

火电机组 汽轮机运行技术

主 编 肖增弘
副主编 曹金成 黄 成
王 勇 李 敬



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



火电机组 汽轮机运行技术

中国电力出版社



中国电力出版社

火电机组 汽轮机运行技术

主 编 肖增弘
· 副主编 曹金成 黄 成
王 勇 李 敬



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

全书分八篇共三十二章，介绍了汽轮机工作原理，汽轮机本体结构，汽轮机调节保安系统，汽轮机辅助设备及运行，离心泵的知识，汽轮机试验、运行、维护及事故处理，集中供热，分散控制系统等技术要点。

本书可作为汽轮机专业运行、检修人员培训教材，也可供从事中小型火电机组运行技术人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

火电机组汽轮机运行技术/肖增弘主编. —北京: 中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-7667-7

I. 火… II. 肖… III. 火力发电-发电机-机组-汽轮机运行 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 097693 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 12 月第一版 2008 年 12 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 26 印张 638 千字 3 插页
印数 0001—3000 册 定价 43.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

火电机组汽轮机运行技术

近几年来,随着我国电力改革的不断深入,电力格局发生较大变化,火电厂新产品、新技术、新工艺不断得到推广应用,自动化水平不断提高;同时电厂运行人员变动较大,运行岗位新职工迅速增加。因此,尽快提高运行人员技术水平,是确保机组和电网安全、经济运行的当务之急。

为提高运行人员的技术素质,做好运行人员技术培训,我们组织编写了这本《火电机组汽轮机运行技术》,作为中小型火电机组(200MW及以下机组)运行技术人员的岗位培训教材。

本书结合发电厂生产设备运行和运行人员的实际情况,从我国目前中、小机组现状出发,根据目前我国中、小机组数量多,但技术参差不齐的情况,较全面的对中、小机组的设备、原理及运行知识作了介绍,同时对目前较多采用的DCS等相关知识作了简单介绍,包括200MW及以下机组的相关知识和DEH的相关知识,以满足中、小电力企业生产的需要,使本书更适合地方电力企业用于职工培训,针对性强,同时注重先进性、实用性和普遍性。

本书由沈阳工程学院肖增弘教授主编,曹金成、黄成、王勇和沈阳工程学院李敬教授为副主编,由李敬负责编写第一篇的第一章和第二篇,肖增弘负责编写第一篇的第二章、第三章和第三篇,黄成负责编写第四篇和第六篇,王勇负责编写第五篇,王晶岷负责编写第七篇,李沛枫负责编写第八篇。全书由肖增弘统稿,由辽宁省电力协会高级工程师姜华、孙宏祥、孙玉石、张进儒审定。

在本书编写过程中,得到了很多单位和个人的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

限于编者水平和经历有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2008年6月

目 录

火电机组汽轮机运行技术

前言

第一篇 汽轮机工作原理

第一章 汽轮机级的工作原理	1
第一节 绪论	1
第二节 级的工作原理与分类	5
第三节 蒸汽在汽轮机级中的流动	8
第四节 级的轮周效率	14
第五节 最佳速比	14
第六节 汽轮机的级内损失和效率	18
第二章 多级汽轮机	23
第一节 多级汽轮机的工作过程	23
第二节 多级汽轮机的损失	24
第三节 多级汽轮机的效率和经济指标	27
第四节 多级汽轮机的轴向推力	30
第三章 汽轮机的变工况	32
第一节 喷嘴的变工况	32
第二节 级与级组的变工况	34
第三节 汽轮机的功率调节方式及调节级变工况	39
第四节 凝汽式汽轮机的工况图	45
第五节 蒸汽参数变化对汽轮机工作的影响	47
第六节 变工况时轴向推力的变化	49

第二篇 汽轮机本体结构

第四章 汽轮机静子结构	51
第一节 汽缸	51
第二节 喷嘴组、隔板	55
第三节 汽封	57
第四节 轴承	60
第五节 汽轮机的滑销系统与膨胀	65

第五章 汽轮机转子结构	70
第一节 叶片	70
第二节 转子	73
第三节 盘车装置	74

第三篇 汽轮机调节保安系统

第六章 汽轮机调节系统的组成	76
第一节 汽轮机调节的基本概念	76
第二节 典型液压调速系统	79
第三节 调速系统的转速感受机构	82
第四节 调节系统的传动放大机构	87
第五节 调节系统的配汽机构	103
第七章 汽轮机调节系统的特性	111
第一节 调节系统的静态特性	111
第二节 调节系统的动态特性	125
第三节 中间再热式汽轮机的调节特点	127
第八章 汽轮机保安装置	129
第九章 汽轮机润滑油供油系统	160
第十章 供热式汽轮机的调节	170
第十一章 汽轮机数字电液调节系统	186
第十二章 典型机组调节系统简介	199

第四篇 汽轮机辅助设备及运行

第十三章 凝汽设备及运行	224
第一节 凝汽设备的作用及组成	224
第二节 凝汽器的工作原理和分类	225
第三节 凝汽器的结构	228
第四节 凝汽器的运行与监督	230
第五节 凝汽器的清洗	235
第六节 凝汽器的抽气器	238
第七节 凝结水泵和循环水泵的运行	240
第十四章 回热加热设备及运行	244
第一节 加热器的分类	244
第二节 表面式加热器的构造	245
第三节 表面式加热器的疏水排出方式	249
第四节 表面式加热器的疏水装置	250
第五节 高压加热器的保护装置	252
第六节 回热加热系统的系统计算	255
第七节 加热器的运行	257

第十五章 给水除氧设备及运行	260
第一节 除氧设备	260
第二节 除氧器的运行维护	266
第三节 给水泵的运行	269
第十六章 再热机组的旁路系统及运行	275
第一节 旁路系统的作用和形式	275
第二节 旁路系统设备	276
第三节 旁路系统的运行	281
第十七章 发电厂的供水系统及运行	283
第十八章 发电厂的循环水系统及运行	287
第一节 电厂的冷却水系统	287
第二节 循环水系统的冷却设备	289
第三节 冷却水塔的运行和维护	291
第十九章 发电机冷却系统及运行	293
第一节 空气冷却系统及运行	293
第二节 发电机的氢气冷却系统	294
第三节 发电机的水冷却系统	299

第五篇 离心泵的知识

第二十章 离心泵的基本知识	301
第一节 泵的分类	301
第二节 泵的主要参数	302
第三节 离心泵的工作原理及比转数	303
第四节 离心泵的主要零部件及结构形式	305
第五节 离心泵的损失和效率	311
第六节 离心泵的性能曲线	313
第二十一章 离心泵的汽蚀	315
第一节 离心泵汽蚀的发生过程	315
第二节 防止汽蚀的措施	315
第二十二章 离心泵的运行	318
第一节 管路性能曲线和泵的工作点	318
第二节 离心泵的调节	319
第三节 泵的联合工作	319

第六篇 汽轮机试验、运行、维护及事故处理

第二十三章 汽轮机试验	322
第一节 汽轮机组的试验条件	322
第二节 辅机试验	323
第三节 主机试验	326

第二十四章	汽轮机的启停	333
第一节	汽轮机启动分类	333
第二节	汽轮机的启动	334
第三节	汽轮机停止的分类及条件	336
第四节	汽轮机停止	337
第二十五章	汽轮机启停注意事项及运行维护	341
第一节	汽轮机启停的注意事项	341
第二节	汽轮机正常运行维护	343
第二十六章	典型事故处理及反事故措施	345
第二十七章	汽轮机寿命管理	352
第一节	汽轮机的寿命	352
第二节	汽轮机的寿命管理	354

第七篇 集中供热

第二十八章	集中供热与供热方式	358
第一节	集中供热与热电联产	358
第二节	供热方式	358
第二十九章	供热设备及运行	363
第一节	供热式汽轮机	363
第二节	减温减压器	366
第三节	加热器	368
第三十章	热网的运行维护及停运	372
第一节	热网的试运及投入	372
第二节	热网的运行维护	377
第三节	热网的停止	379
第四节	热网停运后的防腐	380

第八篇 分散控制系统 (DCS)

第三十一章	分散控制系统 (DCS) 简介	383
第一节	DCS 发展现状与趋势	383
第二节	分散控制系统的构成	385
第三节	DCS 的特点及可靠性	386
第四节	分散控制系统的通信	390
第三十二章	分散控制系统在电厂的应用	394
第一节	汽轮机监控系统	394
第二节	实时监控功能	394
第三节	背压汽轮机的电液调节系统	399
参考文献		408

第一篇 汽轮机工作原理

第一章 汽轮机级的工作原理

第一节 绪 论

一、汽轮机的定义及特点

汽轮机是以蒸汽为工质，将蒸汽的热能转变为机械能的回转式原动机。

汽轮机和燃气轮机都属于涡轮机械。在涡轮机械的基本工作部件中，既有静止的部件，又有高速回转的部件。涡轮机的译名为透平。因此汽轮机又称蒸汽透平。

汽轮机不同于往复式的蒸汽机，它的工质是连续流动的，转动是平稳的。汽轮机具有功率大、效率高、转速高、寿命较长等特点，所以它的用途很广泛。在火力发电厂和核电站中，都采用以汽轮机为原动机的汽轮发电机组。汽轮机也能变速运行，它可以直接驱动各种泵、风机、压气机和船舶的螺旋桨等。

在 19 世纪末期，欧洲人创造了实用的汽轮机。一百多年来，尤其是近三十年里，随着生产和科学技术的发展，汽轮机制造业发展特别迅速，其特点是向着大容量和自动化控制方向发展。大容量机组的电厂经济性高，单位功率的成本低，在电网总容量不变的情况下，电厂数目少，便于管理。目前，世界上运行的最大单机容量是 1300MW，是瑞士勃朗·鲍威利公司为美国制造的。

