1 诱导轮二维水力设计软件开发	185
8.1.1 软件开发平台及开发工具	185
8.1.2 诱导轮二维水力设计软件开发	186
8.1.3 诱导轮二维水力设计软件的设计实例	195
8.2 诱导轮三维造型软件开发	196
8.2.1 软件开发平台及开发工具	196
8.2.2 诱导轮三维造型软件开发	197
8.2.3 诱导轮三维造型软件的设计实例	200
8.3 诱导轮在船用泵中的应用	200
8.3.1 船用泵模型参数	200
8.3.2 诱导轮设计	201
8.3.3 实验验证	202
参考文献	203
索引	205

第1章 绪 论

1.1 空化的概念

在液流中,当流场压力降低到饱和蒸汽压力以下时,液体的热力学状态就会发生改变,生成充满蒸汽的空泡,这种现象称为空化^[1]。空化现象的研究始于18世纪,1753年,Euler指出:“在水管中,若某处的压强降到负值时,水即与管壁分离,在该处会形成一个真空空间,该现象应予以避免”。19世纪后期,随着蒸汽机船的迅速发展,人们发现当螺旋桨转速提高到一定程度时,航行速度反而会下降。1873年,Reynolds解释这种现象是由于螺旋桨上的压强降低到真空时吸入了空气。1897年,在多艘蒸汽机船及“果敢号”鱼雷艇相继发生推进器性能严重下降的事件之后,Barnaby和Parsons提出了“空化”的概念,并同时指出当物体和液体间存在较高的相对运动速度时就可能会发生空化^[2]。

1.2 空化的分类

空化有多种不同的分类方法,按其外貌特征可分为^[3,4]附着空化、游移泡状空化、云状空化和旋涡空化,按其发展的阶段特征可以简单地分为初生空化、片状空化、云状空化和超空化。

(1) 附着空化(图1-1和图1-2)。附着空化形成的空泡通常附着在水翼、叶片等固壁面上。在绕水翼空化流中该类空化又可分为局部空化和超空化:图1-1所示的空化类型为局部空化(即片状空化),此时空泡仅覆盖了水翼上游的部分区域;图1-2所示的空化类型为超空化,空泡完全覆盖了水翼吸力面,甚至靠近水翼尾端

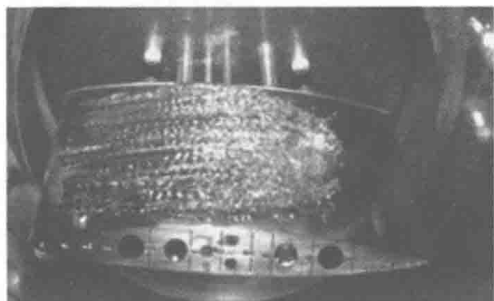


图 1-1 水翼局部空化流



图 1-2 水翼超空化流

的液体中都充满了大量的空泡。

(2) 游移泡状空化(图 1-3 和图 1-4)。游移泡状空化是一种在水中形成的不稳定的球形空泡,这些空泡会随水流一起运动,当其流经低压区时,空泡尺寸增大;而运动到压强较高的区域时,又会迅速收缩,以致溃灭。

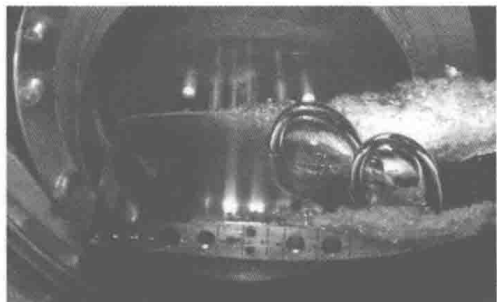


图 1-3 水翼吸力面两个大空泡



图 1-4 大攻角下游移泡状空化

(3) 云状空化(图 1-5)。云状空化有多种多样的形式,图 1-5 给出了一个非定常局部云状脱落的例子。云状空化也可以在其他一些具有短暂周期性的流场中观察到,例如,在离心泵中,叶轮和蜗壳之间的耦合作用导致的波动可能会引发这种周期性。

