

火电厂技工培训教材

4.2

汽轮机运行

中 册

湖北省电业局编

水利电力出版社

內 容 提 要

根据培训工人的需要，湖北省电业局编写了一套火电厂技工培训教材，教材的内容力求结合发电厂工作的需要，以达到理论与实际密切结合的目的。

这套教材的汽轮机部分共分三册出版，本书为中册。书中的主要内容是叙述汽轮机的工作原理、构造、热能两出式汽轮机和热力测量仪表，其中包括冲动式汽轮机和反动式汽轮机及汽轮机的附属设备装置等；并介绍了现代供热汽轮机的情况，最后简单地叙述了压力表、温度计和流量表的构造、原理和维护等注意事项。

本书系供火力发电厂培训工人之用；同时也可供作中等技术学校教材之用。

汽轮机运行 中 册

湖北省电业局编

*

1563R324

水利电力出版社出版（北京西郊科春路二号楼）

北京市书刊出版业营业许可出字第106号

水利电力出版社印刷厂排印 新华书店发行

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 开本 * 5 $\frac{1}{2}$ 印张 * 116千字

1958年11月北京第1版

1958年11月北京第1次印刷(0001—6,100册)

统一书号：T15143·297 定价(第8类)0.55元

目 录

第六章 汽轮机工作原理	(189)
第一节 蒸汽的能量在汽轮机中的转变过程	(189)
第二节 冲动原理及冲动式汽轮机	(194)
第三节 反动原理及反动式汽轮机	(208)
第四节 汽轮机的损失和效率	(217)
第五节 蒸汽在喷嘴和工作叶片中的工作过程	(229)
第七章 汽轮机的构造	(240)
第一节 汽轮机分类	(241)
第二节 各式汽轮机的图例	(243)
第三节 汽轮机静止部分	(248)
第四节 轴 封	(261)
第五节 主轴承与推力轴承	(267)
第六节 汽轮机旋转部分	(277)
第七节 调速装置	(289)
第八节 给油装置	(306)
第九节 盘车装置	(319)
第十节 汽轮机汽缸的保温	(322)
第八章 热能两出式汽轮机	(324)
第一节 背压式汽轮机	(325)
第二节 抽汽式(抽汽式)汽轮机	(329)
第三节 压力调节器的构造	(343)
第九章 热力测量仪表	(346)
第一节 弹簧管压力表	(346)
第二节 温度计	(348)
第三节 流量表	(353)

第六章 汽輪机工作原理

第一节 蒸汽的能量在汽輪机中的轉变过程

(一) 热能轉变为动能

学过热工学的人都懂得，蒸汽在膨胀时，其中一部分热能轉变成动能。活塞式蒸汽机和汽輪机的工作，就是把这一部分动能轉变成成为有用的回轉机械能。

蒸汽机和汽輪机的工作原理不同。

如图 6-1，蒸汽的位能在蒸汽机內直接轉变为 活塞 的 动

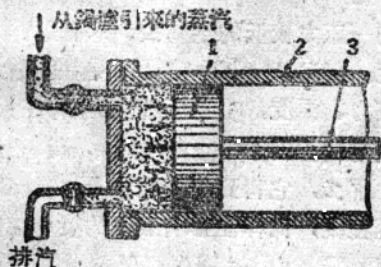


图 6-1 活塞式蒸汽机的作用图

1—活塞；2—汽缸；3—活塞杆。

能，表现为活塞在汽缸內运动。通过連杆及拐臂机构，再把活塞的直綫运动变成蒸汽机軸的回轉运动，蒸汽机就是这样进行工作的。

在蒸汽机上，轉动軸每回轉一周，活塞的运动速度就兩次变为零，所以

有相当大的一部分“能”，消耗在克服活塞及其它部分的慣性上。往运复动可使各零件发生很大的变形，在机器迅速轉动时能引起很危险的顫动，甚至因而破坏机器。为了增大各部分的强度，必須把各部分做得厚些，这又使蒸汽机的重量增大很多。

发电厂中多用汽輪机做为原动机，前面談到的有活塞的机器所有的許多缺点，在汽輪机上是不存在的。这种机器的运动部分都不做往复运动，而是以很大的速度轉动（一般标准是 1500 或 3000 轉/分）汽輪机的重量远远小于和他的功率相等的蒸