电力工业的发展直接关系到国民经济发展的速度，电气化的程度已成为国民经济现代化的重要标志之一。新中国成立前，我国没有汽轮机制造业，新中国成立后，陆续兴建了三个大型汽轮机制造厂，下边列出了它们的代表产品的额定功率。

上海汽轮机厂：125、300MW，以及引进美国西屋公司技术生产的 300MW 和 600MW 汽轮机。

哈尔滨汽轮机厂：50、100、200MW，以及引进美国西屋公司技术生产的 300MW 和 600MW 汽轮机。

东方汽轮机厂：75、200、300MW，以及引进西门子公司技术生产的 300MW 和 600MW 汽轮机。

另外，还有北京重型电机厂、青岛汽轮机厂和武汉汽轮机发电机厂等中小型汽轮机厂，以及以生产工业汽轮机为主的杭州汽轮机厂和以生产燃汽轮机为主的南京汽轮电机厂。

二、汽轮机结构简介

图 1-1 所示是单级汽轮机主要部分结构图。动叶按一定的距离和角度安装在叶轮上形成动叶栅，动叶栅构成了许多相同的蒸汽通道。动叶栅与叶轮及叶轮轴组成汽轮机的转动部

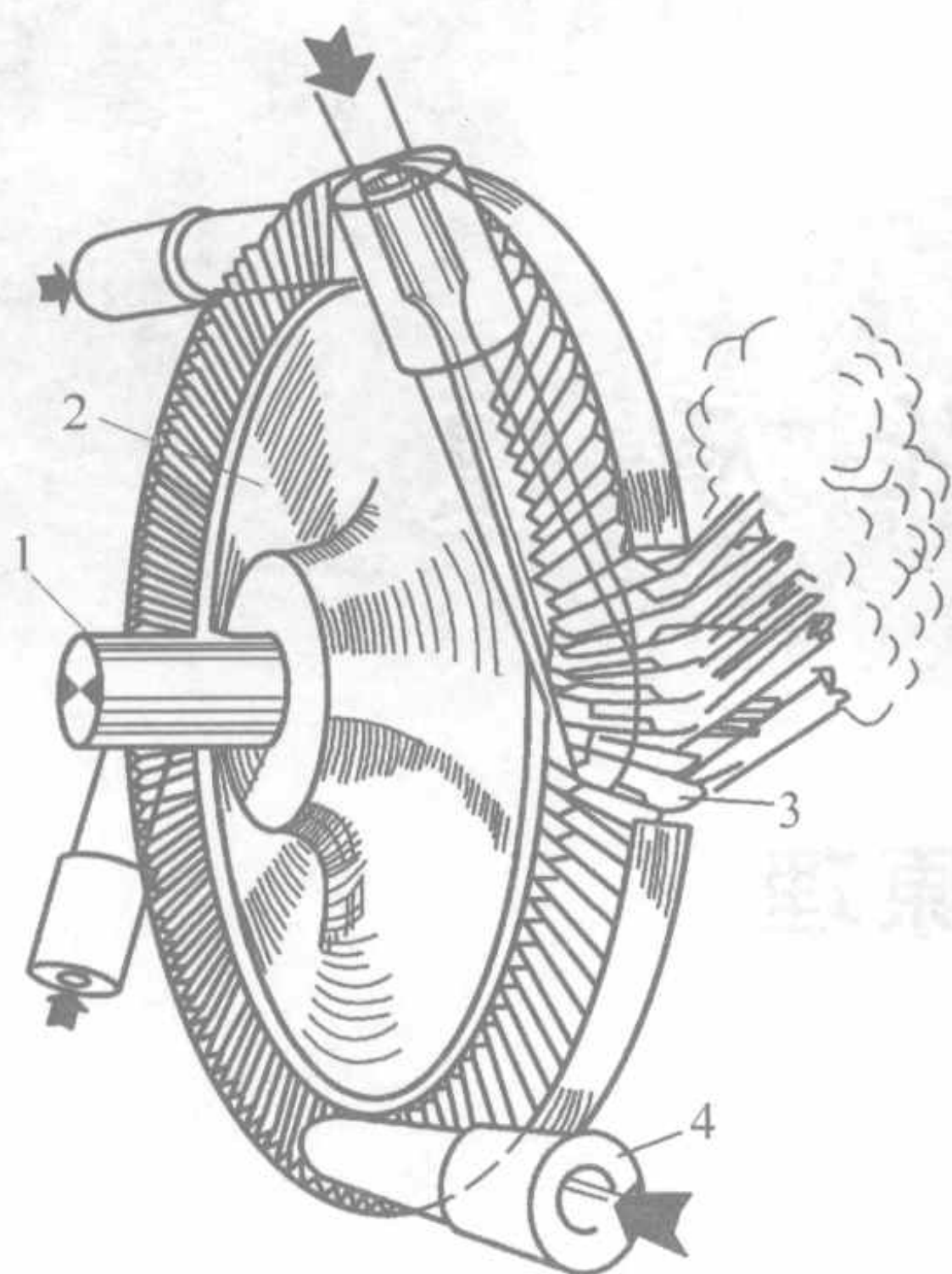


图 1-1 单级汽轮机的结构简图

1—主轴；2—叶轮；
3—动叶；4—喷嘴

分，称为转子。

在环形通道中设置流线型的静叶（或称导叶），两相邻静叶形成的蒸汽通道称为喷嘴。喷嘴可以是管状的，如图 1-1 所示，当需要多个喷嘴时，喷嘴汽道和动叶栅通道一样也是环形的。在汽轮机行业中将静叶俗称作喷嘴。

转子及静叶都装在汽缸内。具有一定压力和温度的蒸汽先在固定不动的喷嘴中膨胀，蒸汽压力、温度降低，速度增加，使热能转换成动能。从喷嘴出来的高速气流，以一定的方向进入动叶通道，在动叶通道中气流改变速度，对动叶产生一个作用力，推动转子转动，完成动能到机械能的转换。由喷嘴和一系列动叶栅组成的从热能到机械能转换的基本单元，称之为级。汽轮机可以是单级的，但绝大多数是多级的。

图 1-2 所示为多级汽轮机的纵剖面图。虽然汽轮机由很多零部件组成，但概括地看，可分为转动部分和静止部分。转动部分即转子，转子的中心部分是一根轴，称为主轴，主轴上固定着一个或若干个叶轮，叶轮上嵌有动叶片。静止部分主要是汽缸、隔板、静叶及轴承等。隔板装在汽缸上，隔板上装有喷嘴（静叶），在一台汽轮机中，静叶列数和动叶列数相同。轴承分支持轴承和推力轴承，支持轴承保证静子对转子的支承，并确定转子与静子的相对幅向位置，推力轴承保证转子在轴向推力的作用下仍能维护相对于静子的正确轴向位置。

