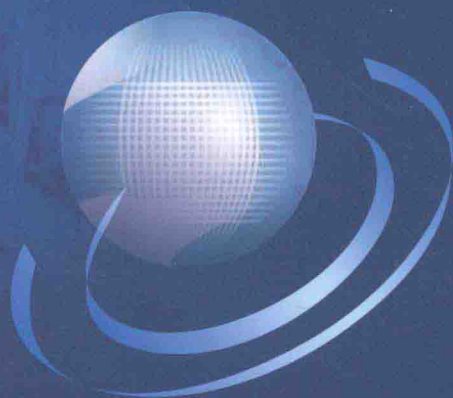


普通高等教育“十三五”规划教材



# 离心式压缩机原理

祁大同 主编



双色印刷



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

# 离心式压缩机原理

主编 祁大同  
参编 闻苏平 李景银  
        秦国良 毛义军  
主审 张楚华



机械工业出版社

本教材是流体机械及工程学科入门的基础教材之一，主要在一维定常亚声速流动、工质在热力学意义上为理想气体的前提下，讲授离心压缩机的基本工作原理和热力设计方法，包括压缩机通流部分的基本结构和通流元件的主要作用、气体流动的基本方程和基本概念、能量损失及性能曲线、叶轮及固定元件、相似理论在离心压缩机中的应用、离心压缩机的运行与调节、离心压缩机热力设计。本教材注重突出分析和解决问题的思路与方法，注重培养综合运用基础理论解决实际工程问题的能力。教材中每章后面均附有学习指导和建议，并配有思考题和习题。

本教材为能源与动力工程专业本科生的专业课教材，也适合相关学科的本科生、研究生和有需要的初学者学习使用，并可供从事离心压缩机和鼓风机设计、制造、运行以及从事相关研发工作的工程技术人员和科研人员参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

离心式压缩机原理/祁大同主编. —北京: 机械工业出版社, 2017. 12  
普通高等教育“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-111-58685-2

I. ①离… II. ①祁… III. ①离心式压缩机-高等学校-教材  
IV. ①TH452

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 305467 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
策划编辑: 蔡开颖 责任编辑: 蔡开颖 张丹丹 任正一  
责任校对: 刘秀芝 封面设计: 张 静  
责任印制: 孙 炜  
保定市中国画美凯印刷有限公司印刷  
2018 年 2 月第 1 版第 1 次印刷  
184mm×260mm·13 印张·312 千字  
标准书号: ISBN 978-7-111-58685-2  
定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版



## 前言

根据教育部教育教学改革的精神和西安交通大学能源动力类专业教学体制改革和系列教材规划的要求,我们以机械工业出版社1990年出版的《离心式压缩机原理》(修订本)(以下简称原教材)为基础,对其基础内容部分重新编写,形成了这本新的教材。所谓“基础内容部分”,指原教材中在“一维定常亚声速流动、工质在热力学意义上为理想气体”假定下的离心压缩机工作原理、热力设计、运行调节及流动相似等基础内容,其他内容(三元流动及实际气体)将作为大学本科高年级学生的选修课程或研究生课程另外出版专门教材。

原教材由我们的老师、西安交通大学徐忠教授主编,程迺晋、李超俊和黄淑娟三位教授参编,是我国风机行业及相关专业领域内一本声誉卓著的教材。我们重编的宗旨是发扬原教材的一系列优点,继承教材中反映出的西安交通大学“基础厚、重实践”的光荣传统,遵循原教材的基本内容和总体框架,力争使基础内容有所深化及拓展,适当融入新时期的理念,努力使教材更适合新时期年轻学生的学习特点,更有利于对他们进行思维方法、创新意识和分析问题、解决问题能力的培养,从而符合最新教学大纲和教学改革的要求。

本教材的目标是使其成为流体机械及工程学科入门的基础教材之一,面向能源与动力工程专业的大学三年级本科生,为他们学好后续课程及做好今后工作或读研深造打下坚实的基础。同时,也努力做到适合相关学科、专业和有需要的初学者学习使用,并可供从事离心压缩机设计、运行以及相关研究工作的工程技术人员和科研人员参考。

本教材由西安交通大学能源与动力工程学院流体机械及工程系的教师编写,共分8章。毛义军编写第1章,祁大同编写第2、6、8章,闻苏平编写第3、7章,李景银编写第4章,秦国良编写第5章。祁大同担任主编,对教材进行统筹修改并最终定稿。

衷心感谢以徐忠教授为代表的原教材编者和以苗永森先生为代表的所有老师们,是前辈们的辛勤培养使我们能够承担编写教材的任务。沈阳鼓风机集团教授级高工熊欲均、陈福芳和研究院刘长胜总工程师,西安交通大学热流科学与工程系流体力学研究所所长李国君教授,杭氧透平机械公司池雪林总工程师等对本教材的内容及编写提供了很好的指导意见,西安交通大学能源与动力工程学院院长丰镇平教授、院长助理李军、陈雪江和流体机械及工程系主任张楚华教授为抓好本教材的编写工作倾注了大量心血,也向他们表示衷心感谢。硕士生张义、郭明达,本科生陈博和硕博连读生高亢在本教材的编写过程中提供了大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

衷心感谢教材主审张楚华教授,他的宝贵意见对于提高教材质量起了极大的作用。

教材中使用并引用了一些对学生的学习和培养起着重要作用的图片和插图,特向制作这些图片和插图的作者和单位表示衷心感谢。

由于我们水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正,以使教材内容能在使用过程中不断得到改进和完善。

