

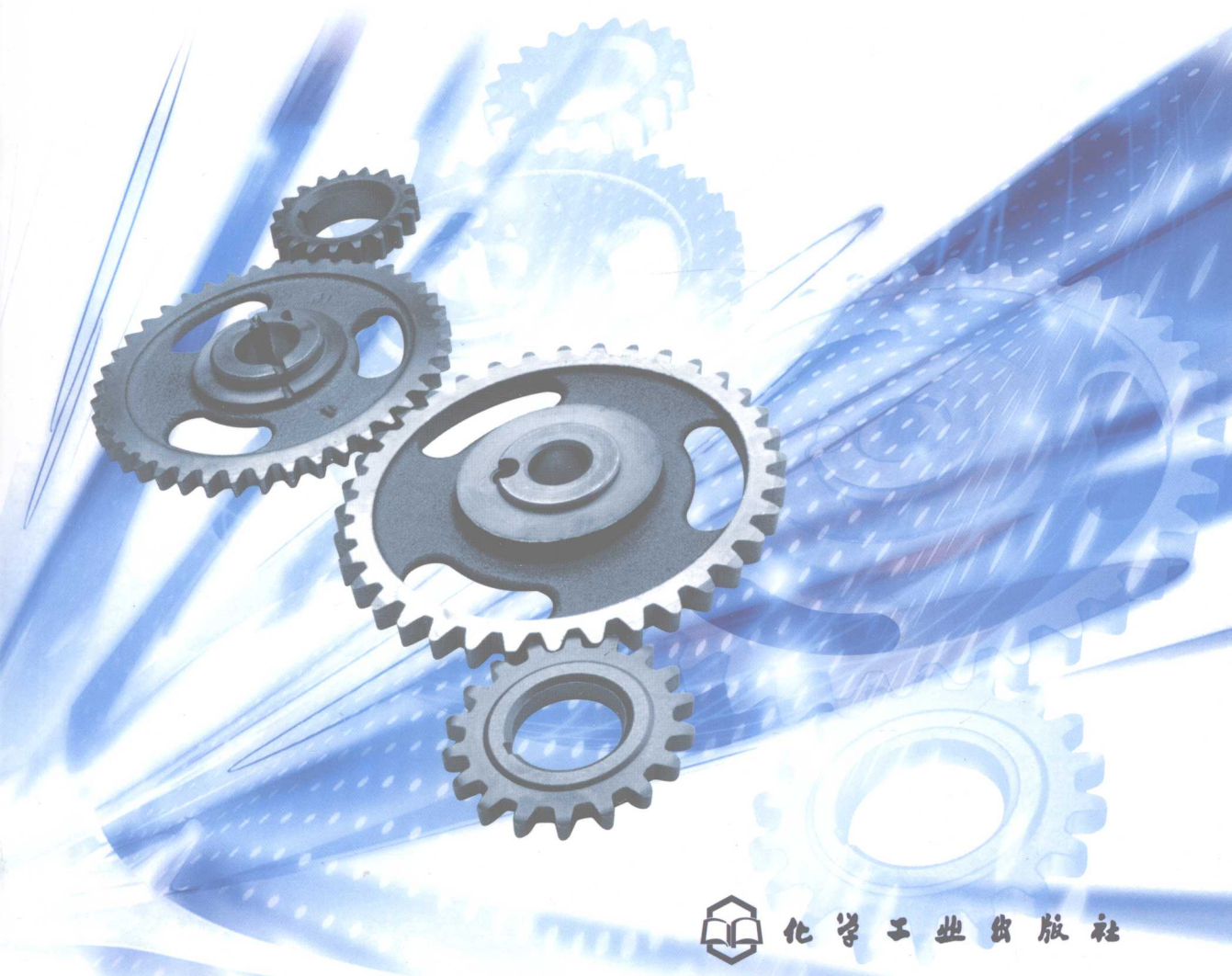


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

过程流体机械

康勇 张建伟 李桂水 编

宗润宽 主审



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

过程流体机械

康 勇 张建伟 李桂水 编
宗润宽 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

分子
· K)]

200°C

. 0525

2. 041

4. 504

1. 024

0. 962

2. 993

1. 058

2. 458

2. 119

. 7109

. 9920

2. 484

2. 170

α

360

350

340

330

320

310

300

290

280

270

260

250

240

230

220

210

200

190

180

本教材比较深入、系统地介绍了过程工程中常用的流体机械，内容主要包括：过程流体机械的概念、分类及应用范围、叶片泵（离心泵、轴流泵、旋涡泵）、容积泵（往复泵、螺杆泵、齿轮泵、液环泵）、往复式压缩机、螺杆式压缩机、离心式压缩机、通风机、离心机的基本结构、工作原理和相关的热力学、流体力学和动力学原理等，并在最后介绍了高速回转件的强度计算。

本书可供普通高等院校过程装备与控制工程、流体机械、化学工程和环境工程等专业的本科生作教材使用，也可供涉及过程流体机械技术学习、研究、生产和应用等方面的科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程流体机械/康勇, 张建伟, 李桂水编. —北京:
化学工业出版社, 2007. 9
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-01081-0

I. 过… II. ①康…②张…③李… III. 化工过程-
流体机械-高等学校-教材 IV. TQ021. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 137376 号

责任编辑: 程树珍 金玉连
责任校对: 蒋 宇

装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京市彩桥印刷有限责任公司
装 订: 三河市前程装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 18 $\frac{1}{4}$ 字数 498 千字 2008 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

工业通常分为两类，一类是以天然资源为原料的过程工业，生产出初级产品；另一类是以过程工业生产出的初级产品作为原料的制造业（商品制造业），加工出人们生活所需的日常用品，如服装、汽车、电视机、冰箱等。产品是过程的结果，公认的产品类别分为四种：硬件、软件、服务和流程性材料。所谓流程性材料指的是经过各种转化制成的产品，以固体（粉粒）、液体、气体或其组合形态为主的材料，通常以散装形式如管道、桶、袋、箱、罐或卷的形式交付。

然而，无论是过程工业还是制造业，均需要把原动机产生的机械能转换成流体（气体、液体等）的动能、压力能和位能。过程流体机械是实现这类能量转化的重要装置之一，并广泛应用于石油化工、冶金、能源、航空航天、制冷、医疗卫生、电力工业及交通运输等部门，也是现代人们日常生活不可或缺的机械。

过程流体机械种类繁多，本书所指的过程流体机械仅限于流体机械中的工作机，而不包括原动机，重点是三机一泵（压缩机、鼓风机、通风机和泵），它们是流体机械的重要组成部分，用来将机械能转变为流体的压力能、动能和位能，是过程工业的心脏设备。选择、应用、管理好这些流体机械，对工厂的装备投资，生产产品的质量、产量、成本和效益等都具有十分重要的意义，因而它是过程装备与控制工程、流体机械、化学工程或其他过程工程专业的一门核心课程。

