



国防科技图书出版基金

《现代船舶力学》丛书

空化机理

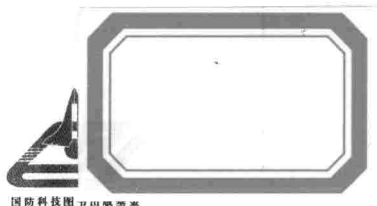
Physical Mechanism
of Cavitation

潘森森 彭晓星 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



《现代船舶力学》丛书

空化机理

Physical Mechanism of Cavitation

潘森森 彭晓星 著

国防工业出版社

·北京·

·图书在版编目(CIP)数据

空化机理/潘森森,彭晓星著. —北京:国防工业出版社,2013. 12

ISBN 978 - 7 - 118 - 09513 - 5

I. ①空... II. ①潘... ②彭... III. ①空化 - 研究
IV. ①TV131. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 097539 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 710 × 960 1/16 印张 13 字数 221 千字

2013 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 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 杨崇新

秘书长 杨崇新

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

《现代船舶力学》丛书 编辑委员会

名誉主任委员 黄平涛

顾问 姜来根

主任委员 吴有生

(以下按姓氏笔画排序)

副主任委员 王国强 吴德铭 翁长俭 盛振邦

委 员 尤子平 石仲堃 冯丹宇 许西安

刘应中 纪卓尚 杨士莪 吴秀恒

何友声 张圣坤 陈铁云 耿广生

徐秉汉 郭日修 崔维成 董世汤

彭华良 戴仰山 戴遗山

秘 书 陈燮麟 赵德会 康伯霖

总 序

历史上蒸汽动力装置在船舶推进中的应用,改变了船舶在波浪中的航速与航线,也促进了19世纪中期船舶运动理论的诞生。从此,在牛顿力学的基础上,开始了船舶力学漫长的发展历程。于20世纪上半叶形成了自身较为系统的专业格局,并且在20世纪下半叶取得了突飞猛进的发展。

在20世纪后40年,随着世界经济大循环模式的形成,船舶的产量、品种大幅增长,船舶设计制造技术频频更新,改变着船舶与海上运输的面貌。21世纪将是海洋的世纪,海洋经济、海洋开发与海洋军民装备的发展需求更将给海洋运载器技术的进步以前所未有的巨大动力。船舶力学是一个与船舶工程紧密结合的力学领域。船舶类型的每一步更新与发展,都包含着在船舶力学的领域中认识与把握船舶所遭受的随机、复杂、险恶的环境载荷,改进航行性能,保证船体安全可靠等方面的科学与技术的进步。凡是船舶力学研究最活跃的地方,往往就是需求最明确、船舶新技术出现最快的地方。可以说,现代船舶发展的历史,也就是船舶力学发展的历史,船舶力学是船舶技术创新的重要源泉之一,而船舶的工程需求又是船舶力学发展的基石,两者紧密结合,与时俱进。因此,可以预见,进入21世纪以后,不用太长的时间,船舶力学发展的历史必将翻到崭新的一页。

面对这样的历史机遇,有必要对世纪之交船舶力学若干主要领域的前沿内容,以及我国船舶科技工作者希望有更多了解的新内容作一些归纳与介绍。这不仅是我国广大船舶科技工作者的愿望,也有助于为进一步发展船舶力学打好基础。

20世纪80年代初以来,我国的船舶工业与船舶技术取得了迅速的发展,船舶总产量在20世纪末已稳居世界第三位。为奠定我国船舶技术与船舶工业发展的基础,我国的船舶力学工作者含辛茹苦,摩胼胝地工作,取得了丰硕成果,有的领域接近和达到了国际先进水平。本世纪初是我国船舶工业和船舶技术跨越式发展的重要历史时期,为进一步振兴我国的船舶技术与船舶工业,有必要把所取得的成果与国际动向结合起来,作必要的提炼与总结,供我国船舶与海洋工程界科技人员和高等学校师生参考。

