

离心泵数值模拟 应用技术

司乔瑞 袁建平 裴吉陆 荣
——
等编著

NUMERICAL
SIMULATION
OF
CENTRIFUGAL
PUMPS

A TECHNICAL GUIDE



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

离心泵数值模拟 实用技术

司乔瑞 袁建平 裴吉陆 荣
等编著



Numerical simulation of
centrifugal pumps
A TECHNICAL GUIDE

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目(CIP)数据

离心泵数值模拟实用技术 / 司乔瑞等编著. — 镇江:
江苏大学出版社, 2018. 1
ISBN 978-7-5684-0761-8

I. ①离… II. ①司… III. ①离心泵—数值模拟
IV. ①TH311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 019772 号

内容提要

离心泵广泛应用于国民经济各领域,对其进行研究有助于提高我国通用机械的设计制造水平.数值模拟技术近年来得到快速的发展,作为理论分析和实验研究的重要补充,将其用于离心泵技术研究具有广泛的应用前景.本书是作者多年来从事离心泵数值模拟工作的理论概括、技术积累和经验总结.全书共 10 章,内容丰富,实用性强,主要包括离心泵基础理论、离心泵内部不稳定流动现象、过流部件水力设计、离心泵 CFD 理论与应用、离心泵性能优化设计、离心泵空化和气液两相流数值模拟、离心泵流动诱导噪声数值模拟、离心泵模态计算和流固耦合数值模拟、离心泵水力实验等内容.

本书可作为从事叶片泵设计人员的入门教材,也可作为从事离心泵研究、设计、实验及应用等领域人员的参考资料.

离心泵数值模拟实用技术

Lixinpeng Shuzhi Moni Shiyong Jishu

编 著/司乔瑞 袁建平 裴 吉 陆 荣 等

责任编辑/孙文婷

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/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/句容市排印厂

开 本/787 mm×1 092 mm 1/16

印 张/16

字 数/382 千字

版 次/2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0761-8

定 价/50.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

序 言

作为重要的能量转换设备及流体输送装置,离心泵广泛应用于灌溉、石化、环保、水利、冶金、运输、海洋工程、航天动力和核电等国民经济重要部门.随着我国对产品节能、环保等指标的不断重视,离心泵效率的提高、可靠性的增强、振动和噪声的降低等对我国经济发展具有重要意义.近年来,随着计算机技术的快速发展及计算流体力学(CFD)、结构有限元分析(FEA)、计算声学(CA)等数值求解方法的逐步完善,采用数值模拟方法进行离心泵内部流场计算、结构强度分析、振动和噪声预测已经成为一种发展趋势.借助数值模拟方法可以取代传统模型实验的多方案比较和优选,大大缩短泵的开发周期,降低研发成本,提高泵的设计质量.采用正确的数值模拟方法并提高其计算精度,对缩短离心泵产品开发周期具有重要的指导作用.

本书是作者数年来科学研究的总成,内容多来自于科学研究中的亲身实践,具有理论与实践相结合的特点.首先,在整合专业理论知识的基础上,对离心泵的基础理论、内部不稳定流动现象和传统水力设计方法进行详细介绍与论述.然后,结合采用数值计算软件如 CFturbo, Isight, Pumplinx, CFX, ACTRAN, ANSYS Workbench 等进行离心泵数值计算的多个案例分析,对 CFD 技术在离心泵性能优化设计方面的应用、离心泵空化和气液两相流数值模拟、离心泵流动诱导噪声数值模拟、离心泵模态和流固耦合数值模拟等给出了具体方法和详细步骤.最后,阐述了利用离心泵水力实验结果对数值模拟进行验证及利用实验数据改进数值模拟方法和提高数值模拟精度的方法.

本书的研究工作是在国家自然科学基金项目(51509108, 51779107)、江苏省自然科学基金项目(BK20150516)、中国博士后科学基金项目(2015M581735, 2016T90422)、江苏大学高级人才基金资助项目(15JDG048)和“青年骨干教师培养工程”项目的资助下展开的.