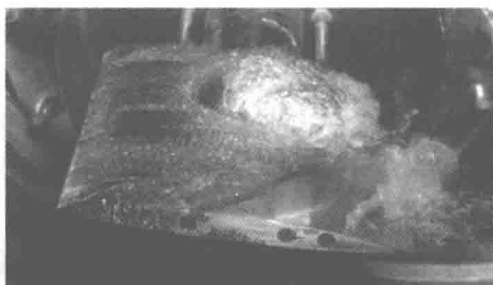


图 1-5 非定常局部云状脱落

(4) 旋涡空化(图 1-6 和图 1-7)。旋涡空化在船舶工程中十分常见,多出现在

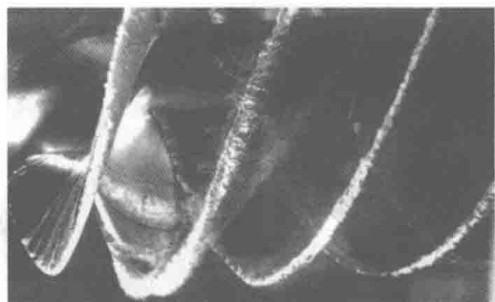


图 1-6 螺旋桨梢涡空化

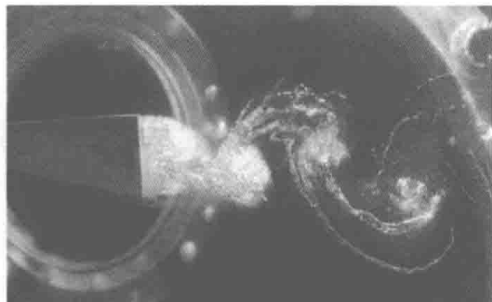


图 1-7 钝体湍流尾迹中的旋涡空化

螺旋桨叶梢附近的梢涡中 (即梢涡空化), 如图 1-6 所示; 另外, 在钝体湍流尾迹中 (图 1-7) 及螺旋桨的毂涡中 (即毂涡空化) 也常出现此种空化。显然, 旋涡空化的空化特性与旋涡的强度密切相关。

1.3 空化的发生机理、危害及利用

1. 空化的发生机理

空化的发生机理是指流场中空泡的生成、发展与溃灭过程的物理本质。影响上述过程的主要因素有: 液体的固有特性, 如温度、密度、黏性、可压缩性、抗拉强度、表面张力、饱和蒸汽压、不可压缩气体含量、空化核的尺寸和含量等; 液体的流体动力学特性, 如热传导、湍流强度、气体扩散效应和流场中的压力梯度等; 流场中物体表面的物化特性, 如壁面粗糙度等。国内外学者对空化的发生机理进行了很多研究, 其中最具代表性的是由柯乃普等提出的“气核理论”^[5]。该理论认为液体中存在着微小的气泡 (称为核子), 这些核子使液体的抗拉强度降低; 当液体的压强低于汽化压强时, 这些核子将迅速膨胀形成气泡, 从而导致空化发生。关于核子存在特性人们还未完全了解, 许多学者对此提出了各种假设和设想。一是 Harvey 等^[6] 提出的: 未溶解的气核可存在于非亲水性的固体缝隙中, 因为在这样的情况下, 表面张力将起着减小而不是增加压力的作用, 所以气体并不是被迫溶解, 而仍可能保持气相。二是福克斯等提出的: 微小气核之所以不会溶解, 是因为气核被有机薄膜所包围。三是认为当核内气体溶解时, 足以改变液体中溶解气体的浓度, 从而可以达到某种平衡, 目前为止此种方法还只能说明在液体中可以稳定存在半径相同的空间均匀分布的泡群。随着科学技术的发展、测量仪器和测量手段的提高, 超声波法^[7]、激光散射法^[8] 和水动力学法^[9] 等测量方法均证实了气核的存在。从而进一步说明了气核是诱发空泡、导致空化发生的直接原因之一。此外, 高秋生^[10] 应用热力学原理, 对气泡核子作了进一步探讨, 并指出在平面平衡条件下, 气核在憎水性裂隙中可以稳定存在。