本教材较系统的阐述了过程流体机械的基本工作原理、结构形式、运行性能与调节控制以及选型的基本原则。由于教学对象、教学目的和学时所限，力求整个流体机械学科横向的覆盖，并在介绍不同类型流体机械的基本结构形式、工作原理、基本参数和应用领域时，努力把握各种流体机械在本质上的机理共同性和相互间的有机联系与差异。其目的是引导学生触类旁通，尽量拓宽知识面，使学生既掌握有关的基本知识，又有利于培养学生的跨学科发展和科技创新的能力。

本书第1~4章由康勇编写，第5~6章由李桂水编写，第7~9章由张建伟编写，全书由康勇统稿。

本书由天津大学宗润宽教授主审，并且在成稿前后均付出了大量的心血和汗水，在此表示诚挚谢意。

由于编写人员的水平有限，书中难免有不妥之处，望广大读者不吝赐教、批评指正。

编 者

2008. 3. 1

目 录

1 概论	1	3.2.5 往复泵的类型	74
1.1 过程流体机械概念	1	3.2.6 往复泵的润滑	81
1.1.1 过程及过程工业	1	3.3 螺杆泵	83
1.1.2 过程装备与过程流体机械	1	3.3.1 单螺杆泵	83
1.2 过程流体机械的分类	2	3.3.2 三螺杆泵	90
1.2.1 按作用机理分类	2	3.3.3 双螺杆泵和五螺杆泵	96
1.2.2 按流体形态分类	2	3.4 齿轮泵	97
1.2.3 按流体运动特点分类	2	3.4.1 外啮合齿轮泵	97
1.3 过程流体机械的用途	2	3.4.2 内啮合齿轮泵	100
思考与练习题	3	3.4.3 高压齿轮泵的特点	100
参考文献	3	3.5 液环泵	103
2 叶片泵	4	3.5.1 液环泵的工作原理及特点	103
2.1 离心泵	4	3.5.2 液环泵的分类及结构	104
2.1.1 概述	4	3.5.3 主要性能参数	104
2.1.2 离心泵的结构、工作原理与基本方程	6	3.6 泵的安装、运转和维护	107
2.1.3 离心泵的性能曲线	13	3.6.1 安装	107
2.1.4 流量调节	26	3.6.2 管路	108
2.1.5 汽蚀现象及成因	28	3.6.3 运转	112
2.1.6 离心泵的选择	32	3.6.4 维护	114
2.1.7 离心泵的轴向力及其平衡	33	思考与练习题	114
2.1.8 离心泵的主要零部件	37	参考文献	115
2.1.9 离心泵的典型结构	44	4 往复式活塞式压缩机	116
2.2 轴流泵	49	4.1 概述	116
2.2.1 轴流泵的原理和结构	49	4.1.1 压缩机的应用与分类	116
2.2.2 轴流泵的基本方程	49	4.1.2 活塞式压缩机的主要优缺点	118
2.2.3 轴流泵的性能特点	50	4.1.3 活塞式压缩机的种类及型号的编制	118
2.3 旋涡泵	51	4.2 活塞式压缩机的热力学基础	120
2.3.1 旋涡泵的结构和工作原理	51	4.2.1 基本热力状态参数	120
2.3.2 旋涡泵的基本方程式	52	4.2.2 理想气体状态方程式	120
2.3.3 旋涡泵的汽蚀和流量调节	53	4.2.3 压缩机的理论循环	121
思考与练习题	54	4.2.4 压缩机工作过程的示功图分析	125
参考文献	55	4.2.5 气缸的实际吸入气量	126
3 容积泵	56	4.2.6 压缩机的排气量	129
3.1 概述	56	4.2.7 压缩机的功率和效率	130
3.2 往复泵	56	4.2.8 多级压缩	133
3.2.1 往复泵的工作原理及分类	57	4.3 活塞式压缩机动力学	139
3.2.2 往复泵的主要性能参数	58		
3.2.3 空气室的工作原理及结构	66		
3.2.4 往复泵的液力端	68		

4.3.1	曲柄连杆机构的运动	139	5.7.4	吸气节流调节	179
4.3.2	曲柄连杆机构运动惯性力的分析	140	5.7.5	滑阀调节	179
4.3.3	压缩机中的作用力	141	思考与练习题		180
4.3.4	惯性力的平衡	144	参考文献		181
4.3.5	切向力图	147	6 离心式压缩机		182
4.4	活塞式压缩机的总体结构	149	6.1	概述	182
4.4.1	活塞式压缩机的结构形式	149	6.1.1	离心式压缩机的特点	182
4.4.2	主要参数的选择	152	6.1.2	离心式压缩机的基本结构及工作原理	182
4.5	活塞式压缩机主要零部件结构简介	152	6.2	离心式压缩机热力过程分析	184
4.5.1	气缸	153	6.2.1	连续性方程	184
4.5.2	活塞组件	154	6.2.2	欧拉方程	185
4.5.3	填料函	157	6.2.3	功率和效率	186
4.5.4	气阀	158	6.2.4	级中气体状态的变化	190
4.5.5	曲轴	160	6.2.5	离心压缩机级的性能曲线	195
4.6	活塞式压缩机的运转	162	6.3	叶轮	197
4.6.1	输气量的调节	162	6.3.1	叶轮的结构形式	197
4.6.2	压缩机的润滑	163	6.3.2	叶轮的主要参数	199
4.6.3	压缩机的维护	164	6.4	其他零件	203
思考与练习题		164	6.4.1	扩压器	203
参考文献		166	6.4.2	回流器和蜗壳	206
5 螺杆式压缩机		167	6.5	离心式压缩机的密封	208
5.1	概述	167	6.5.1	迷宫密封的一般结构形式和原理	208
5.1.1	螺杆式压缩机的优缺点	167	6.5.2	迷宫密封漏气量的计算	210
5.1.2	喷油式螺杆压缩机的优缺点	169	6.5.3	浮环密封	211
5.2	螺杆式压缩机的性能及应用范围	169	6.5.4	干气密封	213
5.2.1	螺杆式压缩机的性能	169	6.5.5	其他类型的密封	215
5.2.2	螺杆式压缩机的应用范围	170	思考与练习题		216
5.3	螺杆式压缩机的排气量	170	参考文献		217
5.4	喷油式螺杆压缩机	173	7 通风机		218
5.5	螺杆式压缩机基本参数	175	7.1	概述	218
5.5.1	转子的圆周速度	175	7.1.1	风机的分类	218
5.5.2	转子的相对长度	176	7.1.2	风机的基本参数	219
5.5.3	螺杆压缩机的级数和压力比	176	7.1.3	风机的应用	220
5.5.4	间隙	177	7.2	离心通风机	221
5.6	单螺杆压缩机	178	7.2.1	离心通风机的工作原理	221
5.7	螺杆式压缩机的排气量调节	179	7.2.2	离心通风机的基本结构形式	222
5.7.1	旁通调节	179	7.2.3	叶轮	222
5.7.2	运行—停机调节	179	7.2.4	离心通风机的型号编制	225
5.7.3	转速调节	179	7.2.5	离心通风机的相似定律	226
			7.2.6	离心通风机的性能曲线	227
			7.3	离心通风机的调节与运行	231

