

➤ 高等学校应用型本科“十三五”规划教材



- 以应用广泛的叶片式流体机械为重点
- 对流体机械的相关内容进行全面介绍

流体机械



向伟 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校应用型本科“十三五”规划教材

流 体 机 械

向 伟 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是应用型本科“十三五”教改规划教材,注重贯彻学以致用、理论联系实际的原则,并力求反映当代流体传动技术发展应用的新成果,以流体机械中应用广泛并具有典型性的叶片式流体机械为重点,对流体机械的相关内容做了一个较为全面的介绍。

全书共六章,第1章对流体机械进行了全面概述,并对学习“流体机械”课程所涉及的工程流体力学基础知识进行了介绍;第2、3、4章主要讨论了液体叶片式流体机械,其中第2章叶片泵是本课程的重点;第5章应用了第2章的讨论成果以比较它们的异同点,并重点讨论了通风机、压缩机的原理、结构及其应用;第6章主要介绍了容积式和其他方式获取流体能量的流体机械,进一步拓宽了流体机械的应用范围,根据学时情况,这部分可作为选择性教学内容。也可节选本书相关内容,作为“泵与风机”和“泵与压缩机”课程的教材和教学参考书。

本书可作为高等学校流体传动与控制、过程装备与控制、热能动力工程、石油工程等专业的教学用书,也可供机械类或近机类相关专业的学生及流体机械和流体动力工程、石油工程等领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体机械/向伟编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.3

高等学校应用型本科“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3964-2

I. ① 流… II. ① 向… III. ① 流体机械—高等学校—教材 IV. ① TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 018874 号

策 划 戚文艳 李惠萍

责任编辑 张 玮 李惠萍

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西大江印务有限公司

版 次 2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 20.5

字 数 484千字

印 数 1~3000册

定 价 35.00元

ISBN 978-7-5606-3964-2/TH

XDUP 4256001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

西安电子科技大学出版社
高等学校应用型本科“十三五”规划教材

编审专家委员会名单

主任：鲍吉龙（宁波工程学院副院长、教授）

副主任：彭 军（重庆科技学院电气与信息工程学院院长、教授）

张国云（湖南理工学院信息与通信工程学院院长、教授）

刘黎明（南阳理工学院软件学院院长、教授）

庞兴华（南阳理工学院机械与汽车工程学院副院长、教授）

电子与通信组

组长：彭 军（兼）

张国云（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

王天宝（成都信息工程学院通信学院院长、教授）

安 鹏（宁波工程学院电子与信息工程学院副院长、副教授）

朱清慧（南阳理工学院电子与电气工程学院副院长、教授）

沈汉鑫（厦门理工学院光电与通信工程学院副院长、副教授）

苏世栋（运城学院物理与电子工程系副主任、副教授）

杨光松（集美大学信息工程学院副院长、教授）

钮王杰（运城学院机电工程系副主任、副教授）

唐德东（重庆科技学院电气与信息工程学院副院长、教授）

谢 东（重庆科技学院电气与信息工程学院自动化系主任、教授）

楼建明（宁波工程学院电子与信息工程学院副院长、副教授）

湛腾西（湖南理工学院信息与通信工程学院教授）

机电组

组长：庞兴华（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

丁又青（重庆科技学院机械与动力工程学院副院长、教授）

王志奎（南阳理工学院机械与汽车工程学院系主任、教授）

刘振全（天津科技大学电子信息与自动化学院副院长、副教授）

何高法（重庆科技学院机械与动力工程学院院长助理、教授）

胡文金（重庆科技学院电气与信息工程学院系主任、教授）

前言

本书是为适应应用型本科教学改革的新形势,在总结以往教学科研实践的基础上编写的一本教学用书。

本书的编写以面向流体传动与控制、过程装备与控制、热能动力工程、石油工程或相近专业的本科教学为基本出发点,同时考虑了不同类型、不同层次的继续教育和自学者的需要。本书也可以作为有关工程技术人员的入门级读物。

流体机械的应用极其广泛,工程性很强,种类繁多,很多产品属于“通用机械”。但是就整体而言,流体机械主要涉及的是动力工程和机械工程领域,在理论上有很强的专业性和系统性。本书以产品为主线,以专业基础知识应用于叶片泵、涡轮机、液力变矩器、通风机、压缩机等产品的设计、结构原理、实际应用为重点,介绍相关流体机械的基本结构形式、工作原理、基本参数、相关技术应用和产品运行中出现的问题及解决方法等。这样设计本书内容的目的,一方面在于适应当今应用型本科教学中学生应用知识技能摄取方面的横向拓宽和今后择业的多元性要求,另一方面也能使学生掌握有关的基本知识,有利于在进一步深造中的跨学科发展和积极的科技创新。

