

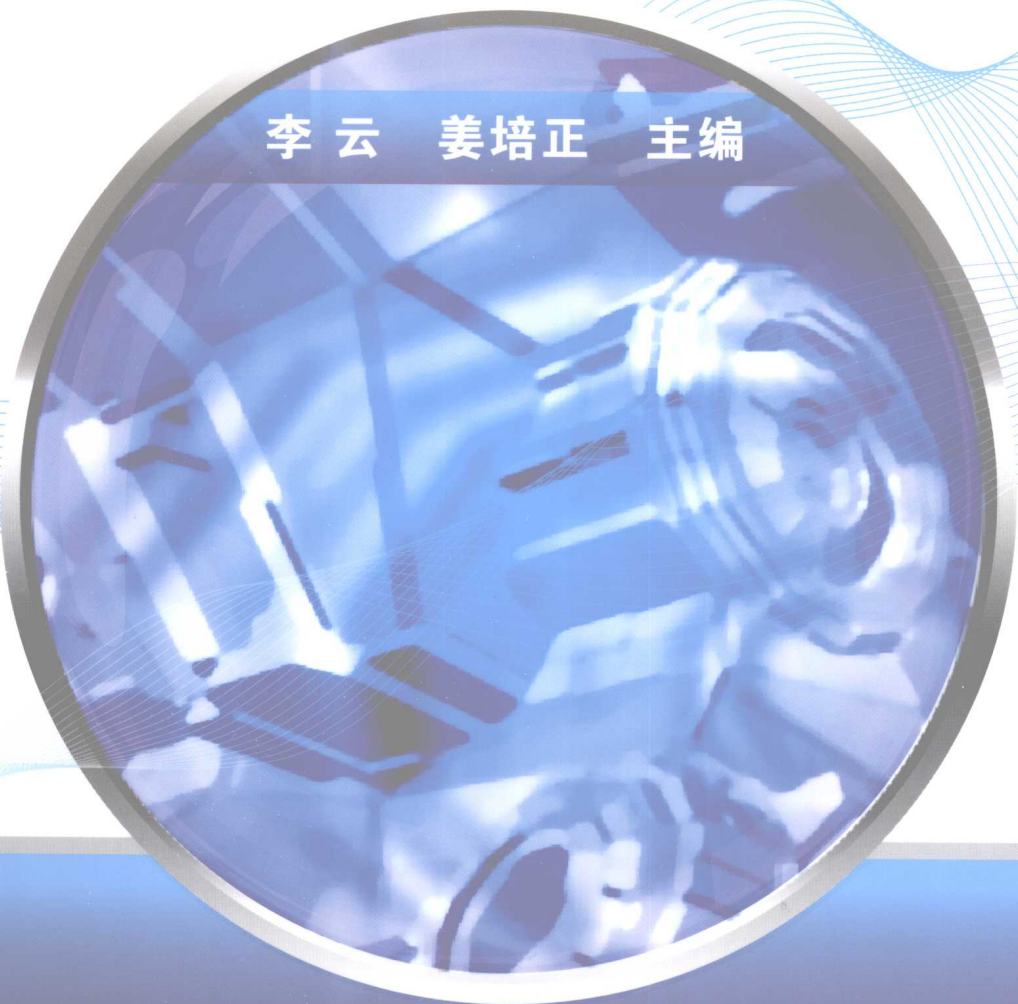


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

GUOCHENG LIUTI JIXIE  
**过程流体机械**

第二版

李云 姜培正 主编



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

第二版

李 云 姜培正 主编



化学工业出版社

·北京·

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是2000年出版的《过程流体机械》的第二版，本版保留了第一版的编排结构，对部分内容进行了更详细的分析和阐述，还添加了反映近年来的过程流体机械新成果的内容。本书以流体机械中应用广泛并具有典型性的活塞式、离心式压缩机和泵为主要对象，阐述了它们的工作原理、结构形式、运行特性、调节方法和机器的安全可靠等方面的基本知识，并注意联系一些化工厂与石油炼制、石油化工厂的特点和发展趋势。每章均有一定数量的思考题和练习题，便于思考，掌握要点。为帮助教师备课，配套制作了《过程流体机械典型题解析》。

本书不仅可作为过程装备与控制工程专业等的本科、大专教材，亦可供制造与使用各种流体机械的有关工厂、设计研究单位等的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

过程流体机械/李云,姜培正主编. —2版. —北京:化学工业出版社, 2008.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-122-03226-3

I. 过… II. ①李…②姜… 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(2008)第097395号

---

责任编辑:程树珍  
责任校对:洪雅妹

文字编辑:陈喆  
装帧设计:韩飞

---

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张16 $\frac{1}{4}$  字数425千字 2008年9月北京第2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:29.80元

