

普通高等教育船舶类规划教材

# 动力工程概论

DONGLI  
GONGCHENG GAI LUN

主编 包伟业



上海交通大学出版社

(沪)新登字 205 号

## 内 容 提 要

本书为热能动力机械类专业普及读本,内容包括涡轮机、内燃机、锅炉、动力装置、制冷与低温技术、核能动力等几个方面,介绍它们的基本原理和技术发展。本书可作为相关专业大、专学生入学教材,也可供工程技术人员参考。

### 动力工程概论

---

出版:上海交通~~学~~出版社

(上海市华山路 1954 号 邮政编码: 200030)

发行:新华书店上海发行所

印刷:常熟市印刷二厂

开本: 850×1168(毫米)1/32

印张: 6.5 字数: 163000

版次: 1994 年 8 月 第 1 版

印次: 1994 年 8 月 第 1 次

印数: 1-1000

科目 322-279

---

ISBN 7-313-01329-9/TK

定价: 4.50元

# 前 言

本书是根据船舶动力类教学指导委员会 1990 年制定的 第三轮全国船舶动力类教材出版计划中,“动力工程概论”课程大纲编写。

本书为热动力机械类专业低年级学生编写,使学生在进入大学后,对动力机械包括涡轮机、内燃机、锅炉、动力装置、制冷和低温技术、核能动力等方面的基本原理和学科发展有一个初步了解,以激发学生奋发学习。

全书由包伟业统稿,各章编写人为:包伟业(绪论、第 4 章 4.3 节),邵震(第 1 章),吴志兴(第 2 章),钱滨江(第 3 章),施润华(第 4 章 4.1、4.2 节),顾安忠(第 5 章),徐济望(第 6 章)。

本书由武汉海军工程学院吕起兴副教授主审,并提出许多宝贵意见,借此表示衷心感谢。此外本书在编写过程中张维竞同志协助做了大量工作,在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中肯定有不足之处,衷心希望广大读者批评指正。

编 者

## 出版说明

根据国务院国发(1978) 23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”,中国船舶工业总公司负责全国高等学校船舶类专业教材编审、出版的组织工作。

为了做好这一工作,中国船舶工业总公司相应地成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”、“水中兵器”五个教材小组,聘请了有关院校的教授、专家60余人参加工作。船舶类专业教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的专家组织,其任务是做好高等学校船舶类专业教材的编审工作,为提高教材质量而努力。

在总结前三轮教材编审、出版工作的基础上,根据国家教委对“八·五”规划教材要“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理体制,加强组织领导”的要求,船舶总公司于1991年又制定了《1991-1995年全国高等学校船舶类专业规划教材选题》。列入规划的选题共107种。

这批教材由各有关院校推荐,同行专家评阅,教材委员会(小组)评议,完稿后又经主审人审阅,教材委员会(小组)复审,然后分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及有关高等学校的出版社出版。

为了不断地提高教材质量,希望使用教材的单位和广大师生提出宝贵意见。

中国船舶工业总公司教材编审室

1992年5月

# 目 录

绪论	( 1 )
<b>第 1 章 涡轮机</b>	<b>( 7 )</b>
1. 1 汽轮机的基本工作原理和级的基本类型	( 7 )
1. 2 汽轮机本体的组成	( 13 )
1. 3 汽轮机的分类和型号	( 15 )
1. 4 汽轮机的优缺点	( 17 )
1. 5 汽轮机应用及近况	( 18 )
1. 6 燃气轮机	( 24 )
1. 7 涡轮机学科近况	( 29 )
<b>第 2 章 内燃机</b>	<b>( 33 )</b>
2. 1 内燃机概史及其应用	( 33 )
2. 2 柴油机总体认识	( 36 )
2. 3 柴油机基本工作原理	( 41 )
2. 4 汽油机可燃混合气的形成	( 48 )
2. 5 柴油机配气机构	( 50 )
2. 6 柴油机系统	( 53 )
2. 7 柴油机基本技术参数	( 58 )
2. 8 内燃机分类与型号识别	( 59 )
2. 9 柴油机发展水平与方向	( 62 )
<b>第 3 章 锅炉</b>	<b>( 66 )</b>
3. 1 锅炉的基本工作原理	( 66 )
3. 2 燃烧设备	( 75 )
3. 3 汽锅	( 79 )
3. 4 工业锅炉	( 85 )

