

普通热工学

第三册

(汽轮机，热力发电厂)

哈尔滨工业大学热工教研室

特

TK122
23/3

15.8/5.8
49 49
10.3 9.30

普通熱工学

第三册

(汽輪机，热力发电厂)

江苏工业学院图书馆
藏书章

1960

普通热工学共分四册出版。第一册内容包括工程热力学和传热学两篇；第二册内容为蒸汽锅炉；第三册内容包括蒸汽轮机、燃气轮机和热力发电厂三篇；第四册内容包括蒸汽机、内燃机和压气机三篇。

目 录

第四篇 汽 輪 机

第一章 汽輪机的一般概念

1—1. 汽輪机发展簡史.....	3
1—2. 汽輪机构造的一般介紹.....	7
1—3. 汽輪机的基本工作原理.....	9
1—4. 汽輪机的分类.....	12

第二章 汽輪机級內的工作過程

2—1. 蒸汽在噴管內的工作.....	21
2—2. 蒸汽在动叶片中的工作.....	34
2—3. 汽輪机的各項損失和效率.....	47
2—4. 单級汽輪机.....	58
2—5. 单級汽輪机热計算示例.....	67

第三章 多級汽輪机

3—1. 多級汽輪机的特点.....	77
3—2. 多級汽輪机中的热力过程.....	80
3—3. 重热系数.....	84
3—4. 多級汽輪机的計算原理.....	87
3—5. 多級汽輪机的一般介紹.....	93

第四章 汽輪机的變動工况和運行維護

4—1. 非設計工况下級的工作情形.....	99
4—2. 汽輪机的調节方法.....	104
4—3. 汽輪机的調速系統和油系統.....	111
4—4. 汽輪机的运行和維護.....	120

第五章 凝汽設備

5—1. 凝汽設備系統及其工作.....	127
----------------------	-----

- 5—2. 表面式凝汽器的热力计算.....133
- 5—3. 凝汽器和抽汽器的构造.....138

第六章 燃气轮机装置

- 6—1. 燃气轮机装置的特点和发展简史.....143
- 6—2. 简单燃气轮机装置的实际循环.....144
- 6—3. 回热的和分段燃烧的燃气轮机装置.....150
- 6—4. 燃气轮机装置的主要设备.....155
- 6—5. 按闭式循环工作的燃气轮机装置.....158
- 6—6. 燃气轮机装置的应用范围和发展前景.....159

第五篇 热发电厂

第一章 热力发电厂的基本特性

- 1—1. 我国火力发电事业的发展简述.....163
- 1—2. 热力发电厂的生产过程.....165
- 1—3. 力能用户特性和负荷图.....171
- 1—4. 发电厂的主要设备.....176
- 1—5. 发电厂的运行经济指标.....183

第二章 发电厂的热力系统

- 2—1. 发电厂的原则性热力系统.....191
- 2—2. 热力系统计算.....206
- 2—3. 发电厂的主要管道.....215

第三章 发电厂的辅助系统和布置

- 3—1. 发电厂的水处理.....221
- 3—2. 发电厂的供水.....227
- 3—3. 发电厂的燃料供应系统.....235
- 3—4. 发电厂的除尘和除灰.....242
- 3—5. 发电厂厂址和主厂房布置.....248

第四篇 汽輪机

第一章 汽輪机的一般概念

1—1. 汽輪机發展簡史

直到上世紀末，活塞式蒸汽机仍然是把热能变为机械能的唯一热机。

随着工业的发展，对高速发动机提出了这样的要求，即既要功率大又要外形尺寸小和重量輕，还要求具有高的經濟性。就这些要求来看，在很大的程度上，汽輪机都比蒸汽机好得多。

在活塞式蒸汽机中，蒸汽的热能是在汽缸中直接轉变为机械功的。在汽輪机中則不同，蒸汽的热能先轉变为蒸汽的动能，然后再由动能轉变为机械功。在汽輪机中，蒸汽的热能变为动能是在噴管中进行的，或者也有一部份热能在动叶片的汽道間轉变为动能。从噴管中射出的高速汽流流經动叶片时推动轉子使其动能变为机械功。

汽輪机的概念由来已久，我国古代的走馬灯和紀元 150 前年亚历山大城的希罗所描述的旋轉球（图 1—1）都可算是反动式汽輪机的雛形。由于弯管中高速汽流冲出时产生的反作用力（其方向和汽流的方向相反）使球产生了旋轉运动。