本着上述目的,中国造船工程学会船舶力学学术委员会及部分船舶力学工作者倡议,在世纪之交,组织国内船舶力学的专家们,集体编著一套《现代船舶力学》丛书。这个倡议很快得到了原国防科工委和国防科技图书出版基金评委会的赞

同。1996年成立了编委会。编委会的日常工作挂靠在中国造船工程学会船舶力学学术委员会,并在中国船舶科学研究中心的大力支持和国防科技图书出版基金评委会与国防工业出版社的指导下开展工作。

《现代船舶力学》丛书包括船舶水动力学、船舶结构力学、船舶设计和制造工艺中的力学问题等方面的专著。丛书注重理论与应用相结合,着眼于选题内容相对新颖与先进,并不追求覆盖范围全面与广泛。丛书内容难免会有缺陷与不足,但编委会希望在我国船舶科技界各有关院所、高校与造船企业的关怀和参加编著的专家学者的共同努力下,它的出版能够对推动我国船舶与海洋工程技术的发展,促进我国船舶工业的技术创新,以及加强中外船舶工程界的学术交流有所贡献。

吴有生

2002年9月8日

序 一

工程界和学术界对于空化的研究虽已持续百年以上,但直至今日,恐怕还不能认为对于空化及其演化规律的认识已经趋于成熟。例如,多年来,学术界总是将“空化”列为工程流体力学的一个分支学科,就可能是一种误解。固然就工程应用而言,当前最受公众瞩目和关心的可能是各类物体在水中作高速运动时所出现的充分发展的空化流动(或称空泡流),因此将它列入工程流体动力学学科的研究范畴;但“空化”本质上是一种物态相变的现象,且受众多环境因素的影响。因此,空化的研究理应属于广义的理论物理学范畴。从 20 世纪 70 年代以来,国内外已经出版了不少有关空化方面的各类专著,大概除了对于以 Rayleigh-Plesset 方程为基础的单泡动力学方程取得学者们较多共识而普遍加以引用外,其他方面的内容则多半根据作者们各自的学术背景、专注与兴趣而取舍,特别对于空化机理的阐述、分析和讨论,显得相当薄弱;这一方面囿于学术界对此项研究还不够充分,另一方面也由于对空化机理的物理认识并不完全统一所致。

出版本书甚至可以认为是一次壮举:本书作者们首次将“空化机理”作为论述主题并以此为书名,以阐述机理为统领,把涉及“空化”有关的诸多物理现象,包括空化的起因、空化核及核谱、空化初生、介质效应、空化发展、涡空化、剪切空化、云空化、空蚀、相似律和比尺效应以及广泛的空化效应等等都提升到机理的高度加以归纳和认识。这是很不容易做到的事。

本书作者们不仅在物理学科方面有深厚的根底和素养,而且对空化机理的研究一直情有独钟;即使在多年从事有关空化的工程研究中也十分关注“机理”这一环节。从创建试验设备、改善测试技术、引用新的判据到谨慎分析试验结果,在空化机理的研究与探索方面不仅在国内领先,而且起到了引领的作用。本书内容在不少方面独具一格,例如关于气核存在形式及其作用的分析,见解新颖,堪称一绝;对于核群模拟与播种也作了较为系统的阐释,未见诸于其他著作中;关于空化模糊预报的内容全係作者与其合作者的自行研究成果;对于传统空化数作为相似参数的分析与评价以及新的建议更是作者多年深思熟虑的结果,富有创意。特别值得一提的是有关空化效应的各种工程应用,本书不仅在原理方面给予清晰的阐释,而且对机构和增效方面也提供了明示和有益的建议,这将大大有益于工程应用的实施、改进和拓宽。

本书脱俗于一般科技著作:文笔流畅而洒脱,娓娓道来,引人入胜;书中蕴涵作者感情色彩的论述,使读者阅之不仅无疲惫之感,且会不经意间地被吸引而与之共鸣,这确为攻读科技书藉中所少见。总之,这是一本具有较高学术水平且特色明显的好书。它的出版将大有益于对空化机理的认识与深入研究,并有力地推动相应的工程应用。