在本书编写过程中,江苏大学党委书记、国家水泵及系统工程技术研究中心主任袁寿其研究员给予了大力支持,他不仅在技术层面上进行把关定向,还对全书进行了系统、全面、认真的审核;同时,林刚、张克玉、唐苑峰、顾延东、曹睿、崔强磊、盛国臣等研究生在本书的编写过程中做了大量的工作,在此一并表示衷心的感谢.

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不当之处,敬请读者批评指正.

编著者

2017 年 9 月

主要符号说明

一、英文字母符号

符号	物理意义	单位	符号	物理意义	单位
B	磁感应强度	T	n	转速	r/min
b_1	叶轮进口宽度	mm	n_s	比转速	
b_2	叶轮出口宽度	mm	P	轴功率	kW
b_3	蜗壳进口宽度	mm	P_{ref}	参考声压	Pa
C	空化比转速		p	压力	Pa
D_1	叶轮进口直径	mm	Q	流量	m ³ /h
D_2	叶轮出口直径	mm	Q_d	设计流量	m ³ /h
D_3	蜗壳基圆直径	mm	R_2	叶轮出口半径	mm
D_d	蜗壳出口直径	mm	Re	雷诺数	
D_j	叶轮进口当量直径	mm	R_H	霍尔系数	
D_s	泵进口直径	mm	S	流道面积	m ²
d	最小轴径	mm	S_1	实测转差率	
d_h	叶轮轮毂直径	mm	s	叶片流面厚度	mm
E	电动势	V	s_m	叶片轴面厚度	mm
F_r	径向力	N	s_u	叶片圆周厚度	mm
f	频率	Hz	u_1	进口圆周速度	m/s
g	重力加速度	m/s ²	u_2	出口圆周速度	m/s
H	扬程	m	V_{ims}	振动烈度	m/s
H_0	空化前扬程	m	v_1	叶片进口绝对速度	m/s
H_d	设计扬程	m	v_2	叶片出口绝对速度	m/s
H_t	理论扬程	m	v_{m1}	进口轴面速度	m/s
I	电流	A	v_{m2}	出口轴面速度	m/s
k_1	速度系数		v_{u1}	进口绝对速度圆周分量	m/s
M	扭矩	N·m	v_{u2}	出口绝对速度圆周分量	m/s
$(\text{NPSH})_a$	有效空化余量	m	w_1	叶片进口相对速度	m/s
$(\text{NPSH})_c$	临界空化余量	m	w_2	叶片出口相对速度	m/s
$(\text{NPSH})_r$	必需空化余量	m	Z	叶轮叶片数	

二、希腊字母符号

符号	物理意义	单位	符号	物理意义	单位
α_0	蜗壳隔舌螺旋角	(°)	η_h	水力效率	%
β_1	叶片进口安放角	(°)	η_m	机械效率	%
β_2	叶片出口安放角	(°)	η_v	容积效率	%
β_1'	进口液流角	(°)	ν	运动黏性系数	m ² /s
β_2'	出口液流角	(°)	ρ	密度	kg/m ³
$\Delta\beta_1$	叶片进口冲角	(°)	σ	滑移系数	
$\Delta\beta_2$	叶片出口冲角	(°)	ϕ	叶片包角	(°)
δ_1	叶轮表面粗糙度	μm	ψ_1	叶片进口排挤系数	
ϵ	介电常数		ψ_2	叶片出口排挤系数	
η	总效率	%	ω	角速度	rad/s
η_d	设计流量下效率	%			

注：书中对符号有注释的优先；多于一个含义的符号在文中另做说明。

第 1 章 绪论

- 1.1 泵的定义和分类 /001
- 1.2 离心泵概述 /002
 - 1.2.1 离心泵的定义 /002
 - 1.2.2 离心泵的工作原理 /002
 - 1.2.3 离心泵的分类 /003
 - 1.2.4 离心泵的结构型式 /003
- 1.3 数值模拟技术概述 /004