上世紀末，汽輪机才开始在工业上应用。它的优点主要是轉速高，单位功率的重量小，相对效率高和在一个机组內可发出巨大的功率。因此汽輪机的发展非常快，并且

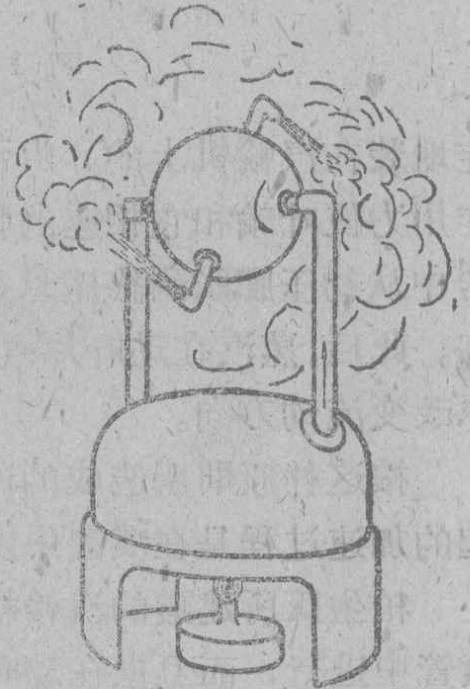


图 1—1 利用汽流反作用力的旋轉球模型。

广泛地代替了蒸汽机，而在大功率固定设备中也取代了内燃机。

十九世纪末，瑞典工程师古斯德夫·拉伐尔和英国的查理斯·柏生各自独立地开始为建造并继续改善汽轮机而工作并获得了相当成就。在拉伐尔汽轮机（图1—2）中，蒸汽进入一个或几个平行排列的喷管中，在其中获得很高的速度，并导入分布在叶轮轮缘上的叶道中，叶轮是固

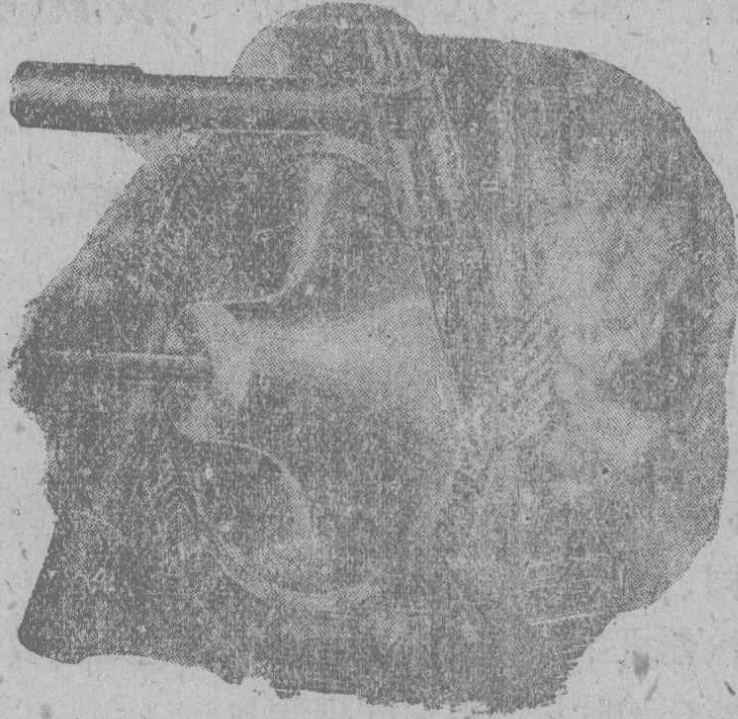


图 1—2 拉伐尔冲动式汽轮机。

定地装在汽轮机上的。由于蒸汽通过动叶道时改变汽流的方向所产生的作用力使叶轮和它相连的轴发生转动。这种汽轮机的特点，是蒸汽在喷管中从初压膨胀到终压只在一级中进行，因此喷管出口的汽流速度很高。此后，蒸汽在动叶片汽道中把动能转变为机械能时，不再继续膨胀而只改变流动方向。

按这种原则所造成的汽轮机，即全部蒸汽的膨胀过程以及由此所引起的加速过程是在喷管中发生的汽轮机，叫做冲动式汽轮机。

柏生氏所建议的汽轮机是按反动原理工作的。即蒸汽的膨胀不仅在喷管中进行，而且也在动叶汽道中进行，故作用在动叶上的力，既有因汽流改变方向而产生的冲力，又有汽流在动叶道中加速所引起的反作用力。其次，柏生汽轮机是多级式的，即蒸汽的膨胀不是在一组喷管内进

行，而是在依次連續的若干个級内进行（图 1—3）。每級的噴管（导

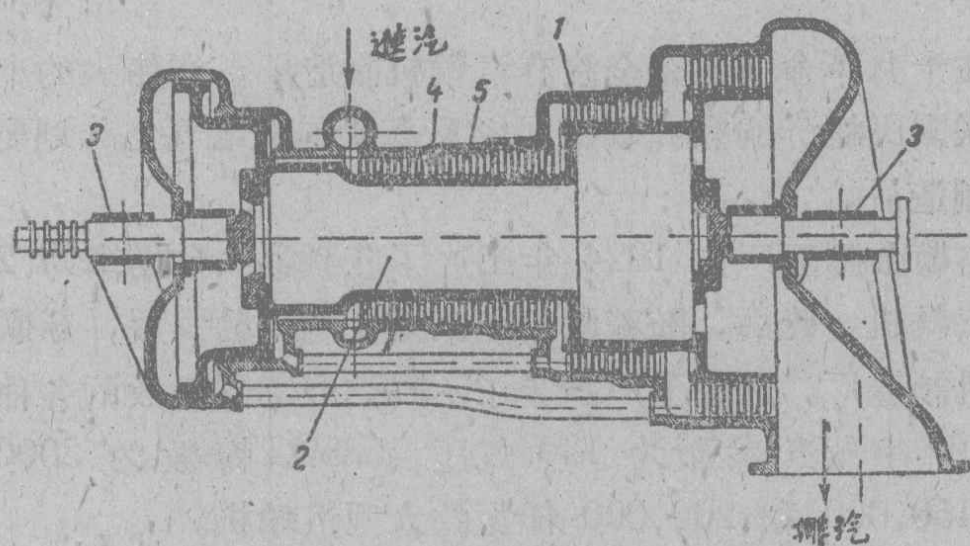


图 1—3 柏生反动式汽輪机。

1—汽輪机汽缸；2—輪鼓；3—軸承；4—导叶；5—动叶。

叶) 装在汽輪机汽缸上，而工作叶片（动叶）則装在輪鼓上。第三，每級中只用全部焓降的很小一部份，因此每級中汽流速度不很高，因而动叶的圓周速度也較拉伐尔汽輪机为小。有了上述这些优点，就可使汽輪机的效率达到很高的数值，轉数相应地降低了，并且可与从动机（例如发电机）的軸直接相联，以及一个机組中可以发出几万仟瓦的功率。