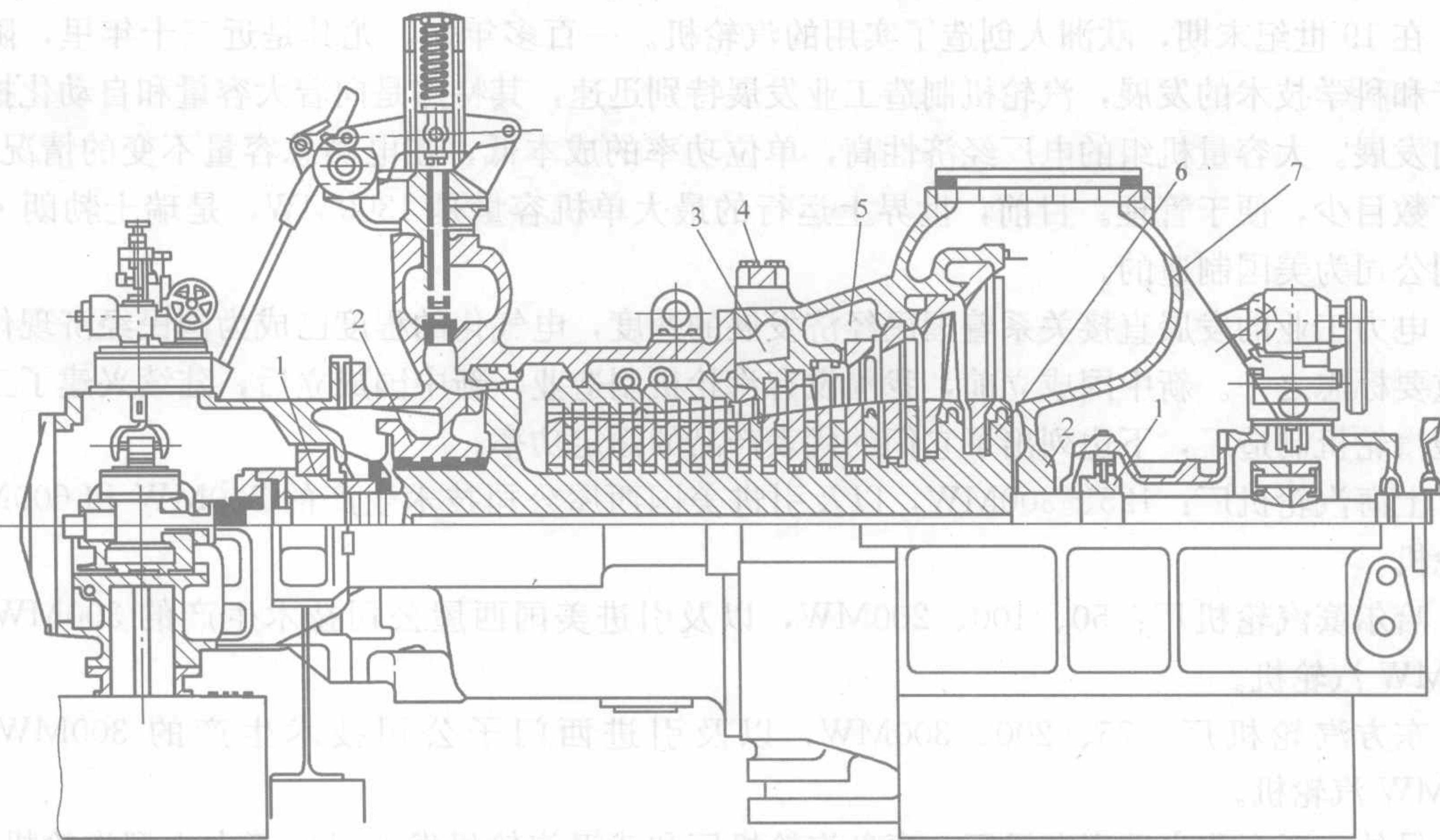


图 1-2 多级汽轮机剖面图

1—轴承；2—轴封；3—静叶；4—隔板；5—动叶；6—转子；7—汽缸

转子和静子之间的密封是用汽封来实现的，它的作用是减少从运动表面和静止表面间的间隙漏过的工质流量，保证汽轮机有较高的效率。在汽轮机内部，凡是有压力差存在而又不



希望有大量工质流过的地方都装有汽封。在汽缸的两端转子轴由汽缸内穿出的地方装有轴封；在多级汽轮机的级与级之间装有隔板轴封；在动叶顶部装有叶顶汽封。

汽轮机光有转子和静子是不能工作的，还必须有附属于本体的各种系统，包括汽水系统、调节保护系统、润滑油系统等，只有在各系统协调一致的条件下，汽轮机才能很好地完成自己所负担的任务。

三、汽轮机的分类

随着生产和科学技术的发展，汽轮机的用途越来越广泛，品种也越来越多。着眼点不同，汽轮机的分类方法也是不同的。

1. 按工作原理分类

(1) 冲动式汽轮机：蒸汽主要在喷嘴中进行膨胀。

(2) 反动式汽轮机：蒸汽在喷嘴和动叶中进行了同样程度的膨胀。

2. 按热力特性分类

(1) 凝汽式汽轮机：排汽在低于大气压力的真空状态下进入凝汽器并凝结成水。

(2) 背压式汽轮机：排汽压力大于大气压力，排汽供热用户使用。当排汽作为其他中、低压汽轮机工作蒸汽时，称为前置式汽轮机。

(3) 抽汽式汽轮机：利用调整抽汽供热的汽轮机，生产用汽的抽汽压力一般为 $0.78 \sim 1.57 \text{ MPa}$ ，生活用汽的抽汽压力一般为 $0.069 \sim 0.25 \text{ MPa}$ 。

