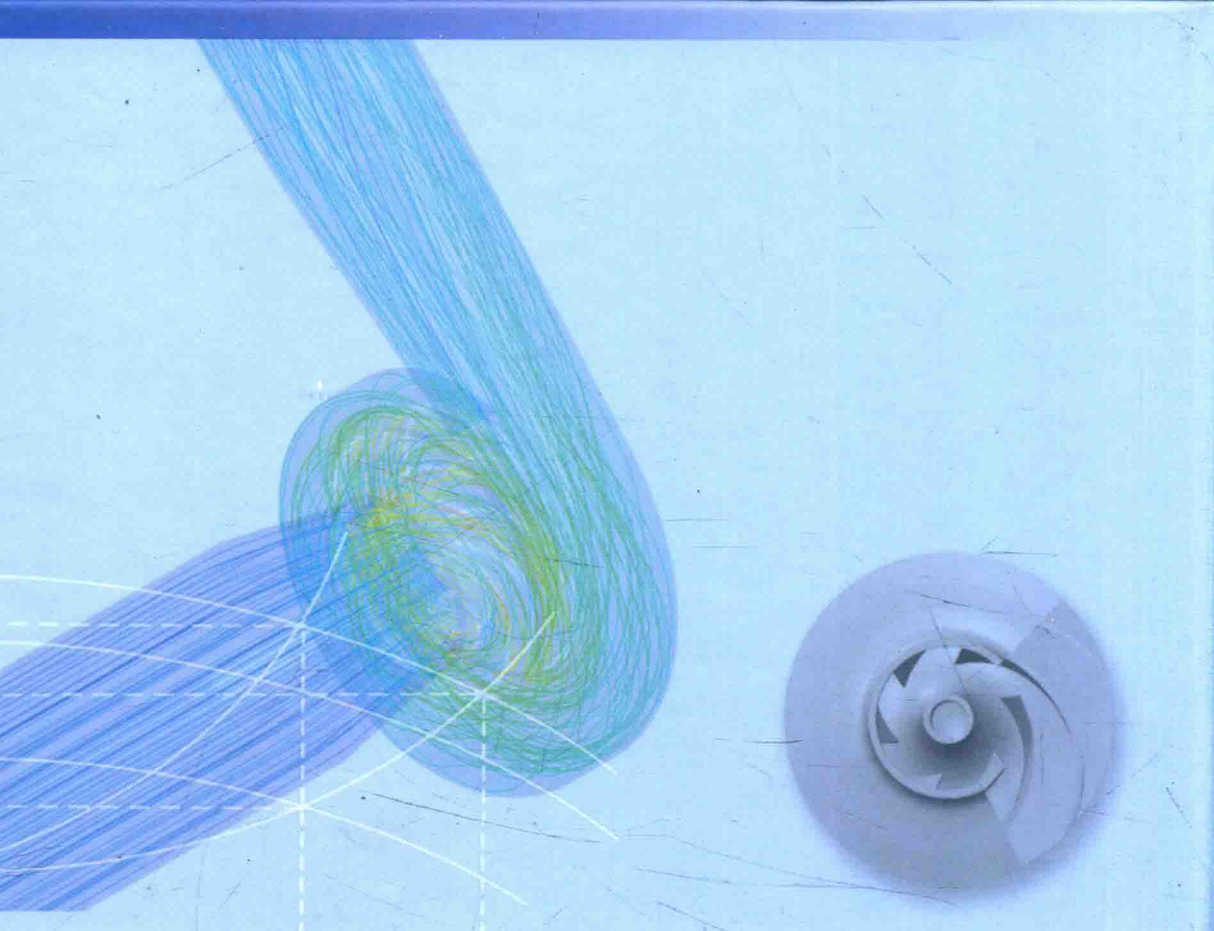




离心泵内部流动与运行节能

袁寿其 袁建平 裴吉 等 著



科学出版社

离心泵内部流动与运行节能

袁寿其 袁建平 裴吉 等 著

国家杰出青年科学基金资助项目(编号:50825902)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较为系统地阐述了离心泵内部流动、水力设计和运行节能的基本理论与最新研究成果,内容包括离心泵内部动静干涉流动特性、进口回流流场特性与控制、失速与驼峰特性、空化特性、流动诱导振动、流固耦合、流动诱导噪声,以及离心泵的多工况水力设计方法与离心泵的运行节能等。本书内容较丰富,几乎涵盖了离心泵内部流动研究的各个方面。