作为现代应用型本科的教学用书,本书在叙述方面力求深入浅出,注重应用所学的基础理论知识对所论述的产品进行系统的讨论。以叶片泵为重点,在此基础上加强横向的对比联系,掌握共性特点,升华局部认识。对于有关具体设计计算等更为深入的专业性理论分析和现场使用的相关设备的具体结构、使用维护等,读者可参考更为专业的著作,本书不予更多涉及。本书所述的流体机械内容,也不包括液压传动和气压传动部分,这些内容读者可参考相关专业的书籍。

为了便于读者更好地掌握教材内容，书中每章给出了学习目标和学习要求、章节小结和复习思考题，在每章后都提供了相应的阅读材料，以进一步加深对本章节知识的认识与应用。由于本书涉及的概念、术语非常多，为便于读者在学习中能较为准确地理解，以及与先修课程符号表示保持连续性，本书在附录中对符号含义进行了说明。本书的第6章和章节中标有“*”的内容，可根据教学需要选择讲授。

本书由重庆科技学院向伟主编，同时负责绘制本书中的所有插图和全书的统筹与审定。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正，我们将致以最诚挚的谢意！

编者

2015年10月于

重庆科技学院

目 录

第 1 章 绪论	1	2.3.5 关于叶轮内流动的两种 处理方法	59
1.1 流体机械的定义	1	2.3.6 轴流泵的基本方程式	59
1.2 流体机械的分类	2	2.4 叶片泵的特性曲线	60
1.3 流体机械在国民经济中的应用	3	2.4.1 理论性能曲线的定性分析	60
1.4 工程流体力学基础简述	5	2.4.2 实测性能曲线的讨论	64
1.4.1 流体静力学的基本结论	5	2.5 叶片泵的相似理论及其应用	67
1.4.2 流体动力学的基本结论	9	2.5.1 泵的相似条件	67
1.4.3 气体介质的状态参数	13	2.5.2 相似定律	68
1.4.4 气体稳定流动的能量方程	14	2.5.3 比例率	70
1.4.5 气体的状态方程	18	2.5.4 叶片泵在改变转速时的特性曲线与 通用特性曲线	70
1.4.6 马赫数及拉伐尔管	26	2.5.5 比转数	71
1.5 阅读材料——典型流体机械的 工作过程简介	28	2.6 叶片泵的汽蚀与安装高度的确定	75
本章小结	32	2.6.1 叶片泵的汽蚀现象及危害	75
复习思考题	33	2.6.2 叶片泵安装高度的确定	76
第 2 章 叶片泵	34	2.6.3 汽蚀余量	78
2.1 叶片泵概述	35	2.6.4 汽蚀的防止方法	82
2.1.1 离心泵的工作原理与结构	36	2.7 叶片泵装置的总扬程和 工作点的确定	82
2.1.2 轴流泵的工作原理与结构	42	2.7.1 叶片泵装置的总扬程计算	83
2.1.3 混流泵	45	2.7.2 静扬程和管路的损失 计算总扬程	84
2.1.4 叶片泵的型号	46	2.7.3 管路特性曲线	85
2.1.5 叶片泵的基本性能参数	48	2.7.4 叶片泵装置工作点的确定	86
2.2 叶片泵的基本工作理论	49	2.7.5 叶片泵装置工作点的改变	87
2.2.1 叶轮流道投影图及主要尺寸	49	2.8 叶片泵装置工作点的调节	87
2.2.2 液体在叶轮中的运动——速度 三角形	50	2.8.1 节流调节	88
2.2.3 叶片泵的基本能量方程式	52	2.8.2 分流调节	88
* 2.3 轴流泵工作理论简介	55	2.8.3 变径调节	88
2.3.1 轴流泵内的流体运动及圆柱层 无关性假设	55	2.8.4 变速调节	93
2.3.2 叶栅及翼型的几何参数	56	2.8.5 变角调节	94
2.3.3 叶栅的速度三角形分析	57	2.8.6 改变运行泵台数调节法	95
2.3.4 翼型和叶栅的动力特性	58	2.9 叶片泵的并联和串联工作	95
		2.9.1 叶片泵的并联工作	95
		2.9.2 叶片泵的串联工作	98