应作者之邀作序,实为本人之荣幸。

何友声
工程院院士,教授
上海交通大学
2013年6月

序 二

空化机理是空泡水动力学的核心问题,也是能否中肯地解决空化与空蚀实用问题的必由之路。

本书以空化机理为主体兼及空蚀机理及应用,成为本书的架构特征。就章节分布而言,全书共分八章,空化机理有六章,空蚀机理一章,工程应用一章,这两章也涉及不少空化机理问题,因此可以说本书是一本空化机理专著。就其涉及的内容及深度来认知,正符合于现代科技文化发展的趋向。

现代科技文化发展的历程,主要是传承西方近代启蒙文化和近代文艺复兴运动。前者推动了科技发展,后者促进了科技大发展,其间也涉及到东方科技文化的某些贡献。现代科技文化在此基础上,受到世界全球化的激励和中西文化加速交流的影响,有了更丰富的内涵。通过若干年的实践,科技作为生产力的地位迅速上升,已被誉为第一生产力,实际上科技成果已成为推动经济发展的重要杠杆,也是影响政治及增强国力的重要支柱。对当今审视和估量科技文化主体的科技著作,提出更高的要求。

本书是典型的现代科技文化著作,以此角度来读本书,在众多判别的要求中,择几点切磋如下:

(1) 本书的传承性。表现在深刻了解前人的认知实质并能在此基础上有所创新。传承不是口号不是传递;是认知、是创新、是去粗取精、去伪存真、不断发展前进。本书在这方面作出代表性的贡献。从历史回顾 1.1.1 节到空化效应示例 8.2 节,一直贯彻这一实质,可以说这是本书在现代科技文化传承运用上的一项范例。

(2) 本书的理论性。从书的性质来判别,机理问题侧重于理论性的探讨是正常的。本书在陈述理论问题时,表现为举重若轻,舍去数理的繁杂推导,直接给出清晰的结果。在基本功比较普及的今天,这是明智之举。例如,作者对空化的“数值模拟”,作者指出 Rayleigh-Plesset (R - P) 方程是空泡水动力学的基本方程,它与“相变方程”等五个方程组成六个方程联立求解,计算手段高超但根本问题是未脱离单气泡计算,使 R-P 方程存在局限。而空泡的群泡性才是解决实际问题的关键,并从传承和理论上指出解决实际问题的重点所在。又如对超空泡的理论分析和应用、涡空化机理及空蚀机理等,均抓住要点加以分析推理,令人信服。

(3) 本书的创新性。本书的另一特点是温故能创新,不徘徊在已有的平台上。

例如,对空化核模型提出了“气核悖理”,进而分析其根源所在。还提出运动与平衡观点,使人们对空化核的认知有更上一层楼的感受。又如,对核谱的论述,强调了空化核的群体作用,指出空化核谱的重要性,还提示了如何避免空化核谱在测量时易误入歧途的要点,这是实践与深入研究的结晶,也是一种创新;再如涡空化机理的分析与陈述不仅有自身的实践经验也有创新的丰富内容。还有值得一提的是,作者在书写中既写了完成的内容,还写出待完成的要点,如5.3节的剪切空化,这正是现代科技文化的另一内容,着眼于当前且顾及到今后。

(4) 本书的应用性(含普及性)。近年来,空化科学技术正在国内国外兴起应用的热潮,普遍用于军工,环保,化工,切割,医疗等领域,成为一种涉及面广的专业。一般机理性书籍有时过分理论化,对涉及不深但又急待了解的读者,有时会陷入“难得明白”的境地,这对推广和普及有些遗憾。本书作者提倡重点放在“讲概念、讲思路、讲方法”,简化了复杂的数理推导,并将很大的空间留给读者去思考发挥。书中选用了大量的第一手资料,书写了切身的体会以启发读者,这符合现代科技文化的要求,是科学文化具有新意的突破。

