



# 空化与空泡动力学

## CAVITATION AND BUBBLE DYNAMICS

[美] 克里斯托弗·厄尔斯·布伦南 (Christopher Earls Brennen) 著

王勇 潘中永 译 袁寿其 审

 江苏大学出版社  
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

国家自然科学基金重点项目“水力机械的空化特性及对策”（编号51239005）资助



**CAVITATION  
AND  
BUBBLE DYNAMICS**

# 空化与空泡动力学

[美] 克里斯托弗·厄尔斯·布伦南 (Christopher Earls Brennen) 著

王勇 潘中永 译 袁寿其 审

 江苏大学出版社  
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

著作权合同登记:图字 10-2013-554 号

### 图书在版编目(CIP)数据

空化与空泡动力学 / (美)布伦南(Brennen, C. E.)  
著;王勇,潘中永译. — 镇江:江苏大学出版社,  
2013.12  
ISBN 978-7-81130-590-6

I. ①空… II. ①布… ②王… ③潘… III. ①空泡流  
—研究②气泡动力学—研究 IV. ①TV131.2②O362

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 266373 号

*Cavitation and Bubble Dynamics* by Christopher E. Brennen  
© Christopher E. Brennen 1995, 2013.  
All rights reserved.  
Original English edition published by Oxford University Press,  
New York.

### 空化与空泡动力学

KONGHUA YU KONGPAO DONGLIXUE

---

著 者/(美)克里斯托弗·厄尔斯·布伦南(Christopher Earls Brennen)  
译 者/王 勇 潘中永  
责任编辑/吴昌兴 张小琴  
出版发行/江苏大学出版社  
地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)  
电 话/0511-84446464(传真)  
网 址/http://press. ujs. edu. cn  
排 版/镇江新民洲印刷有限公司  
印 刷/句容市排印厂  
经 销/江苏省新华书店  
开 本/718 mm×1 000 mm 1/16  
印 张/20.5  
字 数/501 千字  
版 次/2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷  
书 号/ISBN 978-7-81130-590-6  
定 价/65.00 元

---

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

# 中文版序

很高兴中国江苏大学流体机械工程技术研究中心的王勇和潘中永将《空化与空泡动力学》一书翻译成中文并出版。该书先由牛津大学出版社在 1995 年出版,后由剑桥大学出版社于 2013 年再版发行。为了使该书的翻译尽可能准确,在翻译过程中对王勇和潘中永提供帮助我感到十分荣幸。此外我非常感谢袁寿其研究员对该书翻译工作的支持和对翻译书稿的校对。我期望全球以中文为工作语言的科研人员、教师和工程师们能够从该书的中文版中受益,并且能够应用从该书获得的知识来造福全人类。

和剑桥大学出版社出版的英文原版一样,在翻译版中我同样对我的妻子和一生的挚友 Barbara 奉上最真挚的爱和由衷的感谢。

克里斯托弗·厄尔斯·布伦南

于加州理工学院

2013 年 7 月

**Preface to the Chinese translation of “Cavitation and Bubble Dynamics”**

I am honored that Wang Yong and Pan Zhongyong of the Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology at Jiangsu University, P. R. China, have chosen to prepare this Chinese translation of “Cavitation and Bubble Dynamics”. The book was originally published in 1995 by Oxford University Press and later printed by Cambridge University Press in 2013. It was a pleasure to help Wang Yong and Pan Zhongyong to ensure that the translation is as accurate as possible. In addition I am very grateful to Professor Yuan Shouqi for the support he has given to this translation and for proof-reading the manuscript. It is my hope that Chinese-speaking researchers, teachers and engineers around the world will find benefit in this translation and will use the knowledge so gained to advance the welfare of all the people of this earth.

Like the English language original published by Cambridge University Press, this translation is dedicated with great love and deep gratitude to my wife and lifelong friend, Barbara.



California Institute of Technology,  
July 2013.

