

Fundamentals of Cavitation in
Pumps

潘中永 袁寿其 编著

泵空化基础

 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

Fundamentals of Cavitation in
Pumps

泵空化基础

潘中永 袁寿其 编著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS
镇江

图书在版编目(CIP)数据

泵空化基础 / 潘中永, 袁寿其编著. — 镇江: 江苏大学出版社, 2013. 4

ISBN 978-7-81130-448-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 060245 号

泵空化基础

BENKONGHUA JICHU

编 著/潘中永 袁寿其

责任编辑/汪再非 张小琴 郑晨晖

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/787 mm×1 092 mm 1/16

印 张/31

字 数/820 千字

版 次/2013 年 4 月第 1 版 2013 年 4 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-81130-448-0

定 价/80.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

Preface to *Fundamentals of Cavitation in Pumps*

It is a pleasure for me to commend to the reader this scholarly book, “Fundamentals of Cavitation in Pumps”. I have had the pleasure of working with the authors, Pan Zhongyong and Yuan Shouqi, on several other projects over the past few years. I have also visited the Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology at Jiangsu University, P R China, and have been deeply impressed by their collective knowledge of cavitation and turbomachinery and by their enthusiastic pursuit of new knowledge. Indeed, it is clear that this Research Center at Jiangsu University has become an important national and international resource for turbomachinery expertise and that its publications will be increasingly valuable in the years to come.

Therefore, despite my inability to read Chinese, I am confident that this exposition on cavitation and its effects in pumps is thoughtful, knowledgeable and insightful. The list of contents clearly includes an appropriate listing of the relevant topics. I am confident that the book will become an important reference for Chinese speaking engineers and scholars around the world. I recommend it very enthusiastically.



Christopher Earls Brennen

**Hayman Professor of Mechanical Engineering, Emeritus,
California Institute of Technology, February 2013.**

作者的话

很早就有写一本有关泵空化知识著作的想法。因为自 10 多年前开始系统地接触泵空化以来,笔者一直没有发现适合国内初学者使用的介绍泵空化知识的书籍,泵空化的内容散落在各种著作和论文中,没有系统性;之所以这些年一直没有写,主要是因为每次提笔时,总感觉自己具备的相关知识不够且有些方面还不知甚解,担心没有透彻地理解前辈的研究成果会对读者产生误导。

最近几年,很多年轻的科研工作者以及在读研究生在研究泵空化的过程中遇到了笔者 10 余年前同样的困惑,正是因为没有系统的泵空化领域的参考资料,他们在研究的起步阶段很难着手。同时,江苏大学相关领导和同仁也建议系统地总结一下泵空化方面的相关内容,特别是研究团队去年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),笔者深感有责任有义务将泵空化基础部分整理出版。在前辈的鼓励以及年轻教师和研究生的期待下,耗时近 3 年,本书终能成稿。成稿后承蒙各位前辈以及一些研究生进行审阅,他们对书稿中论点的指导和出现异议的宽容令人感激和释然,于是笔者不再诚惶诚恐,最终决定出版该书。

自从 1891 年以来,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重大问题之一。本书对空化基础进行阐述,全书分为 4 篇 16 章,各篇内容之间既相互独立又相互联系,这有利于读者清晰地了解本书的结构和内容并根据自己的需求进行取舍阅读。

在第 1 篇中,对各种水力机械内不同空化形式的介绍主要是为了使读者更清晰地了解空化的本质特性及其物理特征,其微观物理特征就是空泡、空穴和旋涡 3 种形式。

第 2 篇主要介绍空化对泵外特性的影响,空化会导致泵扬程和效率等性能降低。诱导轮是改善泵吸入性能的重要水力部件,因此第 2 篇利用较大的篇幅介绍诱导轮的理论与设计。

第 3 篇介绍空化破坏,包括空化破坏的表现、机理以及与之相关的空化振动与空化噪声,还有空化破坏的预测和诊断等方面的内容。该篇内容是最近几年刚刚发展起来的,因此既不完善也不是特别清晰明了,关于空化破坏的研究还有很长的路要走。