2.9.3 泵组合装置工作方式的选择	100	4.3.1 液力变矩器的结构	150
2.10 叶片泵的选择与使用	100	4.3.2 液体在工作轮中的运动规律	152
2.10.1 叶片泵的选择	100	4.3.3 工作轮的扭矩方程式	157
2.10.2 叶片泵的启动	103	4.3.4 工作轮扭矩的平衡	158
2.10.3 叶片泵的运行	104	4.3.5 液力变矩器的透过性	159
2.10.4 叶片泵的停车	104	4.4 液力变矩器的特性曲线及选用	160
2.10.5 叶片泵的故障与排除	104	4.4.1 输出特性曲线	160
2.11 离心泵的性能实验	106	4.4.2 原始特性曲线	162
2.12 阅读材料——叶片泵的变频		4.4.3 输入特性曲线	164
调速节能	110	4.4.4 发动机与液力变矩器共同工作时的	
2.12.1 三相异步电动机	110	联合输出特性曲线	165
2.12.2 叶片泵的变频调速节能原理	112	4.4.5 液力变矩器的选择	167
2.12.3 变频器恒压供水系统的应用	114	4.5 液力变矩器的类型和构造	169
本章小结	116	4.5.1 单级单相(即三元件导轮固定)式	
复习思考题	117	液力变矩器	170
第3章 涡轮机	120	4.5.2 单级二相液力变矩器(综合式	
3.1 涡轮机概述	121	液力变矩器)	170
3.2 涡轮钻具的典型结构	122	4.5.3 单级三相液力变矩器	172
3.2.1 涡轮钻具概述	122	4.5.4 带锁止离合器的液力变矩器	173
3.2.2 涡轮钻具的结构	122	4.6 阅读材料——液力传动装置在	
3.3 涡轮钻具的基本工作理论	124	工程上的应用	173
3.3.1 涡轮内液体的运动	124	4.6.1 在石油钻井工程上的应用	174
3.3.2 涡轮内的能量转化规律——涡轮的		4.6.2 在汽车工程上的应用	177
基本方程式	127	本章小结	180
3.3.3 涡轮钻具的功率损失与效率	128	复习思考题	181
3.3.4 涡轮钻具的特性曲线	130	第5章 叶片式气体机械	183
3.4 阅读材料——水轮机	132	5.1 叶片式气体机械概述	184
3.4.1 水轮机工作原理	132	5.2 离心式通风机的结构及工作理论	186
3.4.2 近代水轮机的发展简史	133	5.2.1 离心式通风机的结构与原理	186
3.4.3 现代水轮机的发展趋势	136	5.2.2 通风机的全压方程	190
本章小结	136	5.2.3 通风机中的能量损失	192
复习思考题	137	5.2.4 通风机的性能参数	192
第4章 液力传动	138	5.2.5 离心式通风机的有因次	
4.1 液力传动概述	139	特性曲线	194
4.1.1 液力传动的工作原理及优缺点	139	5.2.6 离心式通风机的无因次	
4.1.2 液力传动的工作介质	140	特性曲线	194
4.2 液力耦合器	141	5.3 轴流式通风机的结构及工作理论	201
4.2.1 液力耦合器的结构	141	5.3.1 概述	201
4.2.2 液力耦合器的基本理论	145	5.3.2 轴流式通风机“级”的升压方程	202
4.2.3 液力耦合器的特性曲线	147	5.3.3 轴流式通风机叶轮的布置方案	204
4.3 液力变矩器	150	5.3.4 轴流式通风机的特性曲线	206
		5.4 通风机在管网中的工作及调节问题	206