# 前言

早在18世纪中叶,著名的数学家 Leonhard Euler 就在理论上证明了液体中空化发生的可能性。直到19世纪末,人们才从船用螺旋桨的破坏现象中切实体会到了空化的存在及其危害。自此,空化一直是水力机械领域的一个世界性难题,也是液体式透平机械流体力学的两个特有的重大问题之一。江苏大学流体机械工程技术研究中心近年来一直在水力机械空化领域不懈努力并获得了初步的研究成果及国际影响力。2012年,研究团队获批了国家自然科学基金重点项目“水力机械的空化特性及对策”(编号:51239005),同年底,我们应邀为总部设在英国的国际空化研究委员会(the International Institute of Cavitation Research)的创始成员之一并出席其首届研讨会。作为国家重点学科和国家工程中心的依托单位,我们深知在该领域所肩负的责任与义务。

2012年8月24日和25日,来自全球6个国家的7位国际知名专家出席江苏大学首届“流体机械及工程国际学术论坛”。其间加州理工学院前副校长 Christopher Earls Brennen 教授对我们团队的相关研究及进展表现出了浓厚的兴趣并向我推荐他的著作 *Cavitation and Bubble Dynamics*,该著作在北美及欧洲具有广泛的影响力,Brennen 教授坚信“突破知识限制的最有效方法就是使其尽可能广泛且自由地传播”,并建议翻译出版该书。随后,我于今年7月受邀访问加州理工学院并同 Brennen 教授签署了该书的版权转让以及翻译授权协议。

《空化与空泡动力学》一书共由8章组成,第1章介绍相变、成核以及空化的基本物理概念,第2章到第5章介绍空泡空化的相关知识,第6章到第8章介绍空化流动的不同形式及其数学分析。其中第1章到第4章由王勇

翻译,第5章到第8章由潘中永翻译,全书由袁寿其校译、统稿。由于专业能力和英语水平所限,虽数易其稿,但必然还有翻译不准确的地方,恳请读者批评指正。

袁寿其

2013年9月

# 符号表

## 罗马字母

$a$	波扰动幅值
$A$	过流断面面积或空化(泡)群半径
$b$	绕流体宽度的一半
$B$	水洞宽度的一半
$c$	液体中溶融气体的浓度、声速、弦长
$c_k$	波数 $k$ 的相速度
$c_p$	定压比热
$C_D$	阻力系数
$C_L$	升力系数
$\tilde{C}_{l_h}, \tilde{C}_{l_p}$	非定常升力系数
$C_M$	力矩系数
$\tilde{C}_{M_h}, \tilde{C}_{M_p}$	非定常力矩系数
$C_{ij}$	升/阻力系数矩阵
$C_p$	压力系数
$C_{pmin}$	最小压力系数
$d$	空穴宽度的一半, 叶片厚度与法向节距之比
$D$	质量扩散率
$f$	频率, 单位为 Hz
$f$	复数速度势 $\phi + i\psi$
$f_N$	$N$ 相或者成分 $N$ 的热力学特性



$Fr$	Froude 数
$g$	重力加速度
$g_x$	重力加速度在 $x$ 方向的分量
$g_N$	$N$ 相或者成分 $N$ 的热力学特性
$\mathcal{G}(f)$	声音的谱密度函数
$h$	比焓, 湿面高度, 叶片节距
$H$	Henry 法则常数
$Hm$	Haberman-Morton 数, 通常为 $g\mu^4/\rho S^3$
$i, j, k$	指数
$i$	自由流线分析中 $-1$ 的平方根
$I$	声冲击
$I^*$	量纲一的声冲击, $4\pi R/\rho_L U_\infty R_H^2$
$I_{Ki}$	开尔文冲击矢量
$j$	$-1$ 的平方根
$k$	Boltzmann 常数, 多方常数或者波数
$k_N$	$N$ 相的导热系数或热力学特性
$K_G$	气体常数
$K_{ij}$	附加质量系数矩阵, $M_{ij}/(4/3\rho\pi R^3)$
$K_C$	Keulegan-Carpenter 数
$Kn$	Knudsen 数, $\lambda/2R$
$\ell$	流动特征尺寸, 空穴长度的一半
$L$	汽化潜热
$m$	质量
$m_G$	空泡内部气体质量
$m_p$	粒子质量
$M_{ij}$	附加质量矩阵
$n$	谐波次数或者单位面积成核点的数量
$N(R)$	空化核数量密度分布函数