第 4 篇主要介绍现代空化计算及泵空化不稳定性。基于 CFD 技术的现代空化计算是当前空化研究最活跃的领域,空化研究的国际专题会议每隔 3~4 年召开一次,以 CFD 技术为基础的空化计算文献瀚若烟海,本书仅对现代空化计算的一些基础知识进行介绍;水力机械空化不稳定性分析是现代空化研究的另外一个重要方向,其研究主要是基于一些经典的数值解析方法和现代测试技术,书中主要对航天飞机主发动机(SSME)涡轮泵诱导轮空化不稳定性的形式、经典计算以及部分试验方法进行了介绍。

本书参考了大量的英文和日文文献,对极少数专有名词的翻译,笔者没有采用中文

的传统翻译方法,而是借用了日语汉字,这部分借用的日语汉字全部来自于大阪大学辻本良信教授所著的相关文献。

2004年学校领导和前辈促成了与日本科学技术振兴机构(JST)的合作研究,正是这次合作机会使笔者对水力机械专业有了新的认识,并对水力机械内部流动的一些更深层次的知识产生了浓厚的兴趣。这里特别提出对在日本工作期间日方责任教授三重大学陈鹏先生以及株式会社エクストラネット・システムズ董事长山本隆義先生的钦佩和尊崇,他们的敬业精神无时无刻不激励着笔者,这种激励正是本书终能出版的动力所在。

这次非常荣幸地邀请到美国加州理工学院前副校长 Christopher Earls Brennen 教授为本书作序,并得到北京大学“千人计划”学者、英国华威大学李胜才教授以及日本流体力学部门编辑委员会委员长大阪大学辻本良信教授的帮助和鼓励,在此向水力机械空化领域的3位前辈致以最诚挚的谢意。

此外,河海大学王惠民教授在百忙之中对本书原稿进行审阅并提出了中肯的意见和建议,特此致谢。江苏大学流体机械工程技术研究中心研究生曹英杰、谢蓉、李晓俊、刘威、李俊杰、李帅、陈士星、吴涛涛、潘希伟、张大庆、黄丹、申占浩等同学在文字编辑、图形绘制以及数据处理等方面做了大量的工作,非常感谢他们。在编辑出版过程中,得到江苏大学出版社编辑林卉、汪再非、张小琴以及郑晨晖的热情关心和帮助,在此一并表示感谢。

由于本书内容较多且限于笔者能力和知识水平,必然有谬误之处,恳请读者批评指正。

符号表

英文字母	释义	出现章节
a	管道(路)内的声速	8.2,9.4,14.3
a	正交化的空穴体积	15.5,15.6
a	管道(路)半径	16.1,16.3
A	空泡群的尺寸	4.1
A	过流断面面积	5.1,6.2,8.3,16.1
AM	动量矩	15.9
b	叶轮叶片宽度	5.1
b	空穴厚度	4.2,14.2,15.7
b_{ks}	固载噪声加速度	8.2,8.3
B	热力学空化系数 V_B/V_L	5.7,13.3
$BPML$	叶片流道调制能级	10.3
B_1	$\Delta H=1\text{ m}$ 时的 B 值	4.1,5.7
c	叶栅或者翼型的弦长、叶片长度	2.2,6.5,7.1,15.7
c	声速	16.1
c_u	弦长在圆周方向的投影	15.2
c_{PL}	液体的比热	4.1,5.7,11.2
c_∞	介质仅为流体的环境中的声速	16.1
C	吸入比转速	1.2
C	转子动力学阻尼	13.2
C	(元件、部件的)柔性(度)	16.3,16.7,16.8
C_a	对应 σ_a 的吸入比转速	5.5
C_b	对应 σ_b 的吸入比转速	5.5
C_D	阻力系数	4.2
C_i	对应 σ_i 的吸入比转速	5.5
C_L	升力系数	4.2
C_p	压力系数	1.2,10.1,14.2
C_{p^*}	一阶已知常数	4.1
C_{pmin}	最小压力系数	1.2,4.1,8.3