编者  
于西安交通大学

# 主要符号说明

## 1. 英文字母

$A$ :	面积	$p$ :	压力, 静压, 管网阻力
$b$ :	叶轮进口或出口宽度	$p_{st}$ :	滞止压力, 总压
$c$ :	绝对速度	$P$ :	功率
$c_p$ :	比定压热容	$q_m$ :	质量流量
$d$ :	直径; 叶轮进口轮毂直径; 含湿量	$q_v$ :	体积流量
$d_z$ :	主轴轴径	$Q$ :	热量
$D$ :	直径	$r$ :	半径或径向坐标
$g$ :	重力加速度	$R$ :	气体常数, 半径
$h$ :	焓, 损失	$Re$ :	雷诺数
$i$ :	冲角	$s$ :	熵
$k_v$ :	比体积比	$t$ :	时间, 摄氏温度
$K$ :	级数, 系数	$T$ :	热力学温度, 静温
$K_\eta$ :	效率比	$T_{st}$ :	滞止温度, 总温
$K_d$ :	系数	$u$ :	圆周或切向速度; 热力学能
$l$ :	流程或流线长度, 叶片弧长	$v$ :	比体积
$L$ :	轴承跨距	$w$ :	相对速度
$m$ :	质量, 多变过程指数	$W$ :	功
$M$ :	力矩, 转矩	$\Delta \bar{W}$ :	省功比
$Ma$ :	马赫数	$x$ :	$x$ 向坐标
$n$ :	转速	$y$ :	$y$ 向坐标
$n_k$ :	临界转速	$Y$ :	系数
$n_s$ :	比转数	$z$ :	$z$ 向坐标, 叶片数, 位能
$N$ :	压缩机段数	$Z$ :	中间冷却次数

## 2. 希腊字母

$\alpha$ :	绝对气流角	$\theta_{eq}$ :	当量扩张角
$\beta$ :	相对气流角或叶片安装角, 损失系数	$\kappa$ :	等熵指数 (绝热过程指数)
$\gamma$ :	叶片进口边倾斜角	$\lambda$ :	摩擦阻力系数, 中冷器压力损失比
$\delta$ :	叶片厚度	$\mu$ :	气体相对分子质量; 滑移系数; 动力黏度
$\Delta$ :	管壁凸起颗粒直径, 叶片折边宽度	$\nu$ :	运动黏度
$\varepsilon$ :	压比	$\rho$ :	密度
$\zeta$ :	系数	$\sigma$ :	多变过程指数系数
$\eta$ :	效率	$\tau$ :	叶片阻塞系数
$\theta$ :	圆周角度, 轮盖倾斜角或角坐标	$\varphi$ :	角度

$\varphi_r$ :	流量系数	$\psi$ :	能量头系数或多变能量头系数
$\varphi_{2r}$ :	叶轮出口流量系数	$\omega$ :	角速度
$\varphi_{2u}$ :	周速系数	$\Omega$ :	叶轮反作用度
<b>3. 下角标</b>			
0:	叶轮进口截面	loss:	损失
1:	叶轮叶片进口截面, 任意截面	lsc	缸内末级
2:	叶轮叶片出口截面, 任意截面	lse	末段
3:	扩压器进口截面	L:	内漏气损失
4:	扩压器出口或弯道进口截面	$m$ :	质量
5:	弯道出口或回流器进口截面	max:	最大
6:	回流器出口截面	min:	最小
aver:	平均值	mix:	混合, 尾迹
A:	叶片安装角	out:	蜗壳出口截面
c:	绝对速度	pol:	多变过程
cal:	留有裕度的计算量	r:	径向
con	收敛	s:	等熵过程
cr:	临界值	se	段
df:	轮阻损失	sec:	二次流
div	扩张	sep:	分离
dry:	干气体	sh:	冲击
fri:	摩擦	st:	滞止参数
fsc	缸内首级	th:	理论的
fse	首段	tot:	总的, 全部
hyd:	水力的, 流动的	T:	等温过程
H <sub>2</sub> O:	冷却水	u:	切向
$i$ :	段数, 任意截面	V:	容积
imp:	叶轮	$w$ :	相对速度
in:	压缩机或段进口截面	w:	凝结水
$j$ :	级数	$\infty$ :	无穷大, 叶片数无穷多