$\dot{N}_E$	空化事件发生率
$Nu$	Nusselt 数
$p$	压力
$p_a$	辐射声压
$p_s$	声压均方根
$p_S$	声压级
$p_G$	气体分压
$P$	伪压力
$Pe$	Peclet 数, 通常为 $WR/\alpha_L$
$q$	速度矢量的大小
$q_c$	自由表面速度
$Q$	源强度
$r$	极坐标
$R$	空泡半径
$R_B$	当量体积半径 $[3\tau/4\pi]^{1/3}$
$R_H$	头型半径
$R_M$	最大空泡半径
$R_N$	空化核半径
$R_P$	成核位置半径
$\mathcal{R}$	至测量点的距离
$Re$	雷诺数, 通常为 $2WR/\nu_L$
$s$	沿流线或表面的测量坐标
$s$	比熵
$S$	表面张力
$St$	Strouhal 数, $2fR/W$
$t$	时间
$t_R$	相对运动的松弛时间
$t_*$	量纲一的时间 $t/t_R$

$T$	温度
$u, v, w$	笛卡儿坐标系的速度分量
$u_i$	速度矢量
$u_r, u_\theta$	极坐标系的速度分量
$u'$	$x$ 方向的摄动速度, $u - U_\infty$
$U, U_i$	流体速度和没有粒子时的速度
$V, V_i$	绝对速度和粒子的速度矢量
$U_\infty$	上游无穷远均匀来流速度
$w$	复共轭速度 $u - iv$
$w$	量纲一的相对速度, $W/W_\infty$
$W$	粒子的相对速度
$W_\infty$	粒子的极限速度
$We$	Weber 数, $2\rho W^2 R/S$
$z$	复合位置矢量, $x + iy$

#### 希腊字母

$\alpha$	热扩散率, 体积含气率, 攻角
$\beta$	叶栅安装角, 其他局部变量
$\gamma$	气体比热比
$\Gamma$	环量, 其他局部参量
$\delta$	边界层厚度或频率增量
$\delta_D$	耗散系数
$\delta_T$	热边界层厚度
$\varepsilon$	体积分数或小的摄动量
$\zeta$	复变量, $\xi + i\eta$
$\eta$	每单位液体体积的空泡数量
$\eta$	$\zeta$ 面坐标
$\theta$	角坐标或者速度矢量方向
$\kappa$	体积弹性模量

$\lambda$	分子或粒子的平均自由路径
$\Lambda$	调节系数
$\mu$	动力黏度
$\nu$	运动黏度
$\xi$	$\zeta$ 面坐标
$\varpi$	对数速矢变量, $x + i\theta$
$\rho$	密度
$\sigma$	空化数
$\sigma_c$	阻塞空化数
$\sigma_{ij}$	应力张量
$\Sigma$	空泡生长的热力学参数
$\tau$	粒子或空泡的体积
$\phi$	速度势
$\phi'$	加速度势
$\varphi$	空泡半径摄动分数
$\Phi$	势能
$\chi$	$\lg(q_c/ w )$
$\psi$	流函数
$\omega$	角频率
$\omega^*$	约化频率, $\omega c/U_\infty$

### 下标

对于任何变量, 如  $Q$ :

