

船舶汽轮机及 燃气轮机装置

大连海运学院 上海海运学院
蒸汽动力装置教研室 船舶动力装置教研室

张葆华 查其恺 主编

人民交通出版社

船舶汽轮机及燃气轮机装置

Chuanbo Qilunji Ji Ranqilunji Zhuangzhi

大 连 海 运 学 院 上 海 海 运 学 院
蒸汽动力装置教研室 船舶动力装置教研室

张葆华 查其恺 主编

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书分两篇共十三章。第一篇船舶汽轮机及其装置共八章，比较全面和系统地阐述汽轮机的工作原理、船舶汽轮机-齿轮机组的结构和主要零部件及其强度分析、船舶汽轮机的自动调节和自动保护系统、船舶汽轮机动力装置及其技术管理。第二篇船舶燃气轮机装置共五章，着重说明船舶燃气轮机、压气机、燃烧室的工作原理、结构特点及船舶燃气轮机装置的技术管理。全书侧重说明轮机管理人员需要的基本内容，注意介绍船舶汽轮机及燃气轮机装置发展的当前情况和今后趋势。

本书取材比较丰富，有关理论部分内容的介绍力求作到深入浅出，易为读者接受。

本书不仅适于轮机人员、机务人员以及从事轮机专业的工程技术人员阅读，还可供高等海运院校轮机管理专业学生作为“船舶汽轮机”及“船舶燃气轮机”两门课程的教材使用。

船舶汽轮机及燃气轮机装置

大连海运学院 上海海运学院
蒸汽动力装置教研室 船舶动力装置教研室

张葆华 查其恺 主编

人民交通出版社出版
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：32.25 插页：1 字数：776 千

1983年12月 第1版

1983年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—2,900 册 定价：4.00元

前 言

船舶汽轮机及燃气轮机, 由于单机功率大, 结构简单、紧凑、轻巧及管理、使用方便, 在大吨位、高航速的商船及大、中型军舰上获得广泛的应用。在商船上, 汽轮机动力装置目前应用在载重量十万吨级以上的油船、高航速的大型集装箱船及对航行平稳和振动有特殊要求的船舶上(如大型邮船和科学考察船等)。在军舰上, 汽轮机和燃气轮机广泛装备在航空母舰、巡洋舰、驱逐舰、护卫舰及潜水艇上, 作为主推进装置或用来带动各种机械。在核动力船舶上, 它们是其它型式发动机无法取代的主机。

为了提高汽轮机和燃气轮机运行的经济性, 以便与柴油机相抗衡, 目前正在发展汽轮机、燃气轮机与其它型式发动机联合工作的联合装置。它们可以充分发挥燃气轮机用高参数工质工作和汽轮机用较低参数工质工作的优越性。这是很有发展前途的船舶动力装置。

为了满足广大船舶轮机管理人员了解和学习船舶汽轮机及燃气轮机装置的要求, 同时为了给高等海运院校轮机管理专业师生提供“船舶汽轮机”及“船舶燃气轮机”两门课程的教材, 我们编写了这本书。它也可供从事船舶汽轮机及燃气轮机生产工作的工程技术人员阅读参考。

本书是在大连海运学院和上海海运学院长期使用的教材基础上, 按照高等海运院校轮机管理专业教学计划规定“船舶汽轮机”及“船舶燃气轮机”两门课程的教学大纲, 并以此为基础拟定的教材编写大纲编写的, 书中内容经过较长时间的检验, 基本上能满足我国当前轮机管理专业的需要。

本书力求结合轮机管理专业的特点, 阐述船舶汽轮机及燃气轮机装置的基本内容, 侧重说明轮机管理人员需要的基本知识, 注意介绍发展的当前情况和今后趋势。

本书承海军工程学院蒸汽动力装置教研室、燃气轮机教研室唐应、张俊迈和其他有关人员及原大连海运学院轮机教研室陈民扬负责审阅, 提出许多宝贵意见, 谨致谢意。

本书分船舶汽轮机及其装置与船舶燃气轮机装置两大篇。第一篇初稿中, 绪论、第一章由查其恺执笔, 第二、三、四章由张葆华执笔, 第五、八章由穆泽林执笔, 第六、七章由陈义亮执笔。第二篇初稿中, 第九、十章由曹金康执笔, 第十一、十二、十三章由滕毓富执笔(其中§13-5和§13-6由曹金康执笔)。然后, 第一篇由张葆华、查其恺, 第二篇由查其恺、张葆华负责主编并定稿。

作为教材使用时, 本书需150学时左右(船舶汽轮机部分约需100学时, 船舶燃气轮机部分约需50学时)。

由于我们水平所限, 书中难免有不足之处, 敬请读者批评指正。

编 者

1982年12月

目 录

第一篇 船舶汽轮机及其装置

绪论.....	1
第一章 汽轮机级.....	8
§1-1 蒸汽在喷嘴中的能量转变.....	9
§1-2 蒸汽在动叶栅中的能量转变.....	14
§1-3 汽轮机叶栅.....	18
§1-4 蒸汽在动叶上的作用力及汽轮机级的轮周功.....	26
§1-5 汽轮机级的轮周效率.....	30
§1-6 汽轮机级的内损失、内效率和内功率.....	37
§1-7 长叶片级.....	46
第二章 二列速度级及多级汽轮机.....	52
§2-1 二列速度级.....	52
§2-2 二列速度级的轮周功、轮周效率、内效率、内功率及其特点和适用范围.....	59
§2-3 多级汽轮机.....	64
§2-4 船舶汽轮机-齿轮机组的外部损失、有效效率、有效功率和耗汽率.....	74
第三章 船舶汽轮机主要零部件的结构和强度.....	77
§3-1 喷嘴和叶片.....	77
§3-2 叶片的强度分析和校核.....	85
§3-3 叶片的振动.....	91
§3-4 转子.....	97
§3-5 转轮和机轴的强度分析和校核及转子的临界转速和动平衡.....	103
§3-6 汽缸.....	114
§3-7 隔板.....	122
§3-8 汽封和汽封系统.....	128
§3-9 轴承和润滑系统.....	135
第四章 船舶汽轮机-齿轮机组.....	149
§4-1 船舶汽轮机.....	150
§4-2 减速齿轮和联轴器.....	159
§4-3 冷凝器.....	170
第五章 船舶汽轮机的功率调节及其在变工况下的工作.....	181
§5-1 船舶汽轮机的功率调节.....	181
§5-2 喷嘴在变工况下的工作.....	187
§5-3 汽轮机级在变工况下的工作.....	192