(4) 简单循环汽轮机。

(5) 回热循环汽轮机。

(6) 中间再热汽轮机。

3. 按新蒸汽参数分类

(1) 低压汽轮机：新蒸汽压力为 $0.12 \sim 1.47 \text{ MPa}$ 。

(2) 中压汽轮机：新蒸汽压力为 $2.0 \sim 4.0 \text{ MPa}$ 。

(3) 高压汽轮机：新蒸汽压力为 $6 \sim 9.81 \text{ MPa}$ 。

(4) 超高压汽轮机：新蒸汽压力为 $11.8 \sim 13.7 \text{ MPa}$ 。

(5) 亚临界汽轮机：新蒸汽压力为 $15.7 \sim 17.7 \text{ MPa}$ 。

(6) 超临界汽轮机：新蒸汽压力超过 22.7 MPa 。

4. 按结构分类

(1) 单级和多级汽轮机。

(2) 单缸、双缸和多缸汽轮机。

(3) 单轴和双轴汽轮机。

5. 按汽流方向分类

(1) 轴流式汽轮机：在汽轮机内，蒸汽总的方向是沿轴向流动。

(2) 辐流式汽轮机：在汽轮机内，蒸汽的方向是沿径向流动，见图 1-3。

(3) 周流式汽轮机：蒸汽大致沿轮周方向流动的小功率汽轮机，见图 1-4。

6. 按能源分类

(1) 火力发电厂用汽轮机。

(2) 原子能电站汽轮机。

(3) 乏汽汽轮机：利用其他蒸汽设备的低压排汽或工业生产中工艺流程的副产蒸汽工作。

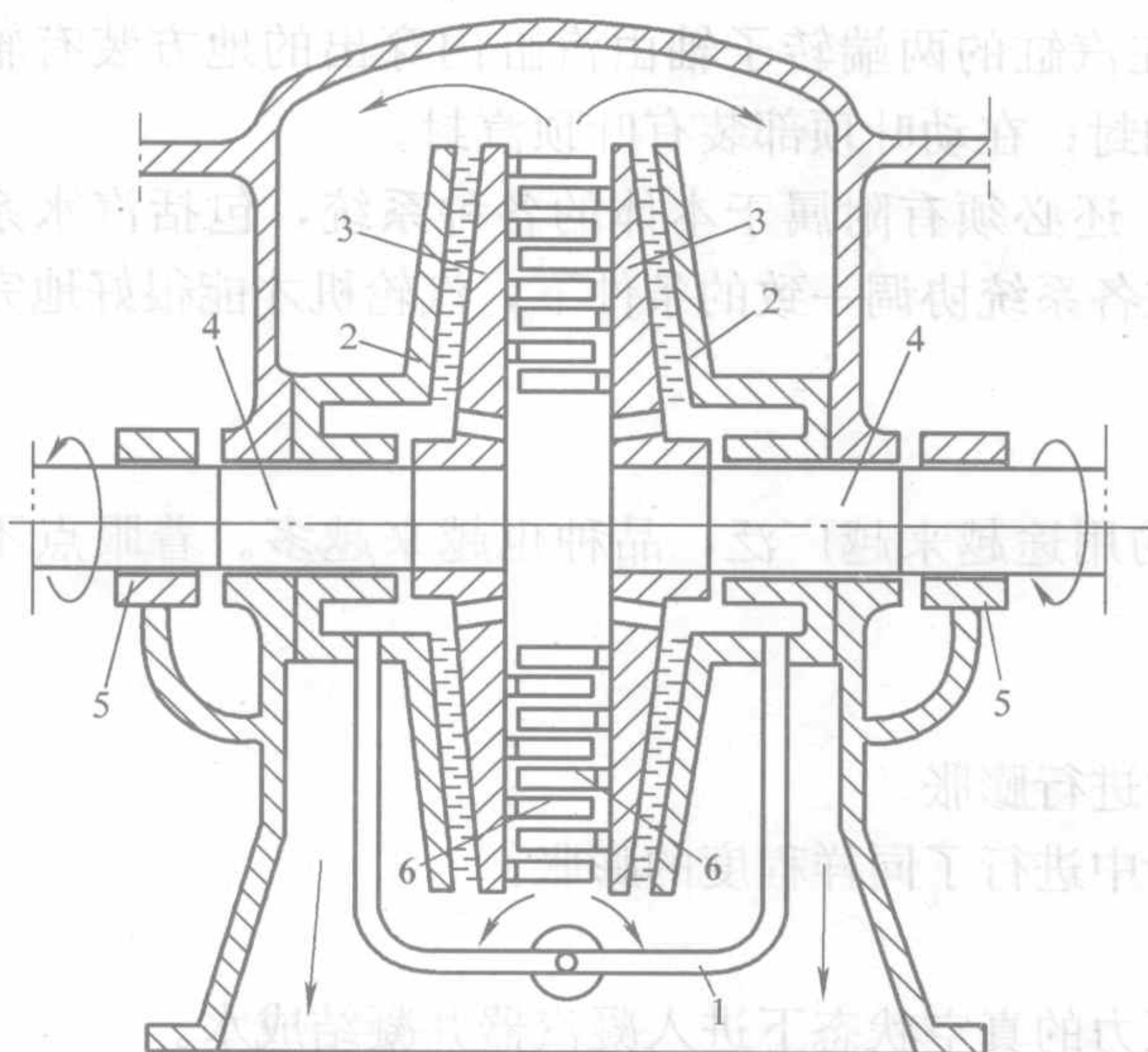


图 1-3 辐流式汽轮机示意图

1—进汽管；2—汽封体；3—叶轮；4—轴；
5—轴承；6—叶栅

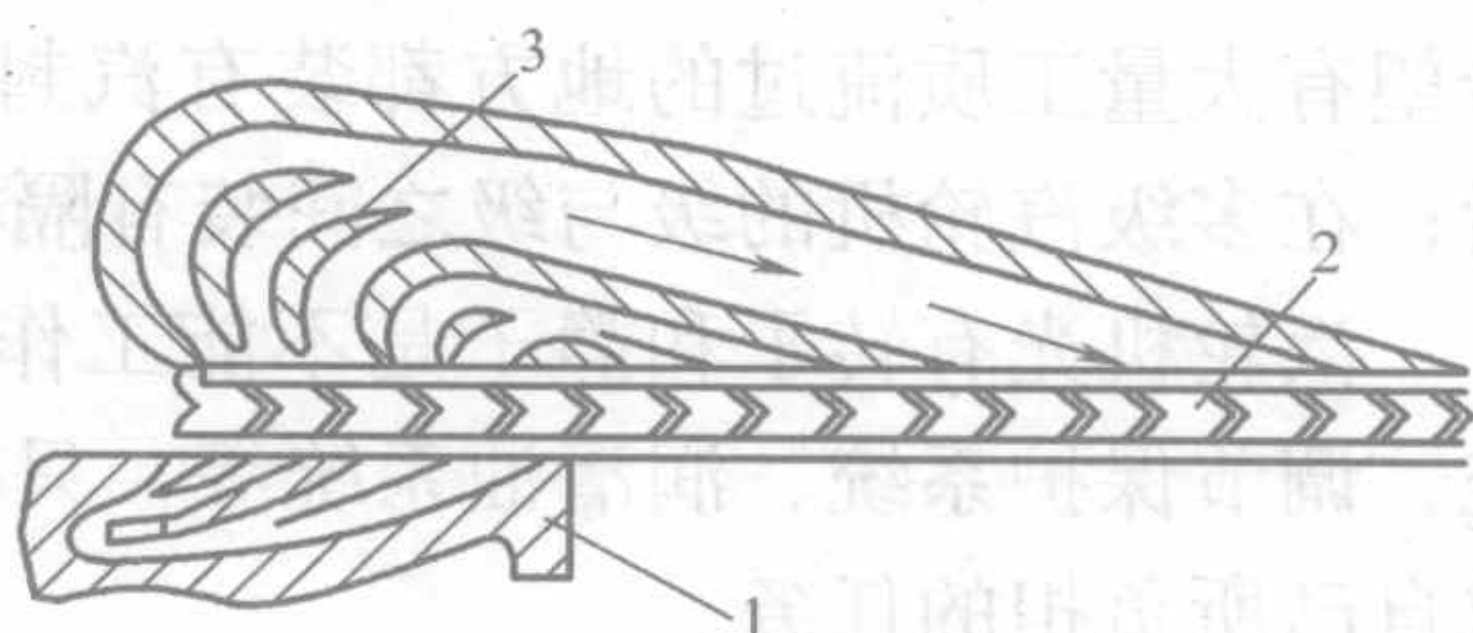


图 1-4 周流式汽轮机示意图

1—喷嘴；2—动叶片；3—导向叶片

(4) 地热电站用汽轮机。

7. 按用途分类

(1) 电站汽轮机：又分为纯发电用汽轮机和既发电又供热的供热式汽轮机。

(2) 工业汽轮机：应用于工业企业中的固定式汽轮机的总称，包括自备动力站的发电用汽轮机（通常是等转速的）和驱动水泵、风机等用途的汽轮机（通常是变转速的）。

(3) 船用汽轮机：用于驱动船舶的螺旋桨。

四、汽轮机的型号

汽轮机的型号分三段：

第一段用拼音字母表示汽轮机的热力特性或用途（见表 1-1），后面的数字表示汽轮机的额定功率（单位为 MW）。

表 1-1

国产汽轮型式的代号表

代 号	型 号	代 号	形 式
N	凝汽式	G	工业用
B	背压式	H	船用
C	一次调节抽汽式	Y	移动式
CC	二次调节抽汽式		

第二段由几个数字表示蒸汽参数：第一个数字表示新汽压力；第二个数字表示的意义取决于机组类型，对凝汽式汽轮机表示新汽温度，对背压式汽轮机表示背压，对一次调节抽汽汽轮机表示抽汽压力，对二次调节抽汽汽轮机表示高压抽汽压力；第三个数字对中间再热式汽轮机表示再热温度，对双抽汽汽轮机表示低压抽汽压力。

第三段用数字表示变型设计次序。

如：N200-12.75/535/535 型汽轮机，表示凝汽式、功率为 200MW、新汽压力为 12.75MPa、新汽温度为 535℃、再热温度为 535℃。

CC25-8.38/0.98/0.12 型汽轮机，表示二次调节抽汽式、功率为 25MW、新汽压力为 8.83MPa、高低压调节抽汽压力分别为 0.98MPa 和 0.12MPa。



第二节 级的工作原理与分类

一、级的组成及基本工作原理

汽轮机从结构上可分为单级和多级汽轮机，级是汽轮机做功的基本单元。汽轮机主要由喷嘴叶栅和与它相配合的动叶栅组成，它们之间的相对位置关系如图 1-5 所示。

具有一定温度、压力的蒸汽通过汽轮机级时，首先在喷嘴中将蒸汽所具有的热能转变成汽流的动能，然后高速汽流作用在动叶上，使装配此动叶的转子转动，动叶将汽流的动能转变成机械能。

汽流对动叶的作用分冲动作用和反动作用两种，现分别说明它们的原理。

在小车上固定着一块半圆形弯板，如图 1-6 所示。当一股汽流在一端切向进入弯板后，小车会向前运动。汽流给小车的力是这样形成的，如图 1-7 所示，沿着弯板的内弧把汽流分成若干个单元体，每个单元体在做圆周运动时都给弯板一离心力，如图 1-7 中所示的 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 等。再把这些力沿着小车运行方向和垂直方向进行分解，如果把这种流动视为理想流动，垂直方向的分力都可互相抵消。而沿着小车运动方向的分力可形成合力 F_u ，小车是在这个力的作用下运动的，这个力就是汽流给弯板的冲动作用力。

假设汽流在进入弯板前的速度是 300m/s，小车向前运行的速度是 120m/s，那么汽流相对于弯板的流动速度是 180m/s，而汽流离开弯板的绝对速度是 60m/s，如果不计损失，1kg 蒸汽的动能之差 ($\frac{1}{2} \times 300^2 - \frac{1}{2} \times 60^2$) (J/kg) 便都转变成了小车运行的机械功。

汽流在纯冲动级内的流动情况如图 1-8 所示，该级前的蒸汽压力为 p_0 ，蒸汽经过喷嘴后压力降至 p_1 ，汽流由喷嘴入口的绝对速度 c_0 增加到出口的绝对速度 c_1 。这种级的特点是：在动叶汽道中，沿汽流流动方向的截面是不变的，动叶前后的压力相等 $p_1 = p_2$ ，汽流在动叶汽道中只改变方