汽机的重量。此外，汽輪机的效率也較蒸汽机的效率高。

在汽輪机中如图 6-2 所示，蒸汽在特殊形狀的导汽槽道中——噴咀 4 中膨脹，使蒸汽的位能变为动能；換句話說，在蒸汽膨脹时降低压力以增加其速度，使汽流以很高的速度推动軸 1 旋轉，这时蒸汽的动能便直接轉变为汽輪机軸的回轉机械能。

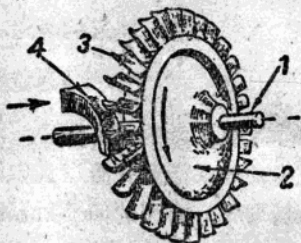


图 6-2 簡單冲动式汽輪机結構图

1—軸；2—輪盤；3—叶片；4—噴咀。

为了把蒸汽的位能变成动能，必須使来自鍋炉的有一定压力的蒸汽，通过噴咀，到一压力較低的空間去；只有这样，才能使汽流获得相当的速度。蒸汽从噴咀中噴出的速度的大小，是由噴咀前蒸汽的初压力、温度，噴咀后的压力(背压)及噴咀的形狀等許多因素来决定的。对于一定的噴咀，蒸汽初压力，温度愈高，背压愈低，那么，它得到的速度愈大。噴咀断面的几何形狀及噴咀壁粗糙程度，同样能影响蒸汽的噴射速度(这在以后几章里会再詳細說明)。由 $i-s$ 图中可以看出，蒸汽初压力、温度愈高和背压愈低，通过噴咀的蒸汽的热焓低下就愈大；那么，从噴咀中噴出蒸汽的速度和热焓降下大小有什么关系呢？下边我們就来談談这个問題。

設初压力 $P_0 = 16$ 公斤/公分²(絕對)，温度 $t_0 = 300^\circ\text{C}$ ，絕热膨脹的压力 $P_1 = 0.2$ 公斤/公分²(絕對)，那么，热焓降下 183 大卡/公斤，即每公斤蒸汽失掉了 183 大卡的热能。

这些能量变成了什么呢？根据能量不灭定律可以判定，它不会无影无踪的消失掉，这 183 大卡热能是轉变为蒸汽的动能了。

由此可見，熱能轉變成動能的規律可以用下面的話來說：

1 公斤蒸汽所獲得的動能，相當于蒸汽在膨脹時的熱焓降下。

以上所說，是指蒸汽在膨脹中沒有對外損失、蒸汽本身也沒有任何熱交換的情況下產生的現象。因此可以推論：蒸汽在汽輪機中工作時，熱焓降下的愈大，蒸汽噴射速度就愈高；也就是熱能轉變成動能愈多，它作用于汽輪機葉片上成為回轉機械能也愈多。

1 公斤蒸汽在膨脹時，所獲得動能的量可按下列公式求得（這個公式是由工程力學中引來的）。

$$E = \frac{C^2}{2g} = \frac{C^2}{2 \times 9.81} \\ = \frac{C^2}{19.62} \text{ 公斤公尺。}$$

E ——動能量（公斤公尺）；

C ——蒸汽的噴射速度（公尺/秒）；

g ——自由落體的加速度，等於 9.81 公尺/秒²。

另一方面，1 公斤蒸汽在膨脹時，壓力由 P_0 與到 P_1 ，熱焓降下為 $i_0 - i_1$ ，利用以前學過的關於熱功當量的概念，可以知道 1 公斤蒸汽在膨脹時所做的功為：

