



高等学校教材

过程流体机械

■ 姜培正 主编



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

过程流体机械

姜培正 主编

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

过程流体机械/姜培正主编. —北京:化学工业出版社,2001.8

高等学校教材

ISBN 7-5025-3343-5

I. 过… II. 姜… III. 化工过程-流体机械-高等学校-教材 IV. TQ 051

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 044220 号

高等学校教材

过程流体机械

姜培正 主编

责任编辑:程树珍

责任校对:蒋宇

封面设计:田彦文

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话:(010)64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787×960 毫米 1/16 印张 17 字数 300 千字

2001年8月第1版 2001年8月北京第1次印刷

印数:1—3000

ISBN 7-5025-3343-5/G·896

定 价:29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

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

序

按照国际公约的约定，社会经济过程中的全部产品通常分为三类，即硬件产品（hardware）、软件产品（software）和流程性材料产品（processed material）。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生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

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，其篇幅虽少而涵盖的内容颇多。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机械研究所所长、本专业教指委主任丁信伟教授审定，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部门的同志们给予批评指正。

西安交通大学 姜培正
2001.4

内 容 提 要

本书介绍许多产品生产过程中所广泛采用的流体机械，如压缩机、泵和分离机等，系统的阐述了这些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，适用于对这些流体机械的选型和使用。

本书作为过程装备与控制工程、化学工程、流体机械等相关专业本科生、大专生和有关培训人员的专业教材使用，亦可作为选用流体机械的有关工程技术人员的参考书。

目 录

1 绪论	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	2
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	3
1.3 流体机械的用途	3
1.4 流体机械的发展趋势	4
1.4.1 创造新的机型	4
1.4.2 流体机械内部流动规律的研究与应用	4
1.4.3 高速转子动力学的应用	4
1.4.4 新型制造工艺技术的发展	4
1.4.5 流体机械的自动控制	4
1.4.6 流体机械的故障诊断	4
1.4.7 实现国产化和参与国际市场竞争	5
2 容积式压缩机	6
2.1 往复压缩机的工作原理	6
2.1.1 往复压缩机组成部分	6
2.1.2 级的压缩过程与压缩功	7
2.1.3 多级压缩	13
2.1.4 气阀	16
2.1.5 往复压缩机的密封	20
2.1.6 辅助设备	23
2.2 热力性能、动力性能、调节与控制	27
2.2.1 容积型压缩机的主要热力性能指标与结构参数	27
2.2.2 动力性能	32
2.2.3 容积型压缩机的调节方式及其控制	40

2.3	容积式压缩机的可靠性	44
2.4	回转式压缩机	46
2.4.1	螺杆压缩机	46
2.4.2	单螺杆压缩机	49
2.4.3	滑片压缩机	50
2.5	选型	50
2.5.1	压缩机的分类	51
2.5.2	往复压缩机型式选择	52
2.5.3	列数及级在列中的配置	54
2.5.4	往复压缩机的典型结构	56
2.5.5	往复压缩机选型	58
2.5.6	压缩机驱动方式选择	60
2.5.7	压缩机复算性计算	61
2.5.8	往复压缩机选型实例	62
附录 1	容积式压缩机型号编制方法(JB 2589)	68
附录 2	动力用空气压缩机的基本型式参数	69
	思考题	70
	练习题	71
	参考文献	71
3	离心压缩机	72
3.1	离心压缩机的典型结构与工作原理	72
3.1.1	离心压缩机的典型结构与特点	72
3.1.2	离心压缩机的基本工作原理	77
3.1.3	级内的各种能量损失	82
3.1.4	多级压缩机	87
3.1.5	功率与效率	89
3.1.6	实际气体	92
3.1.7	三元叶轮的应用	94
3.2	性能、调节与控制	95
3.2.1	离心压缩机的性能	95
3.2.2	相似理论在离心压缩机中的应用	102
3.2.3	压缩机的各种调节方法及其特点	104
3.2.4	附属系统	107
3.2.5	压缩机的控制	109
3.3	安全可靠	109

3.3.1	叶轮强度	110
3.3.2	转子临界转速	110
3.3.3	轴向推力的平衡	111
3.3.4	抑振轴承	114
3.3.5	轴端密封	118
3.3.6	离心压缩机机械故障诊断	122
3.4	选型	125
3.4.1	选型的基本原则	125
3.4.2	选型分类	128
3.4.3	选型方法	136
3.4.4	选型事例	137
	思考题	142
	练习题	143
	参考文献	143
4	泵	144
4.1	泵的分类及用途	144
4.1.1	泵的分类	144
4.1.2	泵的用途	144
4.2	离心泵的典型结构与工作原理	145
4.2.1	离心泵的典型结构、分类及命名方式	145
4.2.2	离心泵的工作原理及基本方程	149
4.3	离心泵的工作特性	152
4.3.1	离心泵的汽蚀及预防措施	152
4.3.2	离心泵的性能及调节	158
4.3.3	离心泵的启动与运行	161
4.3.4	相似理论在泵中的应用	163
4.4	其他泵概述	168
4.4.1	轴流泵	168
4.4.2	旋涡泵	171
4.4.3	杂质泵	173
4.4.4	往复活塞泵	174
4.4.5	螺杆泵	176
4.4.6	滑片泵	178
4.4.7	齿轮泵	179
4.5	泵的选用	181