2. 空化的危害

空化问题一直制约着泵行业的发展, 它的危害主要表现在以下几个方面。

(1) 使泵的性能下降。泵内部空化的发生破坏了介质的连续性, 使泵叶轮与介质的能量交换受到干扰, 泵的扬程和效率下降, 增加泵运行的能耗, 空化严重时会使液流中断, 导致泵不能工作, 影响泵运行的稳定性。

(2) 破坏过流部件。泵内部空化时, 空泡随介质流动到高压区会溃灭, 空泡溃灭时会产生微射流和冲击波, 当空泡在过流部件表面附近溃灭时, 会对过流部件表面产生破坏, 影响泵运行的可靠性, 并造成一定的经济损失。

(3) 产生振动和噪声。空泡在高压区的连续溃灭并伴随着强烈水击,会产生振动和噪声。噪声污染已经成为与空气污染和水污染并列的世界三大污染之一。空化是离心泵产生噪声的主要原因之一。离心泵的空化噪声已成为泵站、潜艇和舰船等的主要噪声源之一,严重影响着人的身体健康和精神状态,而且,不利于潜艇等国防设备的隐蔽性。

3. 空化的利用

近年来,随着对空化的理解与研究更加深入,研究人员发现若对空化的高湍流和高能量转换特性加以利用,空化可以成为一种具有广泛应用前景的技术手段:不但可以加速化学反应^[11]、清洗管道^[12]、处理污水^[13],还可以为鱼雷等水下兵器减阻^[14]。尤其是目前社会经济高速发展,导致水污染情况不断加剧,使得人们对污水处理技术的发展更加重视。污水处理技术的提升不但有助于城市的基础建设,而且有助于生态环境的改善。现阶段普遍的污水处理方法大多都存在着高能耗、低效率的问题^[15,16],而空化特有的易实现、低能耗且相对廉价的特点,使其在相关领域得到越来越广泛的应用。然而,目前对于如何有效地产生空化、采用何种高效的空化设备等问题仍然处于初步研究阶段,因此对空化发生设备的系统研究有利于更好地掌握空化的实用价值。

1.4 空化流的研究进展

1. 实验研究

一直以来,实验方法始终是探究空化特性的基本方法。早在 18 世纪初期, Euler 就对空化现象进行了研究。1917 年, Rayleigh 研究了一定体积液体内单个球形空泡的溃灭过程。随后的近百年内,人们通过大量的实验观察各种形态的空化流。图 1-8 为空化流中典型的片状空化和云状空化^[17]。片状空化近似于准稳态,其外观形态并不会随着时间的推进而改变。它与液体的交界面可能光滑透明,也可能像烧开的水一样粗糙。云状空化是周期性的,它会随着主流逐渐消散在下游高压区,其脱落溃灭的运动特性是引起大多数水力机械产生振动噪声甚至腐蚀破坏的最主要原因。

由于空化的多相流特性及不同时间尺度的复杂运动特征,国内外许多学者对空化的形态与非定常动力特性进行了实验研究。Le 等^[18]指出在几何结构不变的情况下,水翼攻角或者系统压力的改变是准稳态片状空化转变为周期性脱落云状空化的主要原因,且云状空化的脱落频率随着主流的流速和空穴长度的增加而增加。Kubota 等^[19]阐明了脱落空泡团的结构和运动特性,指出脱落空泡团由许多细小的空泡组成,而这些细小的空泡在随着主流运动的同时还围绕着一个处于空泡