$$W = 427(i_0 - i_1) \text{ 公斤公尺。} \quad (2)$$

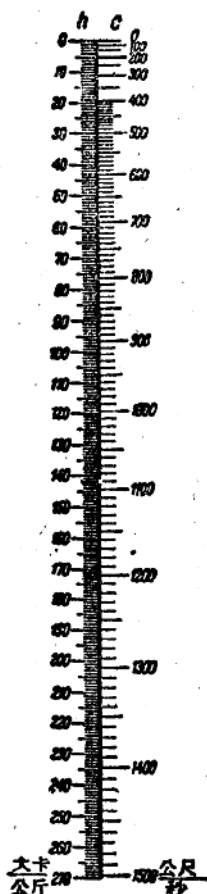


圖6-3 綫格表
用以查出蒸汽的噴射和
對應的熱焓降下

由能量不灭定律，得知：

$$E = W,$$

所以
$$\frac{C^2}{19.62} = 427(i_0 - i_1),$$

蒸汽喷射的速度可由此求得：

$$C^2 = 427 \times 19.62(i_0 - i_1)$$

或
$$C = 91.5 \sqrt{(i_0 - i_1)} \text{ 公尺/秒} \quad (3)$$

例如从 $i-s$ 图查得，喷嘴前蒸汽初压力 $P_0 = 16$ 公斤/公分² (绝对)，温度 $t_0 = 300^\circ\text{C}$ ，热焓 $i_0 = 725$ 大卡/公斤，绝热膨胀到终点压力 $P_1 = 0.2$ 公斤/公分² (绝对)，热焓 $i_1 = 542$ 大卡/公斤。

解
$$(i_0 - i_1) = 183 \text{ 大卡/公斤}$$

那么，蒸汽速度是：

$$C = 91.5 \times \sqrt{183} = 1237 \text{ 公尺/秒}.$$

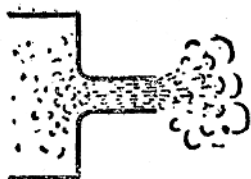
平方根值可利用数学表格查出。

喷射速度和它相对应的热焓降下 $h = (i_0 - i_1)$ 之间的关系，可以用 6~3 线格表查出。左边表示热焓降下 h ，右边表示相应速度

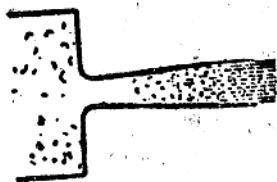
$$C = 91.5 \sqrt{(i_0 - i_1)} \text{ 公尺/秒}.$$

(二) 临界压力和临界速度

最初设计和制造汽轮机的人们，在研究蒸汽在喷嘴中膨胀过程时，遇到如下的问题：如图 6-4 所示的容器内装着有相当压力的蒸汽，对外有圆筒型的（如图 6-4 甲所示的）喷嘴。汽流通过喷嘴进入压力较低的空间，产生压力降下并获得一定的速度，但这些压力降下和获得的速度只能达到某一极限值。如容



甲—蒸汽从等截面喷嘴喷出情况



乙—蒸汽从渐扩喷嘴喷出情况

图6-4

器内的蒸汽是饱和蒸汽，那么，喷嘴出口处蒸汽压力不能低于容器内蒸汽压力的58%（较准确点说是57.7%），这个压力称为临界压力；和这个压力相适应的，有一极限速度，称为临界速度。如果是过热蒸汽，那么，临界压力和初蒸汽压力之比为0.546。

如：某容器内蒸汽是初压 $P_0 = 10$ 公斤/公分²（绝对）的干饱和蒸汽，容器外为大气，则圆筒喷嘴出口处压力为：

$$P_1 = 10 \times 0.58 = 5.8 \text{ 公斤/公分}^2 \text{（绝对）.}$$

也就是用以转变为速度能的压力降下只有：

$$10 - 5.8 = 4.2 \text{ 公斤/公分}^2.$$

蒸汽离开喷嘴出口，在大气中继续膨胀，发生扰动，在喷嘴中心线上不再增加速度；因此，在临界压力以下的那一部分压力降，以及相应的热焓降下，都不能有效的被利用。这件事告诉我们，蒸汽在圆筒喷嘴中不能无限制的膨胀，只能达到某一定限度为止。可见初压力不超过背压一倍时，利用这种形状的喷嘴才是合适的。比如把蒸汽排到大气，那么，容器内压力 P_0 不应超过1.8公斤/公分²（绝对），这样的喷嘴被称为渐缩喷嘴。