本书适于从事泵设计、制造的研究人员和技术人员参考阅读,还可作为泵相关专业研究生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

离心泵内部流动与运行节能/袁寿其等著. —北京:科学出版社,2015
ISBN 978-7-03-045767-7

I. ①离… II. ①袁… III. ①离心泵-内部-流动(力学)-研究②离心泵-运行-节能-研究 IV. ①TH311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 225180 号

责任编辑:刘宝莉 陈 婕 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年2月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年2月第一次印刷 印张:24

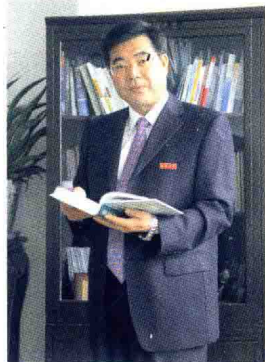
字数:460 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

袁寿其,1963年4月生,上海市人,中共党员,研究员,博士生导师。1995年毕业于江苏理工大学,获博士学位。1995~1996年在英国克兰菲尔德大学(Cranfield University)作高级访问学者。现任江苏大学校长、党委副书记,第十二届全国人大代表,享受国务院政府特殊津贴。



2006年被评为“新世纪百千万人才工程”国家级人选;2007年被列为江苏省“333工程”中青年首席科学家;2010年获何梁何利基金科学与技术创新奖;2010年获中国农业机械发展贡献奖;2012年被评为全国优秀科技工作者;2013年被列为国家万人计划专家。现为国家水泵及系统工程技术研究中心主任、国家重点学科流体机械及工程学科带头人、动力工程及工程热物理国务院学科评议组成员、江苏省“现代农业装备与技术协同创新中心”主任。兼任中国农业工程学会副理事长、中国农业机械学会副理事长兼排灌机械分会主任委员、教育部能源动力类专业教学指导委员会副主任、《排灌机械工程学报》主编、《江苏大学学报(自然科学版)》主编、《农业机械学报》副主编、《农业工程学报》编委会副主任、*International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 编委会副主任、*Journal of Hydrodynamics* 编委、《中国农业科技导报》编委、《机械工程学报》编委等。

长期从事排灌机械和节水装备的科研工作。曾主持完成国家杰出青年科学基金、国家863项目、国家自然科学基金、国家科技支撑计划、江苏省自然科学基金重点项目等国家和省部级课题30余项。获国家科技进步奖二等奖2项,国家教学成果奖二等奖1项,省部级科技进步奖一等奖4项、二等奖13项。申请发明专利112件,其中已授权发明专利30件。在《农业工程学报》、《机械工程学报》等杂志和ASME国际学术会议等上发表论文400余篇,被SCI和EI收录300余篇。出版著作8部。培养和指导博士后19名、博士生39名、硕士生82名,指导的学生论文获全国百篇优秀博士论文1篇、提名奖1篇、江苏省优秀博士和硕士论文9篇。



袁建平, 1970 年 12 月生, 江苏金坛人, 研究员, 博士生导师。分别于 1994 年和 1997 年毕业于甘肃工业大学, 获学士学位和硕士学位; 2008 年毕业于江苏大学, 获博士学位。2010 ~ 2011 年在澳大利亚昆士兰科技大学 (Queensland University of Technology) 作高级访问学者。现任江苏大学流体机械工程技术研究中心主任、国家水泵及系统工程技术研究中心副主任。