§5-4	多级汽轮机在变工况下的工作	201
§5-5	工作蒸汽初、终参数变化对汽轮机工作的影响	207
第六章	船舶汽轮机的自动调节和自动保护系统	213
§6-1	自动调节系统	214
§6-2	调速器和调压器	220
§6-3	放大机构	231
§6-4	反馈机构和执行机构	241
§6-5	汽轮机转速自动调节系统的特性	247
§6-6	船舶汽轮机的自动保护装置	258
§6-7	船舶汽轮机的操纵和自动保护系统	270
第七章	船舶汽轮机动力装置	279
§7-1	船舶汽轮机动力装置及其技术经济指标	279
§7-2	船舶汽轮机动力装置的热循环	282
§7-3	船舶汽轮机动力装置的热线图	294
§7-4	燃气轮机-汽轮机联合装置	304
§7-5	船舶汽轮机动力装置的系统	308
第八章	船舶汽轮机装置的技术管理	321
§8-1	汽轮机的热膨胀、热变形和热应力	321
§8-2	船舶汽轮机装置的起动	327
§8-3	船舶汽轮机装置运行时的管理	333
§8-4	船舶汽轮机装置在特殊工况下运行时的管理	340
§8-5	船舶汽轮机装置的停机及不工作时的保养	345
§8-6	船舶汽轮机装置的常见故障分析和处理	347

第二篇 船舶燃气轮机装置

第九章	船舶燃气轮机装置及其热循环	354
§9-1	船舶燃气轮机装置概述	354
§9-2	简单开式循环及其热力性能指标	362
§9-3	改善热循环的途径	367
第十章	燃气轮机	371
§10-1	轴流式燃气轮机的基本结构	371
§10-2	轴流式燃气轮机的主要特点和工作原理	377
§10-3	轴流式燃气轮机的主要性能参数及变工况特性	381
§10-4	高温零部件的冷却	386
§10-5	轴流式燃气轮机主要零件强度校核的几个问题	391
§10-6	轴流式燃气轮机主要零部件的材料	394
§10-7	离心式燃气轮机的工作原理及特性	397
第十一章	压气机的工作原理与特性	405
§11-1	轴流式压气机基元级的工作原理	405
§11-2	轴流式压气机级	420

§11-3	多级轴流式压气机的能量损失和效率	425
§11-4	离心式压气机的工作原理	432
§11-5	压气机变工况分析	443
第十二章	燃烧室	456
§12-1	燃烧室的工作过程、特点和要求	456
§12-2	燃烧过程和气流的组织	459
§12-3	燃烧室的结构	463
§12-4	点火设备	465
§12-5	喷油嘴	468
§12-6	燃烧室的变工况特性	472
第十三章	船舶燃气轮机装置的变工况、主要系统及技术管理	473
§13-1	燃气轮机和压气机的共同工作	473
§13-2	大气参数变化对机组特性的影响	480
§13-3	船舶燃气轮机装置的不稳定工况	485
§13-4	船舶燃气轮机装置的主要系统	490
§13-5	船舶燃气轮机装置的技术管理	502
§13-6	船舶燃气轮机装置的常见故障分析和处理	504

第一篇 船舶汽轮机及其装置

绪 论

船舶涡轮机包括船舶汽轮机和船舶燃气轮机。

汽轮机以蒸汽为工质，燃气轮机以燃气为工质。虽然两者采用的工质不同，但是它们的基本工作原理是相同的。它们都是通过两次能量转变，先将热能转变成动能，再将动能转变成机械能的回转式热机。另外，汽轮机与燃气轮机在结构上也有许多共同的特点。

一、涡轮机的基本工作原理

图 0-1 所示是最简单的单级纯冲动式涡轮机。当工质连续不断地流进涡轮机时，首先在喷嘴 1 中膨胀，工质的压力 p 降低，绝对速度 c 增加。也就是说，在喷嘴中，热能转变成动能。然后，从喷嘴流出的高速工质进入动叶 2 组成动叶栅的通道。由于在动叶栅通道中工质流动的方向改变，根据冲动作用原理产生冲动力，推动动叶运动。这样，在动叶栅通道中，动能转变成机械能，工质的绝对速度 c 降低，但压力 p 保持不变（见图 0-1 上部的 p 和 c 变化曲线）。

动叶牢固地固定在转轮 3 的外缘上，转轮又与机轴 4 连接成一体。因此，动叶运动时获得的机械能通过转轮传递给机轴，使机轴在轴承中转动。将各种从动机械与机轴相连接，就可以带动它们作出功来。

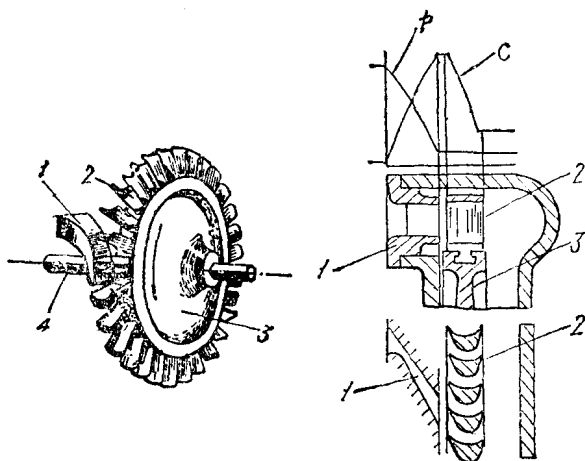


图 0-1 单级纯冲动式涡轮机
1-喷嘴；2-动叶；3-转轮；4-机轴

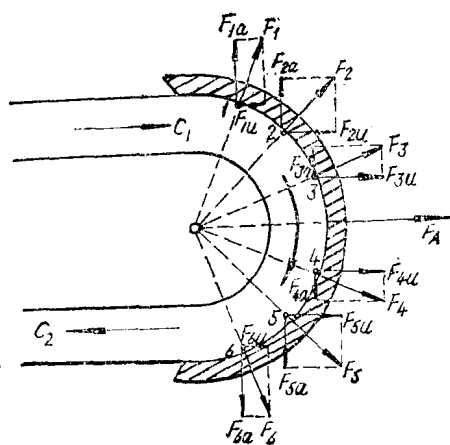


图 0-2 工质的冲动力

在动叶栅通道中，根据冲动作用原理产生工质的冲动力可以用图 0-2 来说明。图中半圆曲面相当于纯冲动式涡轮机的动叶表面。当高速的工质进入动叶栅时，动叶的半圆形表面迫使工质逐步改变流动方向，使工质最后沿着与流入方向相反的方向流出动叶栅。在这种情况下，工质每一个质点都受到来自动叶的向心力的作用。这时，必定有一个大小相等、方向

