

普通高等教育机电类规划教材

流 体 机 械 原 理

上 册

主 编：张克危
副主编：瞿伦富 齐学义 蔡兆林
参 编：区颖达 吴 刚 张师帅
主 审：常近时



438

机 械 工 业 出 版 社

本书系统地讲述了各种流体机械的工作原理，分上、下两册出版。上册介绍叶片式流体机械，下册介绍容积式流体机械。

上册包括：绪论、第一章叶片式流体机械概述、第二章叶片式流体机械中的能量转换、第三章流体机械的相似理论、第四章流体机械的空蚀第五章径流式流体机械的设计计算、第六章轴流式流体机械的设计计算、第七章流体机械的特性曲线与运行调节、第八章流体机械的选型。

本书是高等工科院校“热能与动力工程”专业的规划教材，也可作为其他相关专业流体机械的教学参考书，还可供从事流体机械的研究、设计和生产的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

流体机械原理 (上册) / 张克危主编 .-北京: 机械工业出版社, 2000.5
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-07596-X

I. 流… II. 张… III. 流体机械-高等学校-教材 IV. TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 50274 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 邓海平 版式设计: 霍永明 责任校对: 孙志筠
封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm × 1092mm¹/₁₆ · 22.75 印张 · 558 千字

0 001 - 3000 册

定价: 31.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677 - 2527

前 言

流体机械是动力工程中最重要、应用最广泛的一类机械设备。目前,在我国高等工科院校的动力工程类专业中,有关流体机械的课程和教材为数相当多,这种分散的情况已难以适应我国高校的教学改革和专业调整的需要。为适应我国高等教育改革和专业调整的需要,全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会于1996年11月在西安会议上决定编写一本统一讲述各种流体机械的教材,继而在1997年4月的镇江会议上,由流体机械教学指导小组审定了本书的编写大纲。原机械工业部于1998年批准将本书列为机械工业部“九五”重点规划教材。

本书系统讲述了各种流体机械的工作原理,对应用最广泛的泵、风机、压缩机和水轮机的设计计算也以适当的篇幅作了介绍。

本书上册由华中理工大学张克危教授担任主编,由清华大学瞿伦富教授、甘肃工业大学齐学义教授和华中理工大学蔡兆林教授担任副主编。参加本书编写的人员还有华中理工大学的区颖达副教授以及吴刚副教授和张师帅讲师。其中张克危编写绪论、第一章、第二章和第八章的一部分;齐学义编写第三章;瞿伦富编写第四章和第八章的一部分;蔡兆林编写第五章;区颖达编写第六章;吴刚和张师帅共同编写第七章。全书由张克危统稿,由中国农业大学常近时教授主审。

本书的编写过程中,得到了各兄弟院校以及流体机械教学指导小组的大力支持,编者在这里衷心地表示感谢。

在一本篇幅有限的教材中统一讲解各种流体机械的原理,这对编者来说还是一种新的尝试。尽管我们为此付出了很大的努力,但错误和不尽人意之处在所难免,恳请读者予以指正。

编者

于武汉

目 录

前言		第四节 空化与空蚀的防护及改善措施	167
常用符号一览表		习题四	170
绪论	1	第五章 径流式流体机械的设计计算	172
上篇 叶片式流体机械			
第一章 叶片式流体机械概述	19	第一节 概述	172
第一节 叶片式流体机械的工作过程	19	第二节 一元流动理论分析	174
第二节 叶片式流体机械的主要性能参数	21	第三节 离心叶轮中流动损失的进一步分析	180
第三节 叶片式流体机械的结构型式	25	第四节 叶轮的结构形式及几何参数的确定	188
习题一	41	第五节 静止过流部件的设计计算	201
第二章 叶片式流体机械中的能量转换	43	第六节 离心压缩机计算实例	212
第一节 流体在叶轮中的运动分析	43	第七节 离心通风机和泵设计实例	219
第二节 叶片式流体机械的基本方程式	48	习题五	224
第三节 过流部件的作用原理	57	第六章 轴流式流体机械的设计计算	226
第四节 流道中介质状态参数的变化	67	第一节 轴流式流体机械的基本理论	226
第五节 变工况的流动分析	71	第二节 机翼与叶栅的升力理论	240
第六节 流体机械内的能量损失及效率	76	第三节 轴流式叶轮的设计计算	255
第七节 有限叶片数的影响	92	第四节 导叶的设计计算	271
第八节 反作用度	95	习题六	274
习题二	102	第七章 流体机械的特性曲线与运行调节	275
第三章 流体机械的相似理论	104	第一节 流体机械特性曲线的定义与分类	275
第一节 流体机械的流动相似准则	104	第二节 模型试验及特性曲线的绘制	285
第二节 相似理论在流体机械中的具体应用	108	第三节 流体机械与管网系统的联合工作	291
第三节 流体机械中的综合相似判别数——比转速	125	第四节 旋转失速和喘振	294
第四节 压缩机的相似模化设计	133	第五节 流体机械的串联和并联运行	300
习题三	136	第六节 流体机械的工况调节	305
第四章 叶片式流体机械的空化与空蚀	137	习题七	312
第一节 叶片式流体机械的空化与空蚀机理	137	第八章 叶片式流体机械的选型	314
第二节 水力机械的空化参数	148	第一节 流体机械产品的标准化与系列化	314
第三节 空化的模拟及热力学效应	161	第二节 中、小型水轮机的系列型谱	316
		第三节 水轮机的选型计算	319
		第四节 叶片泵的系列型谱与选型计算	336
		第五节 通风机的系列型谱与选型	345
		习题八	357
		参考文献	358