第 2 章 离心泵基础理论

- 2.1 基本参数 /006
 - 2.1.1 流量 /006
 - 2.1.2 扬程 /006
 - 2.1.3 转速 /007
 - 2.1.4 功率和效率 /007
 - 2.1.5 空化(汽蚀)余量 /007
- 2.2 基本方程 /007
 - 2.2.1 基本方程的推导 /008
 - 2.2.2 基本方程的几点说明 /009
- 2.3 比转速 /009
 - 2.3.1 比转速的推导 /009
 - 2.3.2 关于比转速的几点说明 /010
- 2.4 离心泵特性曲线 /011
 - 2.4.1 离心泵的特性曲线 /011
 - 2.4.2 离心泵特性曲线的形状分析 /012
 - 2.4.3 几何参数对离心泵特性曲线的影响 /014
- 2.5 相似理论 /016
 - 2.5.1 相似理论的基本概念 /016
 - 2.5.2 泵相似定律 /016
 - 2.5.3 泵相似定律的应用 /017
- 2.6 离心泵能量损失 /019
 - 2.6.1 离心泵内的各种损失及泵的效率 /019
 - 2.6.2 离心泵损失的计算 /020

第 3 章 离心泵内部不稳定流动现象

- 3.1 动静干涉 /022
- 3.2 回流 /023

- 3.3 黏性尾流(射流-尾迹) /024
- 3.4 失速 /024
- 3.5 泵空化(汽蚀)理论 /025
 - 3.5.1 泵内空化(汽蚀)的发生过程 /025
 - 3.5.2 离心泵发生空化时的危害 /026
 - 3.5.3 空化(汽蚀)基本方程式 /026
 - 3.5.4 空化(汽蚀)余量计算方法 /028
 - 3.5.5 装置空化(汽蚀)余量计算方法 /030
 - 3.5.6 提高离心泵抗汽蚀性能的措施 /033

第4章 过流部件水力设计

- 4.1 设计参数及其水力结构方案确定 /037
 - 4.1.1 介质的性质 /037
 - 4.1.2 设计流量、扬程 /037
 - 4.1.3 空化(汽蚀)余量的确定 /038
 - 4.1.4 转速、比转速和水力结构的确定 /038
 - 4.1.5 泵效率的预估 /040
 - 4.1.6 确定泵进出口直径 /041
- 4.2 吸水室水力设计 /042
- 4.3 叶轮水力设计 /043
 - 4.3.1 泵轴径和叶轮轮毂直径的初步计算 /043
 - 4.3.2 叶轮主要尺寸的确定方法 /043
 - 4.3.3 叶片绘型 /052
- 4.4 压水室水力设计 /056

第5章 离心泵 CFD 理论与应用

- 5.1 概述 /062
 - 5.1.1 CFD 技术简介 /062
 - 5.1.2 CFD 基础理论和计算方法 /063
 - 5.1.3 常用的 CFD 商用软件 /066
 - 5.1.4 离心泵 CFD 计算中的注意事项 /069
- 5.2 叶轮、压水室水力模型绘制 /074
 - 5.2.1 叶轮水体三维造型 /074
 - 5.2.2 蜗壳水体造型 /077
- 5.3 流体域的网格生成 /079
 - 5.3.1 离心泵几何模型的导入 /080
 - 5.3.2 切分流体域及边界面 /081
 - 5.3.3 生成网格 /084

