

# 汽 輪 机

張 保 衡編著

农村发电厂小丛书之二



电力工业出版社

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 蒸汽的性質和測量仪表 .....    | 2  |
| 第一节 蒸汽的基本性質 .....       | 2  |
| 第二节 蒸汽的測量仪表 .....       | 6  |
| 第二章 汽輪机的工作原理 .....      | 9  |
| 第一节 发电厂的汽水系統 .....      | 10 |
| 第二节 汽輪机的工作原理 .....      | 13 |
| 第三章 汽輪机的構造 .....        | 19 |
| 第一节 汽輪机的靜止部分 .....      | 19 |
| 第二节 汽輪机的轉动部分 .....      | 29 |
| 第三节 汽輪机的調速裝置 .....      | 34 |
| 第四节 汽輪机的油系統 .....       | 42 |
| 第四章 汽輪机中的損失和效率 .....    | 45 |
| 第一节 汽輪机中的損失 .....       | 45 |
| 第二节 汽輪机的效率 .....        | 47 |
| 第五章 凝汽設備 .....          | 49 |
| 第六章 汽輪机的运行 .....        | 57 |
| 第一节 汽輪机的起動 .....        | 58 |
| 第二节 汽輪机运行中應該注意的事項 ..... | 68 |
| 第三节 汽輪机的停機 .....        | 73 |
| 第七章 汽輪机的一般故障 .....      | 77 |
| 第八章 汽輪机的檢修 .....        | 79 |
| 第九章 汽輪机設備維護的技术保安 .....  | 80 |

# 第一章 蒸汽的性質和測量仪表

## 第一节 蒸汽的基本性質

### 一、蒸汽的測量單位：

压力 蒸汽盛在一个容器里，总要佔据整个容器内部而不留任何空隙，并且还要向外膨胀，因此，蒸汽在各个方面都有一种向外推的力量。蒸汽对容器四週所作用的力量，就是蒸汽的压力。1平方公分的面积上受到1公斤的作用力，叫做一个單位压力，也叫一个大气压，用公斤/公分<sup>2</sup>来表示。压力也可以用水柱的高度来表示，一平方公分的面积上受到一公斤的重量，就等于一平方公分面积上有10公尺高的水柱，因为1公分<sup>2</sup>×10公尺=1公分<sup>2</sup>×1000公分=1000公分<sup>3</sup>=1公斤水的重量。

所以，1公斤/公分<sup>2</sup>=1大气压=10公尺高的水柱/公分<sup>2</sup>(温度在4°C时)。

压力也可以用水銀柱的高度来表示，水銀比水重13.6倍，10公尺高的水柱= $\frac{10\,000\text{公厘}}{13.6}=735.6$ 公厘水銀柱高。

所以，1公斤/公分<sup>2</sup>=1大气压=735.6公厘水銀柱(温度在4°C时)。

用10公尺的水柱或735.6公厘的水銀柱所表示的压力，是工業上常用的压力，叫做一个工業大气压或叫做一个技术大气压。另外还有一种是标准大气压或叫物理大气压，是在海平面处所量的水銀柱高的压力。1标准大气压=760公厘水銀柱=10.33公尺水柱。