如果采用如图6-4乙所示，首先是逐渐收缩，然后再逐渐扩大的渐扩喷嘴，情形就完全不同了。蒸汽流动到截面积最小

的喉部，压力降下到临界压力，流速达到临界速度。以后在渐扩的一段喷嘴里，压力繼續降低，流速繼續增加。渐扩部分的形状可以設計得使蒸汽压力在喷嘴出口处等于喷嘴后的背压。当然，出口处的蒸汽喷射速度也就有可能超过临界速度，这样，我們就可以把全部压力降和相应的热焓降都利用了。可見，在喷嘴后背压力小于临界压力的时候，采用渐縮喷嘴是不合适的，必須采用渐縮渐扩喷嘴；因为，渐縮渐扩喷嘴在使用上不受压力降的限制，無論压力降下多少，都可利用它把蒸汽的位能变成冲击的动能。

第二节 冲动原理及冲动式汽轮机

(一) 冲动原理

在这一节里，我們將要研究蒸汽的动能如何使汽轮机轉子轉动。

动能即物体移动的能力，可用公式表示如下：

$$E = \frac{mv^2}{2} \text{ 公斤公尺}$$

m ——物体的質量；

v ——物体移动的速度。

由此可見，物体的动能与其移动速度的平方成正比；即使物体質量很小，只要具有很高的速度，就会具有很大的动能；在物体速度降低时，动能也很快地减少。按照能量不灭定律，任何保持一定速度而运动着的物体，都可以把它的全部能量或一部分能量傳遞給它所推动的另一物体。

由汽流冲向叶片表面的情况可以看出汽流对叶片的作用力，若叶片可以移动，更可以看出汽流把动能傳遞給叶片的过程。試驗証明，汽流对叶片冲击力的大小，决定于蒸汽的消耗

量、进入叶片表面前后的速度差、叶片表面形状及相对喷射角等几个因素。汽流对叶片的正面撞击完全没有必要，应避免这种情况，设法使汽流不是正面撞击叶片，而是平稳地滑过去。下面可以说明这一点。

在汽流冲向和汽流运动方向垂直的平面时，可设想有两种情况。如图 6-5 甲所示。

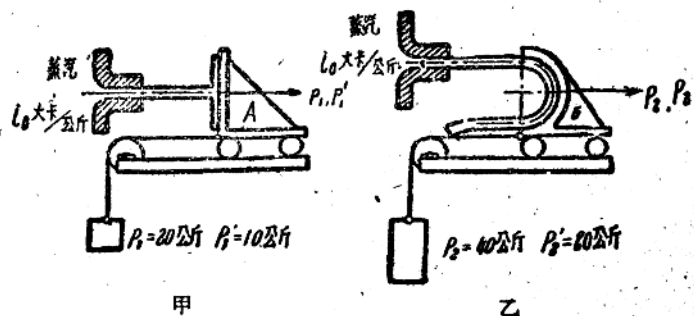


图6-5 汽流作用在不同表面叶片上的情形

(1) 平面固定不动，则汽流本身的动能，一部分转变成热能，一部分就散开或反跳回来。在这种平面不动的情况下，汽流没有发生有用的功。

(2) 平面可以移动，则汽流的部分动能转变为使平面移动的有用的功，另一部分动能如同作用在不动平面上的情况一样，被浪费了。

很明显，我们应尽量减少不能转变为有用功的能量；此外，还应避免汽流冲坏叶片的现象。因此必须选择适当的汽轮机叶片的形状，使喷出来的汽流平滑的进入叶片，并把最大一部分能量传递给叶片。

根据理论上的研究和实验证明，汽流冲向的叶片表面形状

最好是采用能引导汽流转换方向的，并使进退方向彼此相反，因为汽流对这种形状的叶片的作用力将等于对平面叶片的作用力的二倍（如图6-5乙）。也可以证明，汽流对叶片的作用力将随着进、出叶片方向的夹角增大而减小。

用力学知识可以解释汽流对叶片的作用力。沿曲面运动着的汽流，以离心力作用于叶片各个方向上，推动叶片做机械功。

图6-6表示一个半圆形叶片，蒸汽沿着叶片表面流动。蒸汽所以能沿着曲面运动，是因为叶片对汽流有作用力（向心力），叶片也因此受到汽流的反作用力（离心力）。离心力作用在汽流的每一点上，方向都是指向外面，并通过叶片曲面的中心。为了便于研究汽叶所受的综合力量。可把每一小节汽流的离心力 P 分成和叶片运动方向相平行并且和叶片运动方向垂直的两个分力 P_1 和 P_2 。