5.4 CFD 模拟及后处理 /087

5.4.1 求解设置 /087

5.4.2 后处理 /094

第6章 离心泵性能优化设计

6.1 离心泵优化设计理论与实例 /097

6.1.1 能量损失分析法 /097

6.1.2 优化方法简介 /100

6.2 离心泵的参数化设计与造型 /114

6.2.1 CFturbo 参数化设计简介 /114

6.2.2 Pro/E(Creo)和 CATIA 的参数化造型简介 /116

6.3 Isight 参数优化方法介绍 /117

6.3.1 Isight 简介 /117

6.3.2 主要功能 /118

6.3.3 运行界面 /119

6.4 基于 Isight 的泵智能优化平台搭建与优化实例 /121

6.4.1 Isight 组件 /121

6.4.2 应用程序集成 /129

第7章 离心泵空化和气液两相流数值模拟

7.1 纯水条件下基于 CFX 的离心泵内流数值模拟 /132

7.2 离心泵空化数值模拟 /140

7.2.1 基于简化 R-P 方程的空泡动力学模型 /140

7.2.2 基于 CFX 的离心泵空化数值模拟 /140

7.2.3 空化模型的修改 /144

7.3 来流含气条件下离心泵内流数值模拟 /145

7.3.1 常用的气液两相流数值模拟方法和模型 /145

7.3.2 基于 CFX 的离心泵气液两相流数值模拟 /146

第8章 离心泵流动诱导噪声数值模拟

8.1 离心泵噪声和数值模拟方法 /156

8.1.1 离心泵噪声的来源及传播模型 /156

8.1.2 离心泵流动诱导噪声数值求解方法 /157

8.1.3 ACTRAN 软件简介 /159

8.2 离心泵水动力学噪声数值模拟 /159

8.3 离心泵流动诱导结构辐射噪声数值模拟 /179

第9章 离心泵模态计算和流固耦合数值模拟

9.1 模态分析理论与计算 /198

9.1.1 模态分析理论 /198

9.1.2 模态分析中的几何体 /199

9.1.3 载荷和约束及求解结果 /199

9.1.4 模态分析过程 /200

9.2 离心泵流固耦合理论 /205

9.2.1 流体动力学理论 /205

9.2.2 固体弹性结构的有限元理论 /206

9.2.3 流固耦合求解理论依据 /206

9.3 基于 ANSYS Workbench 平台的离心泵流固耦合数值计算 /207

9.3.1 结构域设置 /208

9.3.2 流体域设置 /212

9.3.3 流固耦合计算结果后处理 /215

第10章 离心泵水力实验

10.1 实验种类和基本装备 /219

10.2 泵实验中参数的测量与计算 /223

10.2.1 扬程的测量与计算 /223

10.2.2 流量的测量与计算 /225

10.2.3 轴功率的测量与计算 /226

10.2.4 转速的测量与计算 /228

10.2.5 效率的测量与计算 /231

10.2.6 空化余量的测量与计算 /231

10.2.7 振动和噪声信号的测量与评价 /232

10.3 实验结果的整理 /234

10.3.1 换算为规定转速下的性能 /234

10.3.2 性能曲线拟合 /234

10.3.3 振动噪声评级 /237

10.4 实验数据用于数值模拟 /239

参考文献 /240

第 1 章 绪 论

本章主要介绍泵的定义和分类,并对离心泵和数值模拟技术做简要概述,为采用数值模拟技术进行离心泵研究打下基础.

1.1 泵的定义和分类

泵是以液体作为工作介质进行能量转换的一种机械. 原动机通过泵对液体做功,使其能量(位能、压能、动能)增加,从而使一定体积的液体,由吸水池经泵的过流部件输送到要求的高处或达到要求的压力,完成能量传递. 泵主要用来输送水、油、酸碱液、乳化液、悬乳液和液态金属等液体,也可输送液、气混合物及含悬浮固体物的液体. 泵类装备制造作为科学技术领域基础门类之一,其重要作用已受到国内外的广泛重视,是维护国家经济安全,增强综合国力的基石.