# 目录

前言	95
主要符号说明	95
第1章 离心压缩机初步介绍	1
1.1 压缩机的分类	1
1.2 表征离心压缩机性能特点的主要参数	2
1.3 离心压缩机通流部分的主要结构及作用	3
1.4 多轴离心压缩机结构及特点简介	6
学习指导和建议	8
思考题和习题	8
第2章 气体流动的基本方程和基本概念	9
2.1 基本假定和速度三角形	9
2.2 基本方程	12
2.3 压缩过程及压缩功	19
2.4 离心压缩机的效率	26
2.5 级中气体状态参数的变化	32
2.6 轴向涡流	35
2.7 流量	38
学习指导和建议	39
思考题和习题	40
第3章 能量损失及性能曲线	42
3.1 流动损失	42
3.2 雷诺数和马赫数对流动损失的影响	48
3.3 漏气损失	51
3.4 轮阻损失	59
3.5 离心压缩机的性能曲线	61
学习指导和建议	68
思考题和习题	68
第4章 叶轮	70
4.1 叶轮典型结构介绍	70
4.2 叶轮做功能力的计算	79
4.3 叶轮设计参数的合理选择	83
4.4 半开式、混流式叶轮	91
学习指导和建议	95
思考题和习题	95
第5章 固定元件	97
5.1 吸气室	97
5.2 扩压器	102
5.3 弯道和回流器	110
5.4 蜗壳(排气室)	115
学习指导和建议	121
思考题和习题	121
第6章 相似理论在离心压缩机中的应用	123
6.1 离心压缩机的流动相似	123
6.2 离心压缩机流动相似的结果	129
6.3 离心压缩机的性能换算与模化设计	132
学习指导和建议	140
思考题和习题	141
第7章 离心压缩机的运行与调节	142
7.1 离心压缩机与管网联合工作	142
7.2 离心压缩机的旋转失速与喘振	146
7.3 离心压缩机的串联与并联	149
7.4 离心压缩机的调节	153
学习指导和建议	161
思考题和习题	162
第8章 离心压缩机热力设计	163
8.1 热力设计概述	163
8.2 效率法设计的主要内容	165
8.3 效率法方案设计的基本思路	166
8.4 效率法方案设计的基本步骤	173
8.5 效率法逐级详细计算	178
8.6 离心压缩机热力设计例题	182
学习指导和建议	198
思考题和习题	198
参考文献	199



## 第 1 章

# 离心压缩机初步介绍

## 1.1 压缩机的分类

按照压缩气体的方式不同，压缩机通常分为两类：一类是容积式压缩机，另一类是透平式压缩机。从能量的观点看，压缩机是把原动机的机械能转变为气体能量的一种机械。

### 1. 容积式压缩机

容积式压缩机通过在保持气体质量不变的条件下减小其容积达到提高气体压力的目的。典型的容积式压缩机又可大致分为两种：一种是往复式，例如活塞式压缩机；另一种是回转式，例如螺杆压缩机、涡旋压缩机等。

### 2. 透平式压缩机

透平式压缩机通过旋转的叶轮叶片对气体做功使气体压力得以提高。透平是英文 Turbine 的译音，透平式压缩机是透平机械（Turbomachinery）的一种。透平式压缩机通常有如下分类方式：

#### （1）按结构形式分类

1) 离心压缩机。叶轮对气体做功时，相对于叶轮的旋转轴中心线而言，气体流动方向主要是与其垂直的半径方向并指向离心方向。

2) 轴流压缩机。叶轮对气体做功时，相对于叶轮的旋转轴中心线而言，气体流动方向主要是与其平行的轴线方向。

还有一种观点认为，二者的本质区别为叶轮中是否有离心力做功。

（2）按压力分类<sup>[1-3]</sup> 通常，在进口为理想大气的条件下（或理解为绝对压力为 0.101326 MPa），可根据出口压力按表 1-1 进行分类。

表 1-1 按照压力分类

通风机	出口绝对压力 $\leq 0.116036\text{MPa}$ ，或风机全压 $\leq 0.01471\text{MPa}$ （表压），则称为通风机。在我国风机行业中，习惯上也常将全压 $\leq 0.015\text{MPa}$ 的风机称为通风机。根据我国风机行业的习惯，风机的标准进口状态为：工质为空气，进口绝对压力为 0.101326MPa，进口温度为 20℃，相对湿度为 50%
-----	---



压缩机	出口绝对压力 $\geq 0.343245\text{MPa}$ 时称为压缩机。为方便,我国风机行业习惯上也常将出口绝对压力 $\geq 0.35\text{MPa}$ 作为划分标准
鼓风机	出口压力介于通风机与压缩机之间

实际应用中,离心压缩机在压力分类上并非十分严格。例如:压缩机的出口压力并不高,但由于气体的特殊性质需要进行多级压缩,因此被称为压缩机;也有的观点认为压比(出口绝对压力与进口绝对压力之比)  $\geq 3.5$  时称为压缩机;还有一些是因为使用单位的习惯而被称为压缩机。

另外,压缩机也常用气体的种类来命名,如氨气压缩机、氢气压缩机、氧气压缩机、裂解气压缩机等。也有的压缩机根据用途来命名,如制冷压缩机、制药压缩机、高炉鼓风机等。

### 3. 使用范围比较

一般容积式压缩机宜用于中、小流量的场合,而透平式压缩机宜用于大流量的场合。图 1-1 比较了不同压缩机的使用范围。

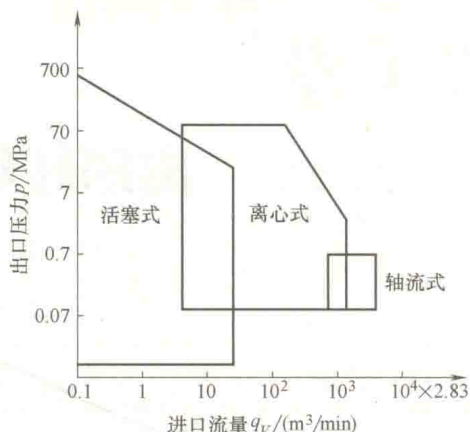


图 1-1 不同压缩机的使用范围

## 1.2 表征离心压缩机性能特点的主要参数

通常,离心压缩机的性能特点通过下列主要参数来表示:

### 1. 工质

工质即工作介质,也就是压缩机输送的气体及相关的组分和物性参数。

### 2. 进口条件

进口条件即压缩机进口气体的热力状态,例如进口温度、进口压力及相对湿度等(本教材中,滞止温度或滞止压力都冠以“滞止”二字加以说明,凡未说明的,均指静温和静压)。

### 3. 设计流量

设计流量即进行离心压缩机设计时给定的流量。一般情况下,所有设计工作都按照压缩机在这一流量下运行而展开。流量一般采用下列三种表达方式:

1) 质量流量。质量流量表示单位时间内通过压缩机或某一通流截面的流体质量,单位有  $\text{kg/s}$ 、 $\text{kg/min}$ 、 $\text{kg/h}$  等。

2) 体积流量。体积流量表示单位时间内通过压缩机某一通流截面的流体体积(通常给出压缩机进口截面处的体积流量)。体积流量与工质在该通流截面的热力状态有关,单位有  $\text{m}^3/\text{s}$ 、 $\text{m}^3/\text{min}$ 、 $\text{m}^3/\text{h}$  等。

3) 标准体积流量。标准体积流量通常表示在某一标准状态下,单位时间内通过压缩机某一通流截面的流体体积。



实际上, 每一台离心压缩机都可以在包括设计流量在内的一定流量范围内运行。因此, 一般情况下, 压缩机有自己的最大运行流量和最小运行流量。行业中经常把压缩机在设计流量下运行称为在设计工况或设计点运行, 把压缩机运行的流量范围称为压缩机的工况范围, 并把工况范围的宽窄作为压缩机性能优劣的评价指标之一。

#### 4. 设计压力 (或压比)

设计压力 (或压比) 是压缩机在设计流量运行时所应达到的出口压力 (或压比)。因此, 设计压力 (或压比) 往往成为考核压缩机是否满足设计要求的重要指标之一。压缩机流量变化时, 通常出口压力也会随之变化, 所以, 对应于压缩机的流量范围, 出口压力也有一个变化范围。通常, 表示压力的单位有 Pa、kPa、MPa 等。

#### 5. 效率

效率通常指压缩机在设计工况运行时的效率, 是表征离心压缩机性能优劣的重要指标之一。离心压缩机运行工况不同, 通常效率也会有所变化。离心压缩机中常用的效率是多变效率、绝热效率 (又称等熵效率) 和等温效率。关于效率, 在第 2 章中将详细论述。

#### 6. 转速

转速通常指压缩机在设计工况运行时的主轴转速, 又称设计转速。在很多情况下, 压缩机的转速可以调节, 因而存在一个变转速的工作范围。转速的单位为 r/min。

#### 7. 功率

功率通常指压缩机在设计工况运行时所消耗的功率。压缩机的运行工况不同, 功率往往也随之变化。压缩机的功率通常包括内功率、轴功率、与压缩机配套的原动机功率等, 单位为 W、kW 等。

#### 8. 冷却水温度

冷却水温度指当压缩机需要进行中间冷却时, 对被冷却工质进行冷却之前的冷却水温度。

#### 9. 噪声

噪声通常是指压缩机在设计工况运行时, 在压缩机外部或指定位置测得的噪声, 一般应按照相关标准进行测量。压缩机运行工况不同, 噪声通常也会不同。随着环境保护意识的日益增强, 离心压缩机噪声也越来越受到关注, 正在逐步成为压缩机性能的重要评价指标之一。

## 1.3 离心压缩机通流部分的主要结构及作用

从结构形式划分, 离心压缩机主要分为单轴和多轴两种类型。单轴压缩机为一缸一轴结构, 是自离心压缩机诞生以来至今一直存在并广泛使用的基本形式。本教材将以单轴压缩机为主要研究对象, 对多轴压缩机只是在部分章节中偶尔提及。因此, 当没有特别指明是多轴压缩机时, 书中所提离心压缩机均指单轴压缩机。

### 1. 离心压缩机的基本结构和流动过程

图 1-2 所示为典型的单轴离心压缩机垂直剖视图, 有时也称为纵剖视图或径向剖视图。一根主轴由气缸 (又称机壳) 两端的轴承支撑。离心压缩机工作时, 通常还需要有与之配套的原动机系统、变速及调节系统、润滑系统、冷却系统、监测和保护系统等, 离心压缩机



是整个装置中的主机。在图 1-2 所示的压缩机中，主轴上装有七个叶轮，通过气缸左端径向轴承之外的联轴器与变速装置或原动机连接，在原动机带动下旋转。主轴主要用于安装叶轮、带动叶轮旋转并传递转矩。主轴上通常还有给叶轮定位的轴套和用于平衡部分轴向推力的平衡盘。行业中通常把固定于主轴之上并随主轴一起旋转的零部件总成称为转子，而把除转子之外的所有静止零部件的总成称为定子或静子。定子的主体是气缸，其他静止零部件（如隔板等）都安装在气缸中。气缸两端设有轴承座，通过轴承为转子提供支撑。

