



Hydrodynamics of Pumps

泵流体力学

(美) 克里斯托弗·厄尔斯·布伦南 (Christopher Earls Brennen) 著 潘中永 译

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

著作权合同登记：图字 10-2012-145 号

图书在版编目(CIP)数据

泵流体力学/(美)布伦南(Brennen,C. E.)著;
潘中永译. —镇江: 江苏大学出版社, 2012. 5
ISBN 978-7-81130-357-5

I. ①泵… II. ①布… ②潘… III. ①泵—流体力学
IV. ①TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 101974 号

Hydrodynamics of Pumps by Christopher E. Brennen

© Christopher E. Brennen 1994, 2011.

All rights reserved.

Original English edition published by Cambridge University Press, England.

泵流体力学

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

译 者/潘中永

责任编辑/徐云峰 侯素娟

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/镇江文苑制版印刷有限责任公司

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/17.5

字 数/410 千字

版 次/2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-81130-357-5

定 价/68.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

目 录

前 言 I

符号表 III

① 简 介 001

- 1.1 本书主题 001
- 1.2 空化 001
- 1.3 非定常流动 003
- 1.4 水力机械发展趋势 003
- 1.5 本书结构 004

② 基本原理 006

- 2.1 几何符号 006
- 2.2 叶栅和叶栅稠密度 009
- 2.3 流动符号 011
- 2.4 比转速 012
- 2.5 泵几何形状 013
- 2.6 能量平衡 016
- 2.7 无空化时泵性能——泵基本方程式 017
- 2.8 几个泵和叶轮 018

③ 二元性能分析 021

- 3.1 引言 021
- 3.2 直列叶栅分析 021
- 3.3 偏移角 026
- 3.4 直列叶栅中的黏性作用 026

3.5	环列叶栅分析	028
3.6	径向流动中的黏性作用	031
4	流动的其他特性	034
4.1	引言	034
4.2	三元流动特性——径平衡假设及其分析	034
4.3	径平衡求解示例——计算及优化	037
4.4	出口流动控制——蜗壳内流动及面积比理论	041
4.5	预旋	042
4.6	其他二次流动	046
5	空化参数与空化初生	050
5.1	引言	050
5.2	空化参数	050
5.3	空化初生	053
5.4	空化初生换算	056
5.5	泵性能	057
5.6	叶轮空化的类型	060
5.7	空化初生数据资料	064
6	空泡动力学、空化破坏和空化噪声	070
6.1	引言	070
6.2	空化空泡动力学——空化空泡的生长和破裂	070
6.3	空化破坏	074
6.4	空化破坏机理	076
6.5	空化噪声	079
7	空化和泵性能	085
7.1	引言	085
7.2	典型泵性能数据资料	085
7.3	诱导轮设计	091
7.4	诱导轮性能	093
7.5	诱导轮几何特性——叶栅稠密度、轮缘间隙、进口边	096

- 7.6 泵内空化分析——游移空泡空化分析 099
- 7.7 泵性能的热效应 101
- 7.8 自由流线法——叶面空化分析 108
- 7.9 超空化叶栅 111
- 7.10 部分空化叶栅 113
- 7.11 空化性能参数的关系 120

8 泵振动 122

- 8.1 引言 122
- 8.2 振荡频率 125
- 8.3 非定常流动 128
- 8.4 旋转失速 130
- 8.5 旋转空化 133
- 8.6 喘振 134
- 8.7 空化喘振 136
- 8.8 动静叶片干涉:流态 141
- 8.9 动静叶片干涉:力 143
- 8.10 充分发展的空穴振荡 146
- 8.11 共鸣 148
- 8.12 叶片颤振 149
- 8.13 Pogo (跷振)不稳定性 151

9 水力系统内非定常流动 153

- 9.1 引言 153
- 9.2 时域法 153
- 9.3 管道中的波传播 155
- 9.4 特征线法 157
- 9.5 频域法 159
- 9.6 系统的维数 160
- 9.7 状态转移矩阵 161
- 9.8 分布式系统 162
- 9.9 状态转移矩阵的组合(部件的串、并联) 162
- 9.10 状态转移矩阵的性质 163