一个工业大气压与一个标准大气压的关系是：

$$1 \text{ 标准大气压} = \frac{760}{735.6} = 1.033 \text{ 工业大气压。}$$

密闭容器里蒸汽的压力，可以比一个大气压力高，也可以比一个大气压力低。要看容器里蒸汽的稠密和稀薄的程度而定。测量压力大小的方法，将在下面讲述。

**温度** 蒸汽的温度是指蒸汽冷热的程度，它可以代表蒸汽里含有热量的多少。

温度的单位最常用的有两种：一种是摄氏温度以“°C”表示；一种是华氏温度以“°F”表示。

摄氏温度是把水的沸点定为 100 度，把冰点定为 0 度，将 0 度与 100 度之间的距离分成 100 等分，每等分就代表摄氏 1 度。

华氏温度是把水的沸点定为 212 度，把冰点定为 32 度，将 32 度与 212 度之间的距离分成 180 等分，每等分就代表华氏 1 度。

发电厂里测量蒸汽温度的单位，都是采用摄氏温度。

**流量** 蒸汽的流量是指在一定时间里流过蒸汽的多少，一般用公斤/秒作单位，意思是指每秒钟内流过多少公斤的蒸汽；也常用公斤/小时作单位，是指每小时内流过多少公斤的蒸汽。

**比容** 水变成蒸汽后，体积急剧膨胀，为了在各种不同的压力下比较蒸汽的体积，把一公斤重的蒸汽佔有多少立方公尺的体积叫做蒸汽的比容。比容的单位是公尺<sup>3</sup>/公斤。蒸汽的压力越大，比容越小，这是因为蒸汽在较高的压力下，体积被压缩的结果。

**二、蒸汽的发生** 如果在瓶子里装上水，水面上安一个温度计，瓶子下面放一个酒精灯来烧，水的温度就会慢慢上

升。当溫度計表示的溫度到了  $100^{\circ}\text{C}$  的時候，水就沸騰，並且開始蒸發出蒸汽來。這種由水變化成蒸汽的過程，叫做汽化過程。水在沸騰時的溫度叫做“沸點”，沸點的高低和水面上所受壓力的大小有關。例如上面所說的情形，開口的瓶子，水面上所受的壓力是一個大氣壓，水的沸點應該是  $100^{\circ}\text{C}$ 。

假使水在一密閉的鍋爐內，外面加熱使它產生蒸汽，則所生的蒸汽被壓縮，故蒸汽的壓力升高，以致水的沸點溫度和蒸汽的溫度也升高。例如，在 30 大氣壓的鍋爐汽包里，蒸發時水的溫度就不是  $100^{\circ}\text{C}$ ，而是  $232.76^{\circ}\text{C}$ 。又如在高山上加熱一開口盛水的容器，因大氣壓力比較低，則容器內的水不到  $100^{\circ}\text{C}$  即開始汽化。但是水在蒸發過程中，水的溫度仍然永遠保持着不變，並且蒸發出來的蒸汽的溫度也永遠等於水的溫度。所以由沸水所生的蒸汽，其溫度和沸水的溫度相同，在這種情形下所形成的蒸汽，叫做“飽和蒸汽”。

水開始沸騰時的溫度，及保持到最後一滴水蒸發時的同一溫度，就是上面所說過的沸點，也叫做“飽和溫度”。

我們已經知道，飽和蒸汽的溫度與水表面所受的壓力有關，即壓力越高，沸點也越高。但是在一定的壓力之下，飽和蒸汽永遠有一定的溫度，反過來說，一定溫度的飽和蒸汽，也永遠有一定的壓力。

當飽和蒸汽從水里蒸發出來的時候，常常會有很細的水珠混在里面。所以混有這些水珠，是在水蒸發得很快時候被蒸汽帶出來的，也有的是因為蒸汽遇冷，有一部分又凝結成水所造成的。有水珠混合在一起的飽和蒸汽叫濕飽和蒸汽，而不含水分的飽和蒸汽叫干飽和蒸汽。

1 公斤濕蒸汽中所含干蒸汽的重量，叫做蒸汽的干度。

例如 1 公斤的湿蒸汽里如有 0.1 公斤水珠，它的干度就是 0.9，对于饱和蒸汽来说，干度等于 1。

如果把饱和蒸汽继续加热，并使压力保持不变，则蒸汽的温度将上升，同时蒸汽的容积也将增加，这样得到的蒸汽叫做“过热蒸汽”。简单地讲，在同一压力下，温度高于饱和温度的蒸汽，叫做过热蒸汽。例如 20 大气压的过热蒸汽，温度如果是  $300^{\circ}\text{C}$ ，饱和温度是  $211.38^{\circ}\text{C}$ ，所以温度高了  $300^{\circ}\text{C} - 211.38^{\circ}\text{C} = 88.62^{\circ}\text{C}$ 。