7.3.1	离心通风机的调节方法及其比较	231	8.3.2	刮刀卸料沉降离心机	257
7.3.2	离心通风机的串联与并联	233	8.3.3	螺旋卸料沉降离心机	257
7.3.3	离心通风机运行注意事项	234	8.4	离心分离机	259
7.4	轴流通风机	234	8.4.1	管式分离机	259
7.4.1	轴流通风机的工作原理	234	8.4.2	室式分离机	260
7.4.2	轴流通风机的结构	234	8.4.3	碟式分离机	260
7.4.3	轴流通风机的叶轮	235	8.5	离心机的功率计算	261
7.4.4	轴流通风机的导叶	238	8.5.1	启动转动件所需功率	262
7.4.5	轴流通风机的型号编制	238	8.5.2	启动物料到操作转速所需功率	262
7.4.6	轴流通风机的性能曲线	239	8.5.3	轴承摩擦消耗的功率	262
7.4.7	轴流通风机的运转与调节	240	8.5.4	机械密封摩擦消耗的功率	263
7.5	通风机的选型	241	8.5.5	转鼓及物料表面与空气摩擦消耗的功率	263
7.5.1	通风机的选择原则	241	8.5.6	卸出滤渣(或沉渣)消耗的功率	263
7.5.2	通风机的选择方法	242	8.5.7	离心分离机用向心泵排液时功率	265
	思考与练习题	242	8.5.8	总功率计算	265
	参考文献	243		思考与练习题	265
8	离心机	244		参考文献	266
8.1	概述	244	9	高速回转元件的强度和转轴的临界转速	268
8.1.1	分离因数的概念	244	9.1	高速回转轮盘和转鼓壁的强度	268
8.1.2	离心液压	245	9.1.1	高速回转轮盘的强度	268
8.1.3	离心过滤速率	245	9.1.2	高速转鼓壁的强度	273
8.1.4	沉降离心机的生产能力	246	9.1.3	回转元件有限元强度分析简介	276
8.2	过滤式离心机	247	9.2	高速转轴的临界转速	277
8.2.1	三足式离心机	247	9.2.1	转轴的临界转速	277
8.2.2	上悬式离心机	249	9.2.2	临界转速的计算	278
8.2.3	卧式刮刀卸料离心机	250	9.2.3	影响临界转速的其他问题	280
8.2.4	虹吸刮刀卸料离心机	251		思考与练习题	281
8.2.5	活塞推料离心机	252		参考文献	282
8.2.6	离心力卸料离心机	253	附录		283
8.2.7	螺旋卸料过滤离心机	254			
8.2.8	振动卸料离心机	255			
8.2.9	进动卸料离心机	256			
8.3	沉降离心机	256			
8.3.1	三足式沉降离心机	256			

1 概论

1.1 过程流体机械概念

1.1.1 过程及过程工业

过程是指事物状态变化在时间上的持续和空间上的延伸，它描述的是事物发生状态变化的经历。

根据生产方式、扩大生产的方法以及生产时物质（物料）所经受的主要变化，工业生产可以分为过程工业和产品（生产）工业两大类。

过程工业（process industry）是进行物质转化的所有工业过程的总称，包含了大部分重工业，诸如化工、石油化工、能源、冶金、建材、核能、生物技术以及医药等工业。它的特点是：工业生产使用的原料主要是自然资源；产品主要用作生产工业的原料；生产过程主要是连续生产；原料中的物质在生产过程中经过许多化学变化和物理变化；产量的增加主要靠扩大工业生产规模或者靠“放大生产规模”来达到；过程工业同时又是操作物质——能量流特别大的工业。

过程工业是一个国家的基础工业，对于发展国民经济及增强国防力量起着关键作用。每一种工业均需从原理上研究如何提高生产率、降低投资费用及操作成本等，需从原理上改进设备，提高生产能力，并不断从创新的角度发展新的生产过程，使过程生产无污染，符合可持续发展的基本原则。

1.1.2 过程装备与过程流体机械

实现过程工业的硬件手段称为过程装备，如机械、设备、管道、工具和测量仪器仪表以及自动控制用的电脑、调节操作机构等。所以过程装备是实现产品生产的物质条件。过程装备的现代化、先进性在某种意义上讲，对过程工业所生产产品的质量会起着决定性的影响。过程流体机械是过程装备中的一大类型，是过程工业中广泛使用的流体机械。

广义地讲，流体机械是指在流体具有的机械能和机械所做的功之间进行能量转换的机械的总称。水泵、风机、压缩机、水轮机、汽轮机等都属于流体机械，与人们的生活有着密不可分的关系。自来水和管道煤气需要用水泵和压缩机加压以便输送到千家万户；在汽车上用燃料泵来输送燃油，液力变矩器用于变速系统，散热器冷却泵和风机用于冷却系统；在发电厂中，流体机械更是必不可少的机械，如核电站中的冷却泵，火电厂中的泵、风机和汽轮机，水电站中的水轮机等；在日常生活用品和食品工业中，各种各样的流体机械被用于压送、干燥、冷却和除尘过程中。此外，在高新技术领域中也广泛地使用流体机械，如人工心脏泵、液体火箭燃料泵等。

流体机械按作用功能可以分为：工作机械类、动力机械类和动力传动机械类。

① 工作机械类 它包括叶片式和容积式的泵、风机、压缩机等，其特点是吸收原动机

提供的机械能，输出高能量的流体（高压、高速流动的流体）。

② 动力机械类 包括水轮机、液动或气动马达以及涡轮动力机，乃至风力发电的风车也属此类机械。其特点是利用输入的流体机械能（位能、压力能或动能），通过机械的转换而输出机械能量（以转速和转矩形式输出）。

③ 动力传动机械类 这是一类特殊的流体机械，用来作为机械动力的传输、变换装置使用，包括液力传动机械、液压传动机械及气压传动机械三大类。这类机械的输入、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。