接着，冲动式汽輪机也走上了造成多級的道路。

本世紀初，大功率多級汽輪机的发展非常迅速。在蒸汽参数方面，1914 年以前由于金屬在高温区域内工作的知識有限，所以主要采用中等压力（12—16 气压）的蒸汽来工作。自 1920 年至 1940 年的这个阶段中。开始应用效率更高的高参数（高压、高温）設備，压力已高达 120—170 气压。

1914 年以后战争时期，各国由于燃料供应发生困难，曾有这样的趋势，即把汽輪机造成非常多的級数以提高其效率。但此后为了簡化构造，在相当长的一段时期中，大功率汽輪机的級数又趋减少，尽量造成单汽缸的（或双汽缸的），而避免用好几个汽缸。

汽輪机是现代火力发电厂中广泛采用的原动机。此外，在軍艦和民用船舶上也广泛地采用汽輪机作为原动机。小型汽輪机一般只作为带动

輔助設備的原動機，如電廠中用來帶動高壓水泵、起動油泵的汽輪機等。

蘇聯在十月革命前還完全沒有汽輪機製造廠。在偉大的十月革命勝利後，蘇聯國民經濟的有計劃發展以及全俄國家電氣化計劃要求有自己的汽輪機製造廠。

列寧格勒金屬工廠在 1924 年出產了蘇聯第一台功率為 2000 仟瓦的固定式汽輪機。此後，隨着社會主義工業的蓬勃發展，蘇聯建成了更多的汽輪機製造廠。這些工廠製造了不同類型不同參數的各種功率的汽輪機，其中有蒸汽參數為 140 氣壓， 535°C 轉數為 3000 轉/分的 100,000, 150,000 和 200,000 仟瓦的大型汽輪機。

由於聯合生產熱能和電能的巨大優越性，所以該廠也生產了供熱式汽輪機。在這種汽輪機中，從中間級抽出的蒸汽可供取暖之用或供工藝上需要之用。1933 年該廠所生產的供熱式汽輪機，當轉速為 3000 轉/分時功率為 25000 仟瓦，抽汽壓力為 1.2—2.0 氣壓。必須指出，只有在蘇聯，供熱式汽輪機才可能被廣泛地使用，因為蘇聯有計劃的國民經濟允許合理的組織熱電中心站來聯合生產電能和熱能。

1934 年，哈爾可夫汽輪機廠建成了，並開始生產汽輪機。直到第二次世界大戰之前，該廠生產着 1500 轉/分的 50000 和 100000 仟瓦凝汽式汽輪機。

現在蘇聯汽輪機製造業生產着用高參數蒸汽的大功率汽輪機。蒸汽壓力為 90 氣壓和汽溫為 500°C 。採用高參數蒸汽可大大地提高經濟性。例如，裝備着高參數（90 氣壓， 500°C ）汽輪機的電站和裝備着中參數（29 氣壓， 400°C ）汽輪機的電站比起來，燃料消耗率可節約 14—15%。

我國在解放以前根本沒有汽輪機製造廠，電廠中所裝備的汽輪機都是從資本主義國家輸入的。解放以後，在黨和政府對國民經濟建設的無限關懷以及蘇聯無私的幫助下，動力機械製造工業進入了新的階段。建成了上海汽輪機廠和哈爾濱汽輪機廠。1955 年上海汽輪機廠試制成功了國產第一台 6000 仟瓦的汽輪機。以後又生產了中壓 12000 仟瓦的凝汽式

汽輪機。到今年為止，哈爾濱汽輪機廠已制成了 25000 仟瓦和 50000 仟瓦具有二次抽汽的供熱式汽輪機。這些廠的建成對我國動力事業將發揮巨大的作用。我國的地區發電站已開始裝備和已裝備了自己的國產大功率汽輪機，從而對國民經濟的發展將起到巨大的保證和推動作用。總之，我國的汽輪機製造工業在解放後短短的十年中，已發展到從無到有，從仿造到自行設計，而在大躍進的形勢下，正以豪迈的步伐，信心百倍地向大功率及高參數方向挺進中。