5.4.1 通风机的典型工作方式	207	6.1.7 往复泵的管路特性曲线及 工作点的确定	256
5.4.2 管网特性及系统的动力平衡	207	6.2 液环泵	260
5.4.3 通风机的串联和并联运行	209	6.2.1 液环泵的工作原理	260
5.4.4 通风机运行工作点的调节	209	6.2.2 液环泵的特点及工程用途	264
5.4.5 通风机运行中的喘振及 噪声问题	210	6.2.3 液环真空泵的工作性能和构造	265
5.5 离心式压缩机的结构及 工作理论简介	212	6.3 射流泵	267
5.5.1 离心式压缩机的结构和 工作原理	212	6.3.1 射流泵的工作原理	267
5.5.2 离心式压缩机的叶轮和气体在 叶轮中的流动	216	6.3.2 射流泵的主要参数及性能曲线	269
5.5.3 离心式压缩机的基本理论	217	6.3.3 射流泵的主要结构形式	269
5.5.4 离心式压缩机的特性	223	6.3.4 射流泵的应用	271
5.5.5 压缩机与管网的联合 工作与调节	227	6.4 旋涡泵	272
5.5.6 相似理论在离心式压缩机 中的应用	228	6.4.1 旋涡泵的工作原理	272
5.6 风力涡轮机	229	6.4.2 旋涡泵的特性曲线	273
5.6.1 风力涡轮机的工作原理及应用	229	6.4.3 旋涡泵的特点	273
5.6.2 风力涡轮机在飞机加油 系统中的应用	231	6.4.4 旋涡泵的操作使用特点	274
5.7 涡轮膨胀机	232	6.5 螺旋泵	274
5.7.1 概述	232	6.5.1 螺旋泵的基本装置和工作原理	274
5.7.2 涡轮膨胀机在制冷装置 中的工作原理	234	6.5.2 螺旋泵的主要设计参数	275
5.8 阅读材料——通风机在 工程上的应用	235	6.5.3 螺旋泵的性能曲线	276
5.8.1 室内通风	235	6.5.4 螺旋泵站的特点	276
5.8.2 贯流式通风机及其应用	237	6.6 气升泵	276
本章小结	238	6.6.1 气升泵的工作原理	276
复习思考题	239	6.6.2 气升泵的特点及应用	278
第6章 其他型式的流体机械	241	6.7 螺杆泵	278
6.1 往复泵	242	6.7.1 单螺杆泵	279
6.1.1 往复泵的工作原理	243	6.7.2 多螺杆泵	281
6.1.2 往复泵的分类及结构	243	6.8 往复式压缩机	283
6.1.3 往复泵的基本特性参数	248	6.8.1 概述	283
6.1.4 往复泵的流量	249	6.8.2 往复式压缩机级的工作过程	284
6.1.5 往复泵流量的不均度及 解决办法	253	6.8.3 往复式压缩机的性能参数	287
6.1.6 往复泵的特性曲线	255	6.8.4 往复式压缩机的多级工作	288
		6.8.5 往复式压缩机的形式与 使用问题	288
		6.9 螺杆式压缩机	289
		6.9.1 螺杆式压缩机的结构和 工作原理	289
		6.9.2 螺杆式压缩机的排气量与 功率的计算	294
		6.9.3 螺杆式压缩机的特性	295
		6.9.4 螺杆式压缩机的排气量调节	298
		6.10 罗茨鼓风机	301
		6.10.1 工作原理	301

6.10.2 结构型式及型线	302	6.12 阅读材料——液环式真空泵在	
6.10.3 使用选型	303	吸污机上的应用	309
6.11 离心机	303	本章小结	310
6.11.1 离心机的结构及工作原理	304	复习思考题	312
6.11.2 分离因数和离心力场的特点	305		
6.11.3 石油钻井工程上使用的		附录 书中符号含义说明	314
离心分离设备	306	参考文献	318

第1章 绪 论

一、学习目标

本章主要讲述流体机械的定义及其应用,对本课程中应用的工程流体学知识也进行了系统的概述。通过本章的学习,应达到以下目标:

- (1) 掌握流体机械的定义及分类;
- (2) 了解流体机械在国民经济中的重要地位及应用;
- (3) 复习工程流体力学的相关知识;
- (4) 了解生活中典型流体机械的工作过程及其应用。

二、学习要求

知识要点	基 本 要 求	相 关 知 识
流体机械的定义	熟悉流体的能量与机械的机械能相互转换或不同的流体之间能量的传递过程	流体能量:位能、压能、动能、内能
流体机械的分类	(1) 掌握按照能量传递方向分类; (2) 掌握按流体与机械的相互作用分类; (3) 掌握按工作介质分类	(1) 流体能机、流体动力机、流体动力传动机; (2) 叶片式、容积式、流体构件; (3) 水力机械和热力机械
流体机械的应用	(1) 了解在水力、电力工程方面的应用; (2) 了解在石油工业上的应用; (3) 了解在钢铁工业上的应用; (4) 了解在其他行业中的应用	(1) 泵、风机、水轮机; (2) 涡轮钻具、高压往复泵,压缩机; (3) 鼓风机、压缩机、风机; (4) 医疗、汽车行业等
工程流体力学基础知识	掌握工程流体力学所述知识要点	液体流体、气体流体及其在能量传递方面的异同点

三、基本概念

流体机械、泵、压缩机、风机、涡轮机、水轮机、风力发电机、液力传动装置、液压传动装置、流体构件、工程流体力学知识简述等。

1.1 流体机械的定义

流体机械是指以流体(液体或气体)为工作介质与能量载体的机械设备。流体机械的工作过程是流体的能量与机械的机械能相互转换或不同的流体之间能量的传递过程。

流体机械的种类和品种十分繁多,工程上乃至日常生活中,几乎随处可见。可是要问到底什么是流体机械,却未必能给出准确的回答。是不是有流体参与工作的机械装置都是流体机械?答案是否定的。例如,一台水泵是流体机械,可是一个水闸,虽然有的也是庞然大物,却不能称之为流体机械;一台锅炉,虽然也是大型装置,工作中又离不开水、蒸汽等流体物质,加热过程中还包含有能量交换过程,可它是一个热动力装置,也不属于流体机械的范畴。