三、发生蒸汽所需要的热量 由水变为蒸汽，所用的热量可分为三部分：

(1) 由零度的水加热到水的沸点温度所用的热量，叫做“沸水含热量”或“液体热”。

(2) 使沸点温度的水变为沸点温度的蒸汽(即饱和蒸汽)，所用的热量，叫做“蒸发热量”或“汽化热”。

(3) 在相同的压力下，使沸点温度的饱和蒸汽变为温度较高的过热蒸汽所用的热量，叫做蒸汽“过热的热量”。

现在简单的将以上几点来谈一谈。在正常的大气压力下(760 公厘水银柱高)，将一公斤的水使它的温度升高一度所需要消耗的热量，叫做一个“大卡”。所以水从  $0^{\circ}\text{C}$  加热到多少度，便应消耗多少大卡的热量。

当压力不变时，把  $0^{\circ}\text{C}$  的水加热到水的任一温度，所需要的热量叫做水的“含热量”，以大卡/公斤度量。在任何温度时，水的含热量与其温度可认为相等。

例如水的温度为  $90^{\circ}\text{C}$ ，其含热量即等于  $0^{\circ}\text{C}$  的水加热到  $90^{\circ}\text{C}$  所需消耗的热量，即 90 大卡/公斤。

加热冷水到沸点温度后，即开始汽化。从沸点温度的水起到全部蒸发成蒸汽，这一段过程中所加入的热量叫做“汽

化热”，也叫“蒸發热量”。

水到了沸点后，虽繼續吸收热量，但溫度不再升高，始終保持着沸点溫度不变，直到全部沸水化为蒸汽后，繼續对蒸汽加热，蒸汽溫度才会上升。这是因为在汽化过程中所吸收的热量是用来分离水的分子，增加分子运动的动能，把分子与分子的距离加大，以便使水变为蒸汽。

水在全部蒸發的时候，变成的是干饱和蒸汽。因此，沸水含热量加蒸發热量就等于干饱和蒸汽的含热量。

反过来，在一定压力下，从干饱和蒸汽中取出蒸發热量，蒸汽就会变成水，这种现象叫做“凝結”。在凝結过程中，同样是保持溫度不变，即蒸汽和凝結水的溫度相等。

要得到过热蒸汽，必須將干饱和蒸汽繼續加热，因此，需要再加热量，这一部分热量，叫做蒸汽“过热的热量”。

由此我們可以知道，在一定的压力下，蒸汽的溫度越高，它所含的热量也越大。

## 第二节 蒸汽的測量仪表

压力表 測量蒸汽压力大小的仪表叫做压力表，最常用的彈簧式压力表的構造如图 1 所示。彈簧管 1 是弯成圓弧形的扁平椭圆形空心銅管，一端封閉，另一端开口，經压力表的管接头 2 与測量压力的空間相連通。当彈簧管受到压力的作用时，就会稍为伸直，并通过傳动桿和扇形齿輪使指針轉动。根据指針指示的位置，在表盤上就可以直接讀出压力是多少。

压力表所測量的蒸汽压力叫做表压力，用技术大气压来表示，單位是公斤/公分<sup>2</sup>。当蒸汽的压力等于大气压力的时候，汽压表上的指針始終指在 0 的位置上，只有在蒸汽压力

超过了大气压力的时候，表上的指针才开始转动，所以表上所指示的压力数值是蒸汽压力超过大气压力的部分。如果要知道蒸汽本身的压力是多少，就要把表压力再加上一个大气压力，这叫做蒸汽的绝对压力。

**真空表** 测量比一个大气压力低的压力，也就是说测量密闭容器内稀薄气体或汽体的压力时，使用真空表。

真空表上指示的压力是由 0 到 1 个大气压。真空是用水银柱的高度来表示的。真空表有两种，一种是弹簧式真空表，另外一种是水银真空表。常用的水银真空表的构造如图 2 所示。用一根两端开口的 U 形玻璃管，一端用胶皮管和稀薄气体的空间连接，另外一端和大气连通。