1—2. 汽輪機構造的一般介紹

為了更好地熟悉汽輪機的主要零件和部件，我們來看一個近代典型的多級汽輪機的結構。

圖 1—4 所示是蘇聯列寧格勒金屬工廠製造的功率為 50000 仟瓦、轉數為 3000 轉/分的凝汽式汽輪機縱剖面圖。在汽輪機軸 2 上固定地安裝着葉輪 23，在這些葉輪的輪緣上固定地裝着動葉片 24。相鄰兩葉輪之間有隔板 20，隔板是固定地安裝在汽輪機汽缸 1 上的。隔板上設有噴管 21。汽輪機的軸 2 在前支持一止推聯合軸承 11 和後支持軸承 13 中旋轉。支持一止推聯合軸承還承受軸向推力。汽缸連同所有汽輪機的不動部份，叫做汽輪機的定子，而其轉動部份——汽輪機軸連同相關的零件——叫做轉子。蒸汽經調節閥 7 進入汽輪機（調節閥由傳動機構 6 操縱），然後流經裝在汽缸上的噴管 5。在噴管 5 中蒸汽的壓力降低了全部壓降的一部份，而在其後各級隔板上的噴管中壓力再逐漸降低。乏汽經排汽管 3 排出。在噴管中，蒸汽壓力的降低使其速度增加。蒸汽就以這個速度進入由動葉片所構成的汽道。由於葉片的特定形狀，汽流的方向就改變了。結果就有沖力作用在葉片上而使帶着葉輪的軸旋轉。汽輪機的軸由聯軸器和發電機的軸相聯，因此汽輪機旋轉時所發出的機械功就通過發電機而轉變為電能了。

一系列噴管和緊挨在它後面的一系列動葉片，就構成汽輪機的一個級。由若干個級構成的汽輪機就叫多級汽輪機。圖 1—4 所示就是由十二個沖動級所構成的沖動式汽輪機。

這台汽輪機具有噴管調節系統。在這種調節法中，第一級的噴管 5

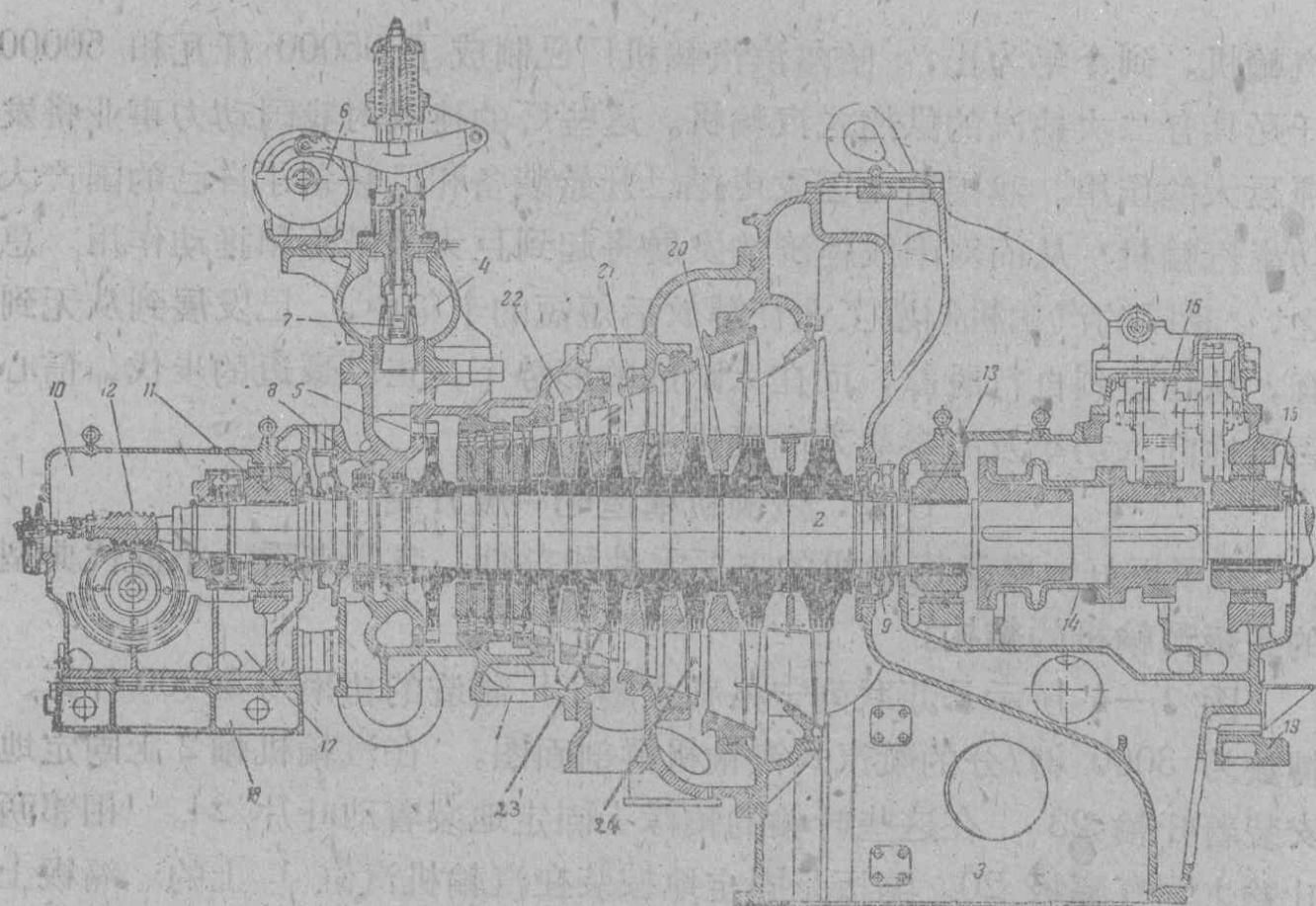


图 1—4多級凝汽式汽輪机縱剖面图

1—汽缸；2—汽輪机軸；3—排汽管；4—汽壓箱；5—調節級的噴管；6—調節閥传动机构；7—調節震；8—前端軸封；9—后端軸封；10—前軸承外壳；11—前支持一止推联合軸承；12—調速器軸和油泵的传动蝸輪；13—汽輪机的后支持軸承；14—联接汽輪机軸和发电机軸的联轴器；15—发电机軸承；16—軸的轉动机构；17—前軸承垫板；18—前基座板；19—后基座板；20—隔板；21—噴管；22—隔板軸封；23—叶輪；24—动叶片。