可以这样说,流体(液体或气体)介质和机械构件(如叶轮、活塞等)——在个别情况下可以是另一工作流体(如在射流泵中,此时工作流体可视为一个流体构件),在一个共容的特定腔室或空间里,通过相互间的作用与反作用,实现机械功—能量的交换、传动的机械装置称为流体机械。在流体机械的工作中,也会有某种热力过程发生,但在一般情况下这只是伴生过程,并非机械的基本功能。按照这样的认识,汽轮机、燃气轮机、内燃机等机械的工作,虽然也有与流体机械类似的作用过程,但它们是以热能与机械能的转换为主,不属于本书所讨论的流体机械范畴,而是属于热力发动机的一类动力机械。

1.2 流体机械的分类

流体机械可按照能量传递方向、流体与机械的相互作用等方式进行分类。

1. 按能量传递方向分类

按能量传递方向,流体机械可分为流体能机、流体动力机和流体力传动机。

流体能机用于将机械能转换成流体的能量,将流体输送到位置更高或压力更高的空间,或克服阻力进行远距离输送,如泵、风机和压缩机等。

流体动力机用于将流体的能量转换成机械能,以驱动其他设备,如涡轮机、水轮机、风力发电机、蒸汽轮机和燃气轮机等。

流体力传动机是以流体为传动介质,将机械能转换为传动介质的能量,再通过循环控制系统将传动介质的能量转换为机械能,用来作为机械动力的传输、变换装置。它包括液力传动机械、液压传动机械及气压传动机械三大类。这类机械对外输入、输出主接口都是机械接口,没有流体接口,是一类隐态的流体机械。

2. 按流体与机械的相互作用分类

按流体与机械相互作用的特点,流体机械可分为叶片式、容积式及其他形式。

叶片式流体机械中,能量转换是在带有叶片的转子及连续绕流叶片的介质之间进行的。流体对叶片作连续绕流,叶片改变了流体的运动状态,运动的流体与转动的叶片之间产生作用力和反作用力,实现流体与机械的能量转换。

叶片式流体机械可按叶轮转换成流体能量的形式分为反击式和冲击式两类。反击式流体机械中流体的动能与势能均发生变化,流体介质充满流道,进口与出口处速度和压力变化明显;而在冲击式流体机械中,仅流体的动能发生变化,进出口处压力不变,一般为大气压。反击式水轮机可根据流体进出叶轮的方向不同进一步分为径流式、混流式、斜流式与轴流式等。冲击式又可细分为切击式、斜击式与双击式等形式。

容积式流体机械中,能量的交换是通过运动部件和静止部件或者两个运动部件之间的

容积的周期性变化来实现的。流体与机械之间的相互作用力为静压力。根据运动方式不同,可分为往复式和回转式两类。

3. 按工作介质分类

按工作介质的不同,流体机械可分为水力机械和热力机械两类。水力机械以液体为工作介质,热力机械以气体为工作介质。一般地,可认为液体不可压缩,气体可压缩。但要特别注意的是,可压缩性概念是相对的,流体是否可压缩,要视具体情况而定。例如当压力变化极大时(例如在水锤过程中),必须考虑液体的可压缩性,而当压力变化很小时(例如在通风机中),也可以不考虑空气的压缩性。

1.3 流体机械在国民经济中的应用

流体机械在国民经济各部门和社会生活各领域都得到了极广泛的应用,而且随着科学技术的发展,其应用越来越广泛、作用越来越大。现代电力工业中,绝大部分发电量是由叶片式流体机械(汽轮机和水轮机)承担的,其中汽轮机约占 $3/4$,水轮机约占 $1/4$,总用电量中,约 $1/3$ 是用于驱动风机、压缩机和水泵的。随着技术的不断进步,各种应用场合对流体机械的性能和可靠性的要求也越来越高。下面列举几个重要的应用领域。

1. 电力工业

目前的电力生产有三种主要方式:热力发电(火电)、水力发电和核能发电。在这三种发电方式中,流体机械都起着重要的作用。

在火电站和核电站中,除用作主机的汽轮机外,还有许多泵和风机。在火电站的蒸汽动力装置中,包括锅炉给水泵、凝结水泵、循环水泵、送风机和引风机等,在燃气动力装置中则要用到空气压缩机等。随着发电机组的大型化,电站用泵也在向大型和高参数方向发展。目前最大的锅炉给水泵的功率已达 49.3 MW ,扬程达 3000 m 。在核电站中,除了二次蒸汽回路中需要与火电站基本相同的泵以外,一次回路中的主循环泵是一次系统中唯一的回转机械,它工作在高温高压的环境下,是核电站的关键设备之一。此外,核电站的安全系统、容积控制系统、废料处理系统中也都要使用多种类型的泵。