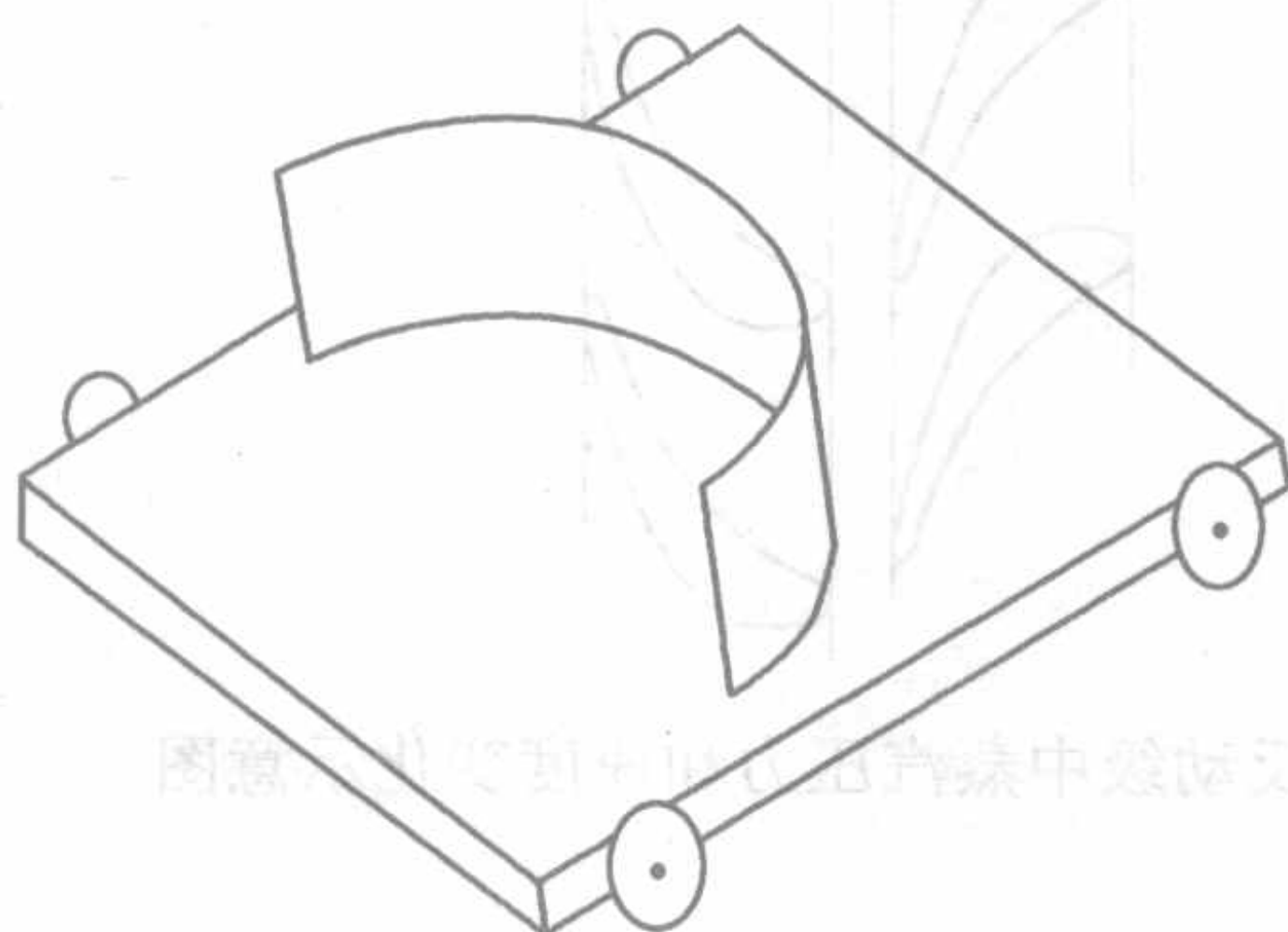


图 1-6 试验小车

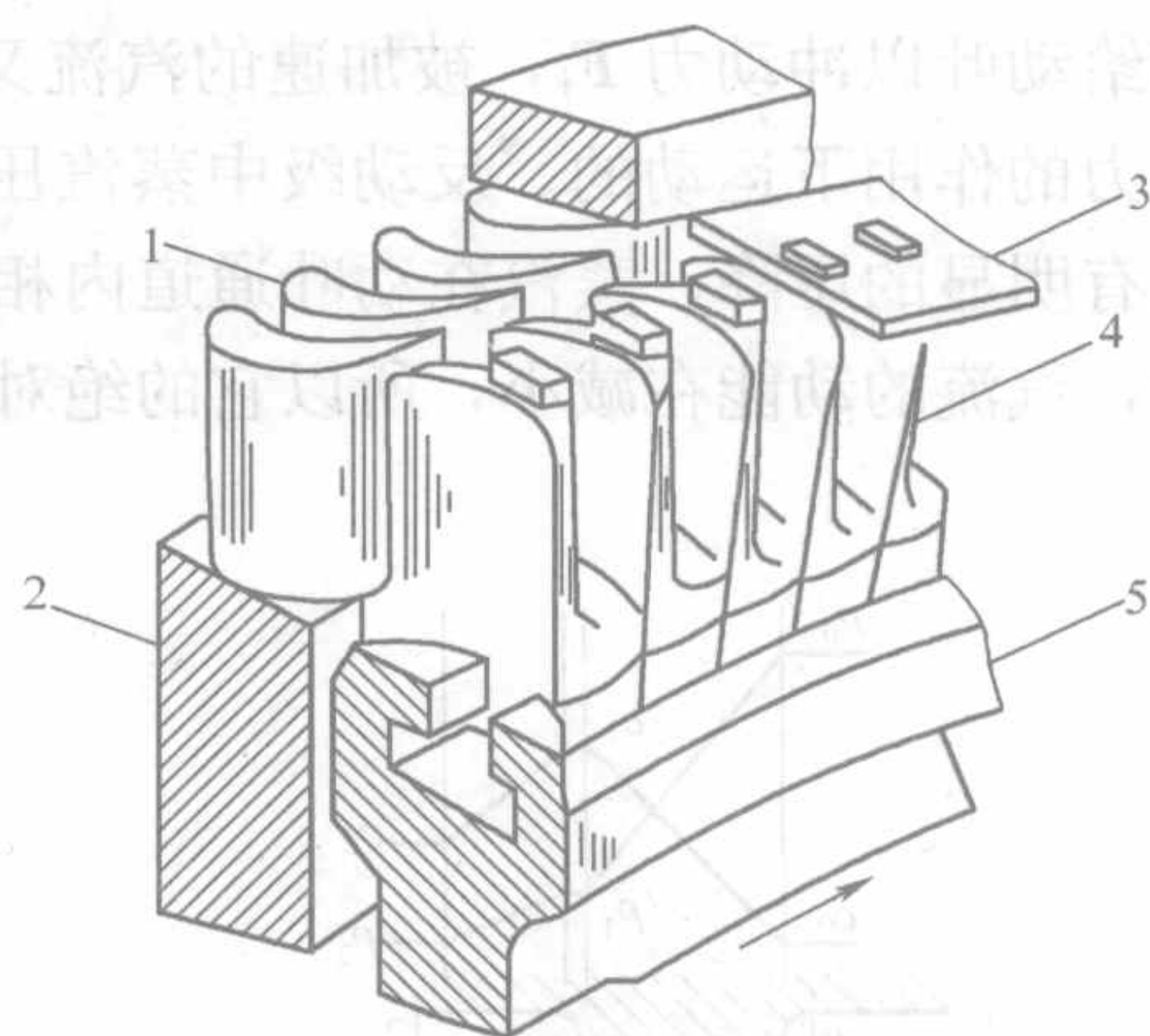


图 1-5 汽轮机级的示意图

1—喷嘴叶栅；2—隔板；3—叶顶；
4—动叶栅；5—轮毂

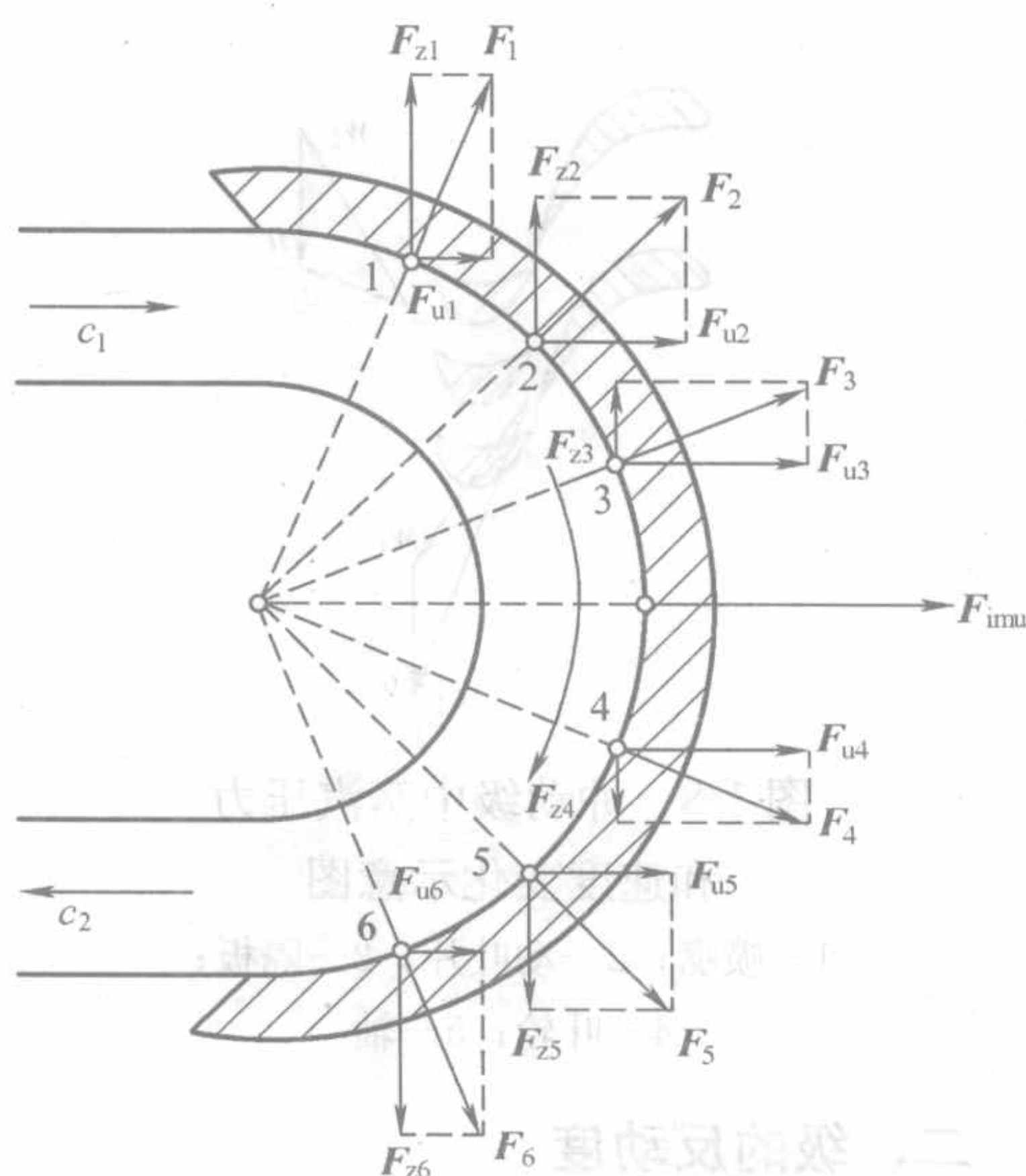


图 1-7 蒸汽流对叶片的作用力

向而不膨胀。汽流在汽道中的相对速度不变，但绝对速度是逐渐降低的，动叶入口汽流的绝对速度为 c_1 ，出口汽流绝对速度降至 c_2 。整个级内的压力和绝对速度的变化规律如图 1-8 所示。汽流在动叶内作圆弧流动时产生的离心力，就是汽流对动叶的冲动作用力，这种级叫纯冲动级。

在汽轮机中还有另一种典型结构的级为反动级，它的动叶栅通道沿汽流流动方向横截面是逐渐缩小的，如图 1-9 所示。蒸汽在其间流动时既改变方向，又膨胀加速。改变方向的流动给动叶以冲动力 F_i ，被加速的汽流又给动叶以反动作用力 F_r ，动叶栅便是在 F_i 和 F_r 的合力的作用下运动的。反动级中蒸汽压力和速度的变化示意图如图 1-10 所示，动叶前后汽流有明显的压降，蒸汽在动叶通道内相对于动叶的速度则是加速的，但由于其间汽流正在做功，汽流的动能在减小，所以它的绝对速度仍然在减小。