根据以上分类，就可以准确无误地知道所谓的过程流体机械就是流体机械中的工作机械。

1.2 过程流体机械的分类

过程流体机械实际上就是流体机械大类中的工作机械。其分类方法仍可遵循传统流体机械的分类方法，即按照不同的原则，过程流体机械可以有不同的分类。

1.2.1 按作用机理分类

① 叶片式流体机械 它包括离心泵、轴流泵等各种叶片式泵、通风机、压缩机等。其基本特点是工作过程借助于叶轮的作用来实现。

② 容积式流体机械 它包括各类液体介质的往复式泵、转子泵和各类气体介质的压缩机等。它们的工作过程均通过“工作容积改变”的作用来实现。

③ 其他作用机理流体机械 如射流泵、液环泵、旋涡泵等。

1.2.2 按流体形态分类

按所用流体形态的不同有液体介质和气体介质两类流体机械，如泵和离心分离机属于前者，压缩机和风机属于后者。这两类机械由于介质密度相差悬殊，因此在单位功率体积比上相差很大，同时在介质密封的方法和具体结构上也大有差别。

① 泵 将机械能转变为液体的能量，用来给液体增压与输送液体的机械称为泵。在特殊情况下流经泵的介质为液体和固体颗粒的混合物，这种泵称为杂质泵，亦称为液固两相流泵。

② 压缩机 将机械能转变为气体的能量，用来给气体增压与输送气体的机械称为压缩机。按照气体压力升高的程度，又区分为压缩机、鼓风机和通风机等。

③ 分离机 用机械能将混合介质分离开来的机械称为分离机。这里所提到的分离机是指分离流体介质或以流体介质为主的离心分离机。

1.2.3 按流体运动特点分类

① 有压流动类 绝大多数流体机械在工作过程中流体是在封闭流道中运动的，相对压力一般不等于零，流动属有压流动。

② 无压流动类 此类流体机械工作中流体运动有一个相对压力为零的自由表面，因此称无压流动。至于液体内部各处相对压力也不一定完全为零。

此外，按照不同的应用和结构特点，流体机械尤其是泵和风机类产品，还有很多工程上的习惯分类，如船用泵、矿用泵、潜水泵、磁力驱动泵、自吸式泵、无堵塞泵、杂质泵、核工程用泵、航天航空用泵、输送特殊气体的压缩机、耐高温的锅炉引风机等。它们在工作原理上并无新的本质性特点。

1.3 过程流体机械的用途

流体机械应用领域很广，其产品和技术广泛应用于石油化工、化工、电力、冶金、环

保、石油和天然气开采及集中输送、城市基础设施建设、煤炭及矿产开采、水利、轻工、建材、纺织、医药、农业、食品、交通、国防等国民经济各领域。如果把奔流着千百种液体和气体物质的各类大小流体系统视为过程工业和社会生活的血管，那么流体机械就是它们的“心脏”。

就以泵来说，这种通用流体机械随处可见。在工农业生产中，只要有流体流动的地方基本都有泵在工作，如农田排灌、石油化工、城市给排水系统、矿业、冶金、造船、制药、酿造等行业均离不开泵。采油工业中需要高扬程的离心泵向油田油层注水以保持油层压力。在采矿工业中需用大量的潜水电泵或深井泵来排除矿区的积水，选矿行业需使用大量的泥浆泵来输送矿浆。化学和石油化学工业也需要各种类型的泵来满足生产的需求。

再从行业的角度来看，以电力为例，不管是火电、水电或核电，流体机械都是该领域重要的机械设备。在高温高压工况下工作的锅炉给水泵是火电厂除锅炉、汽轮机、发电机外最重要的机械设备。锅炉鼓风机、引风机、输送灰渣的渣浆泵，各种循环泵、冷凝泵均是电力行业不可少的设备。在石油、化工行业，用于向地层注水的高压泵、注气的压缩机，用于集油和输油的泵和输气的压缩机以及化工流程中输送酸、碱、盐、原料、成品、半成品的耐腐蚀泵，可以完全避免泄漏的屏蔽泵，输送液态烃、氧、氢等低温液体的低温泵，合成氨、尿素、甲醇、乙烯、石油精炼工艺等所需泵和压缩机等，无一不是生产中的关键性设备。实际上，化工设备与机械中除了反应罐、塔等高压高温容器装置外，就是各种泵和压缩机，因为密如蛛网的各种管网输送的液态和气体物质，都需依靠它们提供流动的动力。

总之，过程流体机械的用途极为宽广，学习这门课程的目的之一就是要学会应用这些流体机械。只有使用得科学合理，才能在生产过程中发挥积极作用。要想达到这一目的，那就必须要求使用者系统掌握过程流体机械的基本知识。

思考与练习题

1. 什么是过程和过程工业？
2. 什么是过程流体机械？如何分类？
3. 举例说明过程流体机械在工业生产领域的应用情况。

参 考 文 献

- [1] 王福安, 任宝增. 绿色过程工程. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 姜培正. 过程流体机械. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [3] 陈次昌. 流体机械基础. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 陆肇达. 流体机械基础教程. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [5] 吴玉林. 流体机械及工程. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [6] 张克危. 流体机械原理. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [7] 张湘亚, 陈泓. 石油化工流体机械. 北京: 石油大学出版社, 1996.

2 叶片泵

2.1 离心泵

2.1.1 概述

2.1.1.1 泵的定义、分类和应用范围

泵在过程流体机械中占有很大的比重，它是一种通用机械，是输送液体并提高液体压力的机器。各个工业领域中凡是有液体流动的地方就会有泵在工作，其主要的有水利、石油、化工、城市给排水、冶金、造船和交通运输等工业部门。

根据作用原理，泵可分为以下三大类。

① 容积泵 利用工作室容积周期性变化来输送并提高液体的压力，如活塞泵、柱塞泵、隔膜泵、齿轮泵、滑板泵（或滑片泵）、螺杆泵等。

② 叶片泵 依靠泵内高速旋转的叶轮把能量传给液体、进行液体输送并提高液体压力，属于这种类型的泵有各种形式的离心泵、混流泵、轴流泵及旋涡泵等。

③ 其他类型泵 利用流体静压力或流体动能来输送液体的流体动力泵，例如射流泵和水锤泵等。

各种类型泵的使用范围是不同的，常用泵的使用范围如图 2-1 所示。由图 2-1 可以看出离心泵所占的区域是比较大的。离心泵适用的流量范围为 $5 \sim 20000 \text{m}^3/\text{h}$ ，扬程范围为 $8 \sim 2800 \text{m}$ 。离心泵具有转速高、体积小、重量轻、效率高、流量大、结构简单、性能平稳、容易操作和便于维修等优点。离心泵的缺点是在启动前需要灌泵。另外，液体黏度对泵的性能