常用符号一览表

A	面积, m^2	n_s	比转速
a	加速度, m/s^2	n_q	比转速
a_0	导叶开口, m	n_{II}	单位转速,
b	叶道宽度、叶高, m	NPSH	汽蚀余量, m
C	空化比转数	NPSH _a	有效汽蚀余量, m
c	绝对速度, m/s	NPSH _r	必需汽蚀余量, m
c_a	声速, m/s	p	压力, Pa
c_p	质量定压热容, $J/(kg \cdot K)$	p_{tF}	通风机的全压, Pa
c_v	质量定容热容, $J/(kg \cdot K)$	p_{sF}	通风机的静压, Pa
D	直径, m	P	功率, kW
\bar{d}_h	轮毂比	P_{II}	单位功率
Eu	欧拉数	q_v	体积流量, m^3/s
F	力, N	q_m	质量流量, kg/s
F_f	摩擦力, N	Q	热量, J
F_m	质量力, N	Q_{II}	单位流量
F_s	表面力, N	q	单位质量流体的热量, J/kg
Fr	弗劳德数	R	矢径, m ; 气体常数, $J/(kg \cdot K)$
g	重力加速度, m/s^2	Re	雷诺数
H	水头、扬程, m	r	半径, m
H_s	吸出高度, m	S	吸入比转速
H_a	大气压力(水柱高), m	Sr	斯特劳哈尔数
H_{va}	汽化压力(水柱高), m	s	比熵, $J/(kg \cdot K)$
H_v	吸入真空高度, m	T	热力学温度, K
h	比焓, 能量头, J/kg	t	时间, s ; 温度, $^{\circ}C$
i	叶片进口冲角, ($^{\circ}$)	u	圆周速度, m/s ; 质量内能, J/kg
K	比值、系数、型式数、空化指数	V	体积, m^3
l	长度, 翼型弦长, m	v	质量体积, m^3/kg
L	动量矩, $kg \cdot m^2/s$	W	单位质量介质的功, J/kg
l/t	叶栅稠(密)度	w	相对速度, m/s
M	力矩, $N \cdot m$	Z	叶片数、高度, m
Ma	马赫数	α	绝对流动角、翼型攻角, ($^{\circ}$)
Ma_o	绝对速度马赫数	α_b	固定叶片安放角, ($^{\circ}$)
Ma_w	相对速度马赫数	β	相对流动角, ($^{\circ}$)
Ma_u	圆周速度马赫数	β_b	叶轮叶片安放角, ($^{\circ}$)
m	多变指数	ΔH	水头损失
n	转速, r/min	Δh	能量头损失

VI

Δp	压力损失	θ	圆周角, ($^{\circ}$)
ΔP_m	机械 (功率) 损失	κ	绝热指数, 等熵指数
ΔP_r	轮盘损失功率	λ	功率系数; 滑动角, ($^{\circ}$)
Δq_V	泄漏体积流量	μ	动力粘度, Pa·s
Δq_m	泄漏质量流量		修正系数
$\Delta\beta$	翼型转折角, ($^{\circ}$)	ν	运动粘度, m^2/s
Γ	环量, m^2/s	ρ	密度, kg/m^3
δ	叶片厚度, m; 落后角, ($^{\circ}$)	σ	空化系数, 滑移系数
ϵ	压缩比	τ	排挤系数, 阻塞系数
ζ	流动损失系数	φ	流量系数, 叶片转角 ($^{\circ}$)
η	效率	φ_{u2}	周速系数
η_h	流动效率、水力效率	Ψ	压力系数
η_V	容积效率	Ω	反作用度
η_m	机械效率	ω	角速度
下标			
1	机器进口, 叶片进口	p	原型、真机
2	机器出口, 叶轮出口	pol	多变过程
p	高压端, 对水轮机指上游水面、机器进口或转轮进口; 对泵、风机和压缩机指叶轮出口、机器出口或下游水面; 叶片压力面	r	径向
s	低压端, 对水轮机指下游水面、机器出口或转轮出口; 对泵、风机和压缩机指叶轮进口、机器进口或上游水面; 叶片吸力面。	u	周向
ad	绝热过程	s	定熵过程
in	进口	T	定温过程
m	轴面, 子午面, 模型, 平均	th	理论的
out	出口	tot	总的
		z	轴向
		v	定容过程, 真空
		va	汽化
		∞	无穷叶片数

绪 论

一、流体机械概述

(一) 流体机械的定义与分类

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能量的流体之间能量传递的过程。由于在几乎所有的技术和生活领域都需要借助于流体进行能量转换或需要输送流体介质，因此流体机械是一类应用极为广泛的机械设备。

由于流体机械的应用极为广泛，各种不同的应用场合的流体机械的结构型式和工作特点有很大的差别。为便于研究，应该对其进行分类。

根据能量传递的方向不同，可以将流体机械分为原动机和工作机。

原动机将流体的能量转换为机械能用于驱动其他的机械设备，例如水轮机、汽轮机、燃气轮机、风力机、各种液压马达和各种气动工具等。工作机则将机械能转换为流体的能量，以便将流体输送到高处或有更高压力的空间或克服管路阻力将流体输送到远处，例如各种泵、风机和压缩机等。