长期致力于流体机械及工程学科的科研工作。曾主持或主要参与完成国家科技支撑计划、国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金、江苏省自然科学基金创新学者攀登计划等国家及省部级课题 20 余项。近年来在离心泵内部非定常流动的测试与模拟、离心泵的运行节能关键技术方面做出了一些创新性的工作。作为主要研究人员参与的成果获国家科技进步奖二等奖 2 项, 江苏省科技进步奖一等奖 1 项, 教育部高等学校科学技术进步奖二等奖 1 项, 中国首届研究生教育成果奖二等奖 1 项。在 ASME 国际学术会议、国内核心期刊上发表各类学术论文 80 余篇, 获授权发明专利 8 件。

裴吉, 1984 年 1 月生, 助理研究员, 硕士研究生导师。2013 年获江苏大学流体机械及工程学科博士学位并留校任教。2010~2011 年获国家留学基金 (CSC) 全额资助赴德国杜伊斯堡-埃森大学 (Universität Duisburg-Essen) 涡轮机械研究所攻读博士 (联合培养)。



主要研究方向为泵内不稳定流动、压力脉动特性及流固耦合等。主持国家自然科学基金、江苏省自然科学基金、中国博士后科学基金等项目, 主要参与国家杰出青年科学基金、国家科技支撑计划、江苏省自然科学基金创新学者攀登计划等国家及省部级科研项目 10 余项。获省部级科技进步奖二等奖 2 项。出版学术著作 1 部, 在 *Journal of Fluids and Structures*、*Journal of Fluids Engineering* 等杂志上发表学术论文 20 余篇, 其中被 SCI 检索 13 篇。申请发明专利 15 件, 授权 8 件。

前 言

泵是以液体作为工作介质进行能量转换的一种机械,是依靠液体和机械之间的相互作用而工作的。水泵作为重要的能量转换装置和流体输送设备,广泛应用于国民经济各个领域,凡是有液体流动的地方几乎都有泵在工作,如农业排灌、城市供水、航空航天、核电站、核潜艇、石油、化工、水力发电和各类机械系统,直至城乡人民生活等各方面。据统计,泵的耗油量约占全国总油耗的 5%,耗电量约占全国总发电量的 15%。

离心泵是应用最广和最多的水泵。虽然在过去的半个多世纪里,科研人员对离心泵内部的流动结构和流动规律已有了一些认识,但鉴于离心泵内部流动是复杂的三维非定常流动,存在复杂的流动现象,如叶轮进出口回流、动静部件干涉、空化等,流动结构非常丰富,且许多流动现象的流场结构和产生机理仍不清楚。随着离心泵向大型化和高速化的发展,其安全稳定运行越来越受到重视,防止离心泵机组、系统及泵站的振动与噪声也成为迫切需要解决的问题。另外,目前其水力设计水平已接近国外先进水平。由于制造和工艺技术水平差距,效率比国外先进水平约低 2%~3%,通过泵水力性能的改进设计来提高水泵本身效率的潜力有限,而在离心泵系统的运行效率方面,我国比国外先进水平约低 20%,主要体现在泵与系统的匹配不合理、运行控制方式简单陈旧等。针对这些问题,在国家杰出青年科学基金项目“离心泵基础理论和节能关键技术研究”(50825902)的资助下,项目组对离心泵水力设计优化、内部流动特性和机组运行节能技术等方面进行了长期、系统、深入的研究。本书即为相关研究内容的总结。

全书共 9 章,内容包括离心泵内部动静干涉流动特性、进口回流流场特性与控制、失速与驼峰特性、空化特性、流动诱导振动、流固耦合、流动诱导噪声,以及离心泵多工况水力设计与离心泵的运行节能等,几乎涵盖了离心泵内部流动研究的各个方面。

除本书作者,参与本书撰写的人员有:江苏大学张金凤副研究员、骆寅助理研究员、司乔瑞博士、付燕霞博士和李亚林博士生,上海理工大学阳君博士,浙江理工大学李晓俊博士;此外,书中也包含了国家杰出青年科学基金课题组老师和研究生的部分研究结果,他们是刘厚林研究员、李红研究员、汤跃研究员、潘中永副