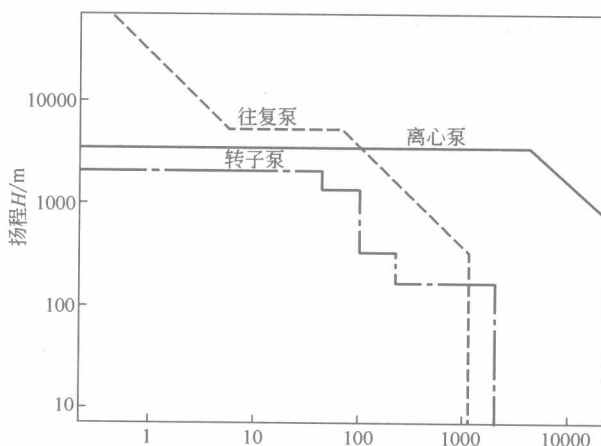


图 2-1 常用泵的使用范围

影响较大,对某一流量的离心泵,有一相应的黏度极限,如果液体黏度超过此黏度极限,泵的效率迅速下降,甚至无法工作。

2.1.1.2 关于泵的名词术语

(1) 流量 Q

流量是泵在单位时间内排送液体的体积,常用单位为 m^3/s 、 m^3/h 或 L/s 。

理论流量 Q_T 是指单位时间内吸入叶轮中的液体体积,与泵的流量 Q 的关系为

$$Q_T = Q + \sum q \quad (2-1)$$

式中 $\sum q$ ——泵在单位时间内的泄漏量,单位与 Q 相同。

(2) 扬程 (压头) H

扬程是指泵输送单位重量的液体从泵进口处(泵进口法兰)到泵出口处(泵出口法兰)总机械能的增值,即单位重量液体通过泵获得的有效能量,常用单位为 m 。根据伯努利方程,扬程的数学表达式为

$$\begin{aligned} H &= \left(Z_2 + \frac{c_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} \right) - \left(Z_1 + \frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} \right) \\ &= (Z_2 - Z_1) + \left(\frac{c_2^2}{2g} - \frac{c_1^2}{2g} \right) + \left(\frac{p_2}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g} \right) \end{aligned} \quad (2-2)$$

式中 p_1, p_2 ——泵进、出口处液体的压力, Pa ;

c_1, c_2 ——泵进、出口处液体的速度, m/s ;

Z_1, Z_2 ——泵进、出口处到任意的测量基准面的距离, m ;

ρ ——液体密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

理论扬程 H_T 是指泵叶轮向单位重量的液体所传递的能量,与泵扬程 H 的关系为

$$H_T = H + \sum h_h \quad (2-3)$$

式中 $\sum h_h$ ——水力损失, m 。

(3) 转速 n

泵的转速是指泵轴每分钟旋转的次数,单位为 r/min 。

(4) 功率 P

泵的功率 P 通常指泵轴的输入功率,即原动机传到泵轴上的功率,一般称为轴功率,单位为 kW 或 W 。

泵的输出功率 P_e 是表示单位时间内泵输送出去的液体从泵中获得的有效能量,也称为有效功率,即

$$P_e = Q\rho gH/1000 \quad (2-4a)$$

或

$$P_e = \frac{Q\gamma H}{102} \quad (2-4b)$$

式中 Q ——泵的流量, m^3/s ;

H ——泵的扬程, m ;

ρ ——液体密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

γ ——液体重度, N/m^3 , $\gamma = \rho g$ 。

(5) 效率 η

泵的效率 η 是指有效功率 P_e 和轴功率 P 之比,即

$$\eta = \frac{P_e}{P} \quad (2-5)$$

2.1.2 离心泵的结构、工作原理与基本方程

2.1.2.1 离心泵的结构与工作原理

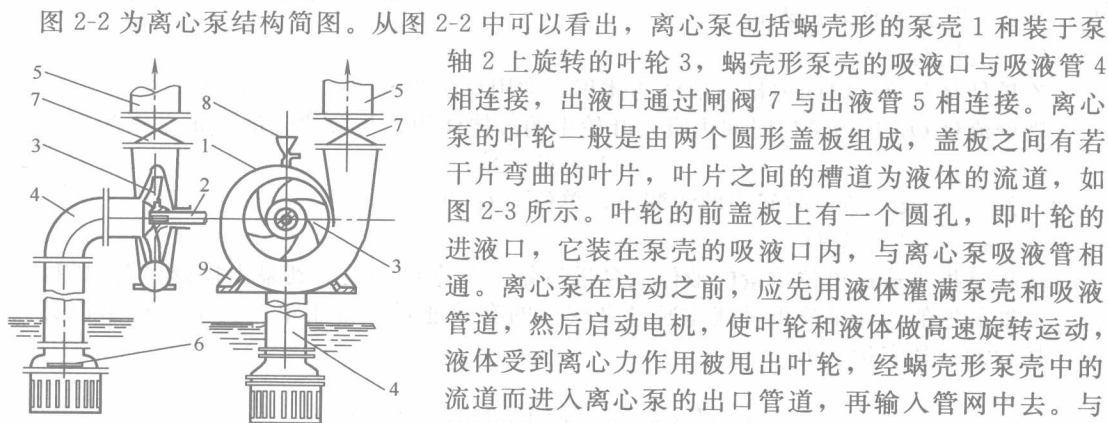


图 2-2 单级单吸式离心泵的构造
1—泵壳；2—泵轴；3—叶轮；4—吸液管；5—出液管；6—底阀；7—闸阀；8—灌水漏斗；9—泵座

从图 2-2 中可以看出，离心泵包括蜗壳形的泵壳 1 和装于泵轴 2 上旋转的叶轮 3，蜗壳形泵壳的吸液口与吸液管 4 相连接，出液口通过闸阀 7 与出液管 5 相连接。离心泵的叶轮一般是由两个圆形盖板组成，盖板之间有若干片弯曲的叶片，叶片之间的槽道为液体的流道，如图 2-3 所示。叶轮的前盖板上有一个圆孔，即叶轮的进液口，它装在泵壳的吸液口内，与离心泵吸液管相通。离心泵在启动之前，应先用液体灌满泵壳和吸液管道，然后启动电机，使叶轮和液体做高速旋转运动，液体受到离心力作用被甩出叶轮，经蜗壳形泵壳中的流道而进入离心泵的出口管道，再输入管网中去。与此同时，离心泵叶轮中心处由于液体被甩出而形成真空区，吸液池中的液体便在内外压力差作用下，沿吸液管而源源不断地进入叶轮吸液口，又受到高速转动叶轮的作用，液体被甩出叶轮而进入出口管道，如此循环，就形成了离心泵连续输液过程。

由上述可知，离心泵的工作过程实际上是一个能量的传递和转化的过程，它把电动机高速旋转的机械能转化为被吸、压液体的动能、位能和压力能。在这个传递和转化过程中，伴随着许多能量损失，这些能量损失越大，离心泵的性能就越差，工作效率就越低。