根据流体与机械相互作用的方式，可将流体机械分成容积式和叶片式流体机械。

容积式流体机械中，工作介质处于一个或多个封闭的工作腔中，工作腔的容积是变化的，机械与流体之间的相互作用力主要是静压力。例如往复式活塞式流体机械（图 0-1），活塞与缸体形成一个封闭工作腔，介质与机械间的相互作用力为活塞表面的压力。当介质推动活塞运动时，是原动机，当活塞推动介质流动时，是工作机。

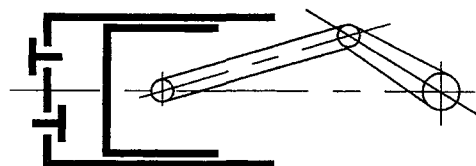


图 0-1 往复式活塞式流体机械

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。叶片与流体的相互作用力是惯性力。叶片使介质的速度（方向或大小）发生变化，由于介质的惯性作用引起作用于叶片的力。该力作用于转动的叶片而产生功率。叶片式流体机械的最简单的例子是风力机（图 0-2），当叶片转动时，空气连续绕流叶片。空气流过叶片后，速度的大小和方向都发生了改变。当流动的空气（风）推动叶片转动时，是原动机（风力机），如果是叶片推动空气流动，就是工作机（风扇）了。

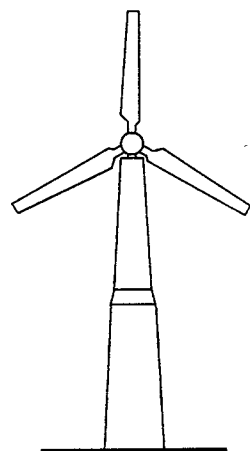


图 0-2 风力机

以上两类是应用最为广泛的流体机械，本书将只限于讨论这两类流体机械。但应该指出，还有一些不属于这两类的流体机械，在这些流体机械中，能量主要是在两种具有不同的能量的流体之间进行传递，例如在射流泵（图 0-3）中，高压流体（液体或气体）与低压流体（液体或气体）在喷嘴后混合，通过动量交换使压力与速度趋于相同，以达到输送低压流体的目的。属于这一类的流体机械还有水锤泵、内燃

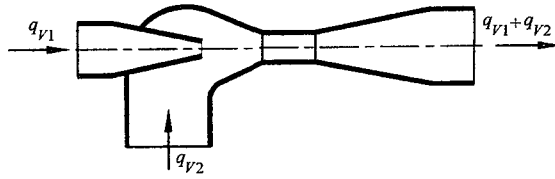


图 0-3 射流泵

泵等。在液环式流体机械（图 0-4）中，叶片将能量传递给液体工作介质，然后液体介质将能量传递给气体，达到压缩气体的目的。

根据工作介质的性质，也可以将流体机械分为两类。以液体为工作介质的流体机械称为水力机械，以气体为工作介质的则称为热力机械。两种介质的主要区别在于，在一般的应用场合下，液体可以认为是不可压缩的，而气体一般是可压缩的。当可压缩介质的体积发生变化时，必然伴随着功的传递及介质内能的变化。应该指出，可压缩性是一个相对的概念，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。而当压力变化很小的时候（例如在通风机中），也可以不考虑空气的可压缩性。

在容积式流体机械中，根据运动方式的不同，还可以分成往复式和回转式两类，其中每一类又可以根据结构和形成工作腔的方式不同进一步细分为不同的类型。表 0-1 为容积式流体机械分类的汇总。

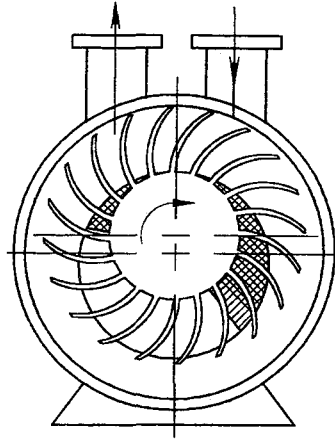


图 0-4 液环式流体机械

在叶片式流体机械中，根据流体在叶轮内的压力与速度的变化，分成反击式和冲击式两类。在反击式机器的叶轮中，流体的压力和速度都发生变化，流体与叶片交换的能量中既有压力能（势能）也有速度能（动能）；在冲击式流体机械的叶轮中，流体的压力是不变的，流体与叶片交换的能量中只有速度能（动能）。在这两种机器中，又都可根据流体在叶轮中流动方向的不同进行进一步细分。表 0-2 为叶片式流体机械分类的汇总。

根据所产生的压力的不同，将用于可压缩介质输送的压缩机械分为：通风机——压力（绝对压力）低于 0.015MPa；鼓风机——压力在 0.015 ~ 0.35MPa 范围内；压缩机——压力大于 0.35MPa。

应该指出，还有许多其他的分类方法，例如根据流体机械的用途、结构特点等进行分类和命名，这些内容将在后面适当的地方予以介绍。由于流体机械的种类极其繁多，限于篇幅，本书将主要讨论水轮机、泵、风机和压缩机这几种流体机械。

（二）流体机械在国民经济中的应用

流体机械在国民经济的各部门和社会生活各领域都得到极广泛的应用，而且技术越发展，流体机械的应用也就越广泛、作用越大。可以说，几乎没有哪一个经济或生活领域没有流体机械。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。而且，随着技术的不断发展，各种应用场合对流体机械的参数和可靠性的要求也越来越高。下面列举几个重要的应用例子。