被分成彼此独立的若干个組，每組都与自己的調節閥相通。当負荷增加（或减小）时便增加（或减少）閥門开启的数目。这样，进入汽輪机的蒸汽量就改变了。因而也就改变了汽輪机的功率。对于通过每一組噴管的蒸汽，可以用开大或关小閥門，亦即使蒸汽节流的方法来改变汽輪机的功率。

凡汽輪机的第一級，据根汽輪机的負荷而經不同数目的噴管获得蒸汽以調整功率的，叫做調節級。

在汽輪机軸穿过汽缸的地方装有軸封。前端軸封8的任务是阻止蒸汽从汽缸內漏出来，后端軸封9的任务則是阻止外界空气漏入汽缸，因

为凝汽式汽轮机末级的压力是低于大气的。在隔板内孔的整个圆周上也装有阻塞片式轴封以减少蒸汽从隔板前漏向隔板后。

1—3. 汽轮机的基本工作原理

汽轮机是回轉式的蒸汽原动机，蒸汽在噴管或导叶中膨胀后直接推动轉子来带动发电机。它沒有蒸汽机所不可少的活塞和曲柄連桿等机件。

当蒸汽通过噴管1时（图1—5），压力降低而速度增加。此高速蒸汽从噴管噴出，冲向动叶片2，推动叶輪3使发生旋轉运动，于是在机軸4上就获得了机械功。

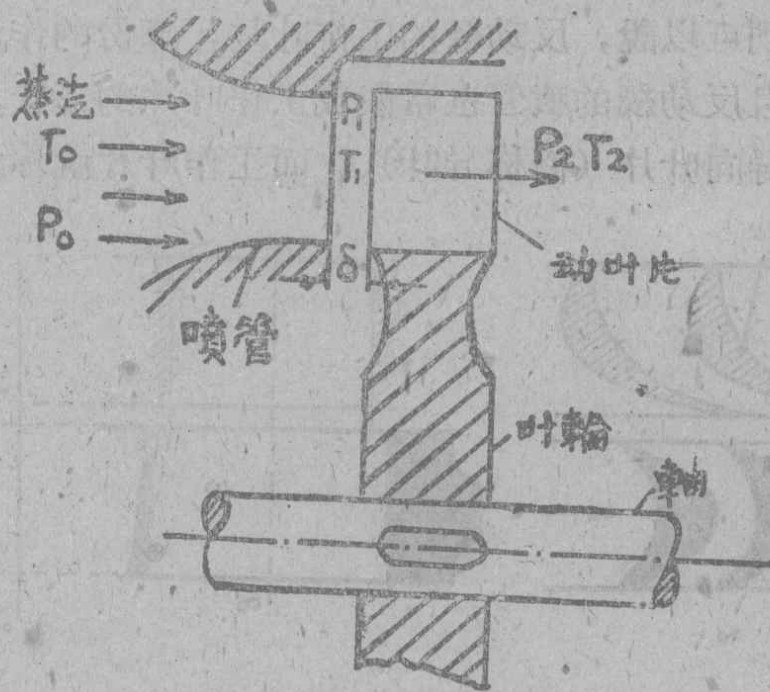


图 1—5 汽轮机工作原理簡图

1—噴管；2—动叶片；3—叶輪；4—机軸。

这样一系列噴管和一系列工作叶片就組成一个压力級。小功率汽轮机往往只有一个压力級，大型汽轮机則需用若干个压力級。

由此可知，汽轮机的基本工作原理是：（1）变蒸汽的热能为动能，也就是蒸汽的热焓降低而速度增加；（2）将蒸汽的动能轉变为汽轮机軸上的机械功。

按照蒸汽在汽轮机內作用原理的不同，可分为冲动工作原理和反动工作原理。

对于每个压力级来说，如果蒸汽只在喷管中膨胀，而在蒸汽离开喷管以后，进入动叶片的汽道以及离开汽道时，压力都基本上保持不变。那么，由于蒸汽流过动叶片时改变流动方向而有冲力作用在动叶上，因而推动叶轮旋转。这种工作原理就称为冲动工作原理。按冲动工作原理工作的级就叫冲动级。

如果蒸汽从初压到终压的膨胀过程，一部份在喷管中进行，而另一部份在动叶汽道中进行，因此蒸汽的速度在动叶汽道中获得新的增加。这样蒸汽从动叶汽道中射出时，对叶片产生反击力。这种情况称为反动工作原理、按反动原理工作的级就叫反动级。

因此，我们可以说，反动级的工作叶片，部份的作用就好像是运动着的喷管，而且反动级的喷管也常做成工作叶片的形状。因此，反动级的喷管常称为导向叶片（简称导叶），而工作叶片就称为动叶片。