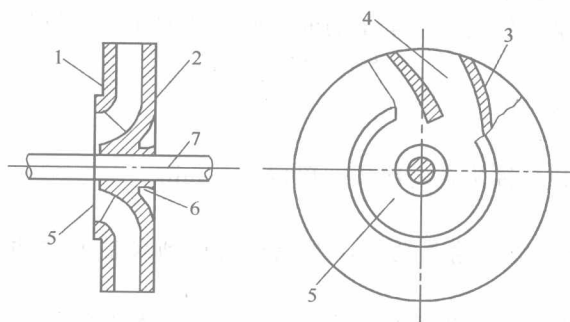


图 2-3 单吸式叶轮
1—前盖板；2—后盖板；3—叶片；4—流道；5—吸液口；6—轮毂；7—泵轴

离心泵的工作原理与后面讲到的容积泵完全不同。容积泵是靠工作部件将液体强行排挤出去，而离心泵是靠离心力将液体从叶轮中抛出去。离心泵的流量和扬程之间有相互对应的关系，因此可以用安装在泵出液管路上的阀门来调节流量。但是对于容积泵，一般不允许用这种方法来调节流量。关小排液管路上的阀门，不仅起不到调节流量的作用，反而会使泵因排压过大而发生事故。但在离心泵工作过程中，即使完全关死排液管路上的阀门，在短时间内一般也不会引起事故。

2.1.2.2 叶轮内流体的速度三角形

离心泵工作时，叶轮内的液体，一方面随着叶轮一起高速旋转，做旋转运动；另一方面又在转动着的叶轮中从内向外运动。因此，液体在叶轮中的运动是一种复杂运动，如图 2-4

所示。当叶轮不转动时，液体流过叶轮的流动如图 2-4 (a) 箭头所示。当叶轮外围通道封闭时，叶轮内的液体随着叶轮一起转动，如图 2-4 (b) 箭头所示。如果叶轮转动，其内的液体既随叶轮一起转动又沿叶轮流道流动时，液体运动如图 2-4 (c) 箭头所示。液体相对于静止坐标（泵体）的运动——绝对运动速度可以由液体随着叶轮旋转的牵连运动速度 u 和液体从旋转着的叶轮由内向外的相对运动速度 w 合成而得，即

$$c = u + w$$

三种速度的向量和所组成的图形，即为相应点处液体运动的速度三角形，如图 2-4 (d) 所示。叶轮进出口处的速度三角形如图 2-5 所示。

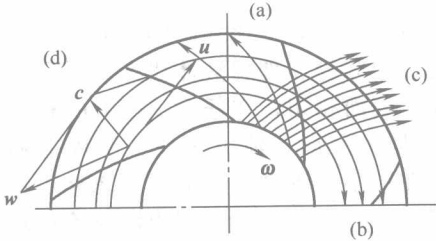


图 2-4 液体的绝对运动

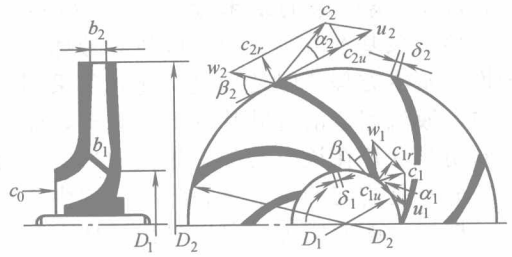


图 2-5 叶轮进出口处的速度三角形

假定叶轮中的叶片为无限多，而且认为叶片的厚度薄到可忽略不计时，称为理想叶轮。液体在理想叶轮中的流动，将紧紧地受到叶片的约束。这时，其相对运动的轨迹与叶片的形状完全一致，相对速度的方向与叶片相切。

理想叶轮内任一点 i 上的液体流动速度三角形（图 2-6）可根据叶轮的形状尺寸、工作转速及流量条件得出。速度三角形的底边圆周 u_i ，只与叶轮的尺寸 D_i 和工作转速 n 有关，其值为

$$u_i = \pi D_i n / 60 \tag{2-6}$$

而方向指向旋转方向并与圆周相切。速度三角形的高，即径向分速度（轴面速度） $c_{ri\infty}$ ，只与流量 Q_T 及叶轮几何尺寸有关，其值为

$$c_{ri\infty} = \frac{Q_T}{\pi D_i b_i} \tag{2-7}$$

式中 b_i ——叶轮内任意点 i 处轴面的流通宽度，m；

D_i ——叶轮内任意点 i 处的叶轮直径，m。

C_r 的方向垂直于圆周速度 u_i 并由内指向外。液流在该点处的相对速度 $w_{i\infty}$ 的方向与叶片表面相切。速度三角形的具体作法如图 2-6 所示。过 i 点作圆周切线并在旋转方向量取 u_i 值得 A 点，在 i 点的径向线上量 $c_{ri\infty}$ 值，作平行线 PQ 平行于 iA ，再过 A 点作平行于叶片切线的直线交 PQ 于 E 点，连接 iE 即得 i 点的液体速度三角形。同样，在叶轮进出口处皆可画出类似的速度三角形。

在实际叶轮中，叶轮叶片数并不是无限多，而是有限的，并且叶片也具有一定的厚度。由于叶片间液体惯性的作用，液体在叶轮中的运动轨迹不与叶片形状一致。液体流出流道时，相对速度的方向角 β_2 （液体相对速度与圆周速度反方向间的夹角）将与叶片出口安置角 β_{2A} （叶片出口处的切线与圆周速度反

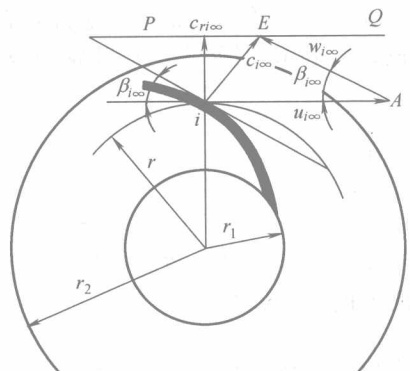


图 2-6 叶轮内任意点内速度三角形

方向间的夹角) 不相等, 需作相应的修正。由于受叶片厚度的影响, 径向分速度 c_{2r} 应为

$$c_{2r} = \frac{Q_T}{\pi D_2 b_2 \tau_2} \quad (2-8)$$

式中 τ_2 ——叶轮出口处叶片阻塞系数。

由此可知, 表示叶轮中液体运动速度大小和方向的速度三角形, 其形状和大小决定于叶轮的几何形状、尺寸、工作转速及理论流量, 即速度三角形的形状及大小对应着离心泵的一定工况。离心泵的性能与泵的工况有密切的关系, 因此, 叶轮中的液体速度三角形, 在研究和分析离心泵的性能中起重要作用。