(5) 本书的前瞻性。表现在论述空化是“福”还是“祸”时,客观地说明两者均存在现实意义而不能偏废,对祸的问题,在水工泄水建筑物中,迄今仍存在易发生严重空蚀破坏或者过度追求安全而加大了巨额投资的现状,其关键的原因是对空化机理“度”的分寸理解和掌握不当所致;对“福”的认知,其中大多数还处在精益求精的阶段,例如,环保水处理中,水力空化有明显优点(8.2.1节),但对空化技术工程化,性价比优化尚有许多工作要做。又如,超空泡水下航行器的研发已经不仅是学术问题,而是海军中的重大问题,关系到保卫和争夺国权国威的问题,需要借助搞飞船搞原子弹的模式来加速进度和深度,争分夺秒地加速提高新技术来保卫我国领海和国威。

如上所述,本书在科技文化方面体现了先进性和时代特征,同时在人文文化方面也具有代表性。这是因为只有物质文化与非物质文化相互融合,才能取得高速度高品质的社会进步。本书中在人文文化上的特点表现在情商,智商和书商上。

(1) 就情商而言,著书贵在全心投入,即所谓要进入精神家园。例如,在1.4.1节中就提出,要理解和应用空化技能就需要“有较强的流体力学知识之外,还需要有物理学的头脑、工程学的思路和流体力学试验技术。”因为空化是一门交叉性学科,四者均需深入,四者缺一很易疏漏,甚至构成错误,这是业内专家多年实践的宝贵经验,也是客观存在的难度。但有人认为,由四人各司其职岂不更好,实践告诫人们最后必须要由一人统筹全局深入融合才能步入境界,这并非一件易事。作者对此将自身认知直率提出是负责的,是真情实意的。本书从始到终都贯彻这种精神,这是人文文化中的重要理念。

(2) 就智商而言,人们常视为遗传因子,正确但不全面。熟能生巧、思能养智

也是对的,两者相互结合那就“上上”了。本书重视语言要简练,剖析要深刻,要能深入浅出,循序渐进。在众多章节中,作者大量提供多年积累的第一手资料,也选用了大量国内外资料,处理的得当,搭配的合理,立论均有根据,这是作者智商的反映,写的很令人信服,可谓之“持之有故,言之有理”,实属智商优良和持之以恒所形成的有价值的成果,也是应该提倡的人文文化理念。

(3) 就书“商”而言,何以书也可以言“商”,它是表达书的品味。理论书籍常很难读,但书的商值高就可以使之流畅易懂,易于理解认知,使内容可以切磋琢磨,导引感触良多,这样的书“书商”就高。例如,人们熟知诗的“商”值,商值高的好诗名句可以流芳百代,感动世人。诗表达人的感受,如“诗言志”也是历史名言,诗是活的,书也是活的,如从此观点翻看本书,业内人士易生感慨,我读过一些有关此专业的书和论文,总的感受是一些著作和论文确属佳作,但要把机理问题写活确实不易,但这也是人文文化发展至今的需要。

本书还是一本重视“高瞻远瞩”的书,在书的后半部分尤为明显。为此,曾在序的第一部分第五段中曾经提及,但由于表达的分量不够,故将此问题展开列为第三段以表示其重要意义。由书中内容可见,作者在空化效应方面作过广泛而深入的探讨、分析、并亲自做过有关设计、制造和试验工作,已将空化效应成为本书的主要脉络之一,对推动空化利用有其特殊意义,为保持前后呼应,本段仍把探讨空化“祸福”问题作为重点,仍用原两例展开讨论如下。