火电站厂与核电站厂所用电的绝大部分用于驱动水泵、风机等辅机,目前我国热电站的厂用电约占发电量的 12% ,而发达国家的厂用电只占 $4\%\sim 4.5\%$,可见提高辅机的效率对于节能有非常重要的意义。同时,泵与风机的可靠性更为重要,特别是当今,汽轮发电机组不断向大容量、单元制发展,对泵和风机等辅机的可靠性与主机有同样的要求。

水轮机作为水力发电的主要设备,在电力工业中占有特殊的地位。由于煤、石油、天然气等燃料的资源有限,又由于大量使用石化燃料对环境有巨大的破坏作用,所以开发清洁可再生能源(水能、太阳能、风能、海洋能等)是实现可持续发展战略的重要条件。目前,水力资源是唯一可以大规模开发的清洁可再生能源,而且开发水力资源还能收到防洪、灌溉、航运、水产养殖和旅游等综合利用的效益。据统计,全世界水力资源的总蕴藏量为 $38\times 10^5\text{ MW}$,已开发的仅约 10% ;我国可开发的水力资源蕴藏量为 $3.78\times 10^5\text{ MW}$,约占世界总量的 10% ,目前已开发和正在开发的占可开发量约 25% 。今后,国家将更加优先开发水力资源。已建设的长江三峡工程,是世界上最大的水电站,也是我国迄今所进行的最大

的工程项目。

水轮发电机组具有功率调节简单快速的特性,因此水电站在电力系统的调节过程中有着特别重要的地位。由于核电站的负荷不便于调节,太阳能、风能、海洋能等新能源具有不稳定的特点,在开发这些能源时,都需要兴建抽水蓄能电站以保证系统的正常运行,因此蓄能机组研发和生产越来越受到人们的重视。

2. 水利工程

我国的人均水资源占有量只有世界平均水平的 $1/4$,而且时空分布极不均匀,水利工程对我国来说尤为重要。水利工程不管是灌溉排涝还是供水,都需要相应容量的泵。据统计,我国排灌机械的配套功率,在 20 世纪 80 年代已达 57 000 MW,这虽然是一个很大的数字,但距解决我国灌溉和排涝问题的要求差距还很大。

为解决我国的水资源问题,开源和节流同样重要。在节流方面,国家大力发展了节水灌溉技术,如喷灌、滴灌等,其中需要大量的泵。在开源方面,国家已经并将继续建设许多大型水利工程,如引黄灌溉工程、南水北调工程等。其中南水北调工程已进行了长期的规划,工程总体规划推荐西线、中线和东线三条调水线路,即分别从长江流域上、中、下游调水,以适应西北、华北各地的经济发展需要。预计到 2050 年,三条线路调水总规模为 448 亿立方米,其中东线 148 亿立方米,中线 130 亿立方米,西线 170 亿立方米,必将在很大程度上解决北方水资源短缺的问题,改善水资源南多北少的局面。

3. 化学工业

在化工流程中,参与反应的原料、中间产品经常是液体或气体,即便是固体物料,也经常以溶液或熔液的形态参与化学反应,所以输送各种流体的泵和压缩机被称为化工厂的“心脏”。现代化工装置日益大型化,对泵和压缩机的要求也越来越高。化工流程中使用的泵和压缩机经常需要输送特殊的介质,如高温或低温、高压、易燃、易爆、剧毒、易结晶、易汽化或分解的介质等,这对泵和压缩机的设计、制造提出了特殊的要求。

4. 石油工业

在石油和天然气的钻井工程中,流体机械占有重要的地位。需要使用泥浆泵来循环钻井工程中所需要的液体泥浆,借以排出井中钻具破碎的岩屑;定向钻井、水平井使用由循环泥浆驱动的井下涡轮钻具;在智能寻向找油气钻井技术上,使用由循环泥浆驱动的涡轮发电机为井下探测器提供电源。在石油和天然气的开采、运输和加工过程中,泵和压缩机都是重要的设备,其中包括一些为适应特殊使用要求而开发的高技术产品。例如,油田注水泵用于向油层中注水,可以提高油层压力,实现原油自喷;在海洋油田,注气压缩机使用不能直接利用的油田伴生气代替水,注入油层以提高压力。

在海洋和沙漠油田中,由于环境特殊,对设备有着非常特殊的要求。例如,从很深的油井中将原油输送到地面所用到的潜油泵,由于受井径的限制,叶轮直径很小,为达到所需的扬程,泵的级数可达数百个。由于原油中含有砂子,泵输送的实际上是固液混合物,因此设备零件必须具有较好的耐磨性。