$Q_0$	初始值, 上游值或基准值
$Q_1, Q_2, Q_3$	$Q$ 在三个方向的笛卡儿分量
$Q_1, Q_2$	上游和下游的冲击量
$Q_\infty$	空泡上游无穷远处的值
$Q_B$	空泡的值
$Q_C$	临界值或者临界点的值

$Q_E$	平衡值或者饱和液/汽线的值
$Q_G$	气体的值
$Q_i$	矢量 $Q$ 的分量
$Q_{ij}$	张量 $Q$ 的分量
$Q_L$	饱和液体的值
$Q_n$	$n$ 阶谐波
$Q_P$	峰值
$Q_S$	在交界面处或者恒定熵的值
$Q_V$	饱和蒸汽的值
$Q_*$	喉部的值

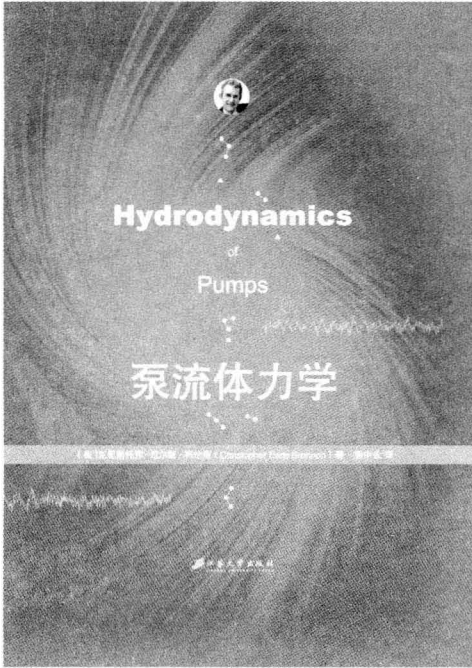
### 上标及其他标识符号

对于任何变量,如  $Q$ :

$\bar{Q}$	$Q$ 的平均值或者共轭复数
$\tilde{Q}$	$Q$ 的复数幅度
$\dot{Q}$	$Q$ 的时间导数
$\ddot{Q}$	$Q$ 的二次时间导数
$\hat{Q}(s)$	$Q(t)$ 的拉普拉斯变换
$\check{Q}$	镜像点原点的坐标
$Q^+, Q^-$	复平面中 $Q$ 值的两端 $Q^+$ 和 $Q^-$
$\delta Q$	$Q$ 的小变动
$\text{Re}\{Q\}$	$Q$ 的实部
$\text{Im}\{Q\}$	$Q$ 的虚部

### 单位

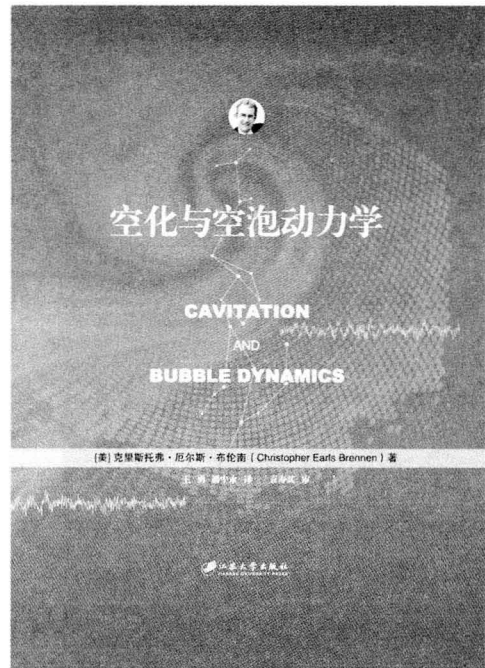
本书的大部分内容将重点放在了那些控制所讨论现象的量纲一的参数上,然而,也有一些情况,要利用有量纲的热力学和输运特性参数,在这些情况下将使用国际单位制,质量(kg),长度(m),时间(s),绝对温度(K);有时偶尔使用其他特别方便的单位,例如焦耳( $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ )等.