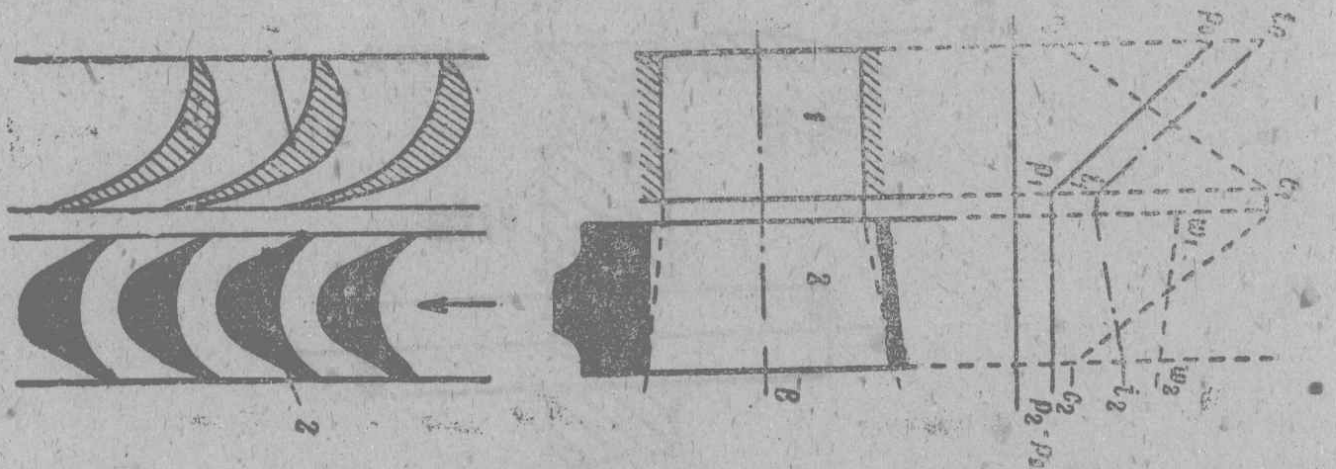


图 1—6 冲动级简图

1—喷管；2—动叶。

图 1—6 和 1—7 分别表出了冲动级和反动级工作原理的基本区别。 p 、 c 和 w 分别表示蒸汽通过喷管和动叶汽道时蒸汽的压力、绝对速度和蒸汽对叶片的相对速度。在冲动级中，蒸汽压力在喷管中即降到这级的终压，也就是蒸汽在喷管进口处为压 p_0 ，而在出口是 p_1 ，相应地蒸汽速度由 c_0 增加到 c_1 。蒸汽在动叶汽道中不再膨胀（动叶出口处的压力 $p_2 = p_1$ ），故蒸汽对动叶的相对速度数值不改变。在反动级中（图 1—7），蒸汽在导叶中先膨胀到某一中间压力 p_1 ，在动叶汽道中