表 0-1 容积式流体机械的分类

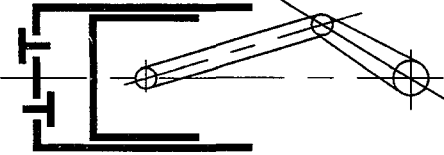
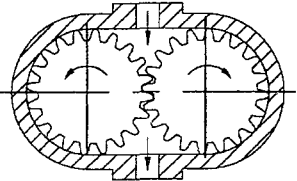
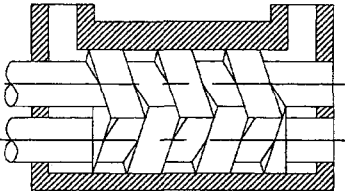
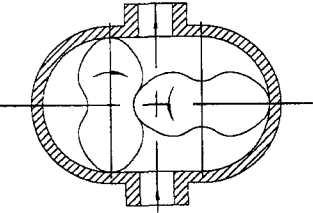
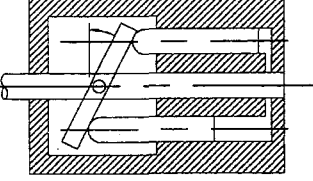
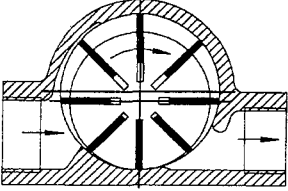
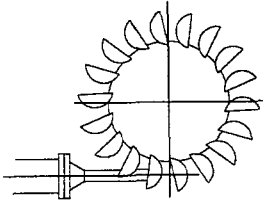
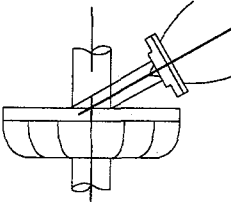
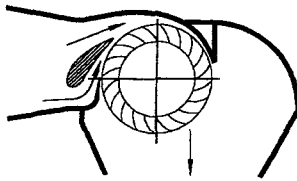
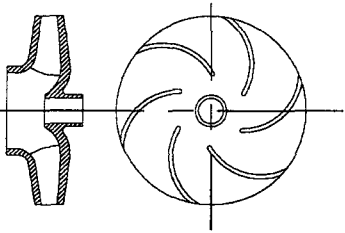
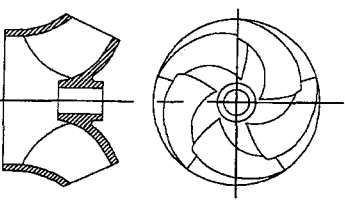
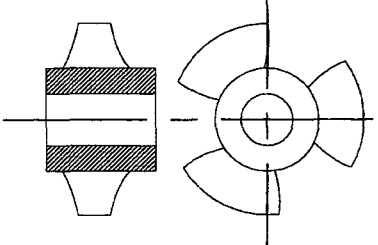
往复式	活塞式		活塞式压缩机 活塞泵
回	齿轮式		齿轮泵 齿轮压缩机 齿轮液压马达
	螺杆式		包括单螺杆、双螺杆、三螺杆、五螺杆等型式的压缩机、泵与液压马达
	罗茨式		罗茨风机 罗茨泵
转式	轴向和径向柱塞式		轴向柱塞泵 轴向柱塞液压马达 柱塞泵 径向柱塞液压马达
	滑片式		滑片泵 滑片液压马达

表 0-2 叶片式流体机械的分类

冲 击 式	切 击 式		切击式水轮机
	斜 击 式		斜击式水轮机
	双 击 式		双击式水轮机
反 击 式	径 流 式		高水头混流式水轮机 离心泵 离心风机 离心压缩机
	混 (斜) 流 式		混流式水轮机 斜流式水轮机 混流泵、斜流泵 混流式风机 混流式压缩机 斜流式风机
	轴 流 式		轴流式水轮机 轴流泵 轴流风机 轴流式压缩机

1. 电力工业

目前的电力生产有三种主要的方式：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（图 0-5）。随着发电机组的大型化，电站用泵也在向大型和高参数发展。目前最大的锅炉给水泵的功率已达 49.3MW，扬程达 3000m。

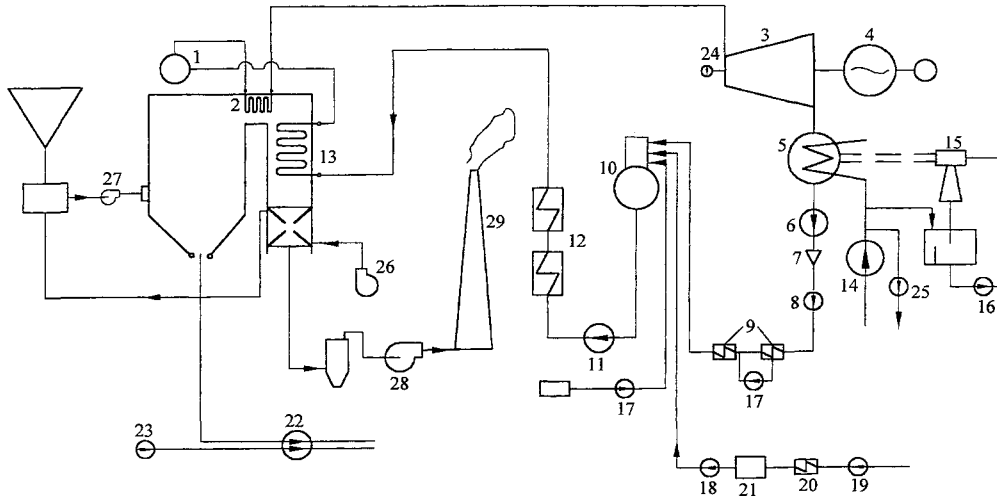


图 0-5 热力发电厂系统简图

- 1—锅炉汽包 2—过热器 3—汽轮机 4—发电机 5—凝汽器 6—冷凝泵 7—除盐装置 8—升压泵
 9—低压加热器 10—除氧器 11—锅炉给水泵 12—高压加热器 13—省煤器 14—循环水泵 15—
 射流真空泵 16—射水泵 17—疏水泵 18—补给水泵 19—生水泵 20—生水预热器 21—化学水处
 理设备 22—灰渣泵 23—冲灰水泵 24—液泵 25—工业水泵 26—送风机 27—排粉风机
 28—引风机 29—烟囱