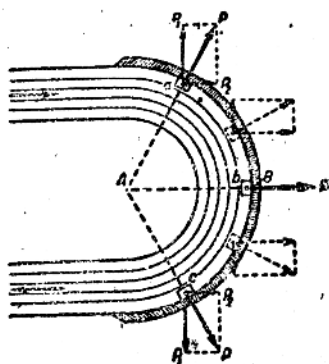


图6-6 在叶片上汽流的离心力作用

现在我们来看 a 、 b 、 c 三小节汽流的作用情况。

如果我们所取的 a 、 b 、 c 这三小节汽流的质量相同，运动速度相同，这就决定了它们作用在叶片上的离心力相等，都等于 P 。从图上可以看到， a 、 c 两小节汽流和叶片运动方向相垂直的分力 P_1 ，是大小相等、方向相反，恰好互相抵消，而对叶片运动没有任何影响；和叶片运动方向相平行的分力 P_2 ，推动着叶片运动。 b 小节汽流和上面情形不同，因为它的垂直方向分

力 $P_1=0$, P 和叶片运动方向一致, 全部有效。

同理可以証明, 所有作用在叶片上的汽流与叶片垂直方向的分力部分將互相抵消, 对叶片运动沒有任何影响。在 B 点兩側的其他汽流, 愈是靠近 B 点, 对叶片的有效作用力愈大。

汽流作用在叶片上离心力的合力等于汽流作用在叶片上离心力与叶片运动方向相平行的有效分力之和。此作用力乘以叶片运动距离, 即为汽流对叶片所做的有用功。

实际上由于受到制造上的限制, 进入叶片的汽流的方向并不与运动方向一致, 而成为一个角度, 这就决定了叶片不是半圓形的。为了使汽流进入叶片沒有撞击, 叶片橫截面形状是由一些直綫和曲綫組成的, 这样能很好地利用汽流速度。

(二) 单級汽輪机

从前面几节里, 我們了解到蒸汽在噴咀和叶片中的工作过程和工作原理, 噴咀和叶片是冲动式汽輪机的基本部分, 因此, 現在我們有条件来研究蒸汽在冲动式汽輪机里的工作过程了。

6-7 图表示一座簡單的冲动式汽輪机。图的中部表示簡單汽輪机構造, 轉子軸 1 上安裝着叶輪 2, 一系列工作叶片裝在叶輪周圍的边緣上, 这些構成簡單汽輪机轉动部分, 称为轉子。一組或几組噴咀 4 安裝在外壳 5 上面, 正对着汽叶, 这两部分構成簡單汽輪机的固定部分。

图的下部表示汽輪机的噴咀及叶片在 1—1 截面上的俯视图。从图的这一部分里可以看出蒸汽的流动情形。

图的上部用坐标表示了蒸汽在流过噴咀和叶片时, 压力和速度变化的情形。橫坐标表示蒸汽流动的部位, 縱坐标表示蒸汽压力和蒸汽流动的速度。

新蒸汽以压力 P_0 及速度 C_0 进入噴咀, 在噴咀里膨胀, 压

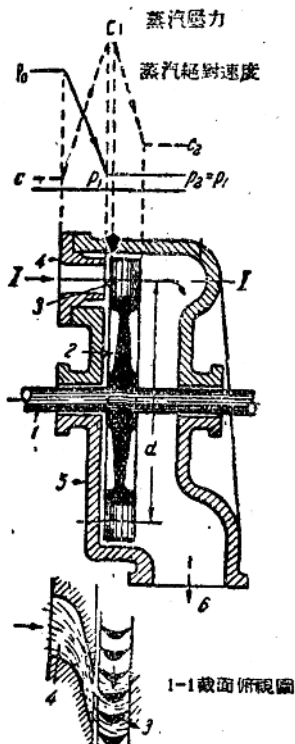


图6-7 单级冲动式汽轮机的断面示意图

1—轴；2—轮盘；3—叶片；4—喷嘴；5—壳；6—排汽管。

力降低到 P_1 ，速度升高到 C_1 ，汽流以这样的速度进入工作叶片。由于离心力作用叶片上的结果，使叶片带动着叶轮运动，轴转动就发生了有用的机械动力。汽流在叶片中流动，转变了方向，汽流的动能转变为汽轮机转子的回转机械能，使汽流离开叶片时运动速度降低到 C_2 。因为沿槽道各断面相同，蒸汽不再发生膨胀，工作完了的蒸汽压力 $P_2 = P_1$ 。工作完了的蒸汽称为乏汽，经过排汽管 6 离开汽轮机。