相反的工质质点的离心力作用于动叶上。这就是冲动作用原理。这些离心力在图 0-2 中用 F_1 、 F_2 、……、 F_6 等表示。它们又都可以分解成平行和垂直于动叶运动方向的两个分力 F_{1u} 、 F_{2u} 、……、 F_{6u} 和 F_{1a} 、 F_{2a} 、……、 F_{6a} 等。工质质点越接近动叶表面的中部，分力 F_u 越大，分力 F_a 越小。如果工质流过动叶栅时绝对速度 c 的大小不变，则各离心力 F_1 、 F_2 、……、 F_6 相等；在动叶的相应点处(点 1 和点 6，点 2 和点 5，点 3 和点 4)，分力 F_a 大小相等、方向相反，互相抵销。结果，只有分力 F_u 对动叶运动起作用。所有分力 ΣF_u 合成 F_u 。它就是因为根据冲动作用原理产生的工质的冲动力。

在实际的涡轮机内，动叶的表面不是半圆形，工质流入和流出动叶栅时的方向不可能与动叶的运动方向平行，工质流过动叶栅时绝对速度的大小会减小。但是，上述根据冲动作用原理产生工质的冲动力，仍然完全适用于实际的涡轮机。

除纯冲动式涡轮机外，还有一种反动式涡轮机。它是同时利用工质的冲动力和反动力推动动叶运动作功的。

根据反动作用原理产生反动力推动物体运动作功的情况并不鲜见。发射运载火箭就是一例。

如图 0-3 所示，燃料在火箭体 1 内燃烧，产生高压、高温燃气。燃气在火箭尾部的喷管 2 中发生膨胀，高速喷离火箭体射向大气中。这时，火箭体受到一个向上的反作用力，推动火箭向上运动。这就是反动作用原理。在图 0-3 中， u 是火箭的运动速度， w 是燃气流出喷管时的相对速度。根据反动作用原理产生的工质的反动力 F_R 有两个特点：一是工质流出运动物体前发生膨胀，压力降低，相对速度增加；二是反动力的方向与工质流动的方向相反。

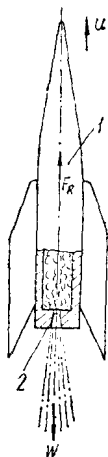


图 0-3 工质的反动力
1-火箭体；2-喷管

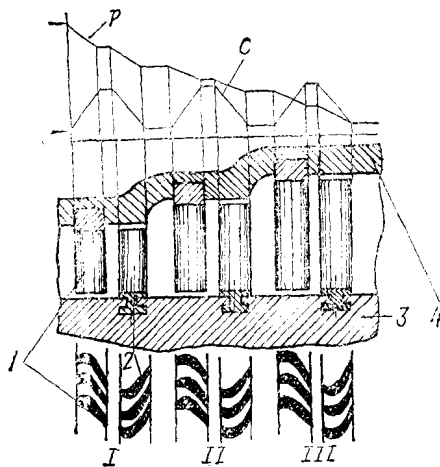


图 0-4 多级反动式涡轮机
1-静叶；2-动叶；3-转鼓；4-汽(气)缸

图 0-4 所示是多级反动式涡轮机的一部分。当工质连续不断地流进涡轮机时，首先在静叶 1 组成静叶栅的通道中膨胀，工质的压力 p 降低，绝对速度 c 增加，一部分热能转变成动能。实际上，静叶栅所起的作用与前面介绍的喷嘴完全相同。

当高速工质流过动叶栅时，由于反动式涡轮机的动叶栅与静叶栅的结构形状相同或极相似，结果不仅使工质流动的方向改变，而且使工质继续发生膨胀，工质的压力 p 降低，相对速度 w 增加。也就是说，又有一部分热能转变成动能。这样，除冲动力外，还会产生一个与工质流动方向相反的反动力，推动动叶运动。在动叶栅通道中，动能转变成机械能，绝对速

度 c 随之降低(见图 0-4 上部的 p 和 c 变化曲线)。

动叶 2 牢固地固定在转鼓 3 的外缘上, 转鼓又与机轴连接成一体。因此, 动叶运动时获得的机械能通过转鼓传递给机轴, 使机轴转动, 并带动各种从动机械做功。

当工质流过反动式涡轮机的动叶栅时, 作用在动叶上的力如图 0-5 所示。它们有根据冲动作用原理产生的冲动力 F_A 和根据反动作用原理产生的反动力 F_R 。这两者的合力 F_T 又可以分解成平行和垂直于动叶运动方向的两个分力 F_u 和 F_a 。它们分别称为轮周向分力和轴向分力。实际上, 只有轮周向分力 F_u 才对动叶运动做功起作用。

在反动式涡轮机内, 由于动叶前后的工质压力 p_1 和 p_2 不等($p_1 > p_2$), 动叶受到一个轴向推力 F_a 的作用, 这个轴向推力在图 0-5 中已包括在轴向分力 F_a 中。轴向分力 F_a 不仅对动叶运动做功不起作用, 而且还要推动动叶轴向移动。为了保证涡轮机安全运行, 动叶的轴向移动量绝对不允许超过一定的范围 ($< 2 \sim 3 \text{ mm}$)。因此, 多级反动式涡轮机在结构上必须采取措施, 平衡和承受上述轴向分力。

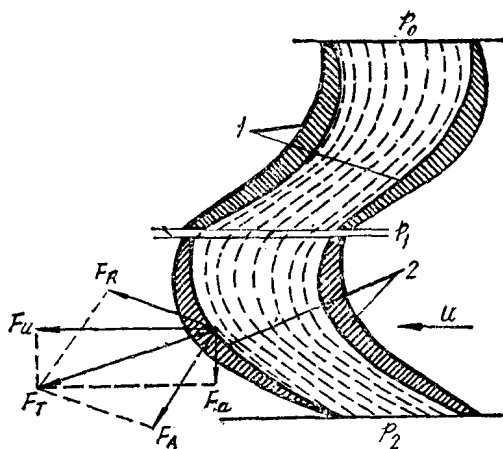


图 0-5 工质作用在反动式涡轮机动叶上的力
1-静叶; 2-动叶

在图 0-5 中, p_0 是静叶前的工质压力, u 是动叶的运动速度。

如前所述, 涡轮机工作原理的特点是连续不断地通过两次能量转变, 先将热能转变成动能, 再将动能转变成机械能。通常将涡轮机内完成一个两次能量转变过程的、相关联的喷嘴(或静叶栅)和其后的动叶栅合并起来, 总称为涡轮机级, 简称级。