5. 钢铁工业

在钢铁的冶炼过程中需要大量的空气和氧气支持燃烧,需要使用大量的风机,如用于向大型高炉中送风的高炉鼓风机、纯氧顶吹转炉中输送高压氧的氧气压缩机等。冶金技术

的进步和设备的大型化,对这些设备不断提出了新的要求。另外,生产过程中也需消耗大量的水,供水和进行水处理所需使用泵的数量也很多。

6. 生物医学工程

动物体内的液体(例如血液)及气体(例如空气)的循环流动是生命活动的最重要的内容之一。心脏泵功能的衰竭是各种心脏疾病发展的严重阶段,直接威胁病人的生命。现代生物医学工程的心脏辅助装置,如图1-1所示,采用人造血泵代替心泵部分功能,为衰竭器官提供动力。目前人们还没能造出性能如此完美的血泵,但在很多研究者的共同努力下,这一目标正在接近。随着植入性心脏辅助装置的性能提高,将来不仅可取代心脏移植成为挽救晚期心衰病人生命的方法,而且还有可能成为非晚期心衰病人的治疗选择,其应用潜力巨大。

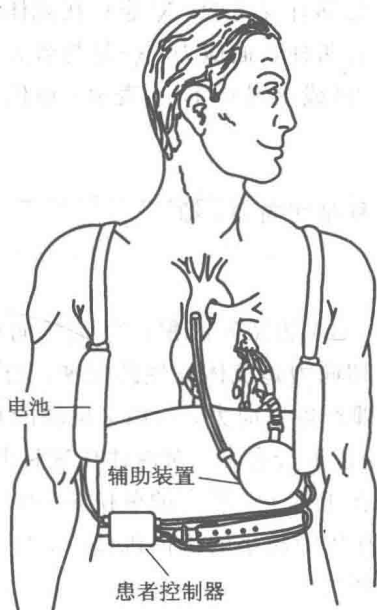


图1-1 心脏辅助装置

7. 其他

流体机械的应用领域十分广阔,除以上列举的一些例子外,其他重要的应用也不胜枚举。例如环境工程中的采暖、通风、空调和污水处理、空气净化,船舰的动力装置及喷水推进,轻工业和食品工业中各种浆料和固液混合物的输送,用压缩空气输送粮食、型砂等物料,各种机械设备、舰船、飞机、火箭控制系统的液压和气动装置等,都是应用流体机械的实例。可以说,在所有的技术领域中,凡是需要有气态和液态的物质流动的地方,都需要有泵、风机和压缩机等流体机械。

1.4 工程流体力学基础简述

本节内容主要服务于后续课程内容的讨论,所述理论不作严密的推导和论证,读者可参阅其他相关教材,以加深理解。

1.4.1 流体静力学的基本结论

1. 流体中的作用力

一般流体机械中的流体可能在两个力场中运动,一个是重力场,另一个是离心力场。两个力场的作用力是可以叠加的。

作用在流体上的力按作用方式可分为两类,即质量力和表面力。质量力作用在每一个质点上,并与流体质量成正比。对于匀质流体,质量力也与流体的体积成正比,所以又称为体积力。质量力不是因为流体与其他物体接触而产生的力,属于非接触力。常见的重力、离心力和惯性力都属于质量力。

表面力则是指仅作用于所考察的微元体表面上的力。因为这种微元体既可取在流体与容器或两种体(如水和空气)的界面上,也可取在流体内部任一位置,所以表面力也是在流

体各处都有发生的,并非只在流体的“表面”上。

有两种表面应力:一是与微元体表面垂直方向(法向)上的应力,指向微元体内部,称为压力(或压强),以 p 表示,单位为 N/m^2 或 Pa 。

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{F_n}{\Delta A} \quad (1-1)$$

另一种是切向力,即

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{F_\tau}{\Delta A} \quad (1-2)$$

式中: ΔA 为微元面积; F_n 为法向单元作用力; F_τ 为切向单元作用力。

切向力是流体黏性的反映,当流体与固体壁面或流体与流体的不同层面间有相对运动时,即产生切应力,所以 τ 反映的是流体的内摩擦力,静止流体中, $\tau=0$ 。假定流体没有黏性, τ 也不会存在。对液体作这种假定时称为理想液体。

在工程上,压力的单位帕(Pa)过于微小,不便使用,工程上常用兆帕(MPa)作计量单位。在压力较小的流体机械中,如通风机、离心泵,也常用千帕(kPa)或量水柱的高度等来表示压力。

2. 压力的表示方法

压力的表示方法有以下几种:

(1) 绝对压力。它以绝对零压力为基准进行计量。

(2) 相对压力。它以当地大气压力 p_a 为零点进行计量,通常所见压力表盘上的指示值就是相对压力,故也称表压。

(3) 真空度。绝对压力低于当地大气压力时,不足一个大气压那一部分,即大气压力与绝对压力之差为真空度,以 p_v 表示。几种压力的关系如图 1-2 所示。

表压 = 绝对压力 - 大气压力

真空度 = 大气压力 - 绝对压力

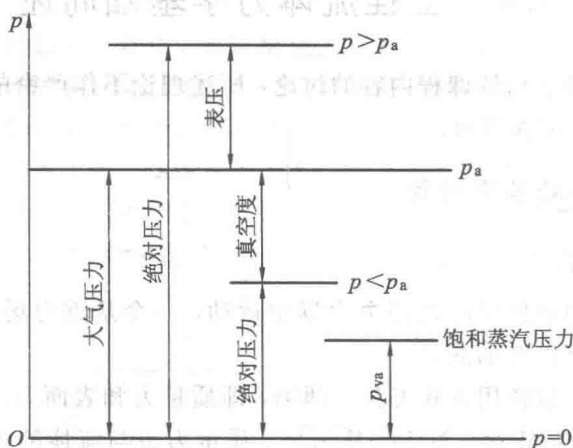


图 1-2 不同压力表示方法关系图

当液体的饱和蒸汽绝对压力 p_{va} 高于当地环境的绝对压力时,液体将气化。流体机械在此产生所谓的“汽蚀现象”,这是液体介质流体机械的一个共性问题,避免流体机械在可能

发生汽蚀的条件下工作是这类机械运行中一个普遍需要注意的问题。

在真空技术领域里,习惯上使用一个与 Pa 并用的单位“托”(Torr), $1 \text{ Torr} = 133.332 \text{ Pa}$,相当于 1 mmHg 的压力。

3. 重力场中的静止流体

与静止容器没有相对运动的流体称为绝对静止流体。如果容器本身处于运动之中,则流体处于相对静止状态。流体静止(包括相对静止)时,流体质点之间没有相对运动,所以黏滞性在静止流体中显现不出来。因此,本部分所得到的流体平衡规律对理想流体和实际流体均适用。

流体静力学理论之一,静止液体中任一点的压力为

$$dp = \rho(X dx + Y dy + Z dz) \quad (1-3)$$

等压面方程:

$$X dx + Y dy + Z dz = 0 \quad (1-4)$$

静止液体中任一点的压力为

$$p = \int \rho(X dx + Y dy + Z dz) + c \quad (1-5)$$

积分常数 c 按压力边界条件确定。式中 X 、 Y 、 Z 为在设定坐标系条件下各坐标方向上的流体单位质量力。在图 1-3 中,静止液体所受到的质量力只有重力,在图示坐标系中,单位质量流体所受到的质量力为

$$X = Y = 0, \quad Z = -\frac{mg}{m} = -g$$

代入式(1-5)中,得

$$\begin{aligned} p &= \int \rho(X dx + Y dy + Z dz) + c \\ &= -gz + c \end{aligned}$$

设液面上的压力为 p_0 , 此时液体中任一点 A 处的压力为

$$p_A = p_0 + \rho g(z_0 - z_A) \quad (1-6)$$

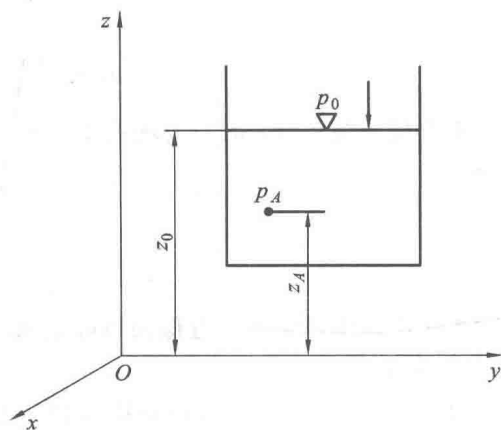


图 1-3 重力作用下流体的平衡

4. 离心力场中相对静止的流体

1) 静压力分布规律

图 1-4 为一个盛有液体的敞口圆柱形容器。设容器以定转速 ω 绕其中心轴旋转,待运动稳定后,各质点都具有相同的角速度,液面形成一个漏斗形的旋转面。现将坐标系固定在运动着的容器上与容器一起旋转,此时液体相对于坐标系处于静止状态。根据达朗贝原理,作用在液体质点上的质量力除了重力 mg 以外,由于存在着向心加速度,所以还应存在着 xOy 平面内虚加的惯性离心力 $m\omega^2 r$,作用在单位质量流体上的惯性离心力为 $m\omega^2 r/m = \omega^2 r$,将 $\omega^2 r$ 在 xOy 平面内分解,即可得出单位质量流体所受的质量力 f 的三个分量为