团中心的旋涡运动。Knapp^[20] 采用高速相机揭示了空泡团脱落的机制,即近壁面反射流(re-entrant flow)的存在。他同时指出,反射流是由于空泡团发展时沿翼弦方向的涡流扰动传播而形成的,且空泡的脱落位置大约发生在当反射流到达汽液交界面处^[21]。Barre 等^[22] 对文丘里管内的片状空化进行了研究,结果表明尽管片状空化是一种近似准稳态的结构,但是在空穴尾部仍然存在着反射流,会造成一小部分空泡的脱落。Kawanami 等^[23] 通过在水翼压力面的不同位置布置凸起障碍,成功地抑制了反射流向上游传播,从而阻止了空泡脱落的发生且有效地降低了压力脉动和噪声。Laberteaux 和 Ceccio^[24] 研究了三维水翼几何结构对空化流的影响,研究表明,相比二维水翼,即使空化数相同,当三维水翼的翼展结构不同时,空泡的形态也不尽相同,并且水翼的三维结构能够将反射流导向翼展方向,使反射流无法沿翼弦方向逆流到达汽液交界面导致空泡脱落,故空穴尾端的流动是无旋的。近年来,国内学者也对空化流进行了大量的研究。张敏弟等^[25] 研究发现空穴尾部的涡旋运动与流场中的发卡型旋涡拟序结构有关,并建立了空泡的非定常形态与涡旋运动之间的关系。Feng 等^[26] 采用实验手段对钝头体的空化流进行了研究,分析了局部压力脉动与小尺度特性。何友声等^[27] 对轴对称回转体进行了水洞实验研究,指出空泡的几何形态依赖于空化数、回转体结构及攻角等因素,研究结果为运载器的外形设计及水弹道数值模拟提供了实验依据。

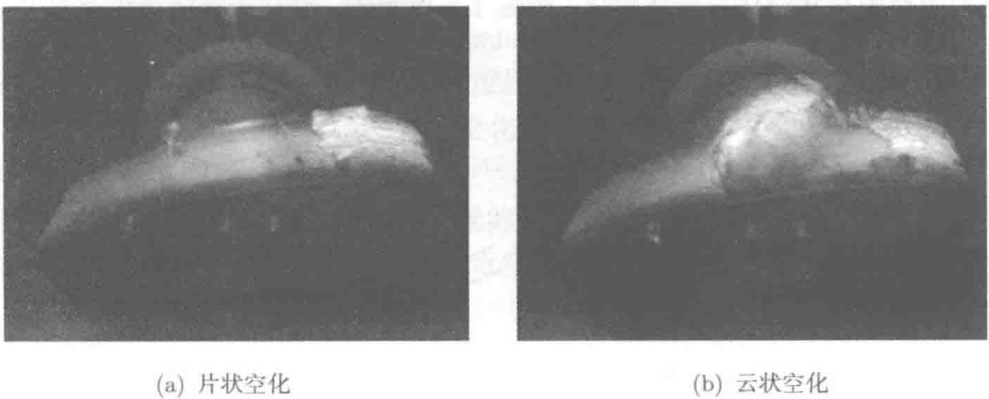


图 1-8 空化流中典型的片状空化和云状空化

随着科技的进步,许多高精度仪器的研制成功使得空化的研究不再只局限于空泡形态等外观结构。空泡的含气量、流场速度、升阻力与压力脉动等空化流场参量的测量均已实现。Stutz 等^[28,29] 利用探针法测量了文丘里管中空化流场的速度,但该方法只能在一个时刻下采集流场中一个点的速度数据,因此最终也只能得到一个平均速度流场。近年来,激光多普勒测速(laser Doppler velocimeter, LDV)技术、粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术的出现使得测量空化全流场速度矢量成为现实。Foeth 等^[30] 采用 PIV 技术研究了三维绕水翼空化流

在不同攻角时的演变及流场的速度矢量图,但由于汽液混合区域内荧光示踪粒子受周围细小空泡的干扰,并未能捕捉到反射流的形成。Brewer 和 Kinnas^[31] 采用 LDV 技术针对绕水翼空化进行了类似的研究,同样也未能成功地捕捉到反射流现象。其他学者在使用这两种技术研究空化时也遇到了同样的问题^[32,33]。因此,人们提出了一些基于 PIV 技术的流场测量改进方法,如数字粒子图像测速 (digital particle image velocimetry, DPIV) 法和激光诱导荧光粒子图像测速 (laser induced fluorescence particle image velocimetry, LIF-PIV) 法,这两种方法均可以有效地捕捉到空泡团的内部流场结构及旋涡区域^[34,35],但是这些方法操作复杂且成本较高。另外,一些学者还通过在研究对象的固壁表面安装高灵敏度的压力传感器用于测量空化的非定常动力特性。例如, Liu 等^[36] 通过在水翼表面布置一系列微型压力传感器测量了空化状态时的固壁面压力分布情况。Farhat 等^[37] 在水翼前段滞止点附近布置微型传感器,研究了空化由初生到断裂过程的水动力特性。