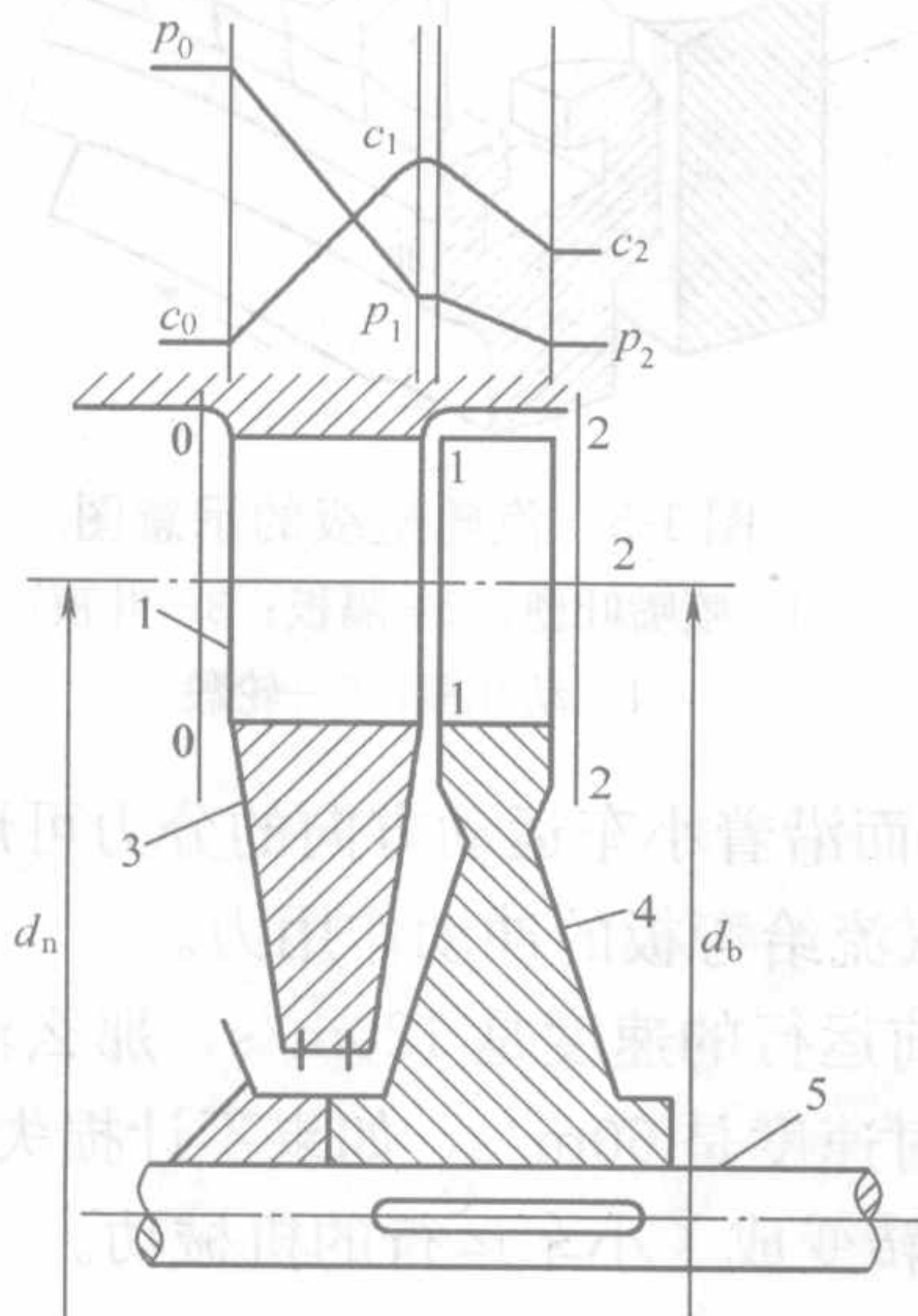


图 1-8 冲动级中蒸汽压力和速度变化示意图

1—喷嘴；2—动叶片；3—隔板；
4—叶轮；5—轴

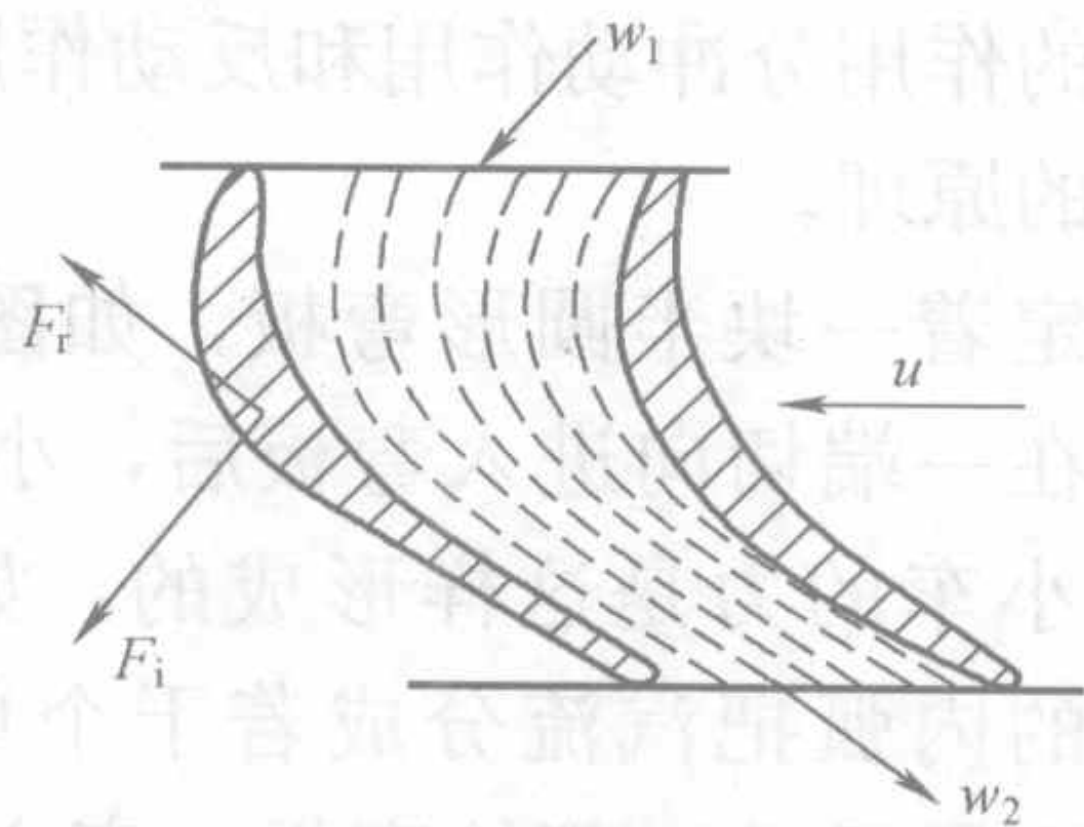


图 1-9 蒸汽在动叶汽道内膨胀对动叶的作用力

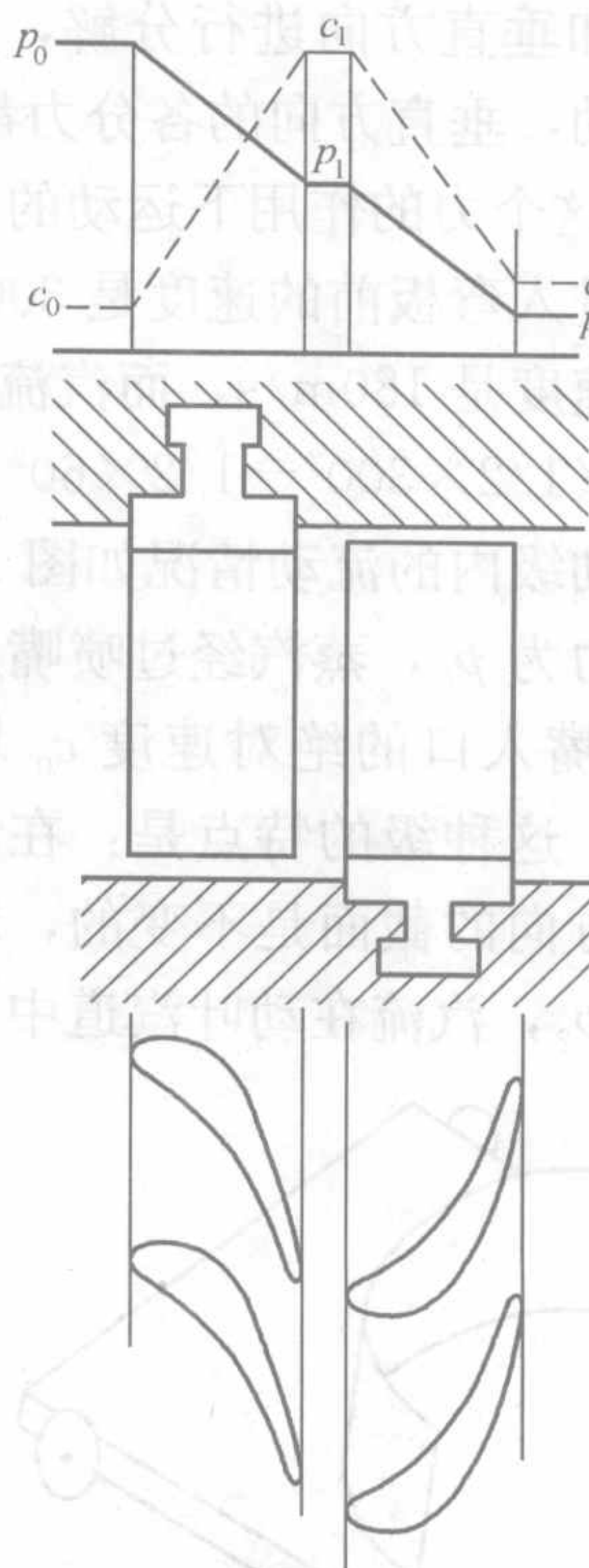


图 1-10 反动级中蒸汽压力和速度变化示意图

二、级的反动度

蒸汽在动叶通道入口边的状态点就是喷嘴出口的实际状态点。如图 1-11 所示，一般动



叶前后都有压力降，如果动叶出口边的压力为 p_2 （这也是该级的背压），蒸汽在动叶通道中的流动被视为等熵过程，动叶后的状态点是 $2t'$ ，则汽流在动叶中的理想焓降为 Δh_b 。