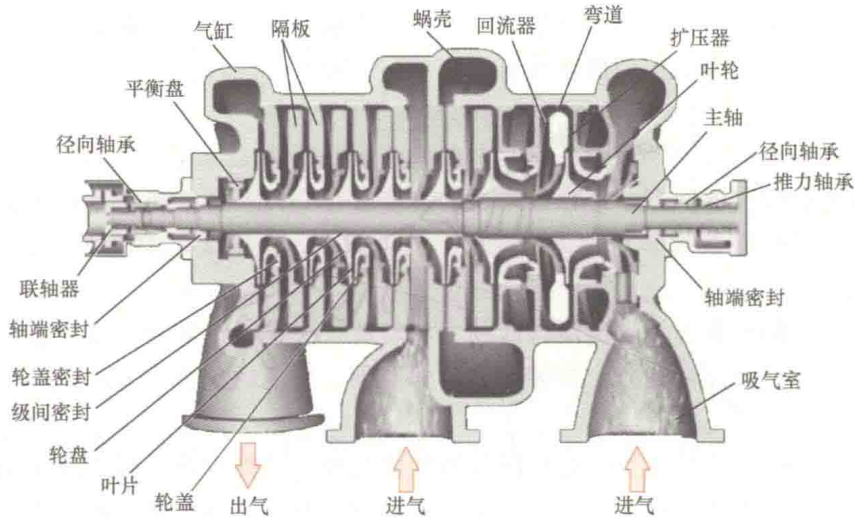


图 1-2 离心压缩机垂直剖视图

离心压缩机中零部件很多，本教材主要关注通流部分的主要结构和作用。通流部分是离心压缩机中气流通过的流道部分，通流截面则指气体流道的横截面（横断面）。如图 1-2 所示，气体从右端下部的吸气室入口进入压缩机，在主轴附近经  $90^\circ$  转弯沿轴向进入叶轮。由于叶轮旋转，气体在叶轮内再经  $90^\circ$  转弯，在叶片作用下提高速度、压力和温度并沿离心方向流出叶轮进入扩压器。在扩压器中，气体速度下降，而压力和温度继续升高，然后通过弯道，经  $180^\circ$  转弯进入回流器，从外向内径方向流动回到主轴附近，再经  $90^\circ$  转弯沿轴向进入下一个叶轮。再次经过叶轮、扩压器、弯道、回流器的流动，气体压力和温度进一步提高，再进入第三个叶轮和扩压器，然后通过蜗壳从压缩机中引出进入中间冷却器。气体经过冷却温度降低后，再从图 1-2 中部的吸气室进入压缩机，在具有四个叶轮的通流部分中重复上述的流动及压缩过程，最后从图 1-2 中左端的蜗壳排出。上述过程中，气流

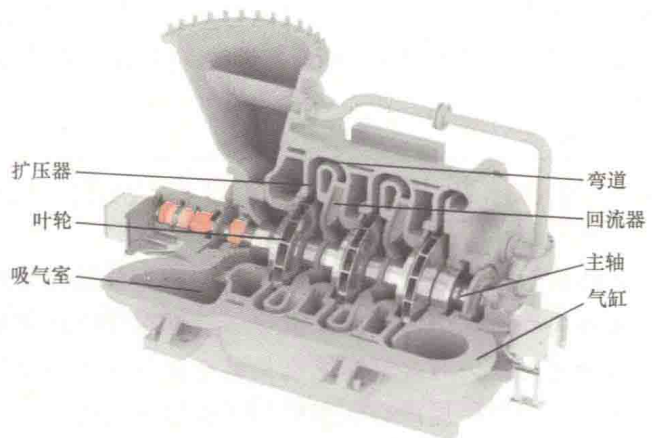


图 1-3 离心压缩机剖视图（一）

动所通过的通道部分即为离心压缩机的通流部分。

图 1-3、图 1-4 所示为用不同形式的视图给出另外两个离心压缩机的剖视图。

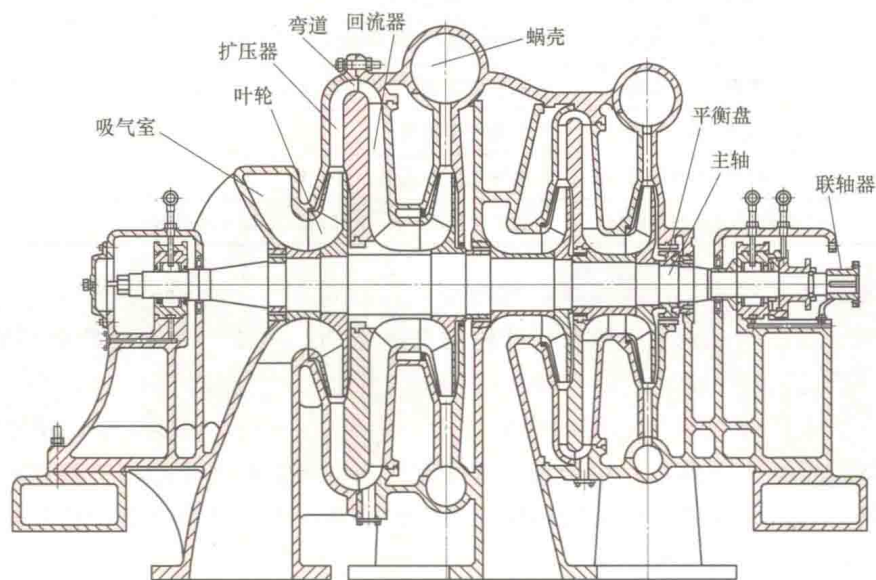


图 1-4 离心压缩机剖视图 (二)

## 2. 基本通流元件及其主要作用

结合上面对气体流动过程的分析，离心压缩机的基本通流元件可按图 1-5 所示进行划分，其名称、位置和主要作用见表 1-2，其中 in-in、out-out 分别表示压缩机的进口截面和出口截面。