2.1.2.3 离心泵的基本方程——理论扬程 $H_{T\infty}$ 方程

离心泵基本方程式表示叶轮对液体所做的功与液体运动状态变化之间的关系。为了在分析推导基本方程式时使问题简化, 仍采用前面所述的理想叶轮和理想液体概念, 即在理想叶轮中, 液流完全沿着叶片的形状流动, 流动方向与叶片表面相切; 在任意 i 点上的相对速度方向角与叶片在该点处的安置角 (叶片离角) 相等, 即 $\beta_i = \beta_{iA}$; 流道中任一圆周上相对速度的分布是均匀的; 液体在流动过程中, 认为液体黏性很小, 流动阻力损失可忽略不计。

根据上面的假定, 可以导出液体在叶轮中作稳定流动时, 单位重量理想液体流过理想叶轮所得到的能量头——理论扬程 $H_{T\infty}$ 的方程式。

根据理论力学动量矩定理“质点系对某轴的动量矩对时间的导数等于外力对同轴的力矩”。

$$\frac{dL}{dt} = \sum M_0^E \quad (2-9)$$

式中 L ——液体对转轴的动量矩;
 $\sum M_0^E$ ——外力 E 对转轴 O 的力矩。

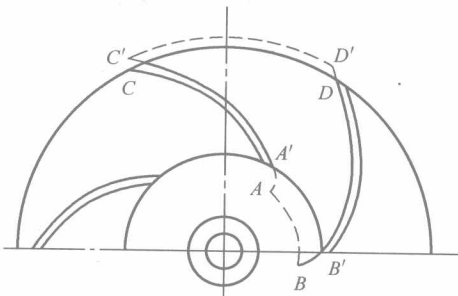


图 2-7 动量矩定理的应用

设在某时刻 t , 流体充满两叶片的空间 $ABDC$, 如图 2-7 所示。在时刻 $t+dt$ 时, 液体流到 $A'B'D'C'$ 位置。泵在稳定工况下, 两叶片间的 $A'B'D'C'$ 空间部分液体的动量矩保持不变。因此在上述两个时刻间, 液流动量矩的增值是 $ABB'A'$ 和 $CDD'C'$ 两部分液流的动量矩之差。根据不可压缩液体的连续方程, 这两部分液体的流量相等、质量相等, 即

$$M_{ABB'A'} = M_{CDD'C'} = \frac{\rho Q_T}{Z} dt \quad (2-10a)$$

对整个叶轮而言, 液流中产生动量矩变化的质量为

$$\sum M_{ABB'A'} = \sum M_{CDD'C'} = \rho Q_T dt \quad (2-10b)$$

在 $ABB'A'$ 处的液流速度为流道进口处流速 c_1 , 在 $CDD'C'$ 处的液流速度为流道出口处流速 c_2 , 在 dt 时间内流过叶轮的液流动量矩变化为

$$dL = L'' - L' = \rho Q_T \left(\frac{D_2}{2} c_{2u\infty} - \frac{D_1}{2} c_{1u\infty} \right) dt \quad (2-11)$$

由动量矩定理得

$$\sum M_0^E = \frac{dL}{dt} = \rho Q_T \left(\frac{D_2}{2} c_{2u\infty} - \frac{D_1}{2} c_{1u\infty} \right) \quad (2-12)$$

此力矩为叶片推动液流时转轴所受的力矩, 即流量为 Q_T 时转轴的做功力矩。单位时间内叶轮所做的功, 即功率

$$P_i = \sum M_0^E \omega = \rho Q_T (u_2 c_{2u\infty} - u_1 c_{1u\infty}) \quad (2-13)$$

根据理论扬程 $H_{T\infty}$ 的定义

$$P_i = Q_T H_{T\infty} \rho g \quad (2-14)$$

所以泵的理论扬程计算式为

$$H_{T\infty} = (u_2 c_{2u\infty} - u_1 c_{1u\infty}) / g \quad (2-15)$$

上式为离心泵基本方程式，也称为欧拉方程式。

对于一般离心泵，都假定 $c_{1u\infty} \approx 0$ ，故一般把式 (2-15) 写成

$$H_{T\infty} = u_2 c_{2u\infty} / g \quad (2-16)$$

在出口速度三角形中，根据几何关系

$$c_{2u\infty} = u_2 - c_{2r\infty} \cot\beta_{2A} \quad (2-17)$$

可得离心泵基本方程式的另一种表达式

$$H_{T\infty} = \frac{u_2}{g} (u_2 - c_{2r\infty} \cot\beta_{2A}) / g \quad (2-18)$$

对上面离心泵基本方程式进行分析，可以得出提高扬程的途径及其影响因素主要有以下三个方面。

i. 基本方程式的各种表达形式是在理想叶轮和理想液体的假定下推导出来的，所以，其扬程为理想叶轮的理论扬程 $H_{T\infty}$ 。对于单位重量的实际液体，流过实际叶轮后的能量增值，即实际扬程 H ，总是小于理想叶轮的理论扬程 $H_{T\infty}$ 。

ii. 基本方程式 (2-15) 表明，离心泵的理论扬程 $H_{T\infty}$ 只与液体在流道出口处速度三角形边长 u_2 、 $c_{2u\infty}$ 和 u_1 、 $c_{1u\infty}$ 有关，而与泵输送液体的性质（如重量）无关。因此，离心泵的理论扬程 $H_{T\infty}$ 是由泵叶轮的形状尺寸、工作转速及流量所决定。同一台离心泵，在相同的转速和体积流量下工作时，不论输送什么液体，叶轮给出的理论扬程 $H_{T\infty}$ 都是相同的。由于各种液体的密度差异，泵出口的压力不相同。

iii. 基本方程式 (2-18) 表明，提高泵的扬程 $H_{T\infty}$ 的途径包括提高泵的转速 n 、增大叶轮直径 D_2 、增大叶轮叶片离角 β_{2A} （叶轮出口处的叶片安置角 β_{2A} 也常称为叶片离角）和降低泵的流量等。

2.1.2.4 出口安置角和叶片数对扬程的影响

将式 (2-6) 和式 (2-8) 代入式 (2-18) 中，得

$$H_{T\infty} = \frac{u_2}{g} (u_2 - c_{2r\infty} \cot\beta_{2A}) = \frac{\pi D_2 n}{60g} \left(\frac{\pi D_2 n}{60} - \frac{Q_T}{\pi D_2 b_2} \cot\beta_{2A} \right) \quad (2-19)$$

可知，当泵的叶轮尺寸、转速和流量一定时，理论扬程 $H_{T\infty}$ 随叶片离角的增大而增加。对于图 2-8 所示的三种不同类型的叶片，当 $\beta_{2A} < 90^\circ$ ，叶片弯曲方向与叶轮旋转方向相反，即图 2-8 (a) 所示的后弯式叶片；当 $\beta_{2A} = 90^\circ$ ，即为径向叶片，如图 2-8 (b) 所示；当 $\beta_{2A} > 90^\circ$ ，叶片弯曲方向与叶轮旋转方向相同，即图 2-8 (c) 所示的前弯式叶片。图 2-8 (d) 表示相应的速度三角形。