如果工质的热能转变成动能全部在喷嘴中完成, 而在动叶栅中只是根据冲动作用原理产生工质的冲动力, 推动动叶运动, 将动能转变成机械能, 则这种涡轮机级称为纯冲动级。如果热能分成两半, 分别在静叶栅和动叶栅中转变成动能, 而在动叶栅中同时根据冲动作用原理和反动作用原理产生工质的冲动力和反动力, 两者一起推动动叶运动, 将动能转变成机械能, 则这种涡轮机级称为反动级。

除纯冲动级和反动级外, 还有一种称为带反动度的冲动级, 简称冲动级。冲动级的结构与纯冲动级相似, 也是由相关联的喷嘴和其后的动叶栅组成。但是, 冲动级动叶栅的结构形状却与反动级接近, 工质流过冲动级的动叶栅时, 也发生膨胀。冲动级的工作原理是介于纯冲动级与反动级之间: 工质的热能大部分(超过一半)在喷嘴中转变成动能, 一小部分(少于一半)在动叶栅中由于工质继续发生膨胀转变成动能。结果, 在冲动级动叶栅中, 主要是根据冲动作用原理产生工质的冲动力, 同时又根据反动作用原理产生工质的反动力, 两者一起推动动叶运动, 将动能转变成机械能。

二、船舶汽轮机的分类和主要零部件

船舶汽轮机根据不同的分类标准, 可以分成许多种型式。现分别扼要介绍如下:

根据用途, 船舶汽轮机可以分为主汽轮机和辅汽轮机两种。前者用来带动螺旋桨, 后者用来带动各种辅机。主汽轮机又可区分为正车汽轮机和倒车汽轮机两种, 它们分别在船舶前进和后退时投入工作。

根据组成汽轮机的基本单元(汽轮机级)的型式来分,有纯冲动式、冲动式和反动式三种汽轮机。它们分别由纯冲动级、冲动级和反动级组成。

根据汽轮机的级数来分,有单级汽轮机和多级汽轮机两种。前者由一个汽轮机级组成,后者由两个或两个以上汽轮机级组成。

根据所有汽轮机级是布置在一个或两个或两个以上汽缸内,船舶汽轮机可以分成单缸式汽轮机 and 多缸式汽轮机两种。多缸式汽轮机又可区分为双缸式和三缸式汽轮机两种,它们所有的汽轮机级分别布置在两个和三个汽缸内。这些汽轮机按工作蒸汽的流动顺序,分别称为高压缸和低压缸汽轮机,或高压缸、中压缸和低压缸汽轮机。

根据汽缸中心线的布置位置,船舶汽轮机可以分成卧式和立式汽轮机两种。前者的汽缸中心线是水平的,后者的汽缸中心线是垂直的。

根据工作蒸汽在汽缸内总的流动方向是平行于汽缸中心线或垂直于汽缸中心线,船舶汽轮机可以分成轴流式和径流式汽轮机两种。

根据工作蒸汽在汽缸内是合成一股汽流从进汽端一直流向排汽端,或分成两股完全对称、但流动方向正好相反的汽流从汽缸两端流向中部或从汽缸中部流向两端,船舶汽轮机可以分成单流式和双流式汽轮机两种。

根据新蒸汽的初压和初温,船舶汽轮机可以分成高压、中压、低压和废汽式汽轮机四种。使用压力在 60kgf/cm^2 、温度在 450°C 以上的蒸汽工作的汽轮机,称为高压汽轮机;使用压力在 30kgf/cm^2 、温度在 400°C 左右的蒸汽工作的汽轮机,称为中压汽轮机;使用 $10\sim 16\text{kgf/cm}^2$ 的饱和蒸汽、或过热度不大、或湿度不大的蒸汽工作的汽轮机,称为低压汽轮机;使用蒸汽机的排汽工作的汽轮机,称为废汽式汽轮机。

根据排汽压力的大小,船舶汽轮机可以分成凝汽式和背压式汽轮机两种。前者的排汽流入冷凝器,排汽压力比大气压力低得多;后者的排汽汇集于排气总管,并保持比大气压力高的压力,供给各种用汽设备使用。

根据带动从动机械的方式,船舶汽轮机可以分成直接传动和减速传动两种型式。

任何型式的船舶汽轮机,为了将蒸汽的热能转变成机械能,都必须具有下列主要零部件(为了便于理解,以图 0-6 所示由三个冲动级组成的多级冲动式汽轮机为例):