汽流在动叶中有焓降，说明蒸汽在动叶中有膨胀，为了反映汽流在动叶中的膨胀程度，引出了反动度的概念，它等于汽流在动叶通道中理想焓降 Δh_b 与整个级的滞止理想焓降 Δh_t^* 之比

$$\Omega = \frac{\Delta h_b}{\Delta h_t^*} \quad (1-1)$$

随着叶片高度的变化，级内不同叶高处的反动度是不同的。本书只要没有特殊说明， Ω 是指级的平均直径处的反动度。平均直径是动叶顶部和根部直径的平均值。

由于在一个级内动叶前后的压力相差不大，等压线 p_1 和 p_2 可视为平行（如图 1-11 所示），则 $\Delta h_b \approx \Delta h_b'$ 。因此反动度的表达式又可表示为

$$\Omega = \frac{\Delta h_b}{\Delta h_n^* + \Delta h_b} \quad (1-2)$$

显然 $\Delta h_b = \Omega \Delta h_t^*$ ， $\Delta h_n^* = (1 - \Omega) \Delta h_t^*$ 。

如果蒸汽进入喷嘴的初速度很小，折合的焓值可以忽略不计，则可以用 Δh_t 和 Δh_n 代替式 (1-1) 和式 (1-2) 中的 Δh_t^* 和 Δh_n^* 。

三、级的分类

按照反动度的概念，汽轮机的级可分为如下几种：

1. 纯冲动级

反动度 $\Omega = 0$ 的级称为纯冲动级， $p_1 = p_2$ ， $h_b = 0$ ，它的特点是汽流只在喷嘴中膨胀，在动叶中不膨胀而只改变其流动方向。这种级的热力过程线如图 1-12 所示。

2. 反动级

反动度 $\Omega = 0.5$ 的级称为反动级，即汽流在喷嘴和动叶中理想焓降相等，也可以说，汽流在喷嘴和动叶中的膨胀程度一样。能够实现这样的流动，是因为喷嘴型线与动叶型线完全一样。反动级内的参数变化规律如图 1-10 所示，这种级的热力过程线如图 1-13 所示。

3. 带反动度的冲动级

在实际使用中，为了兼有纯冲动级和反动级的特点，一般不采用纯冲动级，而是采用带有一定反动度（ $\Omega \approx 0.05 \sim 0.4$ ）的冲动级，这种级反动度的取值范围大多在 $0.05 \sim 0.20$ 之间。实际上，在冲动级和反动级之间并没有一个严格的界线。

4. 复速级

如果有一列动叶的冲动级，级后的绝对速度 c_2 还相当大，为了利用这一部分动能，在后边先后安装上一列静止的导向叶片和第二列动叶，导向叶片使汽流改变方向，汽流在第二列动叶片中继续做功，这种级就称为复速级，即从热能到汽流动能的转变次数在一次以上的级为复速级，级内的参数变化规律如图 1-14 所示。