4.5.1	泵的选用原则及分类	181
4.5.2	选用方法及步骤	185
4.5.3	泵的选用实例	185
	思考题	190
	练习题	190
	参考文献	191
5	离心机	192
5.1	离心机的典型结构及工作原理	192
5.1.1	非均一系的分离及离心机的典型结构	192
5.1.2	分离因数和离心力场的特点	194
5.1.3	沉降离心机流体动力学基本方程及沉降分离过程	197
5.1.4	过滤离心机的有关计算	213
5.2	过滤离心机与沉降离心机	220
5.2.1	过滤离心机	220
5.2.2	沉降离心机	236
5.3	离心机的选型	248
5.3.1	选型的原则	248
5.3.2	选型的依据	249
5.3.3	选型的基本方法	250
	思考题	258
	练习题	259
	参考文献	259

1 绪 论

本章概述了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联接的，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、自动化为其特征的过程。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

流体机械是以流体为工质进行能量转换、处理与输送的机械，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的作用，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，用来输出轴功率，如汽轮机、燃气轮机、水轮机等。工作机是将机械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) 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。

(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。

(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) 往复式结构的流体机械

它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缸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和活塞来实现的。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。

(2) 旋转式结构的流体机械

它主要有各种回转式、各种叶轮式（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 流体机械的用途

流体机械在国民经济众多的物质产品生产中，如煤炭、石油化工、电力、冶金、机械、建筑、交通运输、医药、食品、城市给排水、农田灌溉、环境治理、航空航天、国防装备等都有着广泛而重要的用途。这里仅以化工生产中的乙烯生产为例简要说明之。目前乙烯装备规模已达年产 75 万吨，所使用的压缩机包括裂解气压缩机、乙烯压缩机、丙烯压缩机等多台，其中目前所使用最大的裂解气压缩机为四缸串联机组，进口流量达 $3860 \text{ m}^3/\text{min}$ ，驱动它的汽轮机功率达 37 MW，这一套机组价值几千万元。又其中仅乙烯、丁二烯抽提和汽油加氢这三个单元所用的泵就有化工流程泵、高速泵等十余种类型共一百多台。这些流体机械所占整个工厂装备投资比重和能量消耗的比重都是相当可观的。它们显然是这个工厂的心脏、动力和关键设备，在生产中发挥着极其重要的作用。目前国际上把一个国家的乙烯生产水平作为衡量这个国家的经济发展水平标志之一。而裂解气压缩机的设计制造水平又是乙烯装备水平的重要标志之一。

据不完全的统计表明，流体机械中的工作机如压缩机、泵等等，其能量的消耗大约占中国能量生产的 $1/3$ ，由此可见其流体机械工作机的量大面广，用途之多。因此在研究设计与选型使用这些机器中，仅从节能这一点来说，就具有多么重大的经济意义！

1.4 流体机械的发展趋势

随着国民经济的加速发展和科学技术的突飞猛进，流体机械也随之得到不断的发展与完善。目前流体机械的发展趋势简述如下。

1.4.1 创造新的机型

高压、高单级增压比的压缩机和泵，例如活塞压缩机的出口压力达 700 MPa，离心压缩机出口压力达 200 MPa。

适用于大流量或小流量的压缩机和泵，例如轴流式压缩机进口流量达 $10000 \text{ m}^3/\text{min}$ ，活塞压缩机进口流量约 $0.01 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

高转速压缩机和高转速离心机，例如带有气体轴承的小型气轮——压缩机转速高达 $150000 \text{ r}/\text{min}$ 。

超音速压缩机，例如 $M \geq 2$ 的超音速轴流压缩机。

操作自动控制大型离心机等。

1.4.2 流体机械内部流动规律的研究与应用

在流体机械的通流部件中进行空间三维流动、粘性湍流、可压缩流、两相多相流和非牛顿流体的流场数值分析计算以及改进空间流道几何形状的设计等。

1.4.3 高速转子动力学的研究与应用

高速转子的平衡、高速转子的弯曲振动和扭转振动、高速转子的支承与抑振、高速转子的轴端密封和高速转子的使用寿命预估等。

1.4.4 新型制造工艺技术的发展

多维数控机床加工叶轮、叶片等零部件、复杂零件的精密浇铸和模锻、特殊焊接工艺和电火花加工等。

1.4.5 流体机械的自动控制

为使流体机械安全运行、调控到最佳运行工况或按产品生产过程需要改变运行工况等，均需要与不断完善自动控制系统。

1.4.6 流体机械的故障诊断

为使流体机械安全运行，变定期停机大修为预防性维修，采用在线监测实时故障诊断系统，遇到紧急情况及时报警、监控或联锁停机。目前故障诊