研究员、付强副研究员、谈明高副研究员、王勇副研究员、王凯副研究员、倪永燕博士、梁赟博士生、黄萍硕士、祝磊硕士、杨勇硕士、薛菲硕士、刘阳硕士、叶丽婷硕士、金荣硕士、孙威硕士、刘威硕士、徐宇平硕士、秦武轩硕士、熊海芳硕士、许燕飞硕士、赵坤硕士、曹英杰硕士、谢蓉硕士等,在此对他们表示衷心的感谢。同时,也感谢书中参考和引用的大量国内外相关文献的作者。

尽管作者力求审慎,但是由于水平有限,且为阶段性研究结果,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

袁寿其

2015年8月于江苏大学

目 录

前言

第 1 章 引论	1
1.1 离心泵基础	1
1.1.1 泵的分类	1
1.1.2 泵的性能参数	3
1.1.3 离心泵的结构	6
1.1.4 离心泵的能量特性曲线	8
1.1.5 离心泵的运行	9
1.2 离心泵的内部流动及其诱导噪声和振动	15
1.2.1 离心泵内部非定常流动现象	16
1.2.2 离心泵内部流动诱导噪声和振动	20
1.3 离心泵内部流动的试验测试方法	23
1.3.1 常规流动显示技术	24
1.3.2 PIV 技术	26
1.3.3 LDV 技术	29
参考文献	32
第 2 章 离心泵内部动静干涉流动特性	33
2.1 概述	33
2.2 基于求解雷诺时均方程的动静干涉流动分析	34
2.2.1 求解模型及数值模拟方法	35
2.2.2 设计工况下压力脉动分析	37
2.2.3 非设计工况下压力脉动的分析	46
2.3 基于大涡模拟方法的动静干涉流动分析	51
2.3.1 求解模型及数值模拟方法	51
2.3.2 设计工况下模拟结果及分析	55
2.3.3 非设计工况下模拟结果及分析	64
2.4 动静部件间隙及形式对动静干涉流动的影响	69
2.4.1 求解模型及数值方法	69
2.4.2 作用在叶轮上的扭矩分析	76
2.4.3 离心泵径向力分析	77

2.4.4 离心泵压力脉动分析	82
参考文献	86
第3章 离心泵进口回流流场特性及控制	90
3.1 概述	90
3.1.1 离心泵进口回流现象	90
3.1.2 离心泵进口回流发生原因	91
3.2 离心泵进口回流三维定常数值模拟	94
3.2.1 模型离心泵水力模型	94
3.2.2 数值计算区域	94
3.2.3 数值模拟相关设置	95
3.2.4 数值模拟结果分析	95
3.3 离心泵进口回流三维非定常数值模拟	104
3.3.1 数值模拟相关设置	104
3.3.2 数值模拟结果分析	104
3.4 叶轮几何参数对离心泵进口回流特性的影响	114
3.4.1 叶片数对离心泵进口回流特性的影响	114
3.4.2 叶片进口冲角对离心泵进口回流特性的影响	120
3.4.3 叶片进口边位置对离心泵进口回流特性的影响	124
3.5 离心泵进口回流试验研究	128
3.5.1 试验方案	128
3.5.2 试验装置及试验台布置	129
3.5.3 试验结果及分析	130
3.6 离心泵进口回流控制	135
3.6.1 离心泵叶轮进口回流控制方案	136
3.6.2 数值模拟结果对比分析	137
参考文献	141
第4章 离心泵的失速与驼峰特性	143
4.1 带导叶离心泵内部失速研究	143
4.1.1 失速状态的研究方法	143
4.1.2 失速对泵性能曲线的影响	144
4.1.3 失速状态下的流动结构	146
4.2 离心泵的扬程驼峰特性	148
4.2.1 离心泵的驼峰现象	149
4.2.2 驼峰现象的原因分析	159