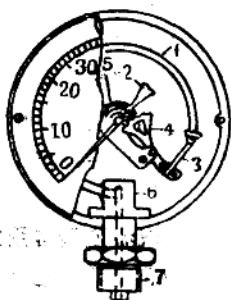


图 1 弹簧式压力表

1—弹簧管；2—指针；3—传动杆；4—扇形齿轮；5—游丝；6—支座；7—管接头。

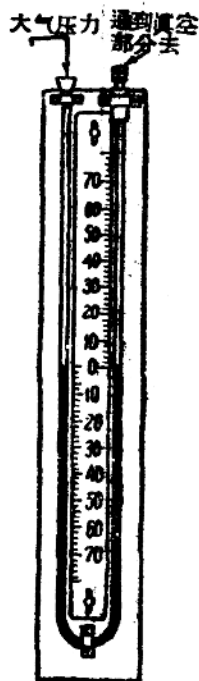


图 2 水银真空表



將水銀注入管子的中央位置，使刻度上的 0 字正好指在這個位置上，以 0 為中心，向上和向下量得的刻度数相同，這樣就可以讀出真空的數值。

假如當地的大氣壓力是 760 公厘水銀柱，在真空表上的指示數字是 700 公厘，那麼所測量的絕對壓力就等於  $760 - 700 = 60$  公厘水銀柱。

如果把上面的絕對壓力換算成大氣壓來表示，則測量的絕對壓力 =  $\frac{760 - 700}{735.6} = \frac{60}{735.6} = 0.082$  大氣壓，也就是 0.082 公斤/公分<sup>2</sup>。

平常多用真空度來表示真空的情況，已知道了絕對壓力，就可以用下面的方法求出真空度。如上面的例子：

$$\begin{aligned} \text{真空度} &= \left( 1 - \frac{760 - 700}{735.6} \right) \% \\ &= (1 - 0.082) \% = 91.8\% \end{aligned}$$

彈簧式真空表的內部構造和彈簧式壓力表完全相同。表盤上的讀數，可以是大氣壓，也可以是公厘水銀柱，但不如水銀真空表準確。

**溫度計** 測量蒸汽溫度最常用的儀器是水銀溫度計，如圖 3 所示。它是用一種管孔非常細小和均勻的玻璃管制成的，管的下端有一個球形或圓柱形的玻璃泡，在這個泡里裝有水銀，玻璃管上刻有刻度，當水銀球遇熱時，管中的水銀就膨脹上

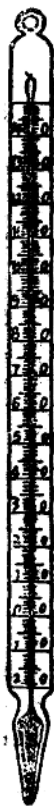


圖 3 水銀溫度計

升到一定的位置，根据玻璃管上的刻度，就可以直接讀出溫度是多少。



圖 4 帶有金屬套的水銀溫度計

校對水銀溫度計的指數是否正確，可以把水銀球放在正在溶解的冰里，經過相當時間後，看它的指數是不是  $0^{\circ}\text{C}$  (攝氏溫度計)。

用水銀溫度計測量管子里蒸汽、水或油的溫度時，要作一個金屬套，在管子上鑽一個孔，將金屬套緊裝在管孔內，溫度計再放在套子里。溫度在  $250^{\circ}\text{C}$  以內時，套管內可以放油，在  $340^{\circ}\text{C}$  以內時放水銀，超過  $340^{\circ}\text{C}$  時應墊以鉛片或銅屑。圖 4 是帶有金屬套的水銀溫度計。

## 第二章 汽輪機的工作原理

汽輪機也叫蒸汽透平，它是利用蒸汽作功的一種原動機。用汽輪機帶動發電機的發電設備，叫做汽輪發電機。

在小型發電廠里，除了使用汽輪機外，也有用往復式蒸汽機或內燃機的，不過比較起來，汽輪機最經濟可靠，轉動起來也平穩，所以現代化的發電廠，絕大多數是用汽輪機來做原動機的