3. 5	电站锅炉	( 89 )
3. 6	船舶锅炉	( 94 )
3. 7	余热锅炉	( 97 )
<b>第 4 章</b>	<b>动力装置</b>	( 99 )
4. 1	船舶动力装置	( 99 )
4. 2	电厂动力装置	( 120 )
4. 3	动力装置自动化	( 123 )
<b>第 5 章</b>	<b>制冷</b>	( 133 )
5. 1	制冷及其发展史	( 133 )
5. 2	制冷的的方法	( 136 )
5. 3	制冷技术的应用	( 145 )
5. 4	低温技术的应用	( 147 )
5. 5	空气调节	( 154 )
<b>第 6 章</b>	<b>核能及核能动力</b>	( 166 )
6. 1	核电站发展概况	( 166 )
6. 2	核电站和核裂变反应堆	( 169 )
6. 3	典型核电站原理	( 183 )
6. 4	核动力舰船	( 187 )
6. 5	核能供热	( 190 )
6. 6	核电站安全与环境	( 191 )

## 绪 论

能源是国民经济发展的基础，它是现代化生产的主要动力来源。在当今世界上，能源问题更是渗透到社会生活的各个方面，它直接关系到我国四个现代化宏伟目标的实现和人们物质文化水平的提高。

能源按其利用的方式来分，可分为一次能源和二次能源。一次能源如煤炭、原油、天然气、水能、核燃料、太阳能、风能等。所谓二次能源是由一次能源经过加工或转换而成的能源产品，如焦炭、液化石油气、煤气、电能、蒸汽、压缩空气等。

回顾人类的历史可以明显地看出能源和人类社会发展的密切关系。古代人类以柴薪、秸秆等生物质燃料来煮食和取暖，以人力、畜力和风力作为动力从事生产。这个以柴薪等生物质为主要能源的时代延续了很长时间，生产力和生活水平极低，社会发展迟缓。

18世纪工业革命开创的工业大发展，煤炭取代了柴薪作为主要能源，蒸汽机成为生产的主要动力，促进了工业的发展，社会劳动生产力有了很大增长。

19世纪末，电力开始进入社会各个领域，电动机代替了蒸汽机，电力成为工矿企业的主要动力和照明的主要来源，社会生产力有了大幅度增长，改变了人类社会的面貌。

石油资源的发现，开始了能源利用的新时代，西方工业发达国家很快地从以煤炭为主要能源转换到以石油天然气为主要能源，这对促进世界经济繁荣和发展起了巨大的作用，创造了人类历史上空前的物质文明。

原子能科学发展，核电站的建立，使原子核裂变能成为地球上

在有机燃料(包括煤炭、石油、天然气等)和水力资源之后的第三种主要能源,而核聚变能的开发和利用,是解决未来人类能源问题的根本途径之一。

综上所述,能源所以和社会发展关系密切,首先因为它是现代生产的主要动力来源,现代化的工业、农业和交通运输业都离不开能源动力。因此,能源问题的重要性是不言而喻的。

我国是世界上能源丰富的国家之一。煤炭的探明储量仅次于俄罗斯和美国,居世界第三位,石油储量约 300 到 600 亿吨,铀的储量也十分丰富,水力资源居世界首位,这些为建设有中国特色的社会主义提供了充分的条件。随着社会经济的不断发展,生产对能源的依赖越来越大。按人口计算的平均能耗(即每人每年的能源平均消费量)是衡量世界各国经济发展和人民生活水平的一项综合性指标。在 1984 年世界人均能耗已达 3375 千克煤当量。我国能源生产在建国以来已取得了巨大的成就,能源消费量虽然也很大,但由于我国人口众多,人均能耗却很低,1984 年人均能耗只有 664 千克煤当量,这相当于世界平均水平的 19.6%,日本的 17.4%,美国的 6.9%。加上能源利用水平低,设备落后,使能源供应与需求的矛盾相当尖锐。当前,能源问题已成为制约我国经济发展的一个非常重要的因素,解决能源问题已成为我国现代化建设的战略重点之一。