(1) 超空泡水下航行器。

在20世纪上半叶,人们对空化认知还看重在“祸”方面开展研究,并花费大量人力物力去进行如何避免、减轻和修复空化破坏等工作,颇为著名的业内专家柯乃普 R. T. 在20世纪70年代还慨叹过“空化是最令人讨厌的水动力现象”。早在1940年,德国就开展了应用空穴流特征进行水下兵器的研究,20世纪70年代中期,苏联研究成功较通用鱼雷速度高三四倍的100m/s的“暴风雪”超空泡高速鱼雷,引起举世瞩目,开创了成功利用空化减阻的先河。到20世纪末期,由于世界局势进入信仰多元化、经济全球化、信息瞬间化、思维概念化,人类发展已由陆地竞争,发展到上至天上乃至宇宙,下至海中乃至地下的比拼,其动力是为了资源的争夺和发展的需要,人们在思维上已清楚地理解,这个世界仍然是谁落后谁就要挨打,中国人民通过自鸦片战争以来的曲折过程,身受切心之痛。当前科学高速发展,比拼日益剧烈,业内人士已经理解到空化研究不仅是科学探讨的问题而是已经上升到海上权益竞争和国家安全。

有一点可以肯定,空化技术已经成为当代的科学前沿问题,事关大局大事,决不能掉以轻心!

(2) 水利工程高水头泄水建筑物。

上述条目(1)为能增强国力避免挨打,可视为空化之“福”。本条目则公认为

典型的“祸”。一座大型泄水建筑物,发生空化空蚀灾祸时,不仅劳民伤财,造成以千万或亿为单位的直接损失,间接的对有发电任务的水电站将停机检修,此间接损失有时更大,而维修工程难度大,时间更长,确实成为“空化是最令人讨厌的水动力现象”。例如,美国的鲍尔特(Boulder),我国龙羊峡、盐锅峡和二滩等大坝均发生过泄水建筑物严重的空蚀损毁事故。令人揪心的是,其间虽提出免蚀设计,抗蚀方法和减蚀技术,但迄今还不能做到有把握地避免,这表明空化机理的认知尚不完美,当前的空化设计已出现设定的安全度,只要试验中发现所谓空泡就以此为设计标准,忽视了其中伪空泡出现的误导,也忽视了空泡与空蚀的内在联系。过去认为“空化是因,空蚀是果”,这模糊的因果关系是否合乎空化机理,合乎实际?如果盲目提高设计标准而安全过度,其浪费有时可达亿元水平,有人估算其后果会造成10%~30%的浪费。

由上述一些事例的陈述可见,空化机理的研究和实用有重大的价值和意义。本书的出版实属雪中送炭,有助于推动本领域的发展。我作为一名读者回顾自己的感受,近期虽看过一些论文和著作,确有一些作品十分优秀,在阅读本书后再回顾自己的感想,更加兴奋,读本书时确有“压倒元白”之感。这也是业内的幸事。期望有志者能参加这一项为国争光、为人民造福、建设海上的铜墙铁壁的工作,成为振兴中华和致力于发展空泡水动力学方面的得力尖兵之一。

柴恭纯

教授级高级工程师

南京水利水电科学研究院

2013年6月

前 言

空化是液体特有的现象,发生在液体内部的低压区、尤其是在液体与固体的交界面上。传统意义上的空化是液体与其蒸气的相变过程,包括发生、发展、消失三个阶段。发生阶段称为“空化初生”,伴有噪声辐射的大幅度上升;消失阶段称为“空化溃灭”,释放出巨大的压能和热能,可能造成对材料的破坏,也可能被利用来为多种工业工程服务;在初生与溃灭之间的是空化发展阶段,称为“空化发展”,它主要是干扰空化物体的运动、使力发生了变化,譬如推力下降、构件振动等,在某些情况下也可以减阻、使阻力系数甚至降低一个数量级。

常见的空化,离不开介质、物体和流动(介质与物体的相对运动)三个主体,应该把它们看作为一个系统来综合考虑。实际工程中的空化都是众多空化泡集合在一起的群体行为,群泡性和随机性是空化现象的特征。空化虽只是力学——流体力学——水动力学学科条目下的一个分支,但它实际上是力学/物理学/材料学的交叉学科之一,是流体力学/热力学/声学/材料学的一支交叉学科。水利工程、水力机械工程、船舶工程、水中兵器工程、石油天然气工程、环保工程、医药工程、化工工程、以及航天工程和核工业工程等,都与空化有密切的关系。