除了对水翼、文丘里管等结构简单的水力装置研究,对离心泵内部空化的研究也取得了显著的进展。离心泵内部空化流种类主要有进口回流空化流、叶片空化流及出口回流空化流等,其中叶片空化流为最典型的离心泵空化流^[38]。

由于离心泵的结构比较复杂,目前对其内部空化结构与非定常动力特性的研究主要通过高速相机、压力传感器等设备实现。经过大量的实验观察,离心泵内空化结构主要为片状空化与云状空化,如图 1-9 所示^[39]。

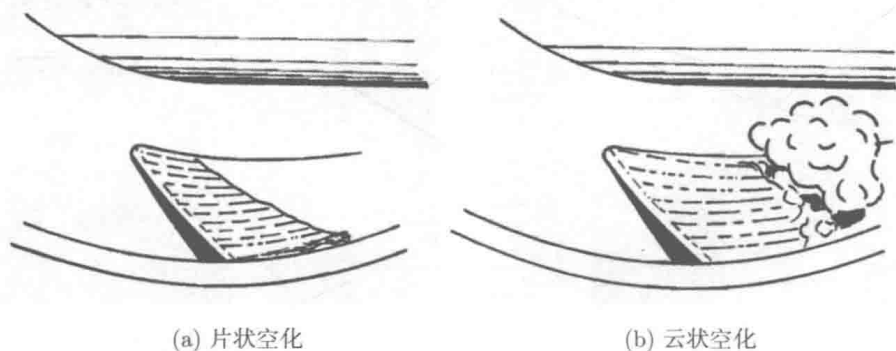


图 1-9 离心泵内空化结构

Duplaa 等^[40] 对一台离心泵快速启动时发生的空化非定常现象进行了研究,测量了隔舌、进口及出口等处的压力脉动值,并采用高速相机记录了空化由初生到完全发展的演变过程。然而,由于离心泵由轴向转向径向的流动特性,泵进口管路的存在影响了高速相机的拍摄,使得实验仅能从进口管侧面对叶轮流道内空化的发展进行观测。Bilus 和 Predin^[41] 研究了进口管内安置整流器对离心泵空化性能的影响,也从进口管侧面对空化的发展进行了可视化研究。为了能够更加清晰地展示离心泵内空化的结构与演变规律,一些学者试图仅关注离心泵叶轮流道内局部区

域的空化现象: Liu 等^[42] 对一台水泵水轮机在水泵模式下的驼峰特性进行了研究, 指出空化的产生是导致其扬程下降的原因, 并通过高速相机研究了该水泵水轮机在不同流量下的空化形态。Coutier-Delgosha 等^[43] 分析了一圆柱叶片离心泵内的附着空化与云状空化。另外, 其他学者也进行了类似的研究^[44-47]。尽管上述从进口管路侧面拍摄的方法能够观察到空泡在离心泵叶轮中不同工况下的形态, 但是由于该方法将研究区域固定, 仅关注了整个叶轮区域的一小部分, 所以无法获得空泡在同一叶片流道内的演变规律。

尽管空化实验研究已经取得了巨大的成果, 但仍然存在一定的问题, 如空化速度流场以反射流形成的精确测量、脱落空泡的涡旋结构及其对流场非定常紊态效应的影响机制等。为了弥补这一缺陷, 数值计算方法的发展在某种程度上较好地丰富了空化研究的手段, 为更好地揭示空化与空蚀的机理创造了条件。

2. 理论分析与数值模拟研究

1) 理论分析

空化现象数学求解的关键是建立一种合适的能够同时描述空化两种不同时间尺度特性, 以及汽液两相流间质量交换的空化模型。然而, 由于空化复杂的特性, 在实际应用中不得不在尽量保持精度的情况下, 对空泡的生长及溃灭过程加以简化, 以保证求解的稳定性。