版权所有 违者必究

# 过程装备与控制工程专业核心课程教材编写委员会

## 组织策划人员（按姓氏笔画排列）

丁信伟（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会  
副主任委员兼化工装备教学指导组组长）

吴剑华（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

涂善东（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

董其伍（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

蔡仁良（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

## 编写人员（按姓氏笔画排列）

马连湘 王良恩 王淑兰 王毅 叶德潜

刘敏珊 闫康平 毕明树 李云 李建明

李德昌 张早校 吴旨玉 陈文梅 陈志平

肖泽仪 林兴华 卓震 胡涛 郑津洋

姜培正 桑芝富 钱才富 徐思浩 黄卫星

黄有发 董其伍 廖景娱 魏新利 魏进家

## 主审人员（按姓氏笔画排列）

丁信伟 施仁 郁永章 蔡天锡 潘永密 潘家祯

## 审定人员（按姓氏笔画排列）

丁信伟 吴剑华 涂善东 董其伍 蔡仁良

## 第二版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是在第一版的基础上，根据时代发展和课程改革的要求，在总结近年来教学研究与改革成果，并分析教师和学生反馈意见的基础上修订而成的。

修订时，在保持第一版特色的基础上，注重对基本概念和基本参数或方程的深入阐述、理解和运用，以便于读者深入理解。力图通过阐述过程流体机械的基本理论以及分析，强化对学生分析和解决工程实际问题能力的培养，还添加了反映近年来的过程流体机械发展的新成果，以激发学生的科技创新兴趣。

由于教学对象、教学目的和书的篇幅所限，本书所阐述的流体机械，仅限于流体机械中的工作机一类。但在工作机这一类中，本书不仅阐述压缩机和泵，而且还阐述分离机。这些流体机械在许多物质产品的生产过程中被广泛大量地使用，发挥着十分重要的作用。有关这些流体机械所要阐述的理论知识和科学技术是内容相当丰富、多彩而有趣的。

本书着重联系化工生产过程所需的流体机械加以阐述与讨论。由于流体机械所涉及的内容既广又深，人们往往从理论计算研究、工程设计制造与选型使用等不同方面、不同层次上来了解它，掌握它与发展它。本书从所规定的教学目的和要求出发，学生学习流体机械这门专业课程主要是为了对流体机械选型与使用。因此本书所阐述的流体机械，其内容的理论性不是太深，但其知识面却相当广，实际的应用知识相当多。本书将从阐述各种流体机械的基本工作原理、结构形式、运行性能与调节控制及安全可靠性出发，着重达到学会选型与使用的目的。

同时，本书修正了第一版存在的错误和表达上的不妥之处，增加了部分过程流体机械结构插图，以增强学生对过程流体机械的感性认识，弥补教学内容过于抽象的不足。

本书由李云、姜培正主编，参加修订工作的有高秀峰（第1、第2章），李云（第3、第4章）、冯诗愚（第5章），本书的建议授课学时为64学时，实验另计。

本书在编写和出版的过程中，得到本书第一版主审人郁永章教授的关心和积极支持，为本书修订提出了许多宝贵意见。书中文字、图表的编辑也得到了研究生林力、罗庶、刘小放等人的帮助，在此向他们以及本书第一版编者致以诚挚的感谢。

我们衷心期望继续得到广大读者、同行专家的批评、指正。

编者  
2008年6月

# 第一版序

按照国际标准化组织的认定 (ISO/DIS 9000: 2000), 社会经济过程中的全部产品通常分为四类, 即硬件产品 (hardware), 软件产品 (software)、流程性材料产品 (processed material) 和服务型产品 (service)。在新世纪初, 世界上各主要发达国家和我国都已把“先进制造技术”列为优先发展的战略性高技术之一。先进制造技术主要是指硬件产品的先进制造技术和流程性材料产品的先进制造技术。所谓“流程性材料”是指以流体 (气、液、粉粒体等) 形态为主的材料。

过程工业是加工制造流程性材料产品的现代国民经济的支柱产业之一。成套过程装置则是组成过程工业的工作母机群, 它通常是由一系列的过程机器和过程设备, 按一定的流程方式用管道、阀门等连接起来的一个独立的密闭连续系统, 再配以必要的控制仪表和设备, 即能平稳连续地把以流体为主的各种流程性材料, 让其在装置内部经历必要的物理化学过程, 制造出人们需要的新的流程性材料产品。单元过程设备 (如塔、换热器、反应器与储罐等) 与单元过程机器 (如压缩机、泵与分离机等) 二者的统称为过程装备。为此, 有关涉及流程性材料产品先进制造技术的主要研究发展领域应该包括以下几个方面: ①过程原理与技术的创新; ②成套装置流程技术的创新; ③过程设备与过程机器——过程装备技术的创新; ④过程控制技术的创新。于是把过程工业需要实现的最佳技术经济指标: 高效、节能、清洁和安全不断推向新的技术水平, 确保该产业在国际上的竞争力。

过程装备技术的创新, 其关键首先应着重于装备内件技术的创新, 而其内件技术的创新又与过程原理和技术的创新以及成套装置工艺流程技术的创新密不可分, 它们互为依托, 相辅相成。这一切也是流程性产品先进制造技术与一般硬件产品的先进制造技术的重大区别所在。另外, 这两类不同的先进制造技术的理论基础也有着重大的区别, 前者的理论基础主要是化学、固体力学、流体力学、热力学、机械学、化学工程与工艺学、电工电子学和信息技术科学等, 而后者则主要侧重于固体力学、材料与加工学、机械机构学、电工电子学和信息技术科学等。