火电站与核电站的厂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%~4.5%。可见提高辅机的效率对于节能有重要的意义。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。

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，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很多泵。表 0-3 给出了核电站主要用泵的参数。

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，又由于大量使用化石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。在目前，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 38×10^5 MW，已开发的仅约 10%。我国的水力资源蕴藏量为 3.78×10^5 MW，约占世界总量的 10%，目前已开发的还不到 15%，今后，国家将更加优先开发水力资源。目前正在建设的

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。

表 0-3 压水式反应堆 360MW 机组用泵性能参数

名称	一次冷却剂泵	充填泵	冷凝泵	锅炉给水泵
型式	立式蜗壳泵（轴封式）	往复式塞泵	立式多级	卧式蜗壳式
口径/mm	700/740	80/80	350/600	200/250
流量/ $\text{m}^3\text{min}^{-1}$	266	0.25	11.2	21.75
全扬程/m	61	2100	220	780
转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	1200	312	900	3570
电动机输出功率/kW	3000	75	580	2810
液体温度/ $^{\circ}\text{C}$	293	70	33	182.8
吸入计示压力/MPa	15.7	0.6	-0.096	1.151
台数	2	3	3	3

水轮发电机组具有便于调节出力大小的特性，使得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。

2. 水利工程

水利不仅是农业的命脉，而且也关系到人民生命财产的安全。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，因此水利工程对我国来说尤其重要。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 80 年代已达 57000MW。这虽然是一个很大的数字，但距解决我国的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。在开源方面，国家已经而且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。在节流方面，将大力发展节水灌溉技术，如喷灌、滴灌等。不论是开源还是节流，都需要大量的泵。

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，即使是固体物料，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相应地越来越高。化工流程用泵和压缩机经常需要输送特殊的介质，例如高温或低温，高压，易燃、易爆，剧毒，易结晶、汽化或分解等等，相应地对泵和压缩机的设计、制造提出了特殊的要求。

这里以乙烯和合成氨的生产为例说明流体机械在化工过程中的作用，表 0-4 给出了乙烯流程中泵的使用情况。

表 0-4 乙烯流程用泵

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
液体种类	油	油	水	汽油	碱液	H.C. C ₂ 等	H.C. 甲烷	H.C. 乙烷等	H.C. 乙烯	H.C. 丙烷等	H.C. 丙烯	H.C. C ₄
泵型式	卧式单级离心	卧式单级离心	卧式单级离心	卧式单级离心	卧式单级离心	卧式单级离心	卧式单级离心	卧式或立式单级离心	卧式或立式单级离心	卧式单级离心	卧式单级离心	卧式单级离心
温度	高温						低温	低温	低温			

图 0-6 为合成氨生产流程示意图, 在该流程中使用了 4 种压缩机, 这些压缩机的动力消耗占全厂的 70% ~ 80%, 投资约占全厂的 20% ~ 30%。合成氨压缩机需要有很高的压力, 最高达 42MPa。在小型合成氨厂中, 采用活塞式压缩机, 在大型 (600t/d 以上) 装置中, 由于流量大, 采用离心式压缩机比较有利。在 $30 \times 10^4 \text{t/a}$ 的装置中, 若采用离心式压缩机, 则可以降低投资 60% ~ 70%, 而且可以采用汽轮机驱动, 使装置热效率达到 70%。这种需求曾是推动离心式压缩机高压化的主要动力之一。

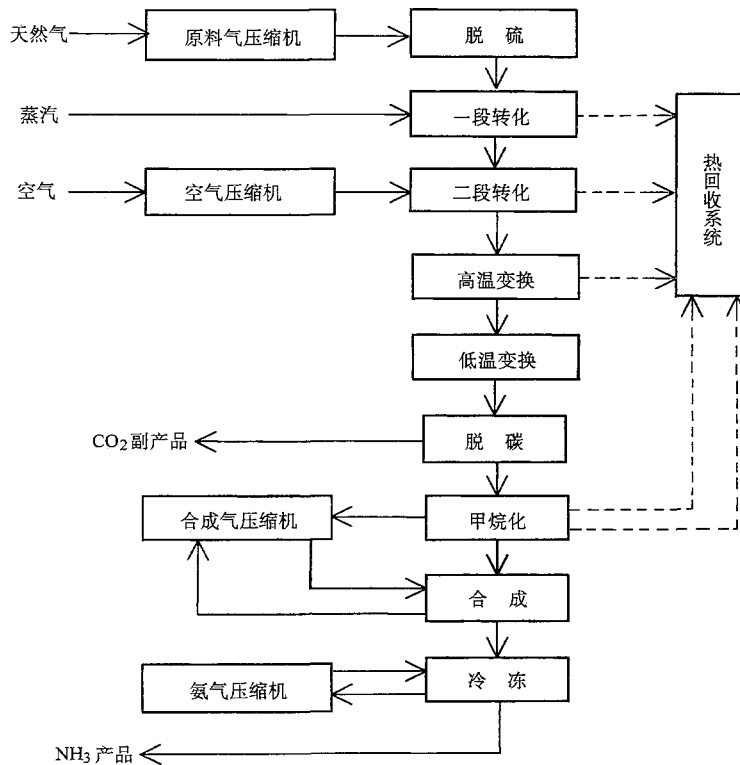


图 0-6 合成氨生产流程示意图

4. 石油工业

在石油和天然气的钻探、开采、集输和加工过程中, 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。特别是对于海洋和沙漠油田, 由于环境特殊, 对设备有着非常特殊的要求。下面是几个典型的例子。