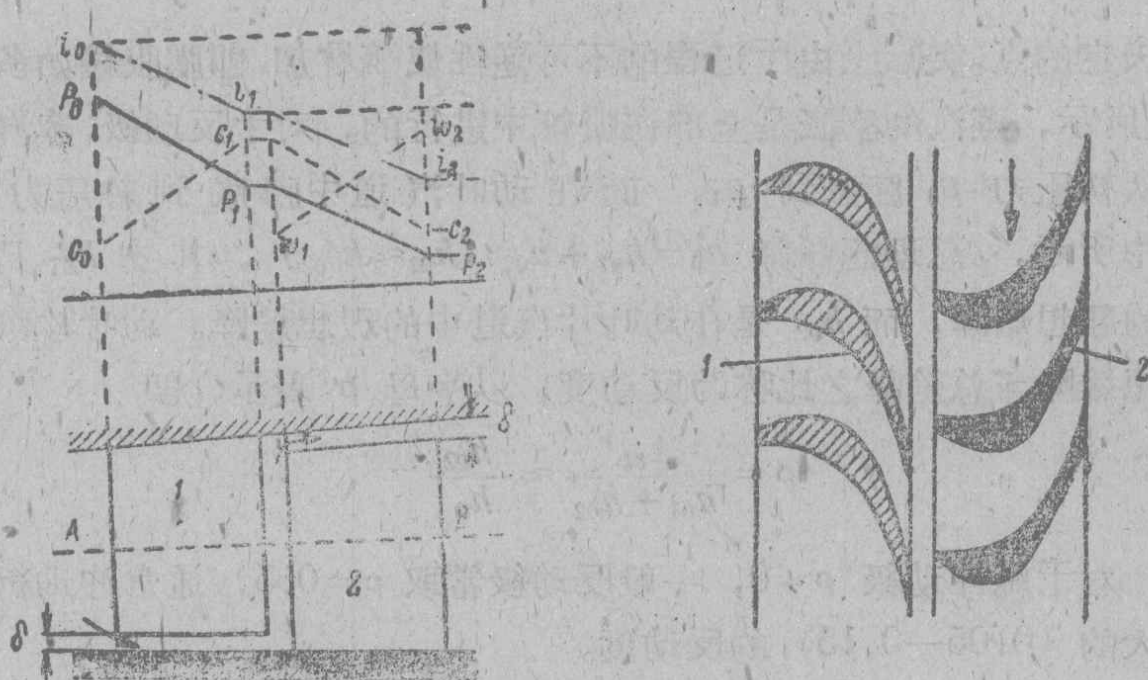


图 1—7反动级简图 1—导向叶片；2—动叶片。

再膨胀到终压力 p_2 ，因此，蒸汽对动叶的相对速度将有所增加。由此可知，在反动级的动叶片上，总是同时作用着冲动力和反击力的。

这两个图中还表示出：冲动级动叶间汽道的断面（垂直于汽流方向的）是近乎一样的，而反动级动叶间汽道的断面是逐渐收缩的。

我们从 is 图上来看蒸汽的膨胀过程（图1—8）。对于冲动级，在理想情况下蒸汽的膨胀是绝热的，即沿等熵线 $A_0 A_{1t}$ ，其中 A_0 为由蒸汽初

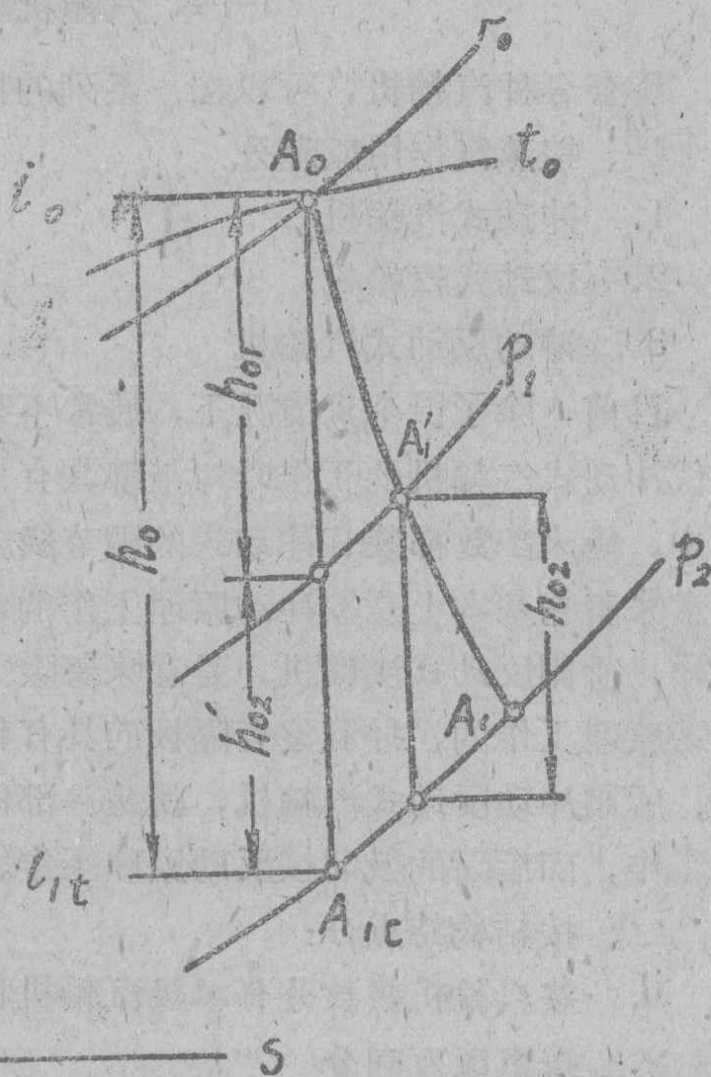


图 1—8 在冲动和反动级中的蒸汽膨胀过程。

态所决定的点。实际上由于过程的不可逆性使熵增加，即膨胀线如多变线 $A_0 A_1$ 所示，蒸汽的膨胀是全部在喷管中进行的。对于反动级，蒸汽在导叶内从初压力 p_0 膨胀到 p_1 ，而在动叶汽道中膨胀到终压力 p_2 。如图中所示，总理想焓降 $h_0 = h_{01} + h_{02}$ ($h_{02} \approx h'_{02}$)，其中 h_{01} 是在喷管中的理想焓降，而 h_{02} 是在动叶片汽道中的理想焓降。动叶片汽道中的理想焓降与总焓降之比称为反动度，以字母 ρ 表示，即

$$\rho = \frac{h_{02}}{h_{01} + h_{02}} \approx \frac{h_{02}}{h_0}$$

显然，对于纯冲动级 $\rho = 0$ ，一般反动级常取 $\rho = 0.5$ ，通常冲动级常具有不大的 (0.05—0.15) 的反动度。

1—4. 汽轮机的分类

所有各种汽轮机，可以按一系列的特征来进行分类。

一、按蒸汽作用原理分：

1. 冲动式汽轮机
2. 反动式汽轮机
3. 冲动反动式汽轮机

目前，除了很个别情况下，通常不制造纯冲动式或反动式汽轮机。现代冲动式汽轮机的工作叶片上都具有一定的反动度，而在反动式汽轮机中，绝大多数都装有冲动式的调节级。因此，所谓冲动式汽轮机，只是意味着它基本上是按冲动原理工作的，并且在各级之间有隔板零件。同样，所谓反动式汽轮机，是意味着除了调节级之外，其余各级都是按反动原理工作的，并且没有隔板而具有轮鼓和平衡轴向推力用的平衡活塞。所谓冲动反动式汽轮机，就是一部份在高压区域工作的级按冲动原理工作，而后面的级则按反动原理工作。