阴差阳错,毕业分配使我这个学理论物理的与空化结上了缘。断断续续,从实验室试验到课题研究,从研究生教学到工程中空化问题的应对,我这一辈子算是爱上空化机理了。

以前,弄清机理是为了“防”,防治空化的祸害;现在不同了,既要“防”又要“用”,弄清机理更是为了要把空化的能量和裨益集中利用起来,为人类谋福。近十多年来,国际国内正兴起一股空化的工业工程应用热潮,涉及面很广,包括环保、化工、清洗、切割等很多行业,虽然多数还处于试验研究阶段,但有的已取得了卓有成效的工业应用,如在石油和天然气的钻探方面。一个奇怪的现象是,在国内已有不少单位不少人在从事这方面的研究开发工作,但几乎都不是专门搞空化研究的人,连从事流体力学研究的人也不多。我作为一名从事空化研究的“老”人,愿意把我数十年积累的有关空化机理的知识和经验奉献出来,希望能对从事和即将从事空化工业工程应用的人有所帮助,这就是我们撰写这本专著的目的。

本书共八章:概论、空化核、空化初生机理、空化发展机理、涡空化机理、空蚀机理、空化相似与空化比尺效应、空化机理与工程应用。从某种意义上讲,前七章是

为第八章铺垫和服务的,而第八章并没有详细展开,只是将方向和方法点到为止,读者可以从前七章中找到进一步的阐述。全书中没有烦琐的数学推导,重点在于讲概念、讲思路、讲方法,把很大的空间留给读者自己去发挥。书中有一些内容是作者们的研究成果,有的还是从未正式发表过的。凡是引用他人的数据和资料的,书中都标明了出处。本书第三和第四章由彭晓星撰写,其余六章由潘森森撰写,全书由潘森森统稿。

本书的撰写和出版获得了著者单位内外许多领导、同事和学生的关心和帮助,在此一并衷心感谢。特别要感谢何友声院士和柴恭纯教授在本书成书过程中的指导和审阅,感谢徐良浩硕士协助完成对本书图表文字的编排。感谢多年来国家自然科学基金对本书著者空化研究项目的资助(资助号:1880365,58909464,19002021,10072005,11072223,11332009)。最后感谢国防科技图书出版基金对本书出版的资助,感谢国防工业出版社编辑为本书出版付出的辛勤劳动。

如果本书对不太了解空化的人有所启蒙作用的话,如果本书对接触到空化问题的工程人员有开拓思路的作用的话,如果本书对想要提升空化应用效率的研究开发人员有那么一点儿指导作用的话,我们就十分欣慰了。

潘森森 研究员
中国船舶科学研究中心
2012年初秋于江苏无锡

目 录

第一章 概论	1
1.1 空化现象	1
1.1.1 历史回顾	1
1.1.2 空化外貌	2
1.1.3 空化是祸也是福	2
1.2 空化概念	5
1.2.1 空化与沸腾	5
1.2.2 空化的内涵	7
1.2.3 空化的定义	8
1.3 空化相似参数	9
1.3.1 空化数的定义	9
1.3.2 空化数的作用	10
1.3.3 空化数的缺陷	11
1.4 空化研究方法	12
1.4.1 空化自身的特征	12
1.4.2 空化的试验模拟	13
1.4.3 空化的数值模拟	13
参考文献	14
第二章 空化核	15
2.1 空化核的提出与气核悖理	15
2.1.1 空化核、气核	15
2.1.2 空化核模型	16
2.1.3 运动平衡与“气核悖理”	17
2.2 气核的惯性生长	18
2.2.1 Rayleigh-Plesset(R-P)方程	18
2.2.2 气核的生长、溃灭与回弹	19
2.3 气核的质量输运生长	21
2.3.1 穿过泡壁的质量运输方程	21