现代生产和生活中消耗着各种能量,但其中使用最广的是电能和热能。电能在各种能源中占有特殊的地位,因为它具有一系列无可比拟的优越性。电能便于在损耗很小的情况下远距离传输,又可方便地分配到任意多的大小用户中去。用户可借助各种电机或电器,把电能转变成工业、农业和生活等需要的其他形式的能量。众所周知,电力按其生产方式而言,有火电、水电和核电等,目前火电在我国占电力中的绝大部分,而火电是从热能动力转换而来,可见热能动力生产是电力生产的重要组成部分。现代工业、农业、交通运输以及国防等各个部门无不以动力为先行,没有现代动



力机械的大量生产和各种动力机械的广泛应用，就谈不上现代工业、现代农业、现代国防和现代科学技术。

将热能转换为机械能的设备人们称为热机，常见的热机有：

1. 蒸汽机 它是利用高温高压的水蒸汽推动活塞往复运动而作功的热机，曾在历史上产生过重要作用，但目前已趋淘汰。

2. 蒸汽轮机 它是利用高温高压的水蒸汽推动叶轮，使轴转动而作功的回转式热机，是现代火力发电厂应用最广的原动机，也是核电站和大型舰船上的主要动力机械。

3. 内燃机 它是在机器内利用燃料与空气混合燃烧产生的高温高压燃气，来推动活塞运动而作功的热机。由于这一能量转换的过程完全是在热机内部完成的故称为内燃机。内燃机具有热效率高、功率和转速范围大，使用寿命长，操作维修简单，价格相对比较低，故被广泛地用于汽车、拖拉机、机车、战车及舰船上。

4. 燃气轮机 它是将空气压缩后同燃油混合燃烧，产生高温燃气，进入燃气轮机膨胀作功，使部分热能转换成机械能的高速回转式动力机械。由于其具有重量轻、尺寸小、功率大的特点，主要用于飞机上作为航空发动机及大中型舰船上作为推进用发动机。

如果将上述的某种热机配备一些必要的辅助机械和设备以及检测控制仪表等，就构成了一种动力装置。例如，内燃机动力装置、燃气轮机动力装置、蒸汽轮机动力装置。由于蒸汽机已趋淘汰，通常把蒸汽轮机动力装置简称为蒸汽动力装置。

在蒸汽动力装置中，水在锅炉中加热产生蒸汽，即锅炉是使燃料的化学能转换成热能的一种重要的动力设备。据不完全统计，我国的工业锅炉总量约达 30 万台，计 50 余万蒸吨，一年消耗的煤炭约达 3 亿吨，占全国总用煤量的三分之一左右。很多工业锅炉的热效率低于国家标准的要求，仅此一项每年多消耗能源 2000 多万吨标准煤，并每年排尘量达 1000 万吨，占全国总排尘量的一半以上。所以提高锅炉的热效率，对节省燃料、节约能源和环保卫生都有重要意义。

在诸多的动力装置中，应特别介绍一下核动力装置。这种动力装置包括核供汽系统(通常称为一回路系统)和热能—机械能转换系统(通常称为二回路系统)两大部分组成。一回路系统是将反应堆中燃料释放的热能送往蒸汽发生器使其产生蒸汽的装置。二回路系统通常由蒸汽轮机、冷凝器和泵等设备组成，即将一回路系统(相当于常规蒸汽动力装置中的锅炉的功能)产生的蒸汽送到汽轮机中对外作功。核动力装置除主要用于核电站外，也是大型舰船的主要动力装置之一，包括核潜艇和核动力的航空母舰等。