“过程装备与控制工程”本科专业在新世纪的根本任务是为国民经济培养大批优秀的能够掌握流程性材料产品先进制造技术的高级专业人才。

四年多来, 教学指导委员会以邓小平同志提出的“教育要面向现代化, 面向世界, 面向未来”的思想为指针, 在广泛调研研讨的基础上, 分析了国内外化工类与机械类高等教育的现状、存在的问题和未来的发展, 向教育部提出了把原“化工设备与机械”本科专业改造建设为“过程装备与控制工程”本科专业的总体设想和专业发展规划建议书, 于1998年3月获得教育部的正式批准, 设立了“过程装备与控制工程”本科专业。以此为契机, 教学指导委员会制订了“高等教育面向21世纪‘过程装备与控制工程’本科专业建设与人才培养的总体思路”, 要求各院校从转变传统教育思想出发, 拓宽专业范围, 以培养学生的素质、知识与能力为目标, 以发展先进制造技术作为本专业改革发展的出发点, 重组课程体系, 在加强通用基础理论与实践环节教学的同时, 强化专业技术基础理论的教学, 削减专业课程的分量, 淡化专业技术教学, 从而较大幅度地减少总的授课时数, 以加强学生自学、自由探讨和发展的空间, 以有利于逐步树立本科学子勇于思考与创新的精神。

高质量的教材是培养高素质人才的重要基础, 因此组织编写面向21世纪的6种迫切需要的核心课程教材, 是专业建设的重要内容。同时, 还编写了6种选修课程教材。教学指导

委员会明确要求教材作者以“教改”精神为指导，力求新教材从认知规律出发，阐明本课程的基本理论与应用及其现代进展，做到新体系、厚基础、重实践、易自学、引思考。新教材的编写实施主编负责制，主编都经过了投标竞聘，专家择优选定的过程，核心课程教材在完成主审程序后，还增设了审定制度。为确保教材编写质量，在开始编写时，主编、教学指导委员会和化学工业出版社三方面签订了正式出版合同，明确了各自的责、权、利。

“过程装备与控制工程”本科专业的建设将是一项长期的任务，以上所列工作只是一个开端。尽管我们在这套教材中，力求在内容和体系上能够体现创新，注重拓宽基础，强调能力培养，但是由于我们目前对教学改革的研究深度和认识水平所限，必然会有许多不妥之处。为此，恳请广大读者予以批评和指正。

全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会  
副主任委员兼化工装备教学指导组组长  
大连理工大学博士生导师  
丁信伟教授  
2001年3月于大连

# 第一版前言

本书是根据全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会“化工装备教学指导组”1999年度扩大工作会议和第二次工作会议决定的“核心课教材《过程流体机械》的编写要求”和审定的“编写大纲”而编写的。其中编写要求指出：“过程流体机械教材的教学目标是让本科生全面熟悉典型的过程流体机械的基本工作原理、工作特性以及能够表征其生产能力的技术经济指标，达到让学生能够初步学会选用各种流体机械的目的”。

遵照以上会议决定和该教材应达到的教学目的，本书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、安全可靠性以及选型的基本原则、方法和事例。流体机械应用量大面广，在国民经济众多的产品生产过程中起着心脏、动力和关键设备的重要作用，选用好这些流体机械，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，因而它是一门十分重要的专业核心课程。

由于教学对象、教学目的和本书篇幅所限，本书在编写体系、内容和方法上作了一些新的尝试。虽然本书不偏重于阐述较深的理论、公式推导和设计计算的内容，但却具有较广的知识面和较多的实际应用知识。书中还反映了一些现代的新知识和发展的新趋向。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，但在工作机中却既有增压与输送流体的压缩机和泵，也有用于流体介质分离的离心机。本书在写法上力求概念清晰、简明扼要、突出重点、图文并茂，其篇幅虽少而蕴涵的内容颇多。另外对部分内容，只是简单的提示了一下，未能作较具体的阐述，仅指出了有关的文献，可供参考。

本书共分五章，姜培正教授编写了第1、3章，李云副教授编写了第2章，魏进家和李德昌副教授编写了第4章，李德昌副教授编写了第5章。全书由姜培正教授主编，李云副教授参加了部分统稿工作。

本书由西安交通大学化工学院郁永章教授主审，由大连理工大学化工装备特种技术研究所所长、博士生导师丁信伟教授审定，承蒙二位教授悉心审阅，提出许多宝贵意见，谨致衷心谢忱。本书在取材中还得到沈阳鼓风机厂、重庆江北机械厂等单位及博士生权晓波、曾卓雄的大力支持和帮助，在此亦表谢意。