泵按工作原理可分为叶片泵、容积泵和其他类型泵. 在总产值中,叶片泵占 80%,容积泵占 10%,其他类型泵占 10%. 叶片泵是靠叶轮带动液体高速回转而把机械能传递给所输送的液体,一般分为离心泵、轴流泵、混流泵和旋涡泵. 容积泵靠工作部件的运动造成工作容积周期性地增大和缩小而吸排液体,并靠工作部件的挤压直接使液体的压力能增加,一般分为往复泵和回转泵. 其他类型泵有真空泵、射流泵、水锤泵等. 各类泵适用的范围如图 1-1 所示. 泵还可按其他方法进行分类,如:按驱动方法可分为电动泵、汽轮机泵、柴油机泵等;按级数可分为单级泵和多级泵;按用途可分为锅炉给水泵、船用泵、煤化工用泵、计量泵等;按输送液体的性质可分为水泵、油泵、纸浆泵和泥浆泵等;按有无轴结构可分为直线泵和传统泵.

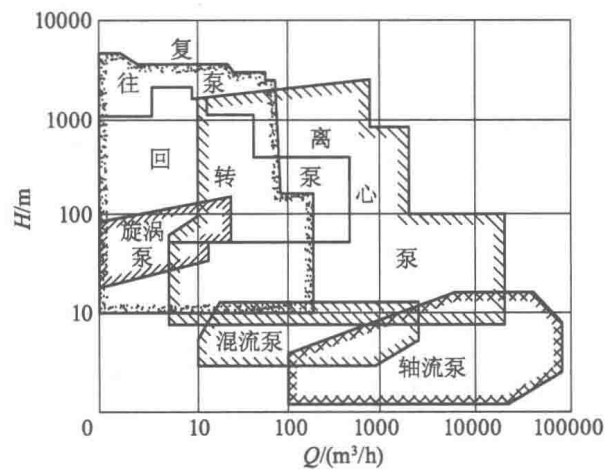


图 1-1 各种泵的适用范围

1.2 离心泵概述

离心泵是应用最为广泛的叶片泵,在国民经济多个领域如工业、农业、能源及军事等方面均发挥着重要的作用。

1.2.1 离心泵的定义

叶轮是叶片泵的核心部件。根据流体从叶轮流出的方向的不同,叶轮可分为离心式、混流式和轴流式三大类。其中,流体流出叶轮的方向垂直于叶轮轴线,即流体沿叶轮半径方向流出的称为离心泵。离心泵是靠叶轮旋转时产生的离心力来输送液体的泵。离心泵叶轮按照有无前后盖板又可分为闭式、开式和半开式,如图 1-2 所示。



图 1-2 离心泵叶轮

1.2.2 离心泵的工作原理

工作时,离心泵叶轮中的流体随着叶轮旋转产生离心力,在离心力的作用下,流体从叶轮流处。流体经过泵的压水室、扩压管,从泵的出口流入泵的外管路中。与此同时,由于叶轮内的流体被抛出,在叶轮中间的吸入口造成了低压,因而泵进口的流体在压力作用下进入叶轮。这样,叶轮在旋转过程中一边不断地吸入流体,一边不断地赋予吸入流体能量,将其抛到压水室,并使其沿扩压管流出泵外(见图 1-3)。

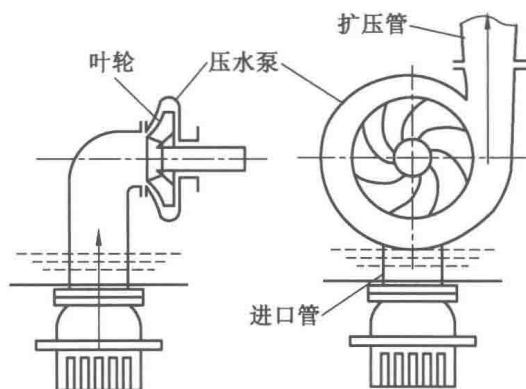


图 1-3 离心泵工作原理

离心泵的基本构造主要包括叶轮、吸水室、压水室(蜗壳、导叶)、挡水圈、泵轴、轴承、密封环、填料函、轴向力平衡装置等。其中,叶轮、吸水室、压水室(蜗壳、导叶)和进、

出口流道称为离心泵的过流部件. 图 1-4 所示为典型的悬臂式单级单吸离心泵的结构图.