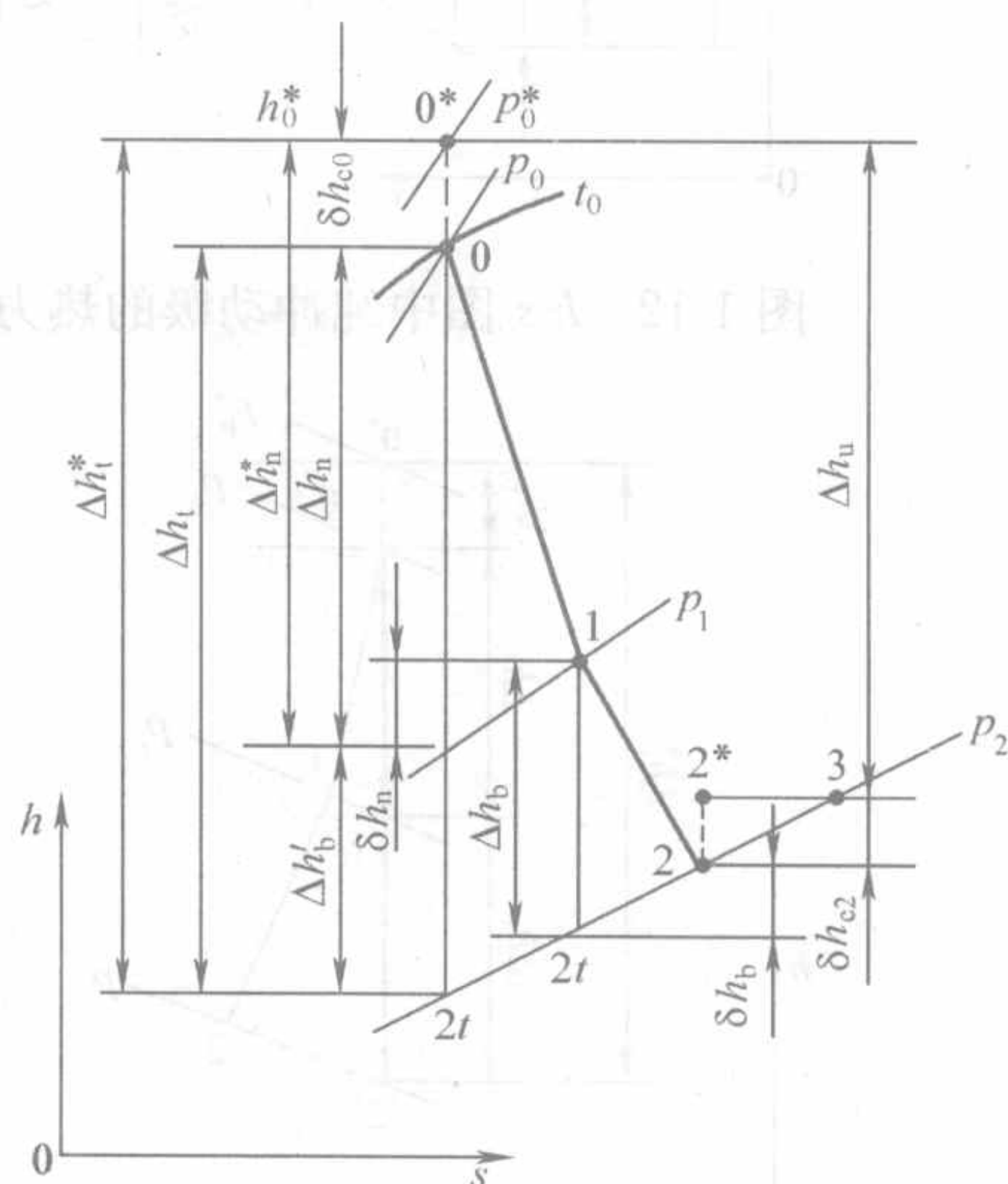


图 1-11 $h-s$ 图中汽轮机级的热力过程

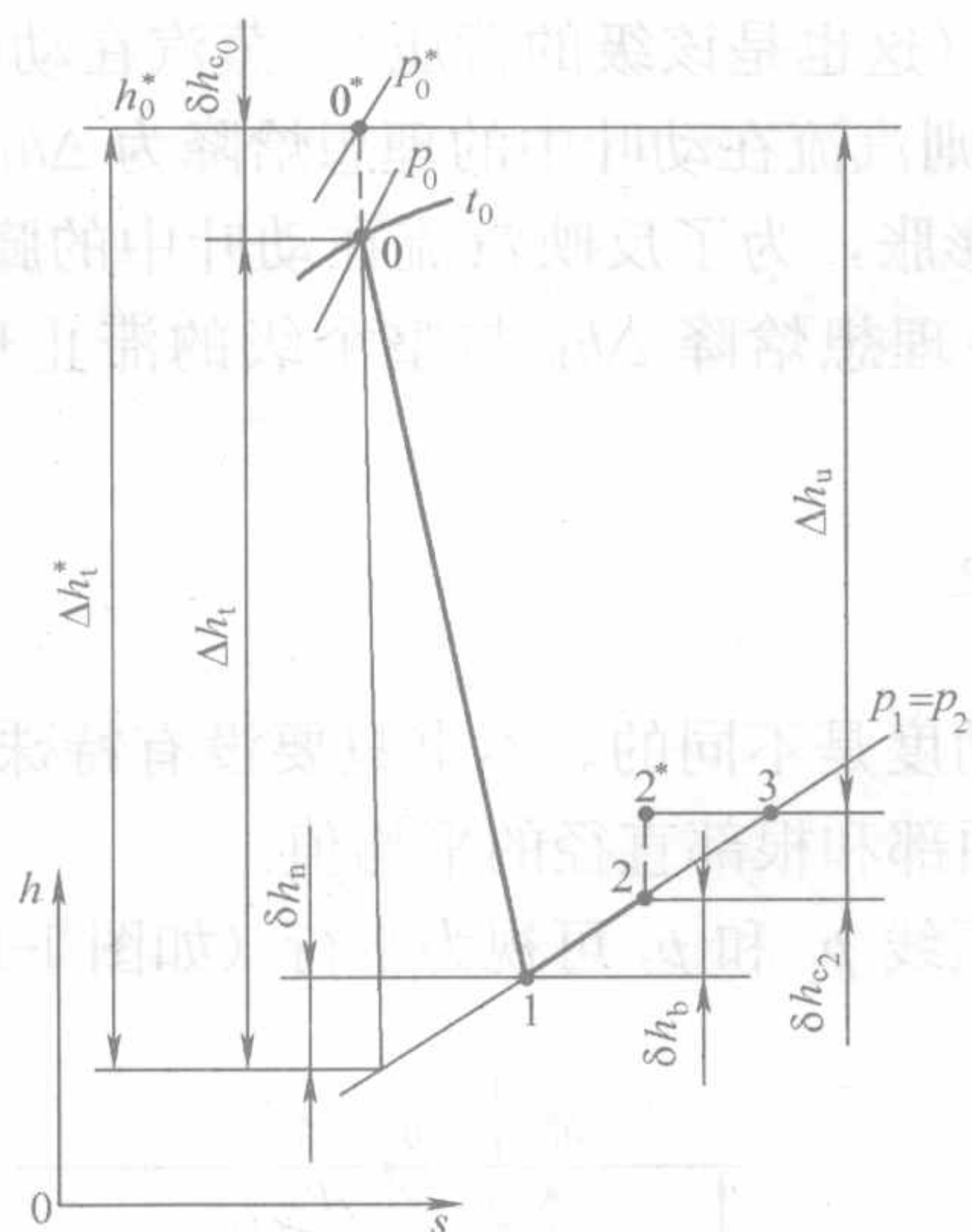
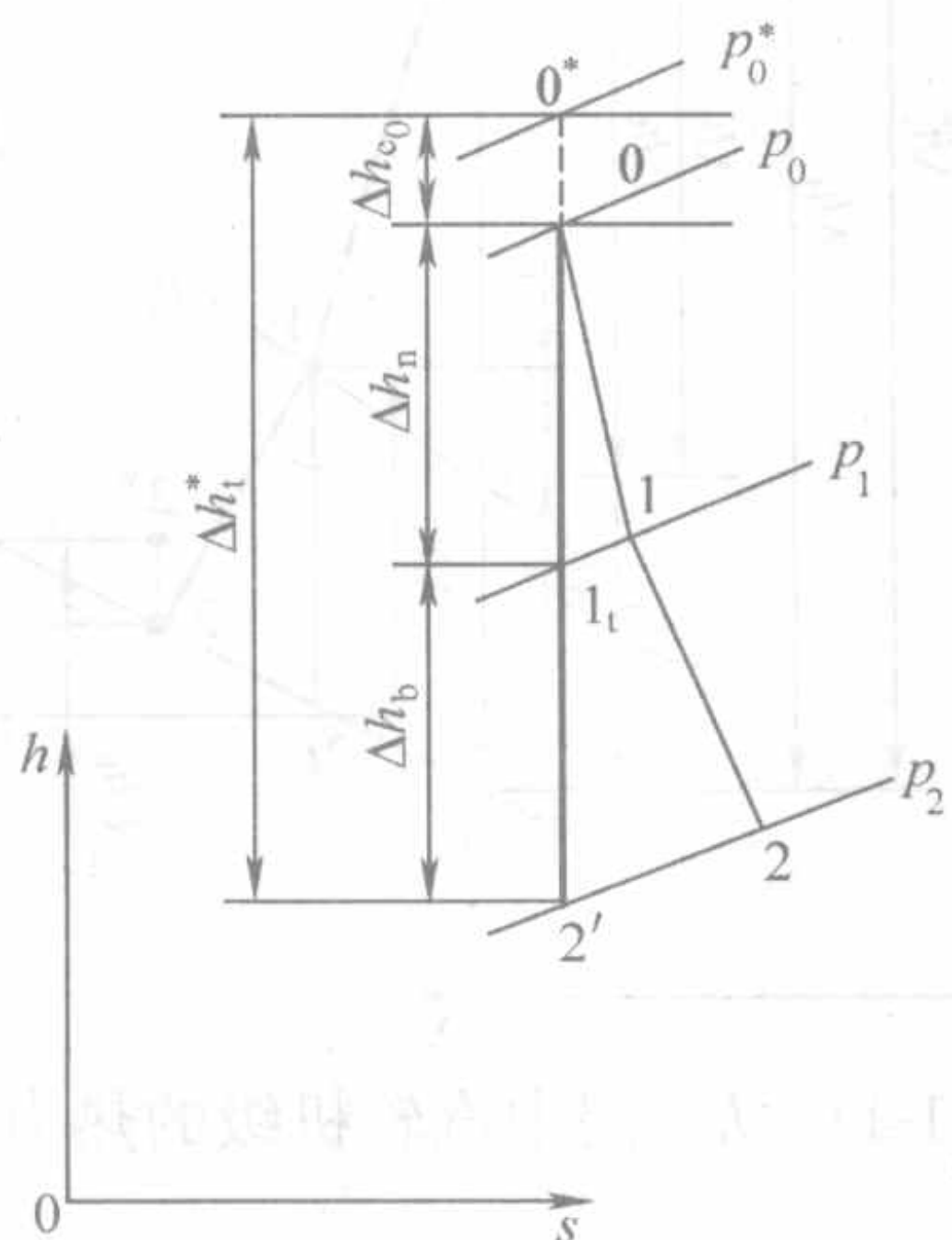
图 1-12 h - s 图中纯冲动级的热力过程

图 1-13 反动级的热力过程

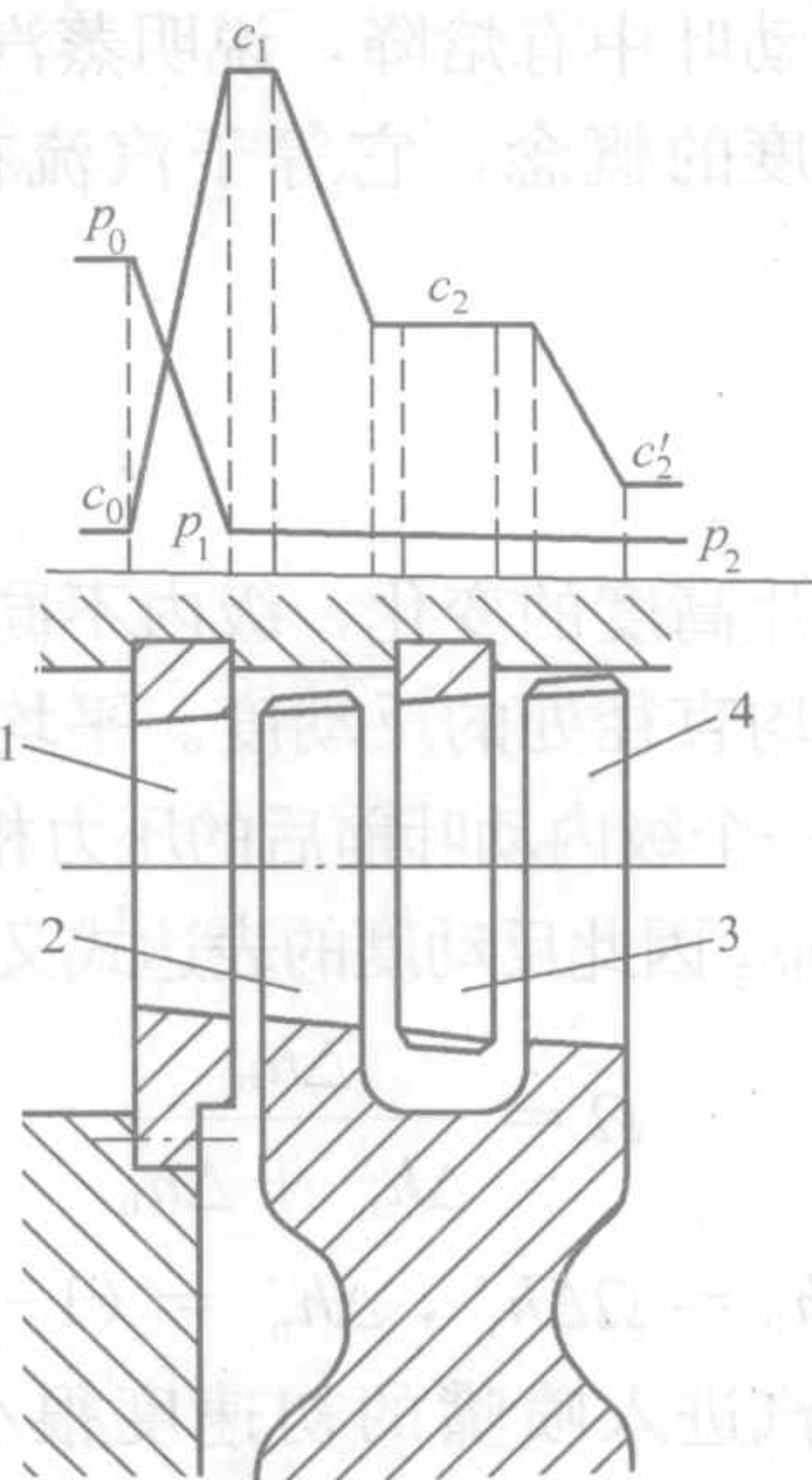


图 1-14 复速级内蒸汽参数变化规律

1—喷嘴；2—第一列动叶；
3—导叶；4—第二列动叶

按照汽轮机的能量转换特点，还可以把级分为速度级和压力级。速度级以利用汽流的速度为主，复速级是一列，还有多列速度级。压力级以利用汽轮机内分配给该级的压力降或焓降为主，单列冲动级和反动级属于压力级。

随着负荷的变化，级内通流面积也发生变化的级称为调节级。采用喷嘴调节的汽轮机的第一级都是调节级。对调节抽汽式汽轮机来说，抽汽口后边的级也为调节级。

第三节 蒸汽在汽轮机级中的流动

一、蒸汽在喷嘴中的膨胀过程

喷嘴（或称导叶、静叶）的作用是蒸汽流过喷嘴时，使它的一部分热能转换成蒸汽的动能，并使汽流有一定的方向。由于喷嘴是固定不动的，因此蒸汽流过喷嘴时，不对外做功。汽流通过喷嘴的时间很短，因此，汽流对外换热可以略去不计，即 $q=0$ 。如果喷嘴前的蒸汽参数为 p_0 、 t_0 ，该点在焓熵图上为 0（如图 1-11 所示），蒸汽在该点所具有的焓值为 h_0 ，