本书因编者的水平、能力和编写的时间有限，不妥之处实为难免，恳请兄弟院校和有关单位的同志们给予批评指正。

西安交通大学 姜培正  
2001.4



# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 过程流体机械 .....	1
1.1.1 过程与生产过程 .....	1
1.1.2 过程装备 .....	1
1.1.3 过程流体机械 .....	1
1.2 流体机械的分类 .....	1
1.2.1 按能量转换分类 .....	2
1.2.2 按流体介质分类 .....	2
1.2.3 按流体机械结构特点分类 .....	2
1.3 气体性质和热力过程 .....	2
1.3.1 气体状态方程 .....	2
1.3.2 气体热力过程 .....	5
1.3.3 气体其他性质 .....	7
1.4 压缩机概述 .....	8
1.4.1 压缩机的分类与命名 .....	8
1.4.2 压缩机的用途 .....	9
1.4.3 各种压缩机的特点和适用范围 .....	10
1.4.4 压缩机的一些术语和基本概念 .....	11
1.5 流体机械的发展趋势 .....	11
1.5.1 创造新的机型 .....	11
1.5.2 流体机械内部流动规律的研究与应用 .....	12
1.5.3 高速转子动力学的应用 .....	12
1.5.4 新型制造工艺技术的发展 .....	12
1.5.5 流体机械的自动控制 .....	12
1.5.6 流体机械的故障诊断 .....	12
1.5.7 实现国产化和参与国际市场竞争 .....	12
<b>2 容积式压缩机</b> .....	13
2.1 往复压缩机基本构成和工作过程 .....	13
2.1.1 基本构成和工作原理 .....	13
2.1.2 压缩机级的工作过程 .....	16
2.2 往复压缩机热力和动力性能 .....	25
2.2.1 压缩机的热力性能和计算 .....	25
2.2.2 压缩机的动力性能和计算 .....	33
2.3 往复压缩机气阀和密封 .....	43
2.3.1 气阀组件 .....	43
2.3.2 工作腔滑动密封 .....	49
2.4 往复压缩机调节和其他附属系统 .....	56
2.4.1 压缩机的容积流量调节 .....	56
2.4.2 压缩机润滑与润滑设备 .....	62
2.4.3 压缩机冷却和冷却设备 .....	65
2.4.4 气体管路和管系设备 .....	66

2.5 往复压缩机选型和结构实例 .....	68
2.5.1 结构形式选择及分析 .....	68
2.5.2 结构参数选择及影响 .....	72
2.5.3 压缩机的驱动机选择 .....	73
2.5.4 压缩机典型结构实例 .....	74
2.5.5 选型计算实例 .....	77
2.6 回转式压缩机 .....	82
2.6.1 螺杆压缩机 .....	82
2.6.2 单螺杆压缩机 .....	88
2.6.3 滑片压缩机 .....	90
2.6.4 液环压缩机(真空泵) .....	91
2.6.5 罗茨鼓风机 .....	93
思考题 .....	97
练习题 .....	97
参考文献 .....	97
<b>3 离心压缩机</b> .....	98
3.1 离心压缩机的典型结构与工作原理 .....	98
3.1.1 离心压缩机的典型结构与特点 .....	98
3.1.2 离心压缩机的基本方程 .....	102
3.1.3 级内的各种能量损失 .....	106
3.1.4 多级压缩机 .....	110
3.1.5 功率与效率 .....	111
3.1.6 三元流理论与三元叶轮的应用 .....	113
3.2 性能、调节与控制 .....	114
3.2.1 离心压缩机的性能 .....	114
3.2.2 相似理论在离心压缩机中的应用 .....	120
3.2.3 压缩机的各种调节方法及其特点 .....	121
3.2.4 附属系统 .....	124
3.2.5 压缩机的控制 .....	126
3.3 安全可靠性的 .....	126
3.3.1 叶轮强度 .....	126
3.3.2 转子临界转速 .....	126
3.3.3 轴向推力的平衡 .....	127
3.3.4 抑振轴承 .....	129
3.3.5 轴端密封 .....	133
3.3.6 离心压缩机机械故障诊断 .....	134
3.4 选型 .....	137
3.4.1 选型的基本原则 .....	137
3.4.2 选型分类 .....	139
3.4.3 选型方法 .....	145
3.4.4 选型示例 .....	145
思考题 .....	149
练习题 .....	150
参考文献 .....	150
<b>4 泵</b> .....	151
4.1 泵的分类及用途 .....	151