- 9.11 几个简单的状态转移矩阵 166
- 9.12 波动能量通量 169
- 9.13 无空化的泵 172
- 9.14 空化诱导轮 176
- 9.15 刚体振动系统 183

10 径向力和转子动力学 185

- 10.1 引言 185
- 10.2 符号 186
- 10.3 滑动轴承与密封 189
- 10.4 小雷诺数轴承 191
- 10.5 大雷诺数环路 195
- 10.6 挤压油膜阻尼器 196
- 10.7 湍流环形密封 196
- 10.8 迷宫密封 202
- 10.9 叶片轮缘转子动力学效应 203
- 10.10 定常径向力 205
- 10.11 空化的影响 212
- 10.12 离心泵 213
- 10.13 力矩及其作用线 216
- 10.14 轴流诱导轮 218

参考文献 220

索引 248

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潘中永将《泵流体力学》一书翻译成中文并出版. 该书先是由 Concepts ETI 公司和牛津大学出版社在 1994 年联合出版, 后由剑桥大学出版社于 2011 年再版发行. 为了使该书的翻译尽可能精确, 我为能够在翻译过程中对潘中永提供帮助非常开心.

十多年前我将该书上传到互联网, 目的是希望该书能够尽可能广地传阅. 这一希望主要是基于两点信念: 一是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; 二是在分享造福全人类的学科知识的过程中, 我们都可以获得彼此间的尊重及合作. 由此, 我期望全球以中文为工作语言的工程师们能够从该书的中文版中受益, 并且能够应用由该书获得的知识来造福全人类.

最后, 对在该中文版发行过程中提供帮助的江苏大学出版社、剑桥大学出版社、Concepts NREC 以及大阪大学的辻本良信教授致以诚挚的谢意.

克里斯托弗·厄尔斯·布伦南

于加州理工学院

2012 年 3 月

Preface to the Chinese translation of *Hydrodynamics of Pumps*

I am honored that Pan Zhongyong of the Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology at Jiangsu University, P. R. China, has chosen to prepare this Chinese translation of *Hydrodynamics of Pumps*. The book was originally jointly published in 1994 by Concepts ETI, Inc. and Oxford University Press and later printed by Cambridge University Press in 2011. It was a pleasure to help Pan Zhongyong to ensure that the translation is as accurate as possible.

When I first placed the entire book on the internet a decade ago, it was with the hope that the material would get the widest possible circulation. This hope was founded on two coupled beliefs. First that the most effective way to roll back the limits of knowledge is to share it as widely and freely as possible. And second that through the process of sharing knowledge we achieve a mutual respect and cooperation that is to the benefit of all mankind. Thus it is my hope that many Chinese-speaking 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 the world.

Finally I would like to express my gratitude to Jiangsu University Press, to Cambridge University Press, to Concepts NREC and to Professor Yoshi Tsujimoto of Osaka University for their help in making the arrangements for this Chinese translation.

A handwritten signature in black ink, reading "Christopher F. Benner". The signature is written in a cursive, flowing style.

California Institute of Technology, March 2012.

译者的话

能够被授权翻译加州理工学院 Christopher Earls Brennen 教授的著作,且在版权贸易中得到了 Brennen 教授本人以及大阪大学辻本良信教授的关心和帮助,译者深感荣幸之至.

本书的出版得到江苏省优势学科建设资金的资助,特别感谢江苏大学校长、国家重点学科流体机械及工程学科带头人、国家水泵及系统工程技术研究中心主任袁寿其研究员.

在 20 世纪末,泵领域的科学家们开始探索泵在 21 世纪的战略发展方向.本人有幸在 2000 年左右涉猎了 Christopher Earls Brennen 教授和辻本良信教授关于泵未来发展战略的学术文章,被两位前辈的远见卓识深深吸引和折服,从此开始追踪他们的研究.