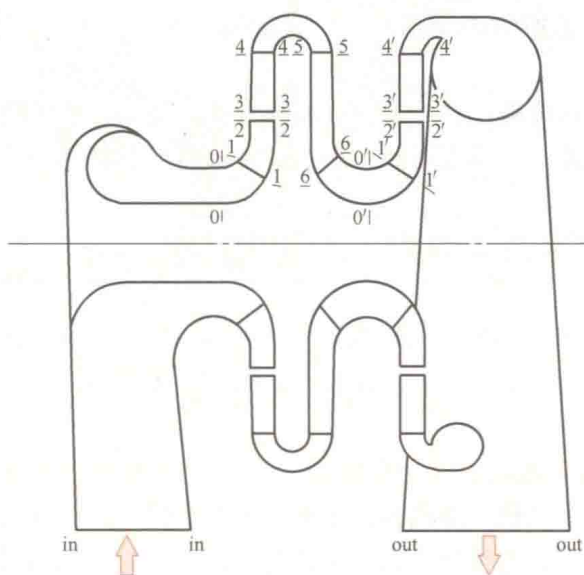


图 1-5 基本通流元件及主要通流截面示意图

表 1-2 基本通流元件及其主要作用

名称	位置	主要作用
吸气室	in-in 截面~0-0 截面	引导气体进入叶轮
叶轮	0-0 截面~2-2 截面	传递能量(对气体做功), 1-1 截面为叶片进口
扩压器	3-3 截面~4-4 截面	降速增压, 将气体动能转化为压力能
弯道	4-4 截面~5-5 截面	引导气体转弯
回流器	5-5 截面~6-6 截面	引导气体进入下一级叶轮
蜗壳	4'-4' 截面~out-out 截面	收集扩压器(或叶轮)出口气体并将其排出

上述基本通流元件中, 叶轮是唯一的转动元件, 也是唯一对气体做功的元件。气体通过离心压缩机时压力能够提高主要依赖于叶轮对气体做功。因此, 叶轮是最重要的通流元件。其他元件称为固定元件或静止元件。图 1-5 所示的各个通流截面不仅划分了各个基本通流元件, 也是学习离心压缩机原理和设计中最常用、最具代表性的通流截面。以后如无特殊说明, 将用这些数字作为下角标, 用于表示这些有代表性通流截面上的相关参数或物理量。

每一个基本通流元件的具体结构和尺寸等详细信息, 可参见第 4 章叶轮和第 5 章固定元件中的相关内容。

### 3. 级、段、缸

简单讲, 一个叶轮及与之配合的所有固定元件构成一个级。行业中习惯把由叶轮、扩压器、弯道和回流器组成的级称为中间级, 把由叶轮、扩压器(也可没有扩压器)和蜗壳组成的级称为末级, 带有吸气室的中间级作为第一级。

气体从吸气室进入压缩机, 经压缩后从蜗壳排出, 则该吸气室与蜗壳之间的所有级组成一个段。压缩气体如需中间冷却, 压缩机必然存在多段, 段数等于冷却次数加 1。

一个机壳(或气缸)里容纳的所有段和级称为一个缸。一个缸内通常只有一个转子。如果压缩机的压比很高, 需要很多级叶轮进行压缩, 但由于受临界转速制约, 转子长度受到限制, 一根主轴上无法安装所需的全部叶轮, 此时, 压缩机就经常采用多缸形式, 如低压缸、中压缸、高压缸等。

图 1-2 所示为氨压缩机的高压缸, 是一缸两段七级。图 1-3 所示的压缩机为一缸一段三级, 图 1-4 所示的压缩机为一缸两段四级, 图 1-5 所示的压缩机则为一缸一段两级。

## 1.4 多轴离心压缩机结构及特点简介

多轴离心压缩机<sup>[4]</sup> (Multi-shaft Centrifugal Compressor) 大约出现于 20 世纪 40 年代, 最常见的形式是一种整体齿轮传动式离心压缩机 (Integrally Geared Centrifugal Compressor), 也有人称其为齿轮组装式离心压缩机。

### 1. 整体齿轮传动式离心压缩机的主要结构

整体齿轮传动式离心压缩机的结构如图 1-6 和图 1-7 所示, 通常由一个或两个大齿轮及其周围的若干小齿轮轴组成齿轮传动系统, 大齿轮中的主齿轮由原动机驱动, 小齿轮轴两端的悬臂伸出端可安装叶轮, 每个叶轮可配置相应的进口、扩压器和蜗壳, 从而构成一个级, 各级之间用管道连接并考虑引入中间冷却器形成一个多轴多段多级离心压缩机。图 1-6 是某

国际著名压缩机公司产品说明书中的图片，是一台出现较早的多轴离心压缩机，称为 DH 型离心压缩机，由一个大齿轮和两个小齿轮轴组成，图示结构为三级压缩。图 1-7 是国际著名的德国 MAN Turbo（曼透平）和 GHH BORSIG（盖哈哈-波尔西克）透平机械公司在产品说明书中公开刊载的图片<sup>[4]</sup>，表示由两个大齿轮和五个小齿轮轴组成的一台十级离心压缩机，反映了当前多轴离心压缩机的国际先进水平。