4.1.1	泵的分类 .....	151
4.1.2	泵的用途 .....	151
4.2	离心泵的典型结构与工作原理 .....	151
4.2.1	离心泵的典型结构、分类及命名方式 .....	151
4.2.2	离心泵的工作原理及基本方程 .....	155
4.3	离心泵的工作特性 .....	157
4.3.1	离心泵的汽蚀及预防措施 .....	157
4.3.2	离心泵的性能及调节 .....	163
4.3.3	离心泵的启动与运行 .....	166
4.3.4	相似理论在泵中的应用 .....	167
4.4	其他泵概述 .....	171
4.4.1	轴流泵 .....	171
4.4.2	旋涡泵 .....	173
4.4.3	杂质泵 .....	175
4.4.4	往复活塞泵 .....	176
4.4.5	螺杆泵 .....	178
4.4.6	滑片泵 .....	179
4.4.7	齿轮泵 .....	180
4.5	泵的选用 .....	181
4.5.1	泵的选用原则及分类 .....	182
4.5.2	选用方法及步骤 .....	184
4.5.3	泵的选用示例 .....	185
	思考题 .....	188
	练习题 .....	188
	参考文献 .....	189
<b>5</b>	<b>离心机</b> .....	<b>190</b>
5.1	离心机的典型结构及工作原理 .....	190
5.1.1	非均一系的分离及离心机的典型结构 .....	190
5.1.2	分离因数和离心力场的特点 .....	191
5.1.3	沉降离心机流体动力学基本方程及沉降分离过程 .....	193
5.1.4	过滤离心机的有关计算 .....	206
5.1.5	离心机的分类 .....	211
5.2	过滤离心机与沉降离心机 .....	212
5.2.1	过滤离心机 .....	212
5.2.2	沉降离心机 .....	225
5.3	离心机的选型 .....	233
5.3.1	选型的原则 .....	233
5.3.2	选型的依据 .....	236
5.3.3	选型的基本方法 .....	237
	思考题 .....	244
	练习题 .....	244
	参考文献 .....	244
<b>附录 1</b>	<b>容积式压缩机型号编制方法(JB 2589)</b> .....	<b>245</b>
<b>附录 2</b>	<b>动力用空气压缩机的基本形式参数</b> .....	<b>246</b>

# 1 绪 论

本章概述流体机械及其在物质生产过程中的地位和作用，介绍流体机械的分类与近代流体机械的发展趋势。

## 1.1 过程流体机械

### 1.1.1 过程与生产过程

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。

生产过程是人们利用生产工具改变劳动对象以适应人们需要的过程。一般是指从劳动对象进入生产领域到制成产品的全部过程，它是人类社会存在和发展的基础。

现代产品的生产过程尤其是化工生产过程往往是由多个生产环节相连接的，或由主、附生产环节相互呼应的相当复杂的过程，并以大型化、管道化、连续化、快速化、自动化为其特征。人们还在提高产品的生产率、降低成本、节约能源、提高安全可靠、优化控制与无污染等方面不断改进和完善着产品的生产过程。

### 1.1.2 过程装备

在现代产品的生产过程中，人们所使用的生产工具广义所指往往是包括各种生产过程装备，如机械、设备、管道、工具和测量用的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，对生产产品的质量、优越性能和竞争能力等都会起着决定性的作用。

### 1.1.3 过程流体机械

流体机械是以流体或流体与固体的混合物为对象进行能量转换、处理，也包括提高其压力进行输送的机械，它是过程装备的重要组成部分。在许多产品的生产中，其原料、半成品和产品往往就是流体，因此给流体增压与输送流体，使其满足各种生产条件的工艺要求，保证连续性的管道化生产，参与生产环节的制作，以及在辅助性生产环节中作为动力气源、控制仪表的用气、环境通风等都离不开流体机械。故流体机械往往直接或间接地参与从原料到产品的各个生产环节，使物质在生产过程中发生状态、性质的变化或进行物质的输送等。所以它是产品生产的能量提供者、生产环节的制作者和物质流通的输送者。因此，它往往是一个工厂的心脏、动力和关键设备。

流体机械是过程装备中的动设备，它的许多结构和零部件在高速地运动着，并与其中不断流动着的流体发生相互作用，因而它比过程装备中的静设备、管道、工具和仪器仪表等重要得多、复杂得多，对这些流体机械所实施的控制也复杂得多。学习与掌握有关流体机械的理论知识和科学技术是颇为必要的。

## 1.2 流体机械的分类

流体机械的分类方法很多，这里仅从三个方面分类如下。

### 1.2.1 按能量转换分类

流体机械按其能量的转换分为原动机和工作机两大类。原动机是将流体的能量转变为机械能，用来输出轴功，如汽轮机、燃气轮机、水轮机等。工作机是将动力能转变为流体的能量，用来改变流体的状态（提高流体的压力、使流体分离等）与输送流体，如压缩机、泵、分离机等。

### 1.2.2 按流体介质分类

通常，流体是指具有良好流动性的气体与液体的总称。在某些情况下又有不同流动介质的混合流体，如气固、液固两相流体或气液固多相流体。

在流体机械的工作机中，主要有提高气体或液体的压力、输送气体或液体的机械，有的还包括多种流动介质分离的机械，其分类如下。

#### 1.2.2.1 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。

#### 1.2.2.2 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，人们将这种泵称为杂质泵，亦称为液固两相流泵。

#### 1.2.2.3 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分离机。

### 1.2.3 按流体机械结构特点分类

流体机械按结构可分为两大类，一类是往复式结构的流体机械，另一类是旋转式结构的流体机械。

#### 1.2.3.1 往复式结构的流体机械

往复式结构的流体机械主要有往复式压缩机、往复式泵等。这种结构的特点在于通过能量转换使流体提高压力的主要运动部件是在工作腔中作往复运动的活塞，而活塞的往复运动是靠作旋转运动的曲轴带动连杆、进而驱动活塞来实现的。这种结构的流体机械具有输送流体的流量较小而单级压升较高的特点，一台机器能使流体上升到很高的压力。