1) 喷嘴(或静叶)组成的静叶栅 在其中将蒸汽的热能转变成动能,并引导汽流按照一定的方向流入动叶栅。

2) 动叶组成的动叶栅 在其中将蒸汽的动能(或同时将一部分蒸汽的热能和蒸汽的动能)转变成机械能。

汽轮机内所有喷嘴(或静叶)和动叶工作部分组成的蒸汽通道,称为汽轮机的通流部分。

3) 转轮(或转鼓)和机轴 汽轮机内所有动叶牢固地固定在转轮(或转鼓)的外缘上,

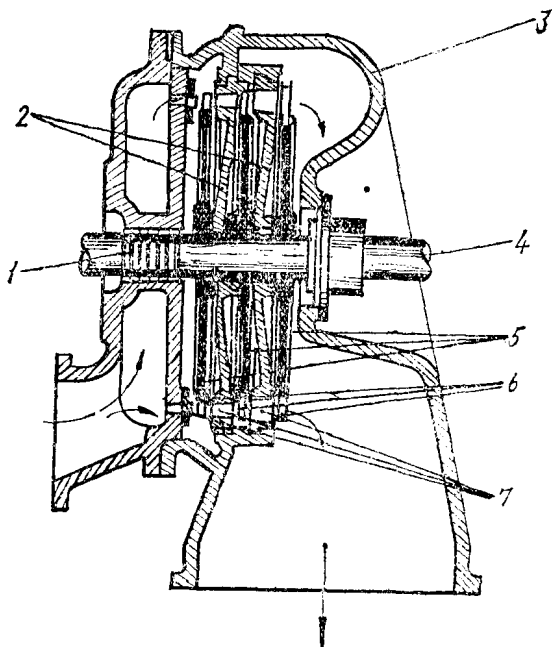


图0-6 多级冲动式汽轮机

1-密封; 2-隔板; 3-汽(气)缸; 4-机轴; 5-转轮; 6-动叶; 7-喷嘴

转轮(或转鼓)又与机轴连接成一体。因此,动叶运动时获得的机械能通过转轮(或转鼓)传递给机轴,使机轴转动,带动各种从动机械。

汽轮机内所有动叶、转轮(或转鼓)、机轴和其它在工作时作回转运动的零件,组成汽轮机的转动部分,简称转子。

汽轮机内所有在工作时不作回转运动的零件,组成汽轮机的静止部分,简称静子,常称定子。定子包括喷嘴(或静叶)、汽缸、隔板、汽封和轴承等。

4)汽缸 它构成一个封闭空间,使工作蒸汽与外界隔绝,在通流部分中实现两次能量转变。另外,汽缸还用来作为固定和连接定子的其它组成部分的基础。

5)隔板 只应用于多级冲动式或纯冲动式汽轮机内,它将汽缸所构成的封闭空间分隔成一系列工作时压力不同的腔室,保证分级实现两次能量转变。另外,隔板还用来固定冲动式或纯冲动式汽轮机各缸第一级后各级的喷嘴。

在多级反动式汽轮机内,汽缸所构成的封闭空间由静叶分隔成一系列工作时压力不同的腔室。静叶直接固定在汽缸内壁上,因此不需要隔板。

6)汽封 又称密封,分外部汽封和内部汽封两种。外部汽封安装在汽缸两端中心孔内壁上,用来减少从汽缸内向外漏出的蒸汽,或抵制空气侵入汽缸内;内部汽封安装在隔板中心孔内壁上和汽缸内其它零件上,用来减少从隔板和零件的高压侧漏向低压侧的蒸汽。

7)轴承 分支持轴承和推力轴承两种。支持轴承用来作为转子的支承点,承受转子的重量和作用在转子上的径向力,并保持转子与定子间正常的径向相对位置;推力轴承用来承受作用在转子上未平衡的轴向力,并保持转子与定子间正常的轴向相对位置。

三、船舶汽轮机的优缺点和适用范围

作为船舶主机主要型式之一的汽轮机,与另一种主要型式船舶主机——柴油机相比,有下列一些优点:

1)单机功率大。任何型式热机的功率,都与单位时间内工质的流量成正比。汽轮机由于工作过程连续、稳定,蒸汽在其中以高速流动,因此,在较小的蒸汽通道中能流过大量的蒸汽。结果,使汽轮机单机功率大大增加。目前船舶汽轮机的单机功率可达100 000PS (73 500 kW)^①以上,陆用电站汽轮机的单机功率可达1 000 000kW以上。这是任何其它型式热机望尘莫及的。

2)结构简单、紧凑、轻巧。汽轮机是一种回转式热机,它不需要往复式热机必不可缺的连杆-曲柄机构和进、排气定时机构,零件种类少,结构简单。另外,为了保证汽轮机在高效率下工作,转子必须高速转动。目前船舶主汽轮机的转速大致在2 000~7 000 rpm范围内,辅汽轮机的转速还要高些。而高速机械的结构一定是紧凑、轻巧的。

3)管理、使用方便,保养、检修工作量少。汽轮机工作稳定,其中又没有直接摩擦部分。因此,运行平稳、可靠,振动和噪声小,管理、使用方便;零件磨损量极小,保养、检修工作量少。在正确管理的情况下,汽轮机连续运行几年无需开缸检修,是习以为常的事。这对轮机管理人员来说是一个非常突出的优点。

但是,汽轮机用作船舶主、辅机有下列一些不如柴油机之处,它们在一定程度上限制了汽轮机在船舶上的适用范围:

^① 本书同时采用国际单位制和工程单位制。在国际单位制中,功率单位采用瓦,符号为W。在工程单位制中,功率单位采用米制马力,单位符号在本书中借用德文缩写PS表示。1PS=735.49875W=75kgf·m/s。

1) 汽轮机动力装置效率比较低。与柴油机动力装置相比, 汽轮机动力装置循环初温低, 因此, 循环效率低。所以, 尽可能提高工作蒸汽的初压和初温是目前提高汽轮机动力装置效率的主要方向之一。但是, 这点对中、小功率汽轮机动力装置却不适用。因为提高工作蒸汽的初压和初温会使中、小功率汽轮机的效率显著降低。目前中、小功率中压和低压汽轮机的有效效率最高不超过0.72。有鉴于此, 中、小功率船舶动力装置很少采用汽轮机作为主机。

2) 汽轮机动力装置比较复杂。汽轮机以蒸汽为工质, 必须装备锅炉、冷凝器和其它一些为它们服务的辅机。这样, 整个动力装置就比较复杂。另外, 通常在采用汽轮机作为主机和带动发电机的船舶上, 还必需专门装备柴油发电机。后者在船舶停港时向全船供电, 使汽轮机动力装置能暂停工作。

3) 制造、装配和技术管理要求高。这是保证汽轮机运行时效率达到额定指标和防止发生事故所必不可少的。

综合以上介绍, 不难得知, 在火力发电站和需要大功率主机(超过30 000PS)的大吨位军舰和快速商船上, 汽轮机占有不可取代的位置。在这些船舶上, 大部分功率较大的辅机, 如发电机、给水泵和鼓风机等, 也都用辅汽轮机带动。在需要较小功率主机的船舶上, 柴油机由于整个动力装置效率比较高, 广泛用来作为主机。但是, 在传统上长期使用汽轮机作为船舶主机的美国例外。在新式柴油机船舶上, 为了充分利用主柴油机排气的热量, 在船舶正常航行时, 用主柴油机的排气在专门装备的废气锅炉内产生低压蒸汽(压力为12~16 kgf/cm²或1.2~1.6 MPa)^①, 用来作为汽轮机的工质, 带动发电机供给全船用电。这种汽轮机称为废气余热发电用辅汽轮机。另外, 在采用柴油机作为主机的油船上, 由于货油加热和保温的需要, 必需专门装备锅炉。在这种船舶上, 通常都用辅汽轮机带动货油泵, 有些还用辅汽轮机带动发电机。

当前世界正处于使用能源多样化的时代。船舶汽轮机由于供给工作蒸汽的锅炉既能燃用油, 又能燃用煤, 还能利用核能, 正显示出强大的生命力。

为了节能, 更合理地使用能源, 近年来船舶上出现了多种汽轮机与其它型式热机联合工作的联合装置, 如柴油机和汽轮机联合装置, 燃气轮机和汽轮机联合装置等, 后者将在第七章§7-4中介绍。