参考文献	169
第 5 章 离心泵内部空化特性	173
5.1 离心泵内空化现象的形成和危害	173
5.2 离心泵空化发生发展机理	175
5.2.1 离心泵内部的主要空化形式	176
5.2.2 离心泵内空化形态与泵性能参数间的关系	176
5.2.3 离心泵内空化形态与空化信号间的关系	181
5.2.4 离心泵内空化形态与压力脉动的关系	183
5.3 空化对离心泵性能的影响	193
5.3.1 离心泵空化条件下扬程下降分析	193
5.3.2 离心泵空化条件下效率下降分析	197
5.3.3 诱导轮对离心泵性能的影响	201
5.4 离心泵空化特性初步研究结果	209
参考文献	210
第 6 章 离心泵内部流动诱导振动及流固耦合	214
6.1 概述	214
6.2 离心泵流固耦合求解理论	216
6.2.1 离心泵流固耦合求解策略	216
6.2.2 流固耦合求解理论依据	218
6.2.3 数据传递动力学条件及耦合收敛标准	219
6.3 普通离心泵流动诱导振动及流固耦合	220
6.3.1 模型泵及参数	220
6.3.2 流固耦合计算参数设置	221
6.3.3 离心泵流固耦合动态响应分析	225
6.4 高温熔盐离心泵流固耦合特性	238
6.4.1 模型泵及参数	238
6.4.2 流固耦合计算参数设置	242
6.4.3 熔盐泵流固耦合动态响应结果分析	242
6.5 双叶片螺旋离心泵流固耦合动力学特性	248
6.5.1 模型泵及参数	248
6.5.2 流固耦合计算参数设置	250
6.5.3 螺旋离心泵流固耦合动态响应结果分析	251
参考文献	263

第7章 离心泵内部流动诱导噪声	266
7.1 引言	266
7.2 离心泵流动诱导噪声声学基础	267
7.3 国内外相关研究	270
7.3.1 国外相关研究	270
7.3.2 国内相关研究	271
7.4 离心泵流动诱导噪声试验研究	273
7.4.1 单端口模型	273
7.4.2 双水听器传递函数法	274
7.4.3 四端网络模型	275
7.4.4 试验系统	276
7.4.5 试验结果	280
7.5 离心泵流动诱导噪声数值模拟	284
7.5.1 流动诱导噪声数值模拟方法	285
7.5.2 基于 ANSYS CFX 和 Virtual Lab 联合求解模型泵流动诱导噪声	287
7.5.3 基于 ANSYS CFX 和 ACTRAN 联合求解模型泵流动诱导噪声	290
7.6 离心泵用 Helmholtz 水消声器声学特性数值分析	293
7.6.1 一维平面波声学模型	293
7.6.2 声学有限元模型	294
7.6.3 模型泵参数及数值计算方法	295
7.6.4 消声器仿真结果及分析	295
7.7 低噪声离心泵设计	299
7.7.1 离心泵低噪声水力设计方法	299
7.7.2 电动离心泵引射管结构设计	301
7.7.3 泵系统减少噪声污染的措施	304
参考文献	306
第8章 离心泵多工况水力设计	310
8.1 能量损失分析法	310
8.1.1 能量性能计算模型	311
8.1.2 优化算法	314
8.1.3 实例验证	315
8.2 多种叶轮组合法	318
8.2.1 核电站上充泵水力性能要求	318
8.2.2 叶轮多工况水力设计理论	319

参考文献	324
第 9 章 离心泵的运行节能	326
9.1 水泵及其系统能耗评价	326
9.1.1 现有能耗评价指标	326
9.1.2 水泵性能及运行参数的描述	327
9.1.3 水泵运行性能参数的几何意义讨论	329
9.1.4 水泵运行参数及能耗指标的计算	330
9.1.5 计算实例	334
9.2 离心泵的运行特性与控制策略	339
9.2.1 水泵系统装置需求特性与水泵特性的关系	339
9.2.2 水泵系统节点装置特性与水泵特性的关系	340
9.2.3 离心泵系统的控制策略	341
9.3 基于单变频器的离心泵配置及优化运行	352
9.3.1 单调速方案的泵站机组配置	352
9.3.2 优化运行模型的建立	354
9.3.3 优化运行模型的求解	356
9.4 离心泵系统运行节能改造实例	357
9.4.1 水泵系统基本情况	357
9.4.2 运行分析	361
9.4.3 技术改造策略分析	363
参考文献	368