#### 1.2.3.2 旋转式结构的流体机械

旋转式结构的流体机械主要有各种回转式、叶轮式（透平式）的压缩机和泵以及分离机等。这种结构的特点在于通过能量转换使流体提高压力或分离的主要运动部件是转轮、叶轮或转鼓，该旋转件可直接由原动机驱动。这种结构的流体机械具有输送流体的流量大而单级压升不太高的特点，为使流体达到很高的压力，机器需由多级组成或由几台多级的机器串联成机组。

## 1.3 气体性质和热力过程

压缩机是应用非常广泛的流体机械，其处理对象是气体，因此，了解被处理对象的性质，尤其是热力性质，以及热力变化过程，对设计、研究和使用压缩机都非常重要。

### 1.3.1 气体状态方程

描述气体宏观状态的物理量是比体积  $v$  或密度  $\rho$ ，气体的基本状态  $v$  或  $\rho$  取决于当时

的压力  $p$  与温度  $T$ 。此外, 比内能  $u$ 、比焓  $h$ 、比熵  $s$  等也是压缩机研究中常用的一些气体状态参数。状态参数的数值仅仅取决于状态, 而与达到此状态所经历的途径或过程无关。

任何气体, 基本状态参数  $p$ 、 $v$ 、 $T$  三者不是完全独立的, 它们之间存在着一定的制约关系, 并可表示成式(1-1), 这一制约关系称为气体的状态方程, 由状态方程可根据气体的任意两个基本状态参数得到第三个基本状态参数。

$$f(p, v, T) = 0 \quad (1-1)$$

### 1.3.1.1 理想气体状态方程

可以将气体假设成分子为不占体积的弹性质点且分子间没有相互作用力的理想气体, 理想气体状态方程为

$$pv = RT \text{ 或 } pV = mRT \text{ 或 } pV = NR_0 T \quad (1-2)$$

式中  $p$ ——气体压力, Pa;

$v$ ——气体比体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

$V$ ——气体体积,  $\text{m}^3$ ;

$T$ ——气体绝对温度, K;

$R$ ——气体常数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$R_0$ ——通用气体常数, 适用于任何气体,  $R_0 = MR \approx 8.31451 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;

$N$ ——气体摩尔数, mol;

$M$ ——气体摩尔质量,  $\text{kg}/\text{mol}$ ,  $M = \mu/1000$ ;

$\mu$ ——气体分子量。

自然界中实际上并不存在理想气体, 但在气体离液相区比较远, 如氮、氧等气体温度在常温以上, 压力小于 10MPa 时, 将气体处理成理想气体所带来的计算误差能被工程上所接受, 采用理想气体模型和状态方程能够简化工程计算。

### 1.3.1.2 实际气体状态方程

随着压力增高和温度下降, 气体的热力性质与理想气体的偏差将逐渐增大, 以致超出工程所允许的误差范围, 这时理想气体模型不再适用, 必须按实际气体处理。已有的处理方式有两种: 一种是对理想气体的压力与比体积分别予以修正, 由此得到的描述气体状态参数关系的方程, 称为实际气体状态方程, 如范德瓦尔方程、RK (Redlich-Kwong) 方程、RKS (Redlich-Kwong-Soave) 方程、PR (Peng-Robinson) 方程、马丁-侯 (Martin-Hou) 方程等, 不同方程适于计算不同的介质以及介质的不同参数状态, 不能完全通用; 另一种是用一个总的修正系数修正理想气体状态方程, 如式(1-3)所示, 表述直观、简单。压缩机研究中多用后一种方式。

$$pv = ZRT \quad (1-3)$$

式中,  $Z$  称为气体压缩因子, 也称气体压缩性系数, 其值与气体性质、压力和温度有关, 需由实验确定。 $Z$  表示实际气体偏离理想气体的程度, 其物理意义是实际气体的摩尔体积与同温同压下理想气体的摩尔体积之比,  $Z=1$  即为理想气体。

在临界状态则有

$$p_c v_c = Z_c R T_c \quad (1-4)$$

根据对比态原理, 不同物质在对比参数 (对比压力  $p_r$ 、对比温度  $T_r$ 、对比比体积  $v_r$ ) 都相同的对比态, 具有相同的压缩因子, 即

$$Z = f(p_r, T_r, Z_c) \quad (1-5)$$

式中  $p_r$ ——对比压力,  $p_r = p/p_c$ ;

$T_r$ ——对比温度,  $T_r = T/T_c$ ;

$Z_c$ ——临界压缩因子，多数气体的  $Z_c$  值在 0.25~0.3 之间。

故此，对于无  $Z$  值曲线的气体或者混合气体，可根据图 1-1 所示的按对比态原理绘制的通用  $Z$  值曲线求取某一对比压力  $p_r$  和对比温度  $T_r$  下的压缩因子，该图假定各种气体临界压缩因子均为  $Z_c=0.27$ 。