由上述分析得出，前弯式叶片所产生的理论扬程 $H_{T\infty}$ 最大。

对泵来讲，一般都希望静压头高，静压头占总能量头的比例要大。否则，动压头大意味着液流速度高，无论在叶轮流道内还是进入压液室，排出管中液体的阻力损失都相应增加，泵的效率降低。

若采用静压系数 ρ_∞ 表示静压头 $H_{P\infty}$ 在总压头 $H_{T\infty}$ 中所占的比例，即 $\rho_\infty = \frac{H_{P\infty}}{H_{T\infty}} =$

$\frac{H_{T\infty} - H_{d\infty}}{H_{T\infty}}$ 。一般离心泵中 $c_{1u\infty} = 0$ ， $c_{2r\infty} \approx c_{1r\infty}$ ，因此液体流过叶轮前后的动能增量为

$$H_{d\infty} = \frac{c_{2\infty}^2 - c_{1\infty}^2}{2g} = \frac{c_{2u\infty}^2 - c_{1u\infty}^2}{2g} - \frac{c_{2r\infty}^2 - c_{1r\infty}^2}{2g} \approx \frac{c_{2u\infty}^2}{2g} \quad (2-20)$$

所以
$$\rho_\infty = 1 - \frac{c_{2u\infty}}{2u_2} \quad (2-21)$$

式中 $c_{2u\infty} = u_2 - c_{2r\infty} \cot\beta_{2A}$

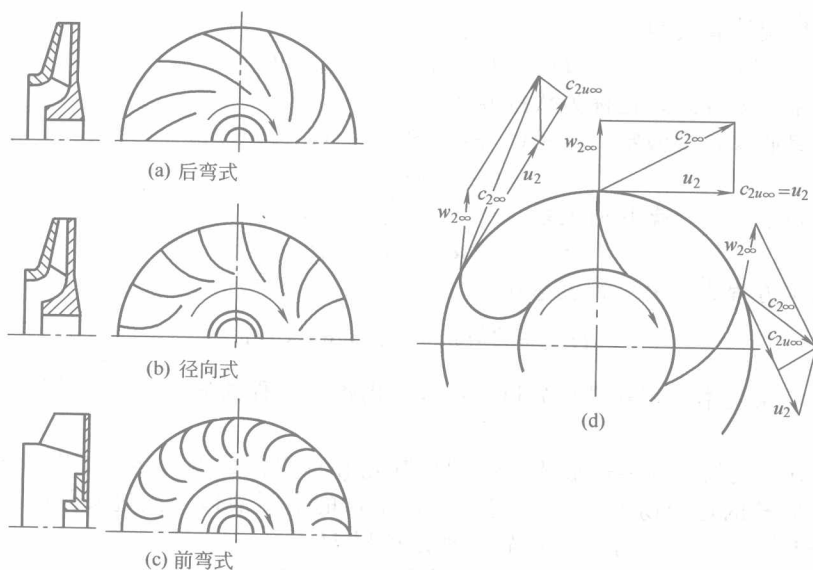


图 2-8 叶片形状及其速度三角形

由上式看出, $c_{2u\infty}$ 随 β_{2A} 增大而增加, ρ_∞ 随 β_{2A} 的增大而减小。因此, 欲使静压头占总能量头的比例大, 则 β_{2A} 值较小为好, 即采用后弯叶片。

根据 $H_{T\infty} = u_2 c_{2u\infty} / g$, 当叶轮尺寸及转速一定时, $H_{T\infty}$ 和 $c_{2u\infty}$ 的变化关系为一条直线方程如图 2-9 所示。由 $H_{d\infty} \approx \frac{c_{2u\infty}^2}{2g}$ 知, $H_{d\infty}$ 和 $c_{2u\infty}$ 的变化关系为通过原点的二次曲线。

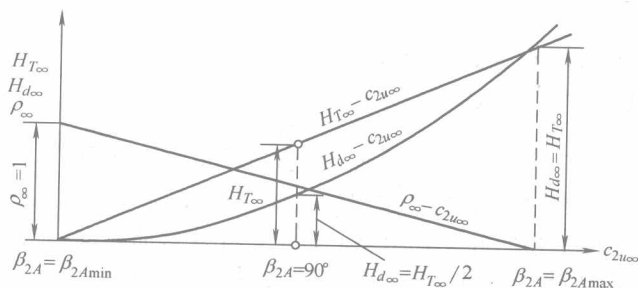


图 2-9 离心泵扬程与叶片离角的关系

由 $\rho_\infty = 1 - \frac{c_{2u\infty}}{2u_2}$ 知, 当 $c_{2u\infty} = 0$ 时, $\rho_\infty = 1$; 当 $c_{2u\infty} = 2u_2$ 时, $\rho_\infty = 0$ 。所以 ρ_∞ 和 $c_{2u\infty}$ 的变化关系为下降直线。当 $\rho_\infty = 0$ 时, 说明流过叶轮的液体将只有速度的增加, 而无压力的提高, 如 β_{2A} 再增加, 则流体流过叶轮后压力反而降低, 实际上泵是不可能在这种情况下工作的, 因此由 $c_{2u\infty} = u_2 - c_{2r\infty} \cot\beta_{2A}$ 得 $\cot\beta_{2A} = -\frac{u_2}{c_{2r\infty}}$, 由此得出叶片离角的最大值 $\beta_{2Amax} = -\cot^{-1} \frac{u_2}{c_{2r\infty}}$; 当 $H_{T\infty} = 0$ 时, 即 $u_2 c_{2u\infty} = 0$, $c_{2u\infty} = 0$, $H_{d\infty} \approx \frac{c_{2u\infty}^2}{2g} = 0$, 由 $H_{T\infty} = \frac{u_2}{g} (u_2 - c_{2r\infty} \cot\beta_{2A})$ 得 $\cot\beta_{2A} = \frac{u_2}{c_{2r\infty}}$, 由此求出叶片离角的最小值 β_{2Amin} 。

当 $\beta_{2A} = 90^\circ$ 时, $c_{2u\infty} = u_2$, $H_{d\infty} = u_2^2 / 2$, $H_{T\infty} = u_2^2$, 则静压系数 $\rho_\infty = 0.5$ 。

由以上分析看出, 希望泵叶轮给出的 $H_{T\infty}$ 占较大比例, 即静压系数 ρ_∞ 要大, 所以离心泵叶轮均采用 $\beta_{2A} < 90^\circ$ 的后弯式叶片, 一般静压系数 $\rho_\infty = 0.7 \sim 0.75$, 叶片离角常用值为 $\beta_{2A} = 16^\circ \sim 40^\circ$ 。