四、涡轮机的发展概况

涡轮机的原理及其初始形态在许多世纪前就已出现, 但是, 成为工业用发动机却只有近百年的历史。1883年, 瑞典工程师拉瓦尔(De Laval)设计了第一台单级冲动式汽轮机, 并于1889年制成, 功率为3.68 kW(5 PS), 每分钟25 000转, 用来带动发电机。1884年, 英国工程师巴森斯(C. A. Parsons)建造了一台多级反动式汽轮机, 转速在17 000 rpm时功率为7.36 kW(10 PS), 也是用来发电。以后, 随着社会生产力的发展, 汽轮机制造业得到迅猛的发展。目前, 在火力发电站中, 单机最大功率已经超过1 300 000 kW。

汽轮机在船舶上用作推进机械也开始于十九世纪末。1894~1896年, 巴森斯在“透平尼亚”号快艇上安装了三轴式汽轮机动力装置, 总功率约2 100 PS, 航速超过32 kn(节)。1904年, 装甲舰“无敌”号上安装了汽轮机动力装置。此后, 在大、中型水面军舰上, 大多

① 在国际单位制中, 压力(压强)单位采用帕[斯卡], 符号为Pa, 1 Pa = 1 N/m²。在工程单位制中, 压力单位采用 kgf/cm², 1 kgf/cm² = 9.806 65 × 10⁴ Pa。为了便于计算, 本书近似取 1 kgf/cm² = 10⁵ Pa。在国际单位制中, 力的单位采用牛[顿], 符号为N, 1 N = 1 kg · m/s²。在工程单位制中, 力的单位采用千克力, 符号为 kgf, 1 kgf = 9.806 65 N。

采用汽轮机动力装置作为主推进装置。第二次世界大战后，核动力装置安装在潜艇、航空母舰及其它大型水面舰船上。在核动力装置中，也用汽轮机作为输出功率的设备。

在商船上，汽轮机动力装置目前应用在载重量十万吨级以上的油船、航速要求高的大型集装箱船及对航行平稳和振动有特殊要求的船舶上(如大型邮船、科学考察船等)。这是由于汽轮机有单机功率大、工作平稳可靠等突出优点。当前应用于商船上的汽轮机动力装置，工作蒸汽初压约在 $60\sim 80\text{kgf/cm}^2$ 、初温约在 500°C 左右，单机功率最大近 $90\,000\text{kW}$ ($120\,000\text{PS}$)，耗油率降低至 $0.25\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ($0.184\text{kg}/(\text{PS}\cdot\text{h})$)，装置单位重量为 $24\sim 26\text{kg}/\text{kW}$ ($17.7\sim 19.1\text{kg}/\text{PS}$)。最近正在研制蒸汽初压为 100kgf/cm^2 、耗油率达 $0.225\sim 0.252\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ($0.165\sim 0.185\text{kg}/(\text{PS}\cdot\text{h})$)的船舶汽轮机动力装置。

从七十年代初期，在世界范围内出现石油危机后，油价全面上涨。截至1979年为止，海洋运输燃料油和柴油的价格已涨到1970年的15倍。另一方面，船用燃料油劣质化的趋势也越来越明显。人们纷纷寻找新的能源作为船舶动力燃料。1980年5月，世界煤炭研究会发表的报告中预计：“到2000年，将有相当大一部分世界商船队可能再度烧煤。”“随着煤炭贸易的发展和航线沿途加煤站的建立，世界商船队其它燃煤船只将迅速增多。”汽轮机动力装置由于对燃料的适应性好，可以烧渣油，也可以烧煤，甚至任何可供燃烧的物质，因此，势将重新受到造船界的重视。

燃气轮机作为船舶推进机械还是后起之秀。1947年，英国海军第一次把一台 $2\,500\text{PS}$ 的燃气轮机组安装在三轴的MGB-2000中，作为一根轴的推进机械。第一代船舶燃气轮机，是对第二次世界大战中得到迅速发展的航空喷气式燃气轮机作了一系列改进(船用化)后制成的。因此，又称为船用化航空改型机组。目前，第二代船舶燃气轮机已进入批量生产。燃气轮机应用在舰船上已经显示出强大的生命力。与汽轮机相比，它的结构更加简单，重量更轻(装置单位重量目前约为 $6\sim 18\text{kg}/\text{kW}$ ，或 $4.4\sim 13.2\text{kg}/\text{PS}$)，经济性也不差(耗油率目前约为 $0.243\sim 0.304\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$)，或 $0.179\sim 0.224\text{kg}/(\text{PS}\cdot\text{h})$)。燃气轮机装置更突出的优点是机动性好。它能迅速地从冷态起动，也能迅速地从热态转为停止使用。一艘用燃气轮机推进的军舰能在 $2\sim 10$ 分钟内达到 20kn 的航速，从空载到全速的时间不大于2分钟。同时，从全速到停船的情行距离，可以缩短到略大于一个船的全长。

船舶燃气轮机的主要缺点是低负荷运行时经济性差，而且在低负荷运行时压气机容易喘振。其改进办法是将燃气轮机与其它动力装置联合作为船舶的推进机械，使它们在各自的设计工况下运行。目前已经出现的联合装置有：燃气轮机与柴油机联合装置(CODOG和CODAG)及燃气轮机与汽轮机联合装置(COSAG和COGAS)。其中燃气-蒸汽联合装置(COGAS)充分利用了燃气轮机在工质高参数下运行的优越性和汽轮机在工质低参数下运行的优越性，循环热效率可达40%以上，是一种很有前途的动力装置，本书将在第七章中介绍。

我国的轮机制造工业完全是在中华人民共和国成立后才建立的。解放前，我国根本没有自己的轮机制造工业。1955年，上海汽轮机厂制造出我国第一台 $6\,000\text{kW}$ 发电用汽轮机。以后，哈尔滨、上海、东方、南京、杭州、北京、沈阳等汽轮机厂陆续制造了一系列发电用和工业用汽轮机，单机功率最大的已达 $300\,000\text{kW}$ 。目前正在研制 $600\,000\text{kW}$ 汽轮机组。我国制造的汽轮机也已安装在一些友好国家中运行。