CR	空化抵抗	9.1
d	轴径,外圆直径	1.2,5.1
d	叶片厚度与叶片法向间距之比	4.2
d_1	进口平均有效直径,进口计算直径	5.1
d_2	出口平均有效直径,出口计算直径	5.1
D	孔径,内圆直径,流动或者几何特征尺寸	1.2,4.1
D_0	叶轮进口当量直径	5.1
D_1	叶轮叶片进口边与前盖板交点处的直径	1.2,5.1
D_{c1}	进口过流断面轴面截线中点处的直径	5.1
D_{c2}	出口过流断面轴面截线中点处的直径	5.1
D_d	泵出口法兰直径	15.9
D_{ei}	孤立诱导轮的当量直径	6.5
D_s	泵进口法兰直径	15.9
D_r	矩阵 T 的行列式	16.3
e	应变	11.4
E	杨氏弹性模量	8.2,9.5,16.1
E	比动能	11.2
E_c	空化的排移功	15.9
E_{pot}	空泡破裂前后势能差	8.3,9.3
E_R	空化侵蚀速度	8.3,9.4,9.5,10.1
f	翼型骨线的挠度	6.5
f	体积力	14.1
f	损失系数,摩擦系数	13.3,16.1,16.7
f	频率,空穴振荡频率 $f=\omega/2\pi$	8.2,8.3,15.1
f_N	转频,轴频	8.2,10.3,15.2,15.9,15.10
F	力	13.2,14.2
F_{cor}	液体的腐蚀系数	9.4
F_H	水力不平衡力	13.2
F_{Mat}	材料的抗空化系数	9.4
F_s	材料抗空化疲劳强度	9.5

g	重力加速度	5.1
g_s	g 在 s 方向的分量	16.1
$G+1$	泵增益	16.8
$G_M(f)$	解调谱	10.3
h	扬程损失	5.3, 6.2, 13.3
h	比焓	11.2, 14.1
h_0	总比焓	11.2
h^*	压力头	16.1
H	材料硬度	9.5
H	扬程	1.2, 5.1
\mathbf{H}	基于 \tilde{p}, \tilde{Q} 的状态转移矩阵	16.7
H_I	第 I 临界空化点 σ_1 对应的扬程	5.5
H_{II}	断裂空化点(第 II 临界空化点) σ_b 对应的扬程	5.5
HCI	空化液力强度	9.1
H_s	装置扬程, 阻力扬程, 系统扬程	5.3
H_T	与热力学特性有关的流体固有性质	4.1
i	流体内能	11.2, 14.1
i	-1 的平方根, 空间域的虚数指数	15.6, 15.7
I	声冲击	8.3
I	惯性矩	14.2
I_p	泵阻抗	16.5
j	-1 的平方根, 时间域内的虚数指数	15.6, 15.7, 16.2
k	转子动力学刚度	13.2
k	湍流动能	12.3, 12.5
k_H	量纲一的水力不平衡力	13.2
k_1	正交化的衰减速度	15.7
k_L	液体热传导率	4.1
K	湍流的平均动能	12.5
K	空化柔度	15.1
$K_{D,11}$	诱导轮当量直径速度系数	6.5
K_G	气体常数	4.1