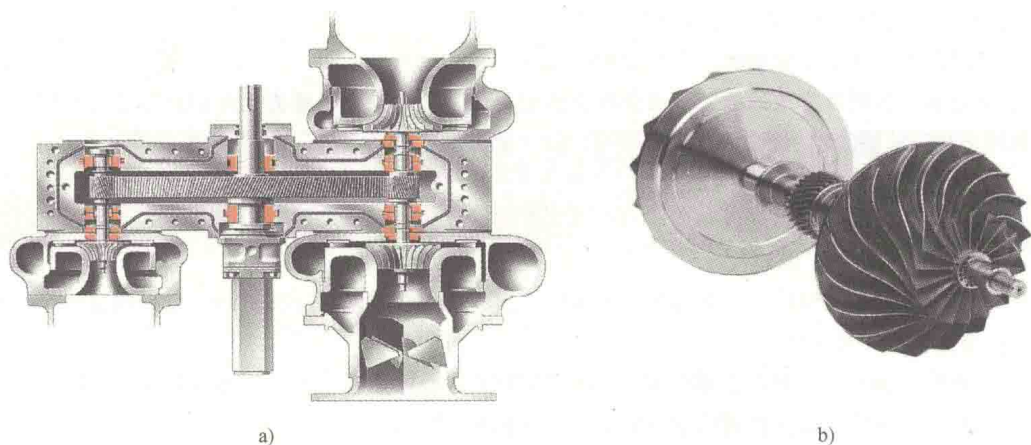


图 1-6 DH 型离心压缩机

a) 水平剖视图 b) 转子

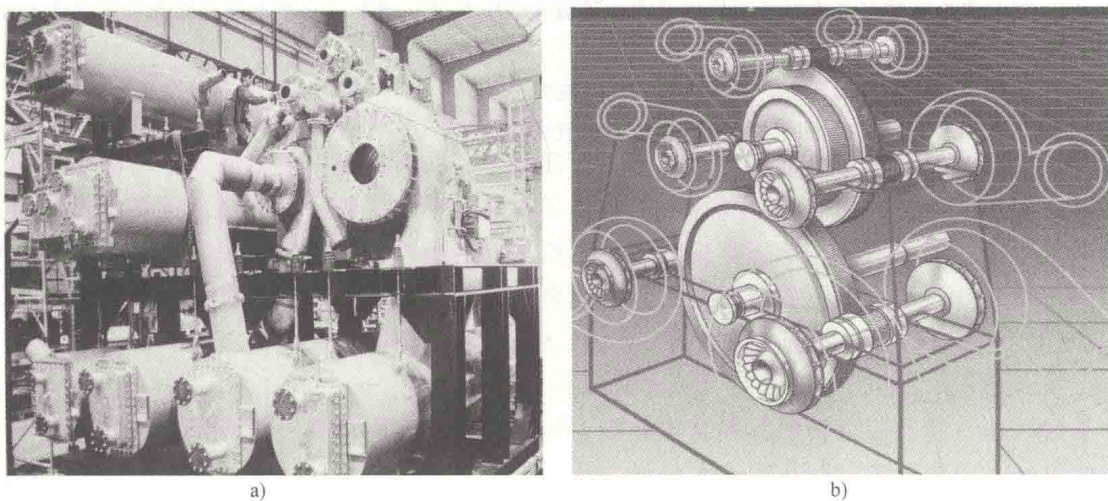


图 1-7 整体齿轮传动式离心压缩机

a) 外观图 b) 内部结构示意图

## 2. 多轴离心压缩机的主要特点

与单轴离心压缩机相比，多轴离心压缩机有如下主要特点：

- 1) 不需要弯道回流器结构，在叶轮进口容易实现轴向均匀进气条件。
- 2) 多轴可以为叶轮提供多个不同的转速。
- 3) 有利于在各级之间实现中间冷却。



- 4) 有利于在各级叶轮进口实现进口导叶调节。
- 5) 压缩机效率高, 工况范围宽。

### 学习指导和建议

- 1-1 掌握与离心压缩机相关的一些基本提法和初步概念, 如压缩机的分类、表征离心压缩机性能的主要参数、离心压缩机的主要结构、零部件的主要名称等。
- 1-2 掌握离心压缩机主要通流元件的名称和作用。
- 1-3 通过学习教材各章中的插图, 结合教学模型及图片, 掌握各个通流元件的具体结构和那些代表性通流截面的形状, 这既是本章重点, 也是学好原理课的关键。

### 思考题和习题

- 1-1 什么是透平式压缩机? 什么是离心压缩机? 离心压缩机与轴流压缩机的主要区别是什么? 与离心通风机、鼓风机又有什么区别?
- 1-2 与容积式压缩机和轴流压缩机相比, 离心压缩机适合应用在什么样的流量和压力范围?
- 1-3 表征离心压缩机性能特点的主要参数通常有哪些?
- 1-4 何谓离心压缩机的设计工况和工况范围? 离心压缩机的流量与出口压力(或压比)、效率、功率及噪声之间是否存在一一对应的关系?
- 1-5 气体通过离心压缩机为什么压力会提高?
- 1-6 离心压缩机的基本通流元件有哪些? 通流元件各自的主要作用是什么?
- 1-7 划分离心压缩机基本通流元件的代表性通流截面有哪些? 掌握这些基本通流元件和代表性通流截面的结构形状和特点。
- 1-8 何谓离心压缩机的转子、定子、级、段、缸?
- 1-9 与单轴离心压缩机相比, 多轴离心压缩机有哪些特点?