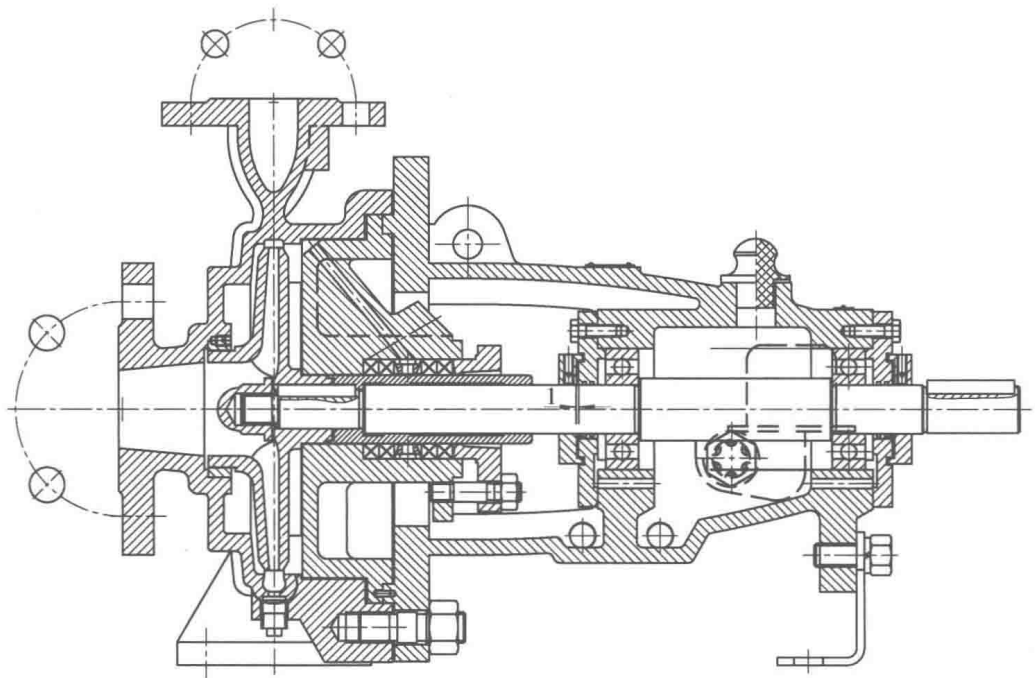


图 1-4 典型悬臂式单级单吸离心泵结构

1.2.3 离心泵的分类

离心泵是工程中应用最为广泛的泵,按其结构特点、使用场合和使用条件等可细分为许多种类,常见的离心泵类型主要有:

- (1) 按叶轮数目分类:单级泵(只有一个叶轮)、多级泵(有两个及以上数目的叶轮).
- (2) 按工作压力分类:低压泵(压力低于 100 m 水柱)、中压泵(压力为 100 ~ 650 m 水柱)、高压泵(压力高于 650 m 水柱).
- (3) 按叶轮吸入方式分类:单吸泵(单侧进水)、双吸泵(双侧进水).
- (4) 按泵轴位置分类:卧式泵(轴处于水平位置)、立式泵(轴位于垂直位置).
- (5) 按压水室类型分类:蜗壳式离心泵、导叶式离心泵.
- (6) 按安装位置分类:陆上泵、潜水泵.
- (7) 按启动时是否需要灌引水分类:普通离心泵、自吸式离心泵.
- (8) 按流体相态分类:纯液相流体离心泵、气液两相流体离心泵、固液两相流体离心泵.
- (9) 按输送液体性质和用途分类:离心水泵、离心式深井泵、离心式油泵、冷凝水泵、锅炉给水泵及其他特殊离心泵等.

1.2.4 离心泵的结构型式

离心泵的结构型式甚多,具体可归结的类型见表 1-1.