l	空穴长度与翼型弦长比值 $l=L/c$	4.2,15.4
l	(诱导轮)轴向长度,管道(路)长度	7.1,14.3,15.9,16.3
l	测量点到空泡(空穴)中心的距离	8.3,15.9
l_s	平均空穴长度,定常空穴长度	15.1,15.6,15.7
l_{shd}	诱导轮轮箍长度	7.1
l_m	混合长度	12.4,12.5
L	空穴长度或流道长度	3.1,6.3,8.3,9.4,10.1,15.2, 15.4,15.6,15.7
L	气化潜热	4.1,5.7
L	惯性	15.9,16.3,16.7
L_d	翼型进口边与上游测试面、管路进口或计算基准面间的距离	15.1,15.7,15.9
L_t	翼型骨线的长度	7.2,7.3
$L_{1,exp}$	叶轮预期寿命	10.1
L_p	声压	8.2
L_S	声级测量面	8.2
L_w	声功率	8.2
m	综合参数	6.2
m	质量	9.5,14.1
m	质量流量	16.3
m_G	空泡内气体质量	4.1
M	转子动力学附加质量	13.2
M	质量流量增益系数	15.5
M	强迫扰动的模数	15.9
Ma	马赫数	14.3,16.3
MDE	(材料的)平均侵蚀深度	9.5
n	叶栅内两叶片间法向间距	4.2
n	泵轴转速	1.2
n	表面法向坐标	14.1
n_0	空化区、回流涡(等不稳定流动)数目	15.2,15.9,15.10
N	量纲一的比转速	5.1
N	系统的维数	16.2

\dot{N}_E	空化事件发生率	8.3
$N(R_N)$	空化核数量密度分布函数	2.1
$NPSP$	净正吸入压力	1.2
$NPSE$	净正吸能	1.2
$NPSH$	净正吸头	1.2
$[NPSH]$	许用净正吸头	5.4
$NPSHA$	装置净正吸头,有效净正吸头	5.3
$NPSH_b$	断裂工况下的 $NPSHA$ 值	8.3
$NPSH_i$	空化初生时的 $NPSHA$ 值	9.4
$NPSHR$	泵净正吸头,必需净正吸头	5.3
$NPSH_x$	x 为数字,对应扬程下降 $x\%$ 时的 $NPSHA$ 值	5.4,8.3
n_s	比转速	5.1
p	压力,压力水头	1.2,5.3,11.1,16.1
p_1	基准静压力,泵进口压力	1.2
p_A	辐射声压,液载(噪声)声压	8.3
p_{A0}	背景噪声声压	8.3
p_{CA}	空化噪声声压	8.3
p_i	冲击压力	9.3,9.4
p^T	总压	1.2,16.2,16.3
p_s	声级	8.3
p_v	汽化压力、蒸气压力、饱和蒸气压力	1.2,5.3
P	功率	5.1,8.2,15.9
P	压力 p 的定常平均值	12.1
P_{ER}	侵蚀比功率	9.4,10.1
q	热量	11.2,14.1
\bar{q}^n	波动量矢量	16.3
Q	体积流量	5.1,16.7
Q_{SF}	进口无冲击流量	9.2

r	透平机械内的径向坐标	4.2
r_H	反射半径	9.4
r_x	叶轮与声测量传感器间的距离	9.4
R	空泡半径	4.1, 8.3
R	透平机械的半径尺寸	5.6
R	(系统部件的)抵抗	15.9, 16.3, 16.7
R_0	空化核(空泡)初始半径	4.1, 14.2
R_{le}	诱导轮进口边修圆半径	7.3
R_e	空泡破裂后半径	9.3
R_0	空泡破裂前半径	9.3
R_H	头型半径	4.1
R_m	抗张强度	9.5
R_N	空化核半径	2.1
R_d	轮毂比(轮毂直径与轮缘直径的比值)	6.2, 7.1
Re	雷诺数	1.2, 5.1, 15.1
s	叶栅稠密度	2.2, 7.1, 13.3
s	沿流动方向的坐标	4.1, 16.1
s	空化图像灰度标准差	10.3
s	扰动波长	15.5
S	量纲一的吸入比转速	1.2, 5.6
S	导程	6.2, 6.5
S'	诱导轮叶片螺距 $S' = S/Z$	7.1
S	吸声表面积	8.2, 9.4
S_E	动能源项	11.2
S_h	焓源项	11.2
S_i	内能源项	11.2
S_L	诱导轮轮缘长径比	7.1
S_M	动量源项	11.2
St	斯特劳哈尔数	8.3, 15.1, 15.7
t	叶栅节距	2.2, 10.1, 15.1, 15.2, 15.5, 15.7