## 泵流体力学

ISBN 978-7-81130-356-8 (平装, 48.00元)

ISBN 978-7-81130-357-5 (精装, 68.00元)



## 空化与空泡动力学

ISBN 978-7-81130-590-6 (平装, 65.00元)

ISBN 978-7-81130-589-0 (精装, 90.00元)

# 目录

符号表 .....	( I )
<b>第 1 章 相变、成核与空化 .....</b>	<b>(001)</b>
1.1 引言 .....	(003)
1.2 液态 .....	(003)
1.3 流动性和弹性 .....	(005)
1.4 抗拉强度概述 .....	(007)
1.5 空化和沸腾 .....	(008)
1.6 成核的类型 .....	(009)
1.7 均质化成核理论 .....	(010)
1.8 对比试验 .....	(013)
1.9 抗拉强度试验 .....	(016)
1.10 异质化成核 .....	(016)
1.11 成核点数量 .....	(018)
1.12 杂质气体的影响 .....	(021)
1.13 流动液体中的成核 .....	(022)
1.14 空化初生的黏性效应 .....	(024)
1.15 空化初生的测量 .....	(026)
1.16 空化初生数据资料 .....	(029)
1.17 空化初生换算 .....	(031)

<b>第 2 章 球形空泡动力学</b> .....	(033)
2.1 引言 .....	(035)
2.2 Rayleigh-Plesset 方程 .....	(035)
2.3 空泡内容物 .....	(038)
2.4 无热效应 .....	(041)
2.5 汽体/气体空泡的稳定性 .....	(044)
2.6 质量扩散引起的空泡生长 .....	(049)
2.7 热效应对空泡生长的影响 .....	(051)
2.8 热控制的空泡生长 .....	(053)
2.9 非平衡效应 .....	(055)
2.10 对流效应 .....	(056)
2.11 表面粗化效应 .....	(058)
2.12 非球形扰动 .....	(059)
<b>第 3 章 空化空泡的破裂</b> .....	(065)
3.1 引言 .....	(067)
3.2 空泡破裂 .....	(067)
3.3 热控制破裂 .....	(071)
3.4 空泡破裂中的热效应 .....	(072)
3.5 破裂过程中空泡的非球形形状 .....	(073)
3.6 空化破坏 .....	(079)
3.7 空泡群破裂破坏 .....	(082)
3.8 空化噪声 .....	(084)
3.9 空化发光 .....	(092)
<b>第 4 章 振荡空泡动力学</b> .....	(095)
4.1 引言 .....	(097)
4.2 空泡的固有频率 .....	(098)



4.3	有效多方常数 .....	(101)
4.4	附加阻尼项 .....	(104)
4.5	非线性效应 .....	(105)
4.6	弱非线性分析 .....	(107)
4.7	混沌振荡 .....	(110)
4.8	瞬态空化初生 .....	(111)
4.9	整流质量扩散 .....	(112)
4.10	Bjerknes 力 .....	(116)
<b>第5章 空泡平动 .....</b>		<b>(119)</b>
5.1	引言 .....	(121)
5.2	高雷诺数球形绕流流动 .....	(122)
5.3	低雷诺数球形绕流流动 .....	(124)
5.4	Marangoni 效应 .....	(129)
5.5	分子效应 .....	(131)
5.6	粒子非定常运动 .....	(132)
5.7	非定常势流流动 .....	(135)
5.8	非定常 Stokes 流动 .....	(139)
5.9	生长或破裂中的空泡 .....	(143)
5.10	运动方程 .....	(146)
5.11	相对运动的大小 .....	(149)
5.12	平动引起的变形 .....	(151)
<b>第6章 均质泡状流动 .....</b>		<b>(157)</b>
6.1	引言 .....	(159)
6.2	声速 .....	(160)
6.3	相变时的声速 .....	(163)
6.4	正压关系式 .....	(167)