这种汽轮机是由一系列喷嘴和一系列工作叶片组合成的，我们称它为单级冲动式汽轮机。由于它功率小，效率低，但转速又很高，因此在电厂中仅适用于带动油泵或水泵。它之所以不能制造大功率主要是受材料强度的限制。因功率要大，则将在喷嘴内利用较大的焓降，而较大的焓降，将引起蒸汽喷射速度的增加，伴随着汽机圆周速度也将增加，圆周速度增加的结果将使叶片受着很大的离心力，根据计算

圆周速度超过 400 公尺/秒时，叶片的离心力将引起一种极大的应力，这是目前材料强度所达不到的，因而就限制了圆周速度的提高，要达此目的是减少通过喷嘴时所产生的热焓降故又

限制了功率的增大。

要想利用較大熱焓降，並減低圓周速度還要提高汽輪機的經濟性則應採用壓力多級與速度多級。才能得到解決。

(三) 壓力多級汽輪機

製造壓力多級汽輪機，是為了把原來從鍋爐壓力一次膨脹到排汽壓力這樣大的壓力降下分成幾次完成，因而蒸汽每次膨脹所發生的壓力降下並不大。

如圖 6-8 中所表示的，水槽內水面比噴咀 1 高出 500 公尺，則噴出水流速度應該是 100 公尺/秒，由此可以得出水輪圓周的最高速度是 100/2 秒。若水輪直徑為 0.5 公尺，即需要轉速 2000 轉/分。如果按圖的右側表示的那樣，把 500 公尺高的水分成四段落下，則噴咀 2、3、4、5 各有 125 公尺高的水從那里流出。這樣，水的噴射速度將不是 100 公尺/秒，而只是 50 公尺/秒，安裝在同軸上的水輪圓周速度為 $50/2 = 25$ 公尺/秒，在同樣的水輪直徑的條件下，水輪轉速只有 1000 轉/分。如計算水輪得到功的量，在不考慮第二種情況下稍大的摩擦損失，則都是相等的。

壓力多級汽輪機，可以當做是由一些順次排列起來，並裝在同一軸上的單級汽輪機組成的。蒸汽在第一段汽輪內消耗一些壓力降下以後，進入第二段，接着進入第三段。只要蒸汽與大汽或凝結器真空有相當的壓力差，這個過程將繼續進行。

從前面所講的材料里可以知道，蒸汽從噴咀中出來的噴射速度為

$$C_1 = 91.5 \sqrt{i_0 - i_1}$$

如果把多級汽輪機內整個壓力降低平均分配給每一級（與單級輪機一樣，一系列噴咀和一系列葉片組成一級），則每一級噴射

速度为

$$C_1 = 91.5 \sqrt{\frac{i_0 - i_1}{z}}$$

由此与單級汽輪机相比較，每一級喷射速度为 $1/\sqrt{z}$ 。因为所有的輪盤都裝在同一軸上，相当的叶片速度都保持 $u/c_1 = 1/2$ 的关系，所以叶片最合适的圓周速度比單級汽輪机要减少 $1/\sqrt{z}$ 。