t	时间	4.1, 16.1
T	温度	4.1, 11.2
\overline{T}	黏性流体对旋转粒子的转矩	14.1, 14.2
T_i	湍流强度	12.1
T_{ij}	状态转移矩阵元	16.3
\mathbf{T}	基于 \tilde{p}^T, \tilde{m} 的状态转移矩阵	16.3
\mathbf{T}^*	基于 \tilde{p}, \tilde{m} 的状态转移矩阵	16.3
\mathbf{TP}	泵的状态转移矩阵	16.5
u	s 或者 x 方向速度, 圆周方向速度	11.2
u_1	对应直径 d_1 处的圆周速度	5.1, 5.3, 6.5
u_2	对应直径 d_2 处的圆周速度	5.1, 5.3
u_τ	摩擦速度	12.4
U	对应直径 D_1 处的圆周速度	1.2
U	上游来流速度, 基准速度, 特征速度	4.1, 8.3, 15.1
U	速度 u 的定常平均值, 平均流动速度尺度	12.1
U_R	在极限抗张强度内的变形功	9.4, 9.5, 10.1
v	非旋转坐标系内的流体速度, 流体绝对速度, 方向速度	11.2
V	体积	5.1, 5.3, 8.3, 16.3
V	速度 v 的定常平均值	12.1
V_c	空穴体积	8.3, 15.1, 15.5, 16.1
w	旋转坐标系内的流体速度, 流体相对速度, z 方向速度	2.2, 5.3, 6.2, 11.2, 14.3
W	速度 w 的定常平均值	12.1
WD	诱导轮进口段楔形度	7.2
We	韦伯数	4.1
x	位移	13.2
y	位移	13.2
z	高度, 位置水头	5.3
z	复数坐标 $z = x + iy$	15.7

Z	不做特别说明时表示叶片数	16.8
Z_R	叶轮叶片数	4.1, 8.3, 16.5, 15.10
Z_s	压水室(吸水室)叶片(流道)数	15.10

希腊字母	释义	出现章节
α	(对叶栅)冲角;(对翼型)攻角	2.2, 15.5, 15.1
α	含气率, 含气量	4.1, 10.1, 16.7, 16.10
α_3	蜗壳螺旋角	5.1
α_L	液体的热扩散率	4.1
α_T	总吸声系数	9.4
β'	液流角	2.2
β	叶片安放角	2.2
β	临界时间比 $\Omega\varphi t_{crit}$	4.1
β_s	叶片安装角	2.2, 6.5, 15.6, 15.7
β_Σ	叶片弯角 $\beta_2 - \beta_1$	6.5
γ	气化蒸气/液体界面的表面张力	2.1, 4.1, 14.1, 14.2
γ	锥角	7.1
γ	诱导轮流道当量扩散角	7.2
γ	单元回转流面偏角	13.3
γ	空气的比热比	16.7
γ_c	诱导轮叶片前倾角	7.1
γ_n	波数	16.3
Γ_t	湍流扩散率	12.5
δ	轮缘间隙	2.2, 7.1
δ	管道壁厚	16.1
δH	用于确定 σ_n 的扬程降低值	5.4
δL	空穴长度的波动分量	8.3
ΔH	第 I 临界空化工况与第 II 临界空化工况间的扬程差(即用于确定 σ_b 的扬程降低值)	5.5
ΔL	声级差	8.2
Δp	压力脉动值	8.2