(1) 潜油泵 潜油泵可以从很深的油井中将原油输送到地面, 用潜水式电动机, 泵置于井下。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。由于原油中含有沙子, 泵输送的实际上是固液混合物。零件必须具有好的耐磨性。

(2) 油田注水泵 用高压向油层中注水, 可以提高油层压力, 实现原油自喷。在我国的大庆油田, 由于开采时间长, 油层含油量减少, 目前每采 1t 油需要注入 6t 水。因此需要大量的注水泵, 总能耗相当大。提高注水泵的效率则可节省可观的能源。

(3) 注气压缩机 在海洋油田, 将不能直接利用的油田伴生气代替水注入油层以提高压力。当注气量较小时用活塞式压缩机, 注气量大时用离心式压缩机。目前离心式注气压缩机

的压力已达 71MPa，是离心式压缩机的最高压力等级。

(4) 水下油气混输泵 油田中原油一般是与天然气共生的，通常是将油与气分离后分别用泵和压缩机输送。这需要在每个井口设置油气分离装置，泵与压缩机机组以及两条管路。在海上油田中，这种配置的成本是很高的。使用油气混输泵以后，每个井口只需一台机组和一条管路，使开采成本大大降低。如果将机组直接设置在水下，则采油平台都可以省掉。如果油田不能自喷，泵还必须装置在井下。图 0-7 是一个这样的装置的示意图。一台装置在海底的泵将海水压入井内，用于驱动一台水轮机，该水轮机驱动与之共轴的油气混输泵，将油气输送出去。这种驱动方式的优点是装置的转速可自动随着含气量的变化而变化，从而在含气量的变化范围内保持输出压力比较稳定。

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，因此需要使用风机。随着冶金技术的进步和设备的大型化，对这些设备不断提出新的要求。另外，生产过程中也需消耗大量的水，在供水和水处理方面使用泵的数量也很多。

(1) 高炉鼓风机 现代大型高炉需要的风量很大，故通常使用轴流式压缩机。当高炉容积达 4000m^3 时，风量可达 $10000\text{m}^3/\text{min}$ ，功率可达 60MW。

(2) 氧气压缩机 纯氧顶吹转炉是目前常用的炼钢设备，需要用氧气压缩机向炉内输送高压氧，其典型的参数为流量 $72000\text{m}^3/\text{h}$ ，压力 3.75MPa，功率 12.15MW。由于纯氧在高压下易于引起爆炸燃烧，因此对压缩机的设计有特别的要求。

6. 动力工程

除了汽轮机、水轮机和燃气轮机属于现代最重要的动力装置以外，在动力工程中还广泛地使用压缩机和液力传动装置。例如：

(1) 燃气轮机压缩机 压缩机是燃气轮机的重要组成部分之一，压缩机将空气压入燃烧室，使燃料得以燃烧，产生高温高压的燃气，燃气推动燃气轮机的叶轮转动。轮机轴除输出有效功率外，同时驱动压缩机转动。在大型和移动式燃气轮机（例如喷气式发动机）中，使用轴流式压缩机，而在小型固定式燃气轮机中，则使用离心式压缩机。

(2) 涡轮增压器 涡轮增压器利用内燃机气缸排出的废气驱动涡轮机，涡轮机则驱动一个压缩机压缩空气以提高进入气缸的空气压力，从而增加进入气缸中的空气量。这样在相同的气缸容积下，可以相应增加燃油量，也就提高了发动机功率。使用废气涡轮增压可使功率增加 50% ~ 100%。