从1958年开始，我国自行设计、制造的第一台 $5\,000\text{PS}$ 船舶汽轮机安装在我国自建的排水量为 $10\,200\text{t}$ 的货船上，至今营运情况良好。六十年代， $13\,000\text{PS}$ 汽轮机动力装置作为万吨级远洋货船的推进装置投入运行。在我国的海军舰队中，国产的导弹驱逐舰上安装着我国自己制造

的大功率汽轮机动力装置。1979年,工程测量船也安装了我国自行设计和制造的主汽轮机组。它们光荣地参加了1980年初我国向南太平洋发射远程运载火箭的测试工作。目前,汽轮机在军舰和商船上,不仅作为推进机械,而且广泛地用来驱动发电机、货油泵和鼓风机等辅助机械。

我国的燃气轮机制造业已开始建立。1958年研制了燃气轮机机车。我国研制的军舰用燃气轮机组,正在进行调试,预计不久即可装船试航。

综合上述可知,建国以来我国涡轮机制造业的发展是迅速的,但与国际上的先进水平相比,还有很大的差距。这就需要我国从事涡轮机专业的同志,加倍努力,迎头赶上,让更多、更好的船舶涡轮机组,为四化建设和保卫祖国作出更大的贡献。可以深信,由我国自行设计和制造用涡轮机动力装置为推进机械的军舰和商船,必将陆续投入运行,航行在我国辽阔的海域,出现在日益强大的远洋船队中。

第一章 汽轮机级

汽轮机级,简称级。它是由完成一个两次能量转变过程的、相关联的喷嘴(或静叶栅)和其后的动叶栅组成。汽轮机级不仅是汽轮机的基本工作单元,而且是汽轮机的基本结构单元。因此,学习和研究汽轮机,一般都从汽轮机级开始。蒸汽在汽轮机级内的流动,是一个十分复杂的过程。一方面由于通流部分的形状复杂及流动时存在摩擦和附面层,蒸汽的参数和速度不仅沿流动方向显著变化,而且在垂直于流动方向的任意截面上所有各点处的蒸汽参数和速度也不相同。这就是说,蒸汽在汽轮机级内的流动实际上是三元流动。另一方面,当汽轮机工作时,组成通流部分的喷嘴(或静叶)与动叶总要发生相对位移。由于在汽缸和转轮(或转鼓)上只能安装并固定有限数目的喷嘴(或静叶)和动叶,而且它们的进、出口边都有一定的厚度,因此,在汽轮机级内各处蒸汽的参数和速度还要周期性地随时间变化。这就是说,蒸汽在汽轮机级内的流动又是不稳定流动。

不稳定的三元流动,分析起来非常繁琐复杂。目前还不能应用不稳定三元流动的理论来解决汽轮机的实际问题。为了研究蒸汽在汽轮机级内流动的规律,必须先作出一些假设,使蒸汽的流动简化。实践证明,在很多情况下,根据这些假设得出的、简化了的气体流动方程完全可以用来计算汽轮机内的蒸汽流动过程,并能达到足够的精确度。

首先,假设蒸汽在汽轮机级内的流动是一元流动,即蒸汽的参数和速度只沿流动方向变化。在垂直于流动方向的任意截面上所有各点处的蒸汽参数和速度都分别用一个平均值来表示。根据这个假设,可以应用简单的一元流动理论来解决汽轮机中大多数实际问题。但是,在分析通流部分各叶栅的实验研究结果时,仍需要应用二元流动理论。在垂直于流动方向的截面上蒸汽参数和速度极不均匀的情况下,还需要应用三元流动理论。

其次,假设蒸汽在汽轮机级内的流动是稳定流动,即汽轮机级内各处蒸汽的参数和速度都不随时间变化。事实上,汽轮机在稳定工况下运行时,由于动叶作回转运动引起蒸汽参数和速度变化的频率很高,因此,蒸汽在汽轮机级内的流动十分接近稳定流动。只有在汽轮机负荷发生急剧变化时,由于工况极不稳定,不能再把蒸汽的流动当作稳定流动看待。

第三,假设蒸汽在汽轮机内流动时,与外界没有热交换。即蒸汽能量的转变,是在绝热条件下进行的。正常运行时,这一假定与实际情况十分接近。

研究汽轮机级,就是研究蒸汽在汽轮机级内流动做功的规律(包括蒸汽在通流部分内的

流动过程、能量转变和做功原理等)，并从数量上推导出能量转变时的相互关系，以求获得最佳的经济效果，并为分析汽轮机零、部件的强度和运行管理提供依据。

需要指出的是，汽轮机级和燃气轮机级的理论，除了工质不同外，具有极大的一致性。本章只讨论汽轮机级的理论，但这里所得出的规律和结论，甚至某些公式，同样也适用于燃气轮机，只要考虑工质不同所引起的变化即可。

本书中分别用符号 p 、 v 、 ρ 、 t 、 u 、 i 、 s 和 c 表示工质的压力、比容、密度、温度、内能、焓、熵和绝对速度。在第一篇中，另外在符号的右下角再加注 0、1 和 2，分别表示喷嘴(或静叶栅)前、喷嘴(或静叶栅)后(即动叶栅前)和动叶栅后等不同位置。

§1-1 蒸汽在喷嘴中的能量转变

本节主要讨论蒸汽在冲动式汽轮机喷嘴中的能量转变。反动式汽轮机的静叶栅^①，其作用与喷嘴相同，本节的有关结论对它也适用。

一、蒸汽在喷嘴中的理想流动

蒸汽流过喷嘴时发生膨胀，压力降低，绝对速度增加，热能转变成动能。所谓理想流动，是假设蒸汽在流动过程中不发生任何能量损失，即能量的转变过程是等熵的流动。蒸汽流过喷嘴时能量的转变，应该符合能量守恒定律。在理想流动时，对于质量为 1kg 的蒸汽，能量守恒方程可表达如下：

$$i_0 + \frac{c_0^2}{2} \cdot 10^{-8} = i_{1t} + \frac{c_{1t}^2}{2} \cdot 10^{-8} \quad \text{kJ/kg} \quad (1-1)$$

其中在 c_{1t} 右下角再加注 t 表示理想流动。

由此可得蒸汽流出喷嘴时的理想速度为

$$\begin{aligned} c_{1t} &= \sqrt{2(i_0 - i_{1t}) \cdot 10^8 + c_0^2} \\ &= \sqrt{2h_{a1} \cdot 10^8 + c_0^2} \quad \text{m/s} \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中： $h_{a1} = i_0 - i_{1t}$ ——蒸汽在喷嘴中的等熵焓降，kJ/kg^②。