$\Delta\varphi$	诱导轮叶片进口边修圆包角	7.3
η	效率	5.1
η_h	水力效率	5.1, 5.7
η_m	机械效率	7.4
θ	相位差	15.7
θ	圆周方向角度坐标	15.9
θ	约化频率	16.3
Θ	Rayleigh-Plesset 方程中的热项	4.1
Θ_u	表示侵蚀的相似参数	10.1
ϑ	大涡特征速度	12.1
κ	叶片进口边曲率半径	4.2
κ	Von Karman 常数	12.3
λ	叶轮叶片进口速度不均匀系数	5.3, 6.5
λ	惯性长度	16.7
μ	空化图像灰度平均值	10.3
μ	第一(动力)黏度	11.4
μ_t	湍流动力黏度, 涡黏度	12.3
ν	运动黏度	1.2, 4.1, 5.1
ν_t	湍流运动黏度, 涡运动黏度	12.3
ρ	密度	1.2, 4.1, 11.1, 16.1
σ	应力	9.4
σ	滑移系数	1.2, 5.1
σ	空化数	1.2
σ_1	第 I 临界空化数	5.5
σ_a	扬程下降百分比空化数	5.5
σ_b	断裂空化数, 第 II 临界空化数	4.2, 5.5
σ_c	阻塞空化数	4.2, 16.8
σ_d	消失空化数	2.1
σ_i	初生空化数	1.2
σ_t	Prandtl/Schmidt 数	12.3
σ_{TH}	Thoma 空化系数	1.2
Σ	空泡生长的热力学参数	4.1
Σ^*	修正后的热效应参数	4.1

τ	翼型、叶片厚度	2.2, 5.4, 6.5, 7.1
τ	黏性切应力	11.2, 12.2
φ	包角	7.5, 14.3
φ	流动特征	12.1
φ_0	隔舌安放角	5.1
ϕ	流量系数	1.2, 5.1
ϕ	流动问题变量	11.1
ψ	扬程系数 $\psi = gH/u_2^2$	5.1
ψ_s	静压系数	15.2, 15.5, 15.10
ω	波动或者其他激励频率 $\omega = 2\pi f$	15.1, 15.6, 15.7, 16.2, 16.7, 16.8
ω_v	涡空穴传播速度, “定子”转速	15.10
Φ	耗散函数	11.4
Φ	流动特征 φ 的平均量	12.3
Φ	速度势函数	13.1
Ω	轴转速	5.1, 13.2

下标	释义	出现章节
0	初始值, 叶轮叶片进口稍前位置	4.1, 5.3
0	关死点的值	5.1
0	额定点的值	5.5
0	流动无撞击进入叶轮	6.2
0	参照值	8.2, 8.3, 9.4
1	叶轮叶片进口边的值	1.2
2	叶轮叶片出口边的值	1.2
3	压水室进口的值	5.1
3	扬程下降 3% 对应的值	5.6
∞	空泡外无穷远处的值	4.1
A	A 声级	8.2
AV	平均值	6.5, 15.6
B	空泡或空化区的值	4.1, 5.7
B	回流区的值	6.2

BEP	最优效率点	5.1,10.1
c	诱导轮离心泵中离心叶轮的值	6.3,7.2
c	属于空穴(表面)的量	15.6
cri	临界值	4.1,6.2,8.3,15.7
d	设计点的值	2.2,5.1,15.9
d	下游	15.9,16.7
D	主流的值	6.2
E	平衡值	8.3
F	顺流流动的值	6.2
G	气体的值	4.1,14.2,16.3
h	轮毂	1.2,5.1
i	空化初生	7.2
i	水力系统的 i 部分	16.8
ind	诱导轮的值	6.3,15.2,16.7
j	叶轮进口	6.2
L	液体的值	4.1,5.6,13.3,14.2,16.1,16.3
m	轴面分量	1.2
m	两相混合流动的值	14.2
m (或 n)	叶片标号	15.7
M	模型的值	5.6
max	最大值	2.2
min	最小值	1.2
N	属于(空化)核的量	2.1
NP	无预旋	5.6
opt	最优值	7.2
p	两相流中属于粒子的量	14.2
P	表示属于泵或者泵系统某元件的量	8.2
PS	叶片工作面	10.1,13.3
ri	诱导轮半径方向	6.2
RB	对应泵进口回流初生时的值	8.3
RMS	均方根值	4.2,8.2,10.3,12.3
s	定常分量	15.6