2010 年 10 月,袁寿其校长建议我写一本适合于研究生使用的叶片泵方面的专业英语教材,但本人深知自身才疏学浅,惶恐难以担此重任.不过其时我正在饶有兴趣地研读 Brennen 教授的 *Hydrodynamics of Pumps* 及日本大阪大学辻本良信教授所译的日语版本,遂有将该书译成中文的念头.

Brennen 教授的 *Hydrodynamics of Pumps* 已被译成日语、波斯语等语言,且在日本早稻田大学以及台湾成功大学等世界知名高校中被用作教科书或参考书.译者有幸将该书译成中文,以供国内的泵技术人员,尤其是水力机械(泵)专业的研究生学习和参考.由于译者的专业能力和英语水平所限,虽数易其稿,必然还有翻译不精确的地方,恳请读者批评指正.

在翻译过程中,有些专业术语借用了辻本良信教授所译日语版中的日语汉字,这些借用词都包含在书后的“索引”中.辻本良信教授还对索引中的日语部分进行了校核,特此向辻本良信教授表示感谢.书中的变量等符号尽量与原著保持一致,不过符号形式以及文献的格式则根据相应的国家标准进行了调整,特此说明.

在版权贸易以及编辑出版过程中,得到江苏大学出版社林卉编辑和《排灌机械工程学报》编辑部徐云峰主任以及侯素娟老师的热情关心和帮助,在此一并表示感谢.

今年是江苏大学流体机械工程技术研究中心 50 周年华诞,谨以此书献给流体机械工程技术研究中心的前辈和同事们.

潘中永

2012 年 3 月

前 言

写作本书的目的,一是希望其能够为泵从业人员所参考,二是为那些对泵基本理论感兴趣的高年级学生提供一部介绍泵空化与振动专题的研究性资料.也将本书献给我的朋友和同事 Allan Acosta,同他共事多年使我既开心又荣幸.

本书最初是由一位我尊敬的同事 David Japikse 负责、由 Concepts NREC 公司开设的短期课程所准备的系列记录.我的另外一个朋友 Yoshi Tsujimoto 阅读了早期的书稿并提出了很多有价值的建议.

与加州理工学院的那些极具才能的学生 Sheung-Lip Ng, David Braisted, Javier Del Valle, Greg Hoffman, Curtis Meissner, Edmund Lo, Belgacem Jerry, Dimitri Chamieh, Douglas Adkins, Norbert Arndt, Ronald Franz, Mike Karyeacis, Rusty Miskovich, Abhijit Bhattacharyya, Adiel Guinzburg 和 Joseph Sivo 等一起在有关透平机械问题的领域内工作是我的荣幸.本书中的内容很多都是他们的研究成果.

在第 1 版中我提到,没有我亲爱的妻子 Doreen 的鼓励、爱与情谊就不会有这一切.此后,命运将她从我身边带走,我将该版献给我们的女儿 Dana 和 Kathy,她们的支持对我而言无比珍贵.

克里斯托弗·厄尔斯·布伦南

于加州理工学院

2010 年 1 月

符号表

英文字母

a	管道(路)半径	9.2, 9.3, 9.11
A	过流断面面积	2.3, 4.4
A_V	蜗壳过流断面面积	4.4
A_{VC}	叶轮出口到蜗壳隔舌之间的过流面积	4.4
A_{VT}	蜗壳出口面积	4.4
A_{ijk}	泵动力学特征系数	9.14
$\mathbf{A}$	转子动力学力矩阵	10.2
A_N	参照流动的截面积	6.5
Ar	过流断面面积比	4.3
B	流道或者流动的宽度	2.1
$\mathbf{B}$	转子动力学力矩矩阵	10.2
c	叶片或者翼型的弦长、流道的长度	2.2, 8.3, 9.14
c	声速	9.2
c	转子动力学系数:交连阻尼	10.2, 10.4, 10.12
c_b	动静叶片间距离	8.9
c_{PL}	液体的比热	6.2
C	(元件、部件的)柔性	9.11
C	转子动力学系数:直接阻尼	10.12
C_D	阻力系数	3.2
C_L	升力系数	3.2, 8.9
C_p	压力系数	5.2
C_{pmin}	最小压力系数	5.2
d	叶片厚度与两叶片法向节距之比	7.10
$\mathbf{D}$	Δ 阻力	3.2