空化现象的数学求解最早始于 Helmholtz^[48] 和 Kirchhoff^[49], 他们提出了自由流线理论(free stream line theory) 与速度图方法(hodograph method)。在这之后的学者基于该方法又衍生出其他一系列空化流理论计算方法, 如映像模型^[50]、回射流模型^[51]、尾流模型^[52] 和螺旋涡模型^[53]。这类势流理论模型大多仅能用于平板、水翼、钝头体等简单几何结构水力装置的空泡绕流定常求解。这是由于这些模型将流体简化为不可压且无黏, 并同时假设空泡内部的压力为常数, 空泡面为自由流线, 且未考虑空泡内部的流动。因此, 上述方法在解析空泡的脱落、发展与溃灭的非定常过程时较为困难。

2) 空化模型

20 世纪 90 年代初期, 随着科技的进步, 计算机技术取得了长足的发展, 使得计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法日趋完善, 研究人员得以提出更为优秀的空化模型来克服势流理论类模型的缺点。

现阶段对于空化的计算方法主要有界面跟踪法与两相流方法。界面跟踪法认为汽液两相间存在着清晰的界面, 由于气体密度远远小于液体密度, 所以只求解液相的控制方程。同时在汽液两相界面上设置通过方程迭代获得的动力学与运动学边界条件。边界元方法是界面跟踪法中发展较为成熟的一种方法, 然而该方法在应用时经常需要假定空泡的脱体点位置和脱体角大小, 但在实际情况中, 尤其是三维

情况中,脱体点位置并不是已知的,这就会导致计算无法准确地捕捉到空泡脱落与溃灭等非定常现象。因此,边界元方法经常用于计算二维定常附着空化流或是单空泡等情况^[54,55]。Dang 和 Kuiper^[56] 基于回射流模型,采用 Derichlet 运动学边界定义空泡面,在回射流截面与水翼湿面区域采用 Neumann 边界条件计算了二维水翼空化现象。由于无法预估空泡脱体点的位置,所以总是假设脱体点位于翼型前缘。

两相流方法则基于 Navier-Stokes(N-S) 方程或 Euler 方程着眼于整个流场,汽液两相间并没有明显的界面,空泡的形状和大小由空泡体积(质量)分数或液体体积(质量)分数决定。两相流方法又可分为双流体模型与均质平衡流模型(homogeneous equilibrium flow model, HEM),其中双流体模型将液相和汽相看成两种相互独立而又相互作用的流体,计算时需分别给出两相的质量、动量和能量方程,通过相间相互作用将两相的方程组耦合到一起求解;另外,还需要考虑汽、液间作用力和滑移系数等,这势必会延长计算时间,较为费时^[57,58]。

均质平衡流模型则将汽液两相视为均一介质,两相间无滑移,汽液间没有明显的界面,通过一组偏微分方程来控制流体的运动和状态。这类基于均质平衡流方法的模型根据对混合相密度的定义可以分为基于状态方程的空化模型与基于输运方程的空化模型。

Delannoy 和 Kueny^[59] 采用一个以压力值为变量的正压方程函数表达式来控制汽液混合相的密度,其函数曲线平滑地连接了纯汽相与液相密度之间的混合密度域。Iga 等^[60] 通过质量分数与局部压力的函数关系定义了混合相密度,并考虑了流体的可压缩性。Merkle 等^[61]、Huang 等^[62]、Song 和 He^[63] 也通过假设压力与密度之间的函数关系来解析空泡的演变过程。以上这类基于状态方程的空化模型结构简单,且无须额外的方程来封闭方程组,故应用较为便捷。然而,最近的研究表明,涡量的形成是空化的重要特征,尤其是在空穴闭合区域^[64],斜压矩的生成是涡量传输的重要因素^[65]。但是正压模型及其类似的状态方程模型计算所得的压力梯度与密度梯度几乎是平行的,无法产生斜压矩。因此,正压模型类空化模型无法准确地解析空化的非定常动力特性^[66]。Aeschlimann 等^[67] 采用正压模型对文丘里管内的片状空化进行了数值模拟,并与实验结果进行了对比,结果表明正压模型能够较好地反映全局的稳定片状空化形态,但无法捕捉到反射流的形成,因此未能获得片状空化尾端的局部空泡脱落现象。此外,由于状态方程类模型对压力密度有较高的依赖性,所以这类模型在处理非定常空化问题时很不稳定,且收敛性较差^[68]。