表 1-1 典型离心泵结构型式分类



1.3 数值模拟技术概述

数值模拟也叫计算机模拟,其依靠电子计算机,结合有限元或有限容积的概念,通过数值计算和图像显示的方法,达到对工程问题和物理问题乃至自然界各类问题研究的目的。

数值模拟技术诞生于 20 世纪 50 年代,Bruce G. H. 和 Peaceman D. W. 模拟了一维气相不稳定径向和线形流.经过几十年的发展,数值模拟已具有较强的实用性和广泛的应用性.工程技术领域常用的数值模拟方法包括有限单元法、边界元法、离散单元法、有限差分法.数值模拟工作主要包含以下几个步骤:第一,建立反映问题(工程问题、物理问题等)本质的数学模型,具体说就是要建立反映问题各量之间关系的微分方程及相应的定解条件,这是数值模拟的前提.第二,数学模型建立之后,需要解决的问题是寻求高效率、高准确度的计算方法,不仅包括微分方程的离散化方法及求解方法,还包括贴体坐标的建立、边界条件的处理等.第三,在确定了计算方法和坐标系后,就可以开始编制程序和进行计算.在计算工作完成后,大量数据就能通过图像形象地显示出来,这就是模拟工作的后处理。

作为一项综合应用技术,数值模拟对教学、科研、设计、生产、管理、决策等部门都有很大的应用价值,其重要性具体体现在以下几个方面:

(1) 从广义上讲,计算机模拟本身就可以看作一种基本实验.计算机计算离心泵运行过程中内部流场的流动及各种非线性波的相互作用等问题,实际上是求解含有很多线性与非线性的偏微分方程、积分方程及代数方程等的耦合方程组.利用解析方法求解爆炸力学问题是非常困难的,一般只能求解一些很简单的问题.利用实验方法不但费用昂贵,而且只能表征初始状态和最终状态,中间过程无法得知,因而也无法帮助研究人员了解问题的实质.而利用数值模拟在某种意义上比利用理论与实验对问题的认识更为深刻、更为细致,不仅可以了解问题的结果,而且可以随时连续动态地、重复地显示事物的发展,了解其整体与局部的细致过程。

(2) 数值模拟可以直观地显示目前还不易观测到的、说不清楚的一些现象,容易为人所理解并进行分析;还可以显示实验无法看到的发生在结构内部的一些物理现象,如

离心泵空化时空泡间的相互作用,空泡破裂产生的波在介质中的传播过程和对结构的破坏过程.此外,数值模拟可以替代一些危险的、昂贵的甚至难以实施的实验,如反应堆的爆炸事故、核爆炸的过程与效应等.

(3) 数值模拟促进了实验的发展,为实验方案的科学制订,实验过程中测点的最佳位置、仪表量程等的确定提供了更可靠的理论指导,不但有很大的经济效益,而且可以加速理论、实验研究的进程.

(4) 一次投资,长期受益.虽然数值模拟大型软件系统的研制需要耗费相当多的物力和人力资源,但和实验相比,数值模拟软件可以进行拷贝移植、重复利用,并可进行适当修改而满足不同情况的需求.

总之,数值模拟计算已经与理论分析、实验研究一并成为科学技术探索研究的三个相互依存、不可缺少的手段.离心泵是一种广泛应用的通用设备,节能空间巨大,也是国防、水利、核电等领域必备的战略装备,对运行稳定性、可靠性、低振动噪声等要求较高.但由于结构参数众多,且不同参数对泵性能的影响相互制约,传统泵性能优化方法已不能满足现代开发设计泵产品的需要.同时,由于结构复杂,泵内部流动、流动和结构间的相互作用机理尚不完全清楚,还需要深入研究.因此,利用数值模拟技术进行离心泵性能预测、内部流动研究定将成为推动泵技术发展的重要途径.

第 2 章 离心泵基础理论

本章主要介绍离心泵的基础理论知识,包括基本参数的定义、离心泵基本方程的推导和应用、离心泵特性曲线、离心泵相似定律和离心泵内的各种损失.

2.1 基本参数

2.1.1 流量

泵的流量有体积流量和质量流量之分.