D	叶轮外径或流动特征尺寸	1. 3
Df	扩散系数	3. 4
D_T	矩阵 T 的行列式	9. 10
e	比能	2. 6
E	能量通量	8. 6, 9. 12
E	杨氏模量	9. 2
f	损失系数, 摩擦系数	3. 2
F	力	3. 2
g	重力加速度	2. 3, 2. 4
g_s	g 在 s 方向的分量	9. 3
h	比焓	2. 6
h	叶片节距	2. 2
h_p	螺距	2. 2
h^T	总比焓	2. 6
h^*	压力头	9. 3
H	总扬程	1. 4, 2. 3
H_T	与热力学性质相关的扬程	7. 7
$H(s, \theta, t)$	间隙尺寸	10. 7
I	声冲击	6. 5
I, J	表示 $\omega/\Omega= I/J$ 关系的整数	8. 2
I_p	泵阻抗	9. 13
j	-1 的平方根	9. 5
k	转子动力学系数: 交连刚度	10. 2, 10. 4, 10. 7, 10. 8, 10. 12
k_L	液体的热传导率	6. 2
K	转子动力学系数: 直接刚度	10. 4, 10. 7, 10. 12
K_G	气体常数	6. 2
l	管长、从测量点开始的长度、 Δ 空穴长度	5. 6, 8. 10
l	空穴长度与翼型弦长之比	7. 8
L	升力	3. 2, 8. 9
L	惯性	9. 11
L	轴向长度	9. 14, 10. 2, 10. 3, 10. 4
$\mathcal{L}$	汽化潜热	6. 2, 7. 7
m	质量流量	2. 3, 8. 6

m	转子动力学系数:交连附加质量	10.12
m_G	空泡内气体质量	6.2
m_D	与阻力系数相关的常数	3.2
m_L	与升力系数相关的常数	3.2
M	力矩	10.2
M	转子动力学系数:直接附加质量	10.12
Ma	马赫数	9.11
n	表面法向坐标	2.3, 4.3
N	比转速	2.4
$\dot{N}_E$	空化事件发生率	6.5
$N(R_N)$	空化核数量密度分布函数	5.3
$NPSP$	净正吸入压力	5.2
$NPSE$	净正吸能	5.2, 5.5, 7.11
$NPSH$	净正吸头	5.2
p	(静)压力	2.3, 6.2
p_A	辐射声压	6.5
p^T	总压	2.3
p_G	部分气体压力	5.3
p_s	声压级	6.5
p_v	汽化压力、饱和蒸气压力	5.2
P	功率	1.4
$\bar{q}''$	波动量矢量	9.7, 9.8, 9.10
Q	体积流量或者热	1.4, 2.6
Q	热量	2.6
r	透平机械内的径向坐标	2.1
R	透平机械的半径尺寸	2.1
R	空泡半径	5.3, 6.2
R	(系统部件的)抵抗	8.6, 9.11
R_N	空化核半径	5.3
Re	雷诺数	2.5, 5.2
s	沿流动方向的坐标	6.2, 9.3
s	叶栅稠密度	2.2
$\mathcal{S}$	汽化蒸气/液体界面的表面张力	5.3, 6.2, 6.5, 7.6
S	吸入比转速	5.2, 5.5, 7.11

S_i	初生吸入比转速	5.2
S_a	扬程下降百分比吸入比转速	5.2
S_b	断裂吸入比转速	5.5
Sf	滑移系数	2.1
t	时间	6.2
T	温度或者扭矩	1.4, 2.6, 6.2
$\boldsymbol{T}$	基于 $\hat{p}^T, \hat{m}$ 的状态转移矩阵	9.7
$\boldsymbol{T}^*$	基于 $\bar{p}, \bar{m}$ 的状态转移矩阵	9.7
T_{ij}	状态转移矩阵元	9.7
$\boldsymbol{TP}$	泵状态转移矩阵	9.13
$\boldsymbol{TS}$	系统状态转移矩阵	9.9
u	s 或者 x 方向平均速度	9.3, 9.4
$\vec{u}_i$	速度矢量	9.7
U	基准速度, 参照速度	5.2, 8.3
U_∞	上游无穷远流速度	
v	非旋转坐标系内的流体速度(流体绝对速度)	2.1
V	体积或者平均流速	9.11, 10.3
w	旋转坐标系内的流体速度(流体相对速度)	2.1
$\dot{W}$	对流体的做功速度	2.6
z	高度	2.6
Z_{CF}	Z_R 和 Z_S 的公约数	8.2
Z_R	转子叶片数	2.1, 8.2
Z_S	定子叶片数	8.2