对于  $Z_c=0.25\sim 0.3$  之间的其他气体，应用图 1-1 的误差小于 5%；对于氢、氦、氖只有当  $T_r \geq 2.5$  时方可应用，且应以如下的虚拟临界压力  $p'_c$  和虚拟临界温度  $T'_c$  代替临界压力  $p_c$  和临界温度  $T_c$ ；对于氨和水蒸气等极性分子，图 1-1 不能直接使用，需要进行修正，详见三参数和四参数法对比态原理及相关压缩因子修正算法。相应上述压缩因子计算方法称为两参数对比态原理，两参数对比态原理假设各种气体的临界压缩因子都相等。

$$\left. \begin{aligned} p'_c &= p_c + 0.811 \quad \text{MPa} \\ T'_c &= T_c + 8 \quad \text{K} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

当  $p_r > 10$  时，所有气体对理想气体的偏差可达几倍；当  $p_r$  接近于零时，在所有对比温度下气体的  $Z$  值都接近于 1；当  $Z=0.95\sim 1.05$  时，工程上可将气体作为理想气体处理。为了应用计算机计算方便，现在正把各种气体的  $Z$  值拟合成温度与压力的函数。

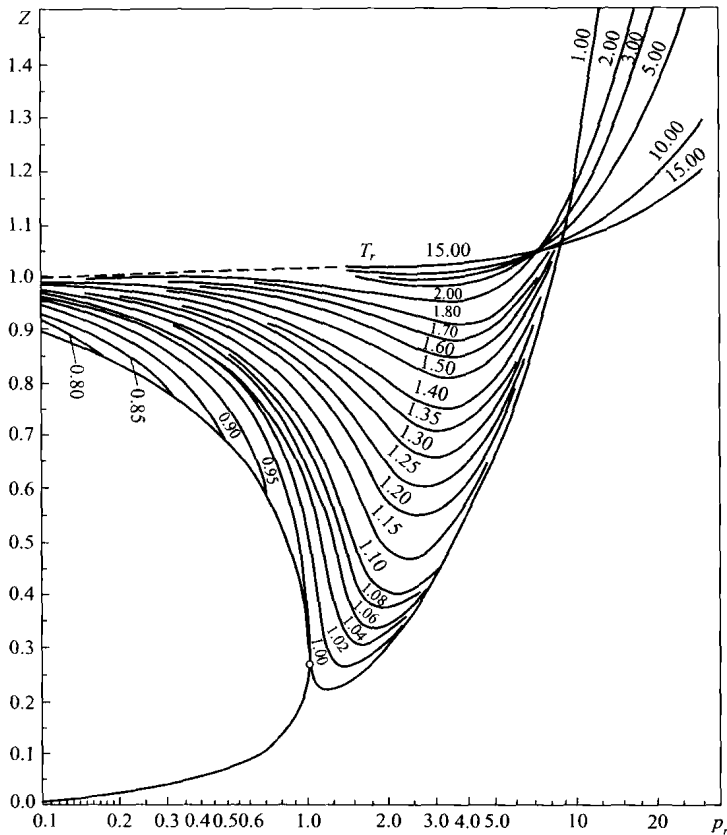


图 1-1 气体通用  $Z$  值曲线 ( $Z_c=0.27$ )

### 1.3.1.3 混合气体状态方程

混合物的热力性质取决于各组元的热力性质和所占比例，混合物中各组元所占的百分数称为混合物的成分，混合物的成分有三种表示方法：质量分数  $w_i$ 、摩尔分数  $x_i$ 、体积分数  $\varphi_i$ 。

质量分数  $w_i$  为混合物中第  $i$  组分的质量  $m_i$  与混合物总质量  $m$  之比：

$$\left. \begin{aligned} w_i &= m_i/m \\ \sum w_i &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

摩尔分数  $x_i$  为混合物中第  $i$  组物质的量  $N_i$  与混合物总物质的量  $N$  之比:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= N_i/N \\ \sum x_i &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

对于理想气体,  $x_i = N_i/N = p_i/p$ 。

体积分数  $\varphi_i$  为混合物中第  $i$  组分的分体积  $V_i$  与混合物总体积  $V$  之比:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i &= V_i/V \\ \sum \varphi_i &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

对于理想气体,  $\varphi_i = V_i/V = p_i/p = x_i$ 。

### (1) 理想混合气体状态方程

理想气体混合物遵循理想气体状态方程, 方程中所涉及的气体常数和摩尔质量要用混合气体的折合气体常数  $R_{eq}$  和折合摩尔质量  $M_{eq}$ 。

$$\left. \begin{aligned} M_{eq} &= m/N = \sum x_i M_i \\ R_{eq} &= R_0/M_{eq} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

### (2) 实际混合气体状态方程

对于实际混合气体, 若组分间不起化学反应, 则可以把混合物当作假想的纯质来处理。相应状态方程中混合物的常数与各组成物质纯质常数之间的关系, 称为混合法则。一旦混合物的常数确定了, 就可像计算纯物质一样, 用状态方程确定混合物的热力参数。各种状态方程用于混合物时, 往往有专门的混合法则, 可查阅相关文献。