二、按结构特点分：

1. 按汽轮机级数分有单级汽轮机和多级汽轮机。
2. 按汽流方向分

(1) 轴流式汽轮机 在这种汽轮机中，蒸汽从第一级到最末级的流

动方向，基本上与机轴的中心线一致。这是一种应用最广的汽轮机。

(2) 辐流式汽轮机 在这种汽轮机中汽流的方向与轴中心线垂直，而动叶片的位置与轴转中心线平行。

(3) 轴流—辐流联合式汽轮机 这种汽轮机由轴流级和辐流级组成。

3. 按汽轮机汽缸的数目分：

(1) 单汽缸汽轮机 这种汽轮机的所有级都放在一个汽缸内。这是一种最简单而又价廉的汽轮机。

(2) 多汽缸汽轮机 这种汽轮机的所有各级分装在若干个汽缸内。多汽缸汽轮机的结构使我们能够采用较多的级数，并且具有较高的效率，但这种结构较重，价格较贵和制造运行都比较复杂。在功率非常大而须要在低压部份用双流程的汽轮机中，或者汽轮机的新蒸汽参数很高，在汽轮机的头部须要用优质金属时，才选用多汽缸结构。常用的多汽缸汽轮机是双汽缸的，很少使用三汽缸，只有在极特殊的情况之下才采用四汽缸结构。

图 1—9 表示出具有一个排汽管的单轴三汽缸汽轮机（ЦВД 表示高压汽缸，ЦСД 表示中压汽缸，ЦНД 表示低压汽缸）。

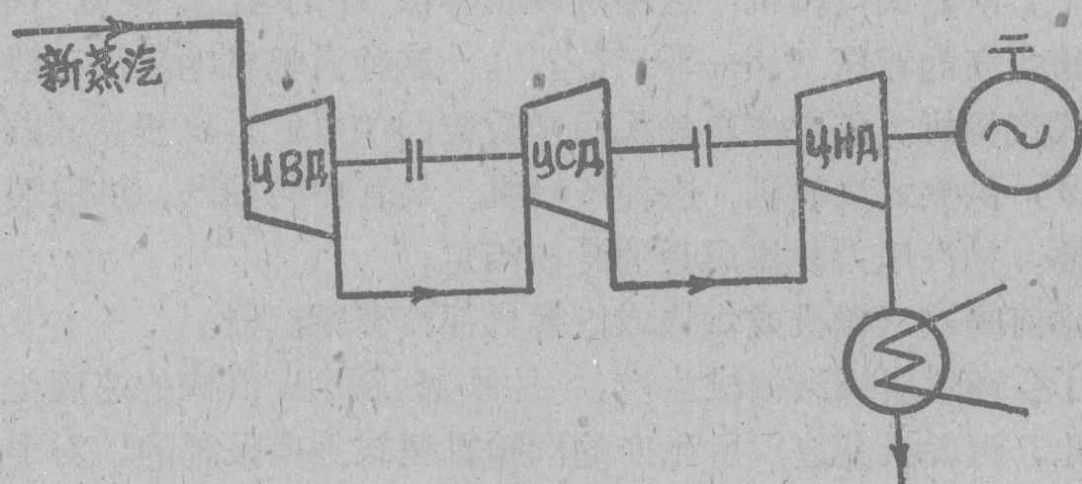


图 1—9 三汽缸凝汽式汽轮机示意图

三、按用途分：

1. 固定式汽轮机（转速不变）

2. 运输用汽轮机 (轉数变化)

四、按工质参数分:

通常按蒸汽压力来区分

- (1) 超高压汽轮机 新蒸汽压力 $p_{cB} = 150-170$ 气压
- (2) 高压汽轮机 新蒸汽压力 $p_{cB} = 90-125$ 气压
- (3) 中压汽轮机 新蒸汽压力 $p_{cB} = 29-35$ 气压
- (4) 乏汽汽轮机 蒸汽压力 $p_{cB} = 1.0-2.5$ 气压。

五、按乏汽被利用的情况分, 有:

1. 凝汽式汽轮机

(1) 具有正常真空度的凝汽式汽轮机

这种汽轮机是最大限度地将蒸汽的热能转变为机械功, 排汽压力在 0.03 到 0.05 气压之间。

在现代的大型电厂中, 这种汽轮机是带动交流发电机的主要机组。

(2) 具有不良真空度的凝汽式汽轮机

在这种汽轮机内, 乏汽排入具有真空度不高的凝汽器中。由于凝汽器中的真空度不高, 所以冷却水离开凝汽器时的温度较高。

2. 背压式汽轮机

(1) 前置式汽轮机 这种汽轮机有很高的蒸汽参数 (60—220 气压) 和较高的背压 (18—30 气压)。这种汽轮机的乏汽一般引入中压凝汽式汽轮机。前置式汽轮机用来改装旧的电厂, 以提高其效率。

(2) 供热式汽轮机 这种汽轮机。具有中间抽汽, 供取暖或工艺上的需要。抽汽压力视热用户的需要而定。

无论前置式汽轮机或供热式汽轮机都没有凝汽器。

为了合理地组织汽轮机生产, 并保证工厂以很快的速度生产汽轮机, 因此, 汽轮机制造厂所生产的汽轮机型式是有限制的。对于蒸汽的参数必须采用规定的标准。

对固定式汽轮机的符号依下列原则确定: 第一部份字母表示汽轮机的型式, 同时, 第一个字母表示蒸汽初参数, 即:

A——表示初压力为 29—35 气压 (中压), 初温为 400—435°C,