第 1 章 引 论

1.1 离心泵基础

泵是以液体作为工作介质进行能量转换的一种机械,是通过液体和机械之间的相互作用而工作的。从传递能量来看,液体通过泵时所具有的能量将发生变化,即液体的能量与机械运动的能量发生转换。因此,泵又可认为是一种能量转换器。具体来说,泵就是把原动机的机械能转换成所输送液体能量的机械。泵能增加液体的位能、压能、动能。简单地讲,原动机通过泵轴带动叶轮旋转,对液体做功,使其能量增加,从而使一定体积的液体由吸水池经泵的过流部件输送到所要求的高处或高压的地方。

泵是一种通用机械,广泛地应用于国民经济各个领域,凡是有液体流动的地方几乎都有泵在工作,如农田灌溉、城市给排水、矿山、石油、化工、电力、纺织、机械、土木建筑、能源、交通、水利、航运、冶炼、造船、航空航天技术等。据统计,泵耗电量约占全国总发电量的 15%,占全国总油耗的 5%左右。火电厂有高压锅炉给水泵、冷热水循环泵、水力清渣除灰高压泵;矿山中的井底排水、矿床地表疏干、水力采煤及输送等都需用水泵及水泵站来完成;石油的开采和管道输送、化工产品浆液的移送等也都需要用泵提升、增压输送。此外,在原子能工业等部门中,还需用到输送带腐蚀性液体与金属及非金属液体的特殊泵。

1.1.1 泵的分类^[1]

泵的种类很多,结构各异,可按其作用原理分为三大类:叶片式泵、容积式泵和其他类型泵。

1. 叶片式泵

利用装有叶片的叶轮高速旋转,将机械能转换为液体的动能与压能而工作的泵,称为叶片式泵。根据被抽送液体流出叶轮的方向可分为离心式、混流式和轴流式三种类型,如图 1.1 所示。旋涡泵为一类特殊的泵,此处不作具体介绍。

由于叶片式泵效率较高、启动方便、性能可靠,而且流量、扬程适用范围较大,因此,在工程实际中得到了广泛应用。

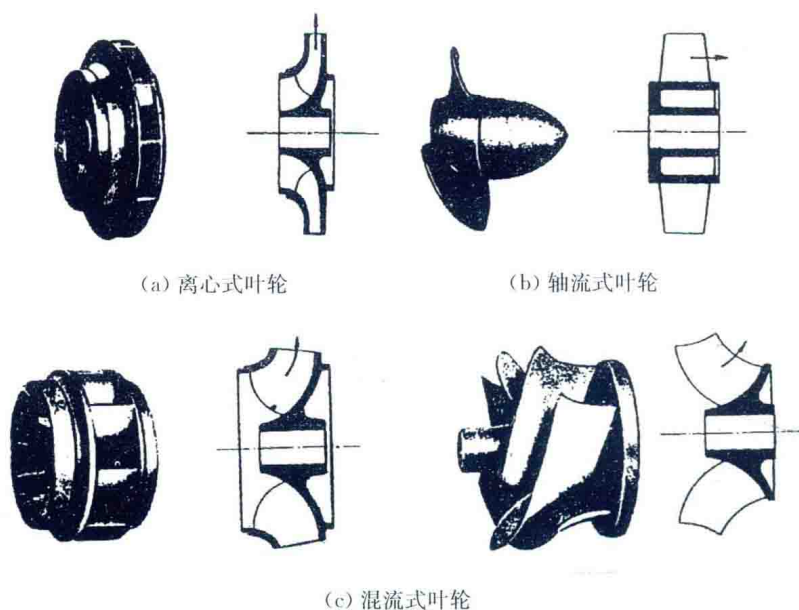


图 1.1 叶片式泵的三种叶轮类型

2. 容积式泵

容积式泵在运转时,机械内部的工作容积不断发生变化,对液体产生挤压,增加液体的压能,从而吸入或排出液体。按其结构不同,又可再分为以下两种形式:

(1) 往复式。这种机械借助于活塞在缸体内的往复作用使缸内容积反复变化,以吸入和排出液体。

(2) 回转式。机壳内的转子或转动部件旋转时,转子与机壳之间的工作容积发生变化,借以吸入和排出液体。

以上各类泵的适用范围如图 1.2 所示,由图可以看出,离心泵所占的区域最大,流量在 $5\sim 25000\text{m}^3/\text{h}$,扬程在 $8\sim 3000\text{m}$ 范围内。

3. 其他类型泵

射流泵是利用流体(液体或气体)来传递能量的泵;螺旋泵是利用螺旋推进器原理来提高液体的位能而将液体提升的泵;气升泵是以压缩空气为动力来提升液体的泵;水锤泵是利用管道中产生水锤压力进行提水的泵等。

这些特殊泵在工程实际中用来送水或药剂(混凝剂、消毒剂等)常常起到良好的效果。

泵的详细分类情况如表 1.1 所示。

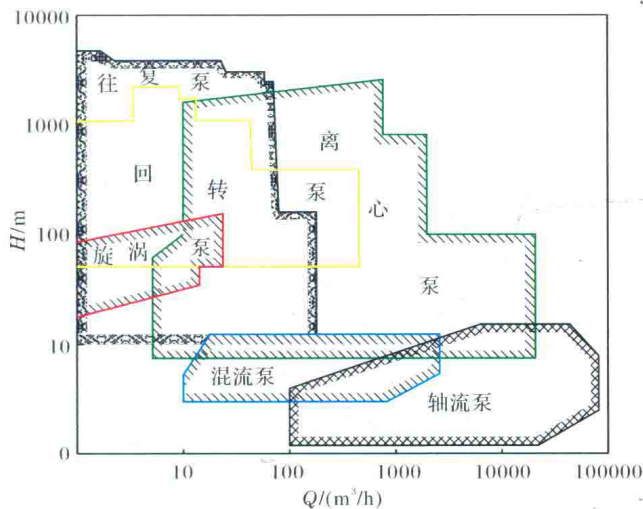


图 1.2 各种泵的适用范围

表 1.1 泵的详细分类

叶片式泵	离心泵	单级(单吸、双吸、自吸、非自吸) 多级(节段式、蜗壳式)
	混流泵	蜗壳泵、导叶式(固定叶片、可调叶片)
	轴流泵	固定叶片、可调叶片
	旋涡泵	单级、多级、自吸、非自吸
容积式泵	往复式泵	(活塞式、柱塞式)蒸汽双作用(单缸、双缸) 电动往复式——单作用、双作用(单缸、多缸)
	回转式泵	螺杆式(单、双、三螺杆)、齿轮式(内啮合、外啮合) 环流活塞式(内环流、外环流)、滑片式、凸轮式、 轴向柱塞式、径向柱塞式
其他类型泵		射流泵、气升泵、水锤泵、电磁泵、水轮泵等

1.1.2 泵的性能参数

1. 流量

泵的流量有体积流量和质量流量之分。

(1) 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，常用单位有 m^3/s 、 L/s 和 m^3/h 。

(2) 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，常用单位有 kg/s 和 t/h 。通常所说的泵的流量是指体积流量。

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,因此, $H = E_d - E_s$, 单位为 $\text{N} \cdot \text{m}/\text{N} = \text{m}$, 即抽送液体的液柱高度,习惯简称为米。

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,但应用能量方程,可将泵装置中液体的能量表示为泵的扬程。