体积流量:泵在单位时间内所抽送的液体体积,即从泵的出口截面所排出的液体体积.体积流量一般用 Q 表示,常用单位为 m^3/s , L/s , m^3/h .

质量流量:泵在单位时间内所抽送的液体质量.质量流量一般用 Q_m 表示,常用单位为 kg/s , kg/h .

通常所说的泵的流量是指体积流量,仅在极少数情况下才采用质量流量.它们之间的换算关系为

$$Q_m = \rho Q \tag{2-1}$$

式中: ρ ——液体的密度, kg/m^3 .

2.1.2 扬程

泵的扬程是指单位重量的液体流过泵后其能量的增值,即泵出口处单位重量液体的机械能 E_d 减去泵进口处单位重量液体的机械能 E_s . 扬程用 H 表示,单位是 m ,即抽送液体的液柱高度,习惯简称为米.

$$H = E_d - E_s \tag{2-2}$$

单位重量液体的能量在水力学中称为水头,通常由三部分组成,即压力水头 $\frac{p}{\rho g}$ 、速度水头 $\frac{v^2}{2g}$ 和位置水头 z . 泵出口处单位重量液体的能量为

$$E_d = \frac{p_d}{\rho g} + \frac{v_d^2}{2g} + z_d \tag{2-3}$$

泵进口处单位重量液体的能量为

$$E_s = \frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} + z_s \tag{2-4}$$

泵的扬程为

$$H = \frac{p_d - p_s}{\rho g} + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} + (z_d - z_s) \tag{2-5}$$

式中: p_d, p_s ——泵出口、进口处液体的静压力, Pa ;

v_d, v_s ——泵出口、进口处液体的速度, m/s ;

z_d, z_s ——泵出口、进口到任选测量基准面的距离, m.

泵的扬程表征泵本身的性能, 只与泵进、出口处液体的能量有关, 而与泵装置没有直接关系.

2.1.3 转速

泵的转速是泵转子在单位时间内的转数, 用 n 表示, 单位为 r/min 或 r/s. 转速也可用转子的回转角速度 ω 来表示, 单位为 rad/s.

转速 n 与角速度 ω 的关系为

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2-6)$$

2.1.4 功率和效率

泵的功率通常是指泵的输入功率, 即原动机传递给泵的功率, 由于其是通过泵轴传递给泵的, 故又叫轴功率, 用 P 表示.

除输入功率外, 还有输出功率. 输出功率是指液体通过泵时由泵传递给它的有效功率, 即单位时间内从泵中输送出去的液体在泵中获得的有效能量, 也称水功率, 用 P_e 表示.

因为扬程是泵输出的单位重量液体从泵中获得的有效能量, 所以扬程和质量流量及重力加速度的乘积, 就是单位时间内从泵中输出的液体获得的有效功率, 即

$$P_e = HQ_m g = \rho g QH \quad (2-7)$$

式中: ρ ——液体的密度, kg/m³;

g ——重力加速度, m/s²;

Q ——泵的流量, m³/s;

H ——泵的扬程, m.

输入功率和输出功率是不相等的, 因为泵内有功率损失, 损失的大小常用泵的效率来衡量. 效率用 η 表示, 水泵的效率是泵的输出功率与输入功率之比, 即

$$\eta = \frac{P_e}{P} \quad (2-8)$$

2.1.5 空化(汽蚀)余量

泵空化(汽蚀)余量又叫作净正吸头, 用 $(NPSH)_r$ 表示, 是表示泵空化(汽蚀)性能的主要参数.

$$(NPSH)_r = K_1 \frac{v_1^2}{2g} + \lambda \frac{w_1^2}{2g} \quad (2-9)$$

由式(2-9)可知, 泵空化(汽蚀)余量只与泵进口的运动参数绝对速度 v_1 和相对速度 w_1 有关, 其物理意义表示泵进口部分的压力降.

2.2 基本方程

离心泵把机械能变成液体的能量是在叶轮内进行的. 叶轮带着液体旋转时把力传