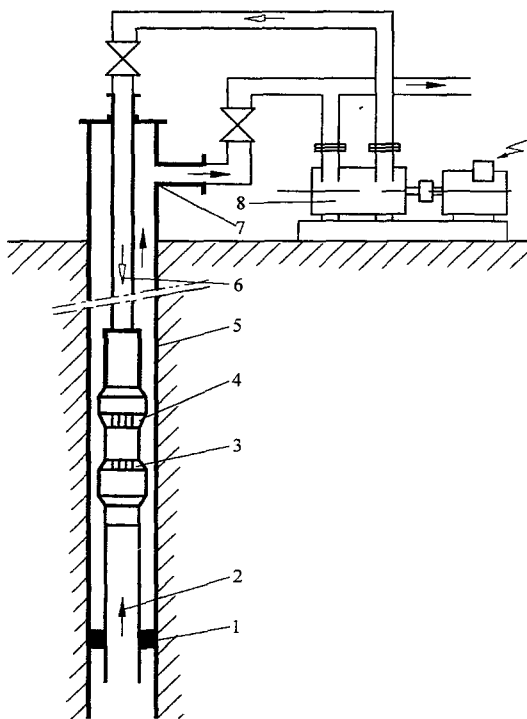


图 0-7 水下油气混输泵装置

- 1—焊接堵头 2—泵吸入 3—泵压出 4—涡轮机出口
5—井壁管 6—涡轮机供水管 7—井口
8—涡轮机供水泵

(3) 动力风源 在电站、机械工厂、建筑工地、矿井等许多地方，广泛使用着各种风动工具，都需要压缩空气作为动力源，而压缩空气通常是利用活塞式或离心式压缩机获得的。

(4) 液力传动装置 最常使用的原动机（如交流电动机和内燃机）的转速是不能改变的或者只适于在一个不大的转速范围内工作。而通常希望工作机的转速能根据使用要求而不断改变（例如车辆的行驶速度），这就需要使用变速装置（例如齿轮变速箱）。液力传动装置（图 0-8）是一种利用叶片式流体机械进行变速的装置。原动机驱动一个泵轮，泵轮将功率传递给液体工作介质，介质推动一个与泵轮装置在同一壳体中的涡轮，再由涡轮推动工作机。液力传动装置具有从动轴的转速可自动适应作用力矩而变化的特性，因而特别适于在车辆上使用。

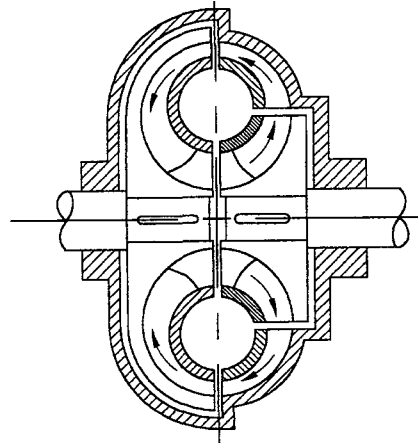


图 0-8 液力变矩器

7. 制冷与低温工程

压缩机是制冷装置中最重要的设备。制冷装置不仅在许多工业和科学领域中有着重要的应用，而且在生活领域中亦日益普及。在小型制冷装置中都使用容积式压缩机，而在大型装置中则使用离心式压缩机。目前世界上最大的离心式压缩机就是化工流程中使用的丙烯冷冻压缩机，功率达 53.7MW。

制冷工程中不仅广泛使用作为工作机的流体机械——压缩机，也常使用作为原动机的流体机械，在制冷装置中称为膨胀机，包括透平膨胀机和活塞式膨胀机。不过这里使用原动机的主要目的不是获得功率，而是使气体（制冷介质）实现绝热等熵膨胀，从而使温度下降。如果不使用膨胀机，就得使工质经过节流阀而使压力降低、体积膨胀。但流体流经节流阀的压力降低是通过流动损失而实现的，这种损失最后转变成热，因而使温度降低较少。在膨胀机中，这些能量成为输出功率，可以拖动泵或发电机，因而可使介质温度得到最大限度的降低，同时节约了能源。

8. 采矿工业

矿井的排水和通风是保证矿井正常工作的重要条件，为此需配备相应的泵与风机。此外，采矿工业还常常利用泵对矿物进行远距离水力输送，例如在选矿厂中用渣浆泵将尾矿通过管道输送到尾矿池等。这类泵输送的介质中含有大量坚硬的固体颗粒，会使过流部件很快磨损，因此泵必须用特殊的耐磨材料制造。

9. 航天技术

燃料输送泵是火箭发动机的重要组成部分。特殊的工作环境对泵的设计提出了特殊的要求。火箭的液体燃料是易燃、易挥发的，有时温度极低（液氢、液氧燃料），而且泵的尺寸和重量受到严格的限制。这些都是设计中必须解决的技术问题。在火箭和飞船的控制与导航系统中，常采用液压装置作为执行元件，而用特殊的离心泵作为整个液压系统的动力源，对这种泵的可靠性有着极高的要求。

10. 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。在现代生物医学工程中，人造器官占有重要的地位。由于前述原因，流体机械在人

造器官又占有特别重要的地位。图 0-9 是一个心脏辅助装置的示意图。

11. 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，舰船的动力装置及喷水推进，轻工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。

二、流体力学与热力学的基础知识

为便于读者学习，本节简略地给出本课程所用到的的一些流体力学和热力学基础知识。

(一) 流体介质的物理性质

流体机械的工作介质包括液体和气体，它们共同的特点是易流动性、粘性和可压缩性。

易流动性是指处于静止状态的流体不能抵抗剪切力的作用，即流体在极小的剪切力的作用下也会连续不断地变形，直至剪切力消失为止。

粘性是指流体在剪切力的作用下，将产生连续不断的变形以抵抗外力的特性。亦即流体的剪切变形速率与作用于其上的剪切力的大小有关。对于多数种类的流体，在层流直线运动的条件下，切应力与剪切变形速率之间的关系为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

上式称为牛顿切应力公式，式中各量的意义见图 0-10。符合上式的流体称为牛顿流体。流体机械的工作介质大部分是牛顿流体。一些高分子化合物、浓度较大的固液混合物等是非牛顿流体的例子。

比例系数 μ 称为粘度，又称为动力粘度，是流体粘性大小的度量。其单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。 μ 与流体密度的比值称为运动粘度

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

其单位为 m^2/s 。流体的粘度与温度有很大的关系，而与压力的关系不大。液体的粘性随温度升高而减小，而气体的粘度随温度的升高而增大。

在多数流体机械中，特别是流动速度较高的叶片式流体机械中，流体粘性的作用仅仅在靠近固壁表面的一薄层（边界层）中才比较显著，而在大部分流场中可以忽略粘性的作用。为简化研究，常引进理想流体的概念。所谓理想流体是粘度为零的流体。当粘度的作用可以