如果蒸汽流进喷嘴时的速度 c_0 不大(一般约 30~80 m/s)，而蒸汽在喷嘴中的等熵焓降 h_{a1} 却很大，则 c_0 可忽略不计， c_{1t} 可按下式计算：

$$c_{1t} = \sqrt{2h_{a1} \cdot 10^8} \quad \text{m/s} \quad (1-2)'$$

由热力学得知，在等熵流动中，蒸汽或空气流出喷嘴时的理想速度 c_{1t} 还可按下式计算：

$$c_{1t} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_0 v_0 \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] + c_0^2} \quad \text{m/s} \quad (1-3)$$

式中： k ——绝热指数。对过热蒸汽， $k=1.3$ ；对干饱和蒸汽， $k=1.135$ ；对干度为 x 的湿蒸汽， $k=1.035+0.1x$ ；对空气， $k=1.4$ 。

按式(1-3)计算 c_{1t} 并不方便。但是，式(1-3)反映出理想速度 c_{1t} 与蒸汽初参数 p_0 、 v_0 和压力比 $\frac{p_1}{p_0}$ 的关系。这在理论讨论中是有用的。此外，如果将式(1-3)中的 p_1 用喷嘴中垂直

① 叶栅就是一列叶型相同的叶片按一定的距离和方向排列起来构成的组合体。叶型是由叶片截面轮廓线围成的图形。汽轮机通流部分中喷嘴(或静叶)和动叶都排列成叶栅。详见本章 §1-3。

② 在国际单位制中，热量、能和功的单位采用焦[耳]，符号为 J，1J=1N·m，比能单位采用焦耳每千克，符号为 J/kg。在工程单位制中，热量单位采用卡，符号为 cal，1cal=4.1868J，比能单位采用卡每千克，符号为 cal/kg。

于蒸汽流动方向的任意截面上的压力 p 代替, 则可求得蒸汽流经该截面时的理想速度 c_{1t} 。

如图 1-1 所示, 已知蒸汽流进喷嘴时的压力 p_0 、温度 t_0 (或比容 v_0), 可以在 $i-s$ 图上确定蒸汽流进喷嘴时的状态点 A_0 和焓 i_0 。从 A_0 点引等熵线, 交喷嘴后压力 p_1 等压线于 A_{1t} 点。该处蒸汽的焓是 i_{1t} 。 A_{1t} 点和 i_{1t} 是理想流动时蒸汽流出喷嘴时的状态点和焓。等熵线 A_0A_{1t} 是蒸汽在喷嘴中的理想流动过程线。

i_0 与 i_{1t} 的差值就是蒸汽在喷嘴中的等熵焓降 h_{a1} 。从 $i-s$ 图上求得 h_{a1} 后, 即可按式 (1-2) 或式 (1-2)' 计算出蒸汽流出喷嘴时的理想速度 c_{1t} 。

从 A_0 点沿等熵线向上截取 $\frac{c_0^2}{2} \cdot 10^{-3} \text{ kJ/kg}$ 后, 得滞止状态点 A_0^* 。这个状态点实际上并不存在。但是, 这个滞止状态点的焓 i_0^* 是蒸汽的动能全部等熵转变成热能时的焓, 它表示 1kg 蒸汽流进喷嘴时具有的总能量, 即

$$i_0^* = i_0 + \frac{c_0^2}{2} \cdot 10^{-3} \quad \text{kJ/kg}$$

i_0^* 称为蒸汽流进喷嘴时的滞止焓; 相应地, A_0^* 点处的压力 p_0^* 、温度 t_0^* 和比容 v_0^* 等, 分别称为蒸汽流进喷嘴时的滞止压力、滞止温度和滞止比容, 统称为滞止参数。它们在相应符号的右上角用加注 * 号来表示。滞止参数在气体动力学方面的问题研究中是非常有用的。

二、蒸汽在喷嘴中的实际流动

蒸汽流过喷嘴时, 由于蒸汽有粘性, 喷嘴通道壁面也不可能绝对光滑, 因此, 在蒸汽内部分子间及蒸汽与喷嘴通道壁面间都不可避免地产生摩擦, 从而使蒸汽的一部分动能重新转变成热能, 并为蒸汽本身所吸收。这样, 蒸汽流过喷嘴时的实际流动过程是一个增熵过程, 而且蒸汽流出喷嘴时的实际速度 c_1 比理想速度 c_{1t} 小。

蒸汽流出喷嘴时的实际速度 c_1 通常可按下式计算:

$$c_1 = \varphi c_{1t} \quad \text{m/s} \quad (1-4)$$

式中: φ ——喷嘴的速度系数, 通常用实验方法确定, 其值一般在 0.93~0.98 之间。

蒸汽流过喷嘴时的能量损失, 称为喷嘴损失, 用 Δh_n 表示。它等于理想流动时蒸汽流出喷嘴时具有的动能与实际流动时具有的动能之差, 即

$$\Delta h_n = \frac{1}{2} (c_{1t}^2 - c_1^2) \cdot 10^{-3} = (1 - \varphi^2) \frac{c_{1t}^2}{2} \cdot 10^{-3} = \zeta_n \frac{c_{1t}^2}{2} \cdot 10^{-3} \quad \text{kJ/kg} \quad (1-5)$$

式中: $\zeta_n = 1 - \varphi^2$ ——喷嘴的能量损失系数。

有关 φ 和 ζ_n 的内容, 详见本章 §1-3。

如图 1-1 所示, 已知理想流动时蒸汽流出喷嘴时的状态点 A_{1t} 、焓 i_{1t} 和压力 p_1 。由于有喷嘴损失, 使蒸汽实际流出喷嘴时的焓 i_1 比 i_{1t} 大, 其值等于

$$i_1 = i_{1t} + \Delta h_n \quad \text{kJ/kg} \quad (1-6)$$

i_1 等焓线与 p_1 等压线的交点 A_1 , 是蒸汽流出喷嘴时的实际状态点。连接状态点 A_0 和 A_1 , 就

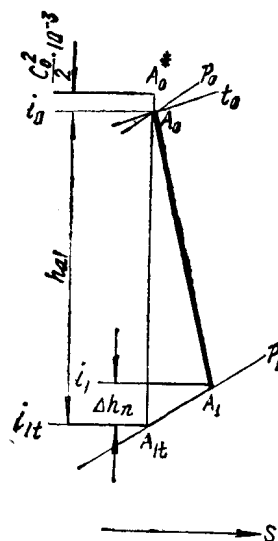


图 1-1 蒸汽在喷嘴中的流动过程