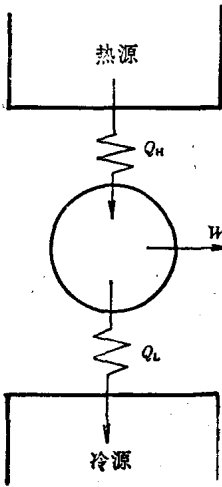


图 1

从上面介绍的各种动力装置来看，它们都是利用燃料的化学能或核能来产生热能，再通过某种途径将部分热能转换成机械功，也就是说各种动力装置实现热变功的方式是不一样的。但是无论哪一种动力装置总是用某种工作流体从某种能源中获取热能，使其具有足够的能量对机器作功，并把余下的热能排向大气或冷却系统中。人们通常把实现热能和机械能相互转化的工作流体叫做工质。而把向工质提供热能的物体称为热源；把接受工质排出余下热量的物体称为冷源。这种把热能转换成机械能的过程对上述任何形式的动力装置都是一样的，可用图 1 来表示。其中  $Q_H$  表示工质从热源获取的热能， $Q_L$  表示工质向冷源排出的剩余热能， $W$  表示工质使机器对外所作的功。

在动力工程中，制冷装置也是一种重要的热力设备，而且它在工业生产、高科技领域以及日常生活中均有十分重要的用途。在实际生产和生活中人们有时需要低于外界环境的温度，并保持一定的时间，为了获得并保持这样的低温状态，就必须设法将低温物体的热量排至外界环境，完成这种工作过程的装置就叫制冷装置。

为了使热量从低温物体排至高温环境，就必须消耗能量（因为热量不能自动地从低温物体排至高温物体）。通常是用消耗机械能来使工质进行和热机相反的工作循环，可用图 2 表示。图中  $Q_L$  是工质从低温物体吸取的热能， $W$  是外界对工质所作的功。 $Q_H$  是工质排至高温物体的热能。

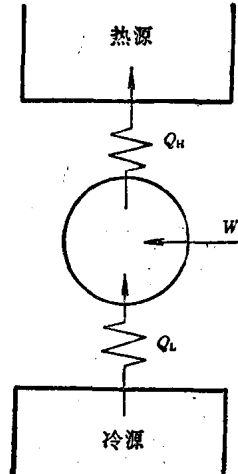


图 2

现代的动力工程虽已达到一个较高的技术水平，但它仍在不断发展和完善之中。除了继续提高现有产品的性能、质量、可靠性和耐久性，延长使用寿命外，当前对热能动力机械及热力设备将以节能为中心，充分兼顾限制排放与噪声对环境的污染，以及机电一体化技术的研究和开发。

由于自然界的矿物能源储量有限，而人类能源消耗量却逐年增长，节能已是所有国家迫切需要解决的重要问题。我国在热力设备的性能指标上与国际先进水平相比，还有较大的差距。在能源使用上还存在极大的浪费。据 1988 年世界资源研究所和国际环境发展研究所公布的资料，如以相同产值所耗能源相比较，我国比法国高出近 4 倍、比日本高 3 倍多，比印度还高近 1 倍，可见节能的潜力是很大的。因此我国的能源方针是开发与节约并重，近期要把节能放在重要地位。必须指出，现代科学技术的研究与节能问题有着密切关系，众所周知，在传统的内燃机中，输入燃料的总能量只有三分之一左右转变成有用的机械能，约有三分之一的能量为排气和冷却系统所带走，更充分地利用损失掉的热能是提高发动机热效率的关键。为此人们提出了有限冷却（或低热损失）或无冷却（绝热）发动机。尽管目前在绝热发动机的研究中尚存在一些技术问题需要解决，但采用绝热发动机提高性能的潜力是可

观的,具有很大的吸引力。再如,低温超导的研究,由于超导体“电阻为零”,使用超导体将有效地实现远距离电力输送而无电力损失,使能耗降低。

由于环境保护的迫切需要,对现代的热能动力机械和热力设备也提出了更新更高的要求。无论是发动机还是锅炉,燃料燃烧后向大气排出的烟气中存有大量的有害物质,直接危害人们的身体健康。我国在这方面的指标还十分落后,控制排放的污染已到了刻不容缓的地步。同样,各种噪声也是环境的公害之一,各种动力机械的噪声问题影响身体健康,现在对噪声的污染也提出了更高更严的要求,迫使我们去解决这方面的问题。