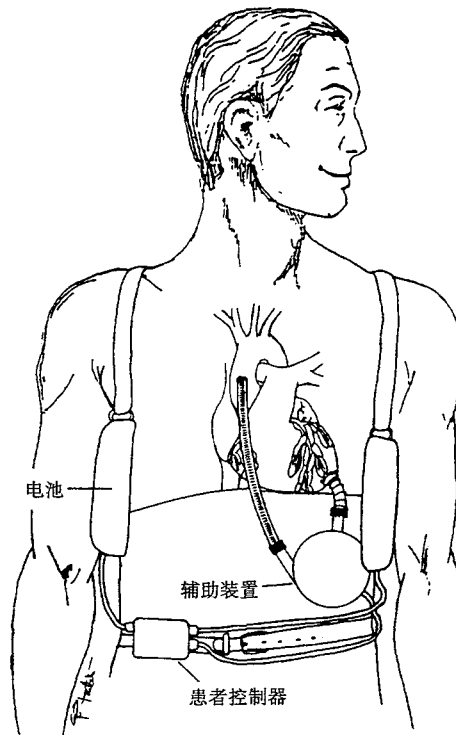


图 0-9 心脏辅助装置

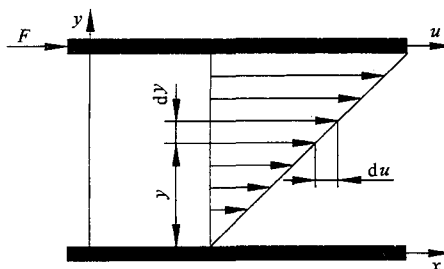


图 0-10 流体的粘度

忽略或暂时忽略时，就可以将工作介质视为理想流体。

可压缩性是指流体的体积随外力作用而改变的特性。液体和气体的可压缩性有很大的差别。液体的可压缩性可以用其体积弹性模量来衡量

$$E = \rho \frac{dp}{d\rho}$$

E 值越大，液体越不容易被压缩。在常温下，水的弹性模量为 $E_w = 2.1 \times 10^9 \text{Pa}$ 。由此可见，若压力变化一个标准大气压时，水的密度的相对变化量约为

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta p}{E_w} \approx 0.5 \times 10^{-4}$$

可见水的密度变化是极小的。其他液体的可压缩性也是很小的，所以在流体机械中，一般将液体介质视为不可压缩流体，在计算中将密度 ρ 视为常数。

气体介质的可压缩性比液体大得多，而且，气体密度随压力的变化过程是和热力学过程紧密联系在一起。因为外力压缩气体时，对气体所作的功将增加气体的内能。不同种类气体的热力学性质也不相同，而产生各种气体不同的热力学性质的原因在于气体分子的构造、体积和相互作用力的不同。当考虑以上三种因素以后，气体的性质变得极为复杂。为简化问题的研究，可引入理想气体的概念。理想气体是指其分子体积为零、分子间没有相互作用力的气体。由物理学可知，理想气体的压力、质量体积和温度之间满足以下关系

$$pv = RT \quad (0-1)$$

此式即为理想气体的状态方程。根据上式，假如温度不变（等温过程），当理想气体的压力由一个大气压升高到两个大气压时，气体密度将增加一倍。可见气体的可压缩性比液体大得多。当实际气体的温度较高、压力较低，因而质量体积较大的时候，其分子之间的距离大，因而相互作用力小，分子本身的体积所占据的空间与气体的体积相比很小，这时就可将其视为理想气体。在工程上，氢、氧、氮等气体以及由它们组成的空气，在常温或高温下，当压力在 10MPa 以下的时候，通常可以作为理想气体处理；二氧化碳、乙烯、氨等临界温度接近常温的气体，只有当压力在 3MPa 以下的时候，才能作为理想气体处理；对于制冷工质氟里昂-12、氟里昂-22 及烃类等易液化的气体，则不应作为理想气体处理。

对于不能作为理想气体处理的气体介质，可在状态方程中引入一个修正系数，此时式 (0-1) 成为

$$pv = zRT \quad (0-2)$$

系数 z 称为气体压缩性系数。显然，对于理想气体，有 $z=1$ ，而对于实际气体， z 值与气体的性质、温度和压力有关。工程上常通过试验求得气体的压缩性系数值，作为示例，图 0-11 给出了几种气体在 0°C 时 z 与 p 的关系。

最后应该指出，以上所谈论的介质的粘性和可压缩性只是一些相对的概念。一种具体的介质在某一具体的应用场合是否能视为理想流体、不可压缩流体或理想气体，取决于对计算精度的要求，应针对具体情况进行分析。例如，通常空气应视为可压

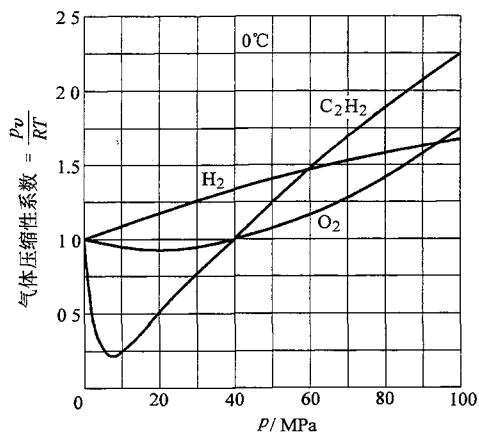


图 0-11 z 与 p 的关系