## 第 2 章

# 气体流动的基本方程和基本概念

第 1 章中初步介绍了离心压缩机的一些最基本的概念，本章主要介绍：叶轮对气体做功及气体在压缩机内部流动遵循什么基本原理或规律？叶轮所做的功、气体热力参数（压力、温度等）的变化如何计算？另外还介绍其他一些重要的基本概念。

本章内容涉及面广，基本概念多，学习难度大，既是后面各章内容的基础，也是全书学习的重点。

## 2.1 基本假定和速度三角形

### 1. 基本假定

由于离心压缩机中的流道形状比较复杂，并存在气流摩擦和边界层，所以气体参数不仅沿流道的每一个截面变化，而且在同一个截面上的不同位置，参数也是变化的。因此，级中气体的流动是三元流动。另外，由于叶轮旋转且叶片数有限、叶片出口存在气流尾迹等，都导致叶轮及其后面固定元件中的气体流动是周期性的非定常流动。此外，还有些因素导致压缩机内部产生非定常流动，如压缩机进气条件或转速发生波动等。所以，离心压缩机内部的实际流动是三维非定常流动，用圆柱坐标  $(r, \theta, z)$  和时间  $t$  表示，可以写成

$$\text{气流参数} = f(r, \theta, z, t)$$

目前的科学研究中，对于离心压缩机内部三维非定常流动的研究已日益普遍，但是实践表明，对于掌握离心压缩机的基本工作原理及基本设计方法而言，将流动假定为一维定常流动进行研究，不仅方便，而且对于突出学习重点、理解物理本质、掌握基本概念，并为进一步深入学习和研究打好基础也是非常需要的。

一维流动假定是流体力学中基元流束概念的推广应用，假设沿流道的每一个截面上，气流参数均匀分布，也可理解为取截面上的平均值。定常流动假定忽略流动非定常性的影响，假设流动参数不随时间变化。对于本教材，一维定常流动假定实际意味着在离心压缩机通流部分中的气流参数仅是通流截面的函数，特别是经常用到第 1 章中给出的那些具有代表性的通流截面。因此，可以简写为

$$\text{气流参数} = f(\text{通流截面})$$





对于本教材，除特殊说明之外，一维定常亚声速流动是贯穿全书的假定。同样，除特殊说明之外，教材中离心压缩机的工质假定为热力学中符合

$$pv = RT$$

状态方程的理想气体。

式中， $p$  为气体的压力 (Pa 或 MPa)； $v$  为气体的比体积 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )； $R$  为气体常数 [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]； $T$  为热力学温度 (K)。

由于离心压缩机属于旋转式机械，所以如无特殊说明，教材中分析问题一般都采用圆柱坐标系。

## 2. 叶轮出口速度三角形

叶轮出口速度三角形如图 2-1 所示，常用的有下面这些量：

$u_2$ ：叶轮出口线速度，即叶轮旋转引起的牵连速度 ( $\text{m/s}$ )， $u_2 = \pi D_2 n / 60$ ； $D_2$ ：叶轮叶片出口直径 (m)； $n$ ：叶轮转速 (r/min)。

$w_2$ ：叶轮出口相对速度 ( $\text{m/s}$ )。

$c_2$ ：叶轮出口绝对速度 ( $\text{m/s}$ )。

$\beta_{2A}$ ：叶轮出口叶片安装角，即叶轮出口处叶片中心线的切线与  $u_2$  反方向之间的夹角。当叶轮设计及制造之后， $\beta_{2A}$  是已知量。

$\beta_2$ ：叶片出口相对气流角，即  $w_2$  与  $u_2$  反方向之间的夹角。实际中， $\beta_2 < \beta_{2A}$ ， $\beta_2$  可通过  $\beta_{2A}$  进行计算。图 2-1 中为表示方便，假定  $\beta_2 \approx \beta_{2A}$ 。

$\alpha_2$ ：叶片出口绝对气流角，即绝对速度  $c_2$  与线速度  $u_2$  之间的夹角。

$c_{2r}$ ：叶轮出口绝对速度  $c_2$  的径向分速度 ( $\text{m/s}$ )。

$c_{2u}$ ：叶轮出口绝对速度  $c_2$  的切向分速度 ( $\text{m/s}$ )。

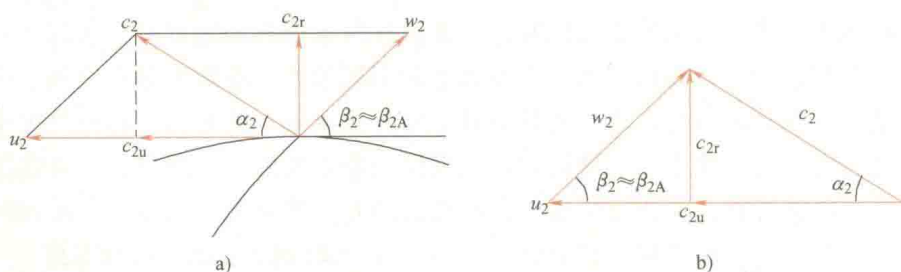


图 2-1 叶轮出口速度三角形

a) 平行四边形画法 b) 三角形画法

学习速度三角形的最终目的是在分析问题时能够正确地进行应用。如压缩机在运行过程中，如果流量或转速发生变化，如何正确地画出变化后的速度三角形？为此，首先要善于区分哪些是速度三角形的主要量。

(1) 速度三角形的主要量 速度三角形中，主要量是与叶轮的某些结构尺寸或压缩机的运行参数直接关联的量，主要量的变化会引起或决定速度三角形其他量发生变化，但其自身变化仅受与之关联的结构尺寸与运行参数变化的影响，不决定于速度三角形中其他量的变化。因此，主要量有点类似于数学中的自变量，其他量则类似于因变量。速度三角形通常有三个主要量。