由于自动控制技术的发展,特别是电子技术和微型计算机科学的迅猛发展,使动力装置自动化技术提高到一个新的水平。由于现代各种动力装置及设备大都在高参数下运行,其控制和监测在常规自动控制技术的基础上,进一步发展到电子技术、微型计算机技术和各种动力装置及设备的广泛结合,因此机电一体化是动力工程发展的必然趋势。现代大型火电站、核电站通常都用计算机实现自动控制和监测的。大型船舶实现了“无人机舱”(即船舶航行中机舱无人值班)。自动控制和计算机技术在动力工程中的广泛使用不仅减轻了工作人员的体力劳动、改善了工作环境和条件,实现有些人无法直接进行的操作,并且大大提高了动力装置的技术性能和运行的可靠性、经济性等。例如:内燃机上采用电子调速器来实现最佳调速可提高发动机的热效率。锅炉采用计算机控制后,可使锅炉保持最佳燃烧从而使效率提高,一般可节省燃料3%~10%,如果我国的锅炉都采用计算机控制,按节约煤炭5%计算,一年便可节约一千万吨以上,所以经济效益是很大的。

总之,如何使热能动力机械和热力设备提高热效率,达到节能的目的,如何减少它们排放和噪声对环境造成的污染,以及实现计算机控制、机电一体化技术的研究和开发,都有待于有志从事动力工程方面工作的同志们去研究和解决。

# 第1章 涡轮机

涡轮机又称透平(透平为英文Turbine或俄文Турбина的音译)。它可以包含有蒸汽轮机、燃气轮机及水轮机等,是以不同的工作介质(简称工质)分别给予不同的命名。蒸汽轮机是利用蒸汽的热能来作功的旋转式热力原动机。它在工作时先把蒸汽的热能转变成动能,然后再使蒸汽的动能转变成机械能。

## 1.1 汽轮机的基本工作原理和级的基本类型

蒸汽轮机简称汽轮机,它的工作原理起源于古代风车带动其他机械做功的原理,即具有一定速度的气流是可以做功的,这种做功的本领,叫做动能。风车是利用空气的动能来做功的,它的工质是空气。

实用的汽轮机比风车复杂得多,一般是通过两种不同的作用原理来实现的。

### 1.1.1 冲动作用原理和冲动级

图 1-1 所示是最简单的纯冲动式单级汽轮机。由图可见,具有一定压力和一定温度的蒸汽连续流进汽轮机时,首先流入固定不动的喷嘴 1 中膨胀,膨胀时蒸汽的压力、温度降低,速度增加,使热能变成动能。这里的喷嘴是固定在汽缸 2 上,图上喷嘴只示出一个,实际上有若干个或一圈喷嘴所组成的静叶栅。然后,从喷嘴流出的高速汽流  $c_1$ , 以一定的方向进入装在叶轮 4 上的由一圈动叶 3 组成的汽道中,在动叶汽道中,由于汽流方向的改变,产生作用力,使叶轮旋转作功,完成动能到机械能的转变。而后,通过