### (3) 实际混合气体压缩因子

对于实际混合气体, 也可根据对比态原理, 采用通用压缩因子图计算其压缩因子, 但此时需把混合物看成是具有当量临界压力  $p_{cm}$  和当量临界温度  $T_{cm}$  的假想单一物质。当量临界参数的计算有如下两种方法。

i. 各组分  $p_c$  和  $T_c$  值相近, 即满足  $0.5 < T_{ci}/T_{cj} < 2$ 、 $0.5 < p_{ci}/p_{cj} < 2$  时, 采用如下的 Key 法则计算, 对氢、氦、氖等气体仍应以虚拟临界压力和虚拟临界温度代入。

$$\left. \begin{aligned} T_{cm} &= \sum_i x_i T_{ci} \\ p_{cm} &= \sum_i x_i p_{ci} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

ii. 任意两组分临界压力比超过 20% 时, 采用如下的 MPG 法则计算。

$$\left. \begin{aligned} T_{cm} &= \sum_i x_i T_{ci} \\ p_{cm} &= \frac{R_m \left( \sum_i x_i \varphi_{ci} \right) T_{cm}}{\sum_i x_i v_{ci}} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

式中,  $R_m$  为混合气体常数,  $R_m = \sum w_i R_i$ , 其中,  $R_i$  为任意组分的气体常数。

## 1.3.2 气体热力过程

压缩机中所涉及的气体热力过程是压缩和膨胀过程, 过程方程是描述气体状态变化过程中各基本状态参数关系的方程。

### 1.3.2.1 理想气体热力过程

理想气体的过程方程可表示如下:



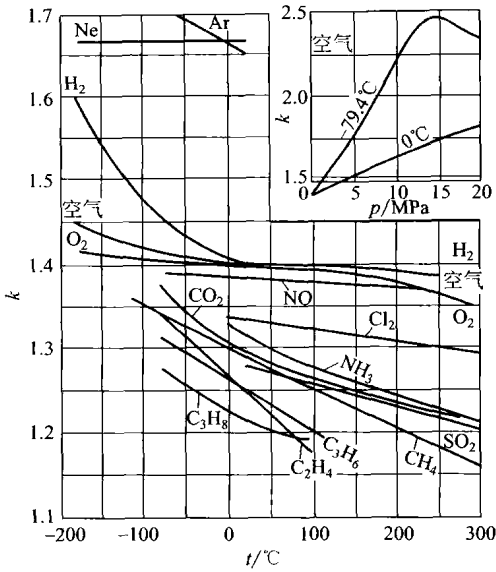


图 1-2 一些气体等熵指数与温度关系 (0.1MPa 下)

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_1}{V_2} &= \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} \\ \frac{T_2}{T_1} &= \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中，当过程指数  $n=1$  时成为等温过程，即压缩过程所产生的热量能全部导出； $n=k$  时成为绝热过程，即无热量传出。理想气体的等熵指数  $k$  值仅为温度的函数，如图 1-2 所示。但在压缩机工作的温度范围内，温度对  $k$  值的影响不超过 1%，故可忽略不计，认为  $k$  等于定值。一般单原子气体  $k=1.66\sim 1.67$ ，双原子气体  $k=1.40\sim 1.41$ ，多原子气体  $k=1.10\sim 1.30$ 。

混合气体的等熵指数  $k$  值按下式计算：

$$\frac{1}{k_m - 1} = \sum \frac{\varphi_i}{k_i - 1} \quad (1-14)$$

式中  $\varphi_i$ ——气体组分体积分数；  
 $k_i$ ——气体组分的等熵指数。

理想气体热力过程在  $p-v$  图及  $T-s$  图上的表示如图 1-3 所示。

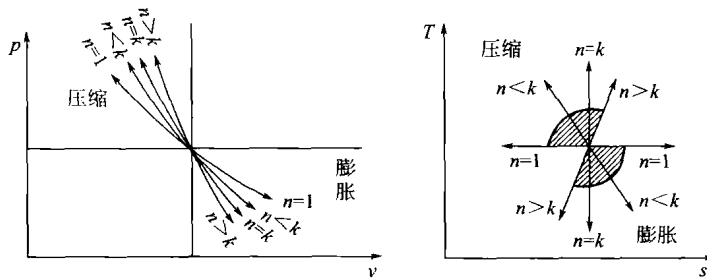


图 1-3  $p-v$  图及  $T-s$  图上的理想气体热力过程

### 1.3.2.2 实际气体热力过程

仿照理想气体过程方程式(1-13)，可把实际气体的绝热过程方程表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_1}{V_2} &= \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k_v}} \\ \frac{T_2}{T_1} &= \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k_T - 1}{k_T}} \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

式中  $k_v$ ——容积等熵指数，其值与气体的性质、压力和温度有关，而且变化比较大；

$k_T$ ——温度等熵指数，其值虽然也与气体的性质、压力和温度有关，但对双原子气体和三原子气体来讲，变化比较小，且与理想气体的等熵指数相近，故常直接应用理想气体的等熵指数。

因此，在实际使用中尽量避免使用  $k_v$ ，而是根据状态方程式(1-3)，由式(1-15)中的后一个表达式整理出容积比的如下表达形式，便于应用：

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Z_2}{Z_1} \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k_T}} \quad (1-16)$$