3. 转速

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

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,由于是通过泵轴传递给泵的,故又称轴功率,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液体获得的有效功率,即

$$P_e = HQ_{mg} = \rho g QH (\text{W}) \quad (1.1)$$

式中, ρ 为液体的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; Q 为泵的流量, m^3/s ; H 为泵的扬程, 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

$$\eta = \frac{P_e}{P} \quad (1.2)$$

5. 比转数

泵的相似定律建立了几何相似的泵在相似工况下性能参数之间的关系。但是,用相似定律来判断泵是否几何相似和运动相似既不直观,也不方便。因此,在相似定律的基础上,希望有一个判别数,是一系列几何相似泵性能之间的综合数据。如果各个泵的这个数据相等,则这些泵是几何相似和运动相似的,为此用相似定律来换算各泵性能之间的关系。这个判别数就是比转数,有时也称为比转速或比速,用 n_s 表示,如下式表示:

$$n_s = \frac{3.65n\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \tag{1.3}$$

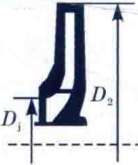
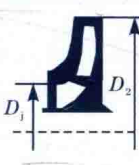
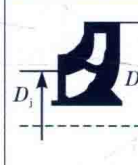
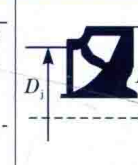
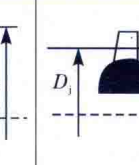
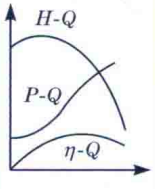
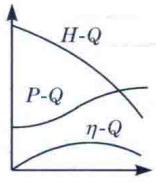
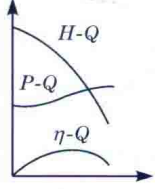
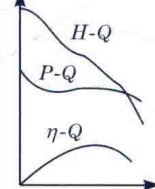
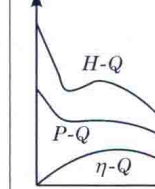
式中, n 为转速, r/min ; H 为扬程, 对多级泵取单级扬程, m ; Q 为流量, 对双吸泵取 $Q/2, \text{m}^3/\text{s}$ 。

另外, 各国所用的比转数系数不同, 流量 Q 、扬程 H 的单位也不相同, 因而对同一相似泵算得的 n_s 的数值不同。在比较时, 应换算为使用相同单位下的数值, 其换算关系如下:

$$n_{s\text{中}} = \frac{n_{s\text{美}}}{14.16} = \frac{n_{s\text{英}}}{12.89} = \frac{n_{s\text{日}}}{2.12} = n_{s\text{德}} \times 3.65 \tag{1.4}$$

因为比转数是由泵参数组成的一个综合参数, 是泵相似的准则, 它与泵的几何形状密切相关, 所以可按比转数对泵进行分类。另外, 泵的特性曲线是泵内液体运动参数的外部表现形式, 而泵内的运动与泵的几何形状有关, 因此, 泵的特性曲线与泵的几何形状间也有着密切的关系, 具体如表 1.2 所示。

表 1.2 各种不同比转数泵的典型特点

泵的类型	离心泵			混流泵	轴流泵
	低比转数	中比转数	高比转数		
比转数	$30 < n_s < 80$	$80 < n_s < 150$	$150 < n_s < 300$	$300 < n_s < 500$	$500 < n_s < 1500$
叶轮形状					
$\frac{D_2}{D_1}$	≈ 3	≈ 2.3	$\approx 1.4 \sim 1.8$	$\approx 1.1 \sim 1.2$	≈ 1
叶片形状	圆柱形叶片	入口处扭曲 出口处圆柱形	扭曲叶片	扭曲叶片	轴流泵翼型
性能曲线形状					
流量-扬程 曲线特点	关死扬程为设计工况的 1.1~1.3 倍, 扬程随着流量减少而增加, 变化缓慢			关死扬程为设计工况的 1.5~1.8 倍, 扬程随流量减少而增加, 变化较急	关死扬程为设计工况的 2 倍左右, 在小流量处出现马鞍形