轴 5 输出机械功。轴是在轴承 7 中转动的，图中止推轴承 6 是用来保证喷嘴与动叶之间的轴向位置。

上述能量转换过程，实际上是经历了两个连续阶段：首先在喷嘴中蒸汽的热能变成动能，然后在动叶汽道中蒸汽的动能转变成机械能。

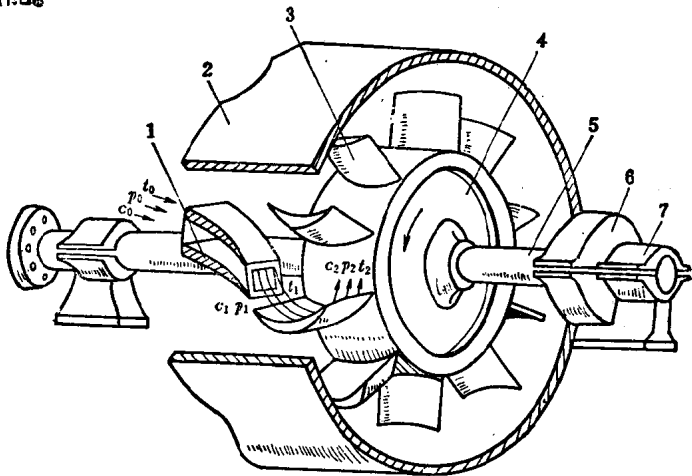


图 1-1 单级纯冲动式汽轮机

1—喷嘴；2—汽缸；3—动叶；4—转轮；5—轴；6—推力轴承；7—轴承

利用冲动作用原理的最简单的汽轮机剖面图如图 1-2 所示。图的右方表示喷嘴和动叶的剖面及汽流流向， $u$  为动叶叶轮的转动方向。图的上方表示蒸汽参数变化，喷嘴前蒸汽压力为  $p_0$ ，速度为  $c_0$ ，温度为  $t_0$ ，出喷嘴的分别为  $p_1, t_1, c_1$ ，在喷嘴中蒸汽膨胀，压力下降，速度增加，出动叶时蒸汽压力为  $p_2$  ( $p_2 = p_1$ )，速度为  $c_2$ ，由于动能转变成机械功，故动叶出口的绝对速度  $c_2$  是减小了。冲动作用原理的特点是：汽流在动叶流道中不膨胀加速，只是改变方向。

喷嘴和它相配合的动叶构成了这种汽轮机作功的基本单元，通常称为纯冲动式汽轮机级，简称纯冲动级。由这样一个级构成的汽轮机，称为单级纯冲动式汽轮机，由这种多个级构成的汽轮

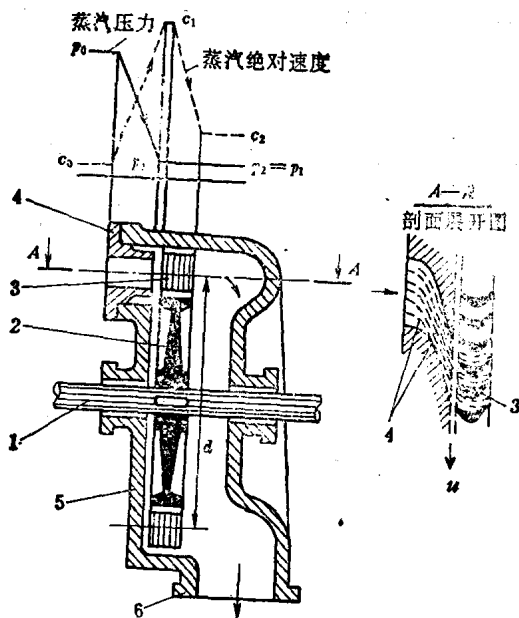


图 1-2 单级冲动式汽轮机示意剖面

1—轴；2—叶轮；3—动叶；4—喷嘴叶栅；5—汽缸；6—排汽管

机，则称为多级纯冲动式汽轮机。

### 1.1.2 反作用原理和反动级

反动力的产生和冲动力的产生原因是不相同的，反动力是由原来静止或运动速度较小的物体，在离开或通过另一物件时，骤然加速而产生的。例如，火箭内燃料燃烧而产生的高压气体，以很高的速度从火箭的尾部喷出，这时，喷出的高速气流就给火箭一个与气流方向相反的作用力，此力推动火箭向上运动。这种反作用力称为反动力。在汽轮机中，蒸汽不仅在喷嘴中膨胀加速，而且在动叶流道中也膨胀加速时，气流必然对叶片作用于一个由于加速而引起的反动力，推动动叶运动，作出机械功，这就是反动作用原理。