假如和利用相等的热焓降下的單級汽輪机相比較，級数

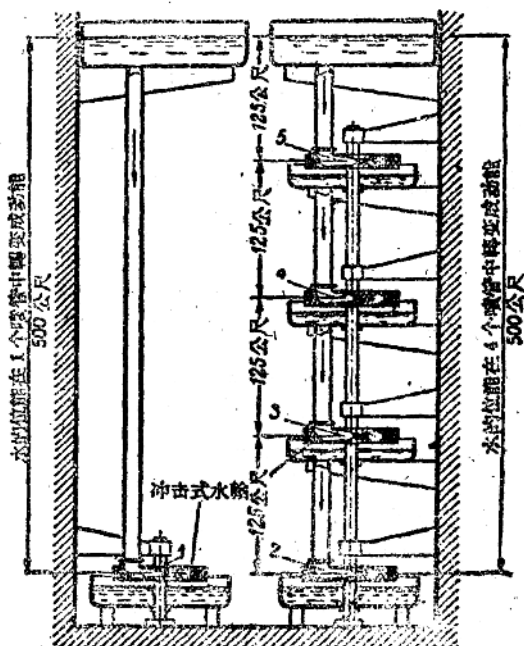


图 6-8 压力多級汽輪机的示意图

$z=9$ 的多級汽輪机的最好的圓周速度仅仅是它的三分之一；若 $z=16$ ，則为四分之一。

图 6-9 中可以看出，汽輪机本体被隔板分为三个汽室，在隔板的圓周上有噴咀，蒸汽由前面的汽室通过噴咀进入下一个汽室。蒸汽膨胀按下列方式进行：从鍋炉来的高压蒸汽进入环形汽室 1，在它的圓周上滿布着噴咀 2，在噴咀 2 內通过时有相当的压力降下，蒸汽离开噴咀时获得一定的速度噴射到叶片上，于是就將动能傳遞給叶片 3。经过叶片 3 蒸汽速度降到 C_1 ，但繼續经过噴咀 4 时，蒸汽又有相当膨胀，压力降下，速度升高，蒸汽的动能傳遞給叶片 5。在以后各級中，也將这样繼續进行，蒸汽膨胀，压力降下，直到与排汽管压力（大气或凝汽压力）相同时为止。

这个过程很容易从图 6-9 上部的曲綫看出来。曲綫表示各級噴咀、叶片前后蒸汽压力和速度变化的情况。如果和图 6-7 相比較，可以看出單級汽輪机工作过程在这里重复三次（这正是压力級数）。压力降下是后一級比前一級少，而蒸汽噴射速度則大致是相同的。

汽輪机的級数相当多时，每一級压力降下不大，蒸汽噴射速度低于临界速度，因此，在多級汽輪机內采用漸縮漸扩形的噴咀是不必要的。在新式汽輪內，按規定都只用漸縮噴咀，以后將研究蒸汽在漸縮噴咀斜切口上膨胀而压力降到临界点以下的問題。

汽輪机各級热焓降下有时是平均相等的，但一般在头一級或最后几級的热焓降下要稍大一些；头一級稍大是因为它有較大的压力降下，可以减低汽輪机內部的压力和温度；最后几級較大是由于有較大的热焓降下，蒸汽流动速度高，可减低最后几級的叶片高度。

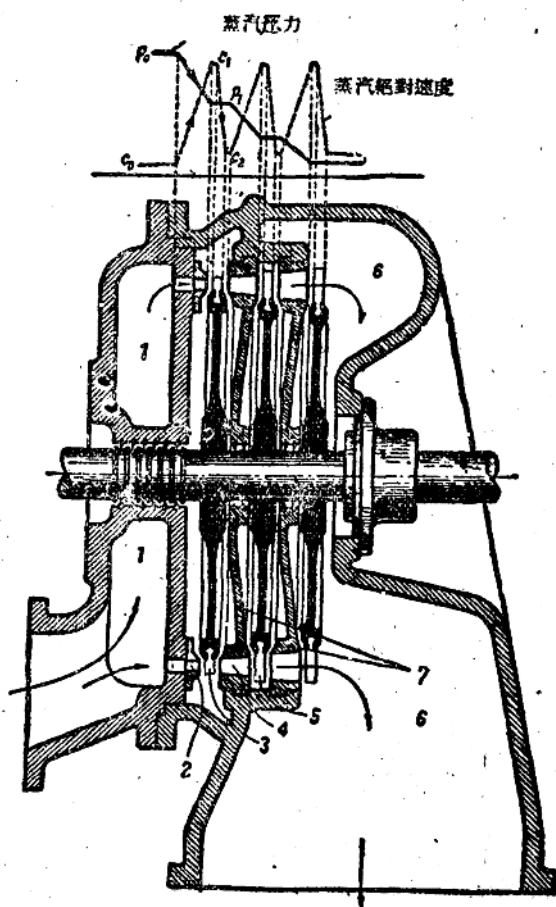


图 6-9 三压力级冲动式汽轮机纵断面示意图

1—环形汽室；2—第一级喷嘴；3—第一级工作叶片；4—第二级喷嘴；5—第二级工作叶片；6—排汽管；7—隔板。