希腊字母

α	含气率	7.6
α	(对叶栅)冲角	2.1
	Δ (对翼型)攻角	2.1, 8.10
α_L	液体的热扩散率	6.2
β	液流角	2.1
β_b	叶片安放角	2.1
γ_n	波数	9.10
Γ	几何常量	4.3
δ	叶轮出流的偏移角	2.1

δ	间隙	5.7
ε	偏心量	10.2
ε	转向角	4.3
η	效率	2.6
θ	圆周方向坐标	4.4
θ	叶片流道出流与转轴间的夹角	2.1
θ_c	拱角	2.1
θ^*	叶片尾迹的动量厚度	3.4
Θ	Rayleigh-Plesset 方程中的热项	6.2
κ	液体的体积模量	6.2, 9.2
	叶片进口边曲率半径	7.10
μ	动力黏度	10.4
ν	运动黏度	2.5, 6.2
ρ	流体密度	1.3
σ	空化数	5.2, 7.8
σ_i	初生空化数	5.2
σ_a	临界空化数	5.5
σ_b	断裂空化数	5.5, 7.7
σ_c	阻塞空化数	7.10
σ_{cT}	$\triangle$ 轮缘处阻塞空化数	7.10
σ_d	$\triangle$ 消失空化数	5.7
σ_{TH}	托马空化系数	5.2
Σ	空泡生长的热力学参数	6.2, 7.7
$\Sigma_{1,2,3}$	几何常量	4.3
τ	叶片厚度	1.3, 5.7
ϕ	流量系数	2.1, 3.2, 7.4, 7.5, 7.10, 10.10
ψ	扬程系数	2.3
ψ_0	关死点扬程系数	3.2
ω	涡动或者其他激励的角速度 rad/s	10.2
ω_p	空泡固有频率	6.5, 8.11
Ω	特征角速度 rad/s	1.3

下标

对于任何变量如 Q :

Q_0	初始值、上游的值或基准值	2.2, 6.2, 7.7
Q_1	进口边的值	2.1
Q_2	出口边的值	2.1
Q_a	轴向分量	2.1
Q_b	属于叶片的特性	2.1, 2.2
Q_∞	空泡上游无穷远处的值	6.2
Q_B	空泡的值	6.2
Q_C	临界值, 空穴的量	7.7, 9.14
Q_D	设计点的值	2.4
Q_E	平衡值	6.5
Q_G	气体的值	6.2, 9.11
Q_{H1}	进口边轮毂处的值	2.1
Q_{H2}	出口边轮毂处的值	2.1
Q_i	矢量 Q 的分量	
Q_i	水力系统的 i 部分	8.6
Q_L	饱和液体的值, 流体的值	6.2, 9.11
Q_m	轴面分量	2.1, 2.3
Q_M	平均值或者最大值	3.2, 6.2
Q_N	名义工况或者属于核的变量	3.3, 5.3
Q_n, Q_τ	涡动轨迹的法向和切向分量	10.2
Q_P	表示属于泵的量	9.13
Q_r	半径方向分量	4.4
Q_s	s 方向分量	
Q_{T1}	进口边轮缘处的值	2.1
Q_{T2}	出口边轮缘处的值	2.1
Q_V	饱和蒸气的值	5.2
Q_x	x 方向分量	3.2, 10.2
Q_y	y 方向分量	3.2, 10.2
Q_θ	圆周方向分量	2.1