利用反动作用原理作功的，由静叶栅和动叶栅所组成的汽轮机级的基本单元，称做反动级。为进一步说明其作用原理，见图

1-3 所示的一反动级示意图。它由静叶栅 1 和动叶栅 3 组成, 静、动叶栅的剖视图如 A—B 所示。其静叶栅与冲动级的喷嘴相同, 蒸汽在静叶栅中膨胀, 压力由  $p_0$  降为  $p_1$ , 速度由  $c_0$  增为  $c_1$  (变热能为动能), 在动叶栅中蒸汽继续膨胀加速, 由压力  $p_1$  降为  $p_2$ , 速度由  $c_1$  增为  $c_2$ 。由于作了机械功, 绝对速度  $c_2$  比  $c_1$  小。从图中左面所示的一静叶流道和动叶流道图可看出, 静叶栅流出的绝对速度  $c_1$ , 而进入动叶流道时, 气流在动叶栅中的相对速度为  $w_1$ 。如前所述, 蒸汽将对动叶栅作用一个冲动力为  $F_A$ , 由于蒸汽在动叶栅中继续膨胀加速, 流出动叶栅的相对速度  $w_2$  将大于  $w_1$ , 这时, 气流就给动叶栅一个方向与  $w_2$  相反的反动力  $F_R$ 。这样, 在冲动力  $F_A$  和力反动  $F_R$  的合力为  $F_T$  作用下使动叶栅运动, 作出机械功。当

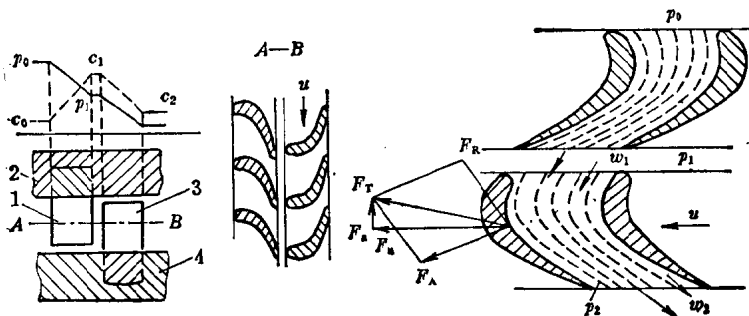


图 1-3 反动级和反动作用原理

然, 合力  $F_T$  真正能作机械功的是它在轮周方向的分力  $F_u$ , 另一分力  $F_a$  为轴向分力, 则产生轴向推力, 是无用功。

由此可知, 反动作用原理的特点是: 气流在动叶流道中不仅改变方向, 而且还膨胀加速。

若热能一半在静叶栅中转变为动能, 而另一半在动叶栅中完成转变的汽轮机级, 称为反动级。由多级反动级组成的汽轮机, 则称多级反动式汽轮机。

若热能主要在喷嘴中转变为动能, 有少量热能在动叶栅中完成转变的汽轮机级, 则称为带反动度的冲动级, 与纯冲动级相区



分。

### 1.1.3 速度级

图 1-4 是速度多级冲动式汽轮机本体部分的简图。这种汽轮机也称复速冲动式汽轮机。它和单级冲动式汽轮机在构造上的主要区别是：在叶轮上装有两列工作叶片 3 和 6，并在两列工作叶片之间，插入一列导向叶片 7；导向叶片固定在汽缸壁上，它是静止不动的，只是使通过的汽流改变方向。

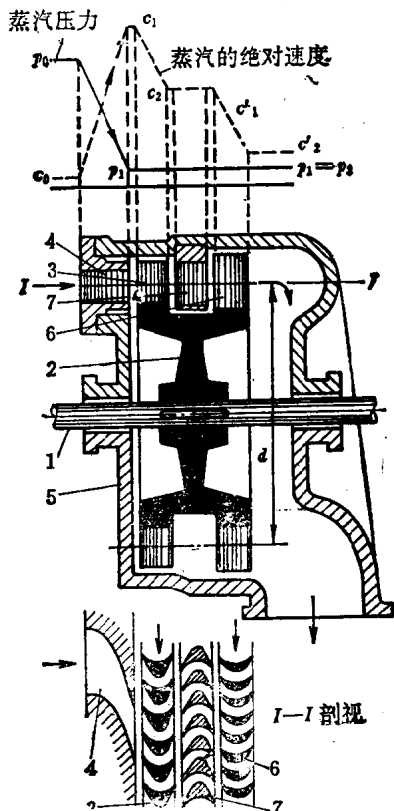


图 1-4 速度多级冲动式汽轮机本体部分简图

1—轴；2—叶轮；3—第一速度级叶片；4—喷嘴；5—汽缸；6—第二速度级叶片  
7—导向叶片