输运类空化模型则通过输运方程来控制液相的汽化和汽相的凝结过程,流场中每一个节点的密度由汽相体积分数或液相体积分数的加权平均定义,并且该方程考虑了流动的对流特性,故可以模拟出空泡受惯性力的影响,如伸长、附着及漂移等。不同的输运类空化模型采用不同的蒸发项与凝结项,并辅以经验系数控制流体的蒸发量与汽泡的凝结量。Singhal 等^[69] 基于 Rayleigh-Plesset(R-P) 方程,并

考虑了湍流脉动与非可溶性气体的影响,建立了一种基于质量(体积)分数的完全空化模型(full cavitation model, FCM)。Zwart 等^[70]通过假设单位体积内空泡核的数量对空泡体积分数进行了定义,空泡半径由简化的 R-P 方程推导得出,基于以上两点假设控制单位时间内汽液两相间的质量转换率。该模型由于计算稳定且收敛性较好,所以应用较为广泛^[71-74]。Yuan 和 Schnerr^[75]假设流体单位体积内的空泡核数量与空泡体积分数存在某种函数关系,并据此定义空泡半径,建立了一种平衡空化模型,即方程中的蒸发项与凝结项相同。然而,在实际情况中空化的蒸发过程与凝结过程并不相同,往往凝结过程比蒸发过程慢很多^[76]。以上这些空化模型的蒸发源项与凝结源项或多或少在形式上相近,且多基于 R-P 方程推导而来。Merkle 等^[77]采用一组基于人工可压缩法和伪时间步的欧拉方法求解二维翼型片状空化绕流,获得了流场压力分布及空泡长度;然而,该方法未考虑汽液两相的相变过程,故对于复杂结构的空化绕流问题收敛性较差。随后 Kunz 等^[78,79]在 Merkle 的研究基础上提出了一种用于研究片状空化与超空化的空化模型。值得一提的是,该模型的蒸发项与凝结项的形式并不相同,其蒸发项与 Merkle 的模型类似,而凝结项则采用了 Ginzburg-Landau 的势函数来表示。另外,在求解时辅以伪时间步的预处理方法进行计算,较好地解决了在求解高速流动且具备大液汽密度比流动时计算容易发散的问题,另外在处理网格纵横比较大的问题时也有较好的表现^[80]。

综上所述,可以发现空化模型的研究呈多元化的发展趋势,且已成功运用于各行各业,其中一些优秀的模型更被商业软件所采用,如 FINE/TURBOTM 采用正压模型;完全空化模型同时被 FLUENT 与 PumpLinx 软件使用,FLUENT 还同时采用了 Zwart 模型与 Schnerr-Sauer 模型;ANSYS-CFX 则单独采用了 Zwart 模型。

3) 湍流模型

在水力机械的空化流数值计算中,除了需要空化模型控制汽液两相间的质量交换,还需要湍流模型对整个方程组进行封闭。湍流方程在空化流模拟中的作用可以说与空化模型是相当的。它不仅影响计算的精确度,关乎对反射流的预测,同时影响湍流涡团的运动,因此湍流模型的选择就显得尤为重要。现阶段的湍流计算方法主要有直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)方法、大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法和雷诺时均 N-S(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)方法。

DNS 方法无需额外的湍流模型对流场进行补充,直接对 N-S 方程进行求解。理论上 DNS 方法拥有最高的解析精度,故该方法也往往作为验证其他模型的可靠方法^[81]。但是由于 DNS 方法对网格的要求极为严苛,需要网格数量与雷诺数的三次幂成正比,导致其求解过程需要耗费大量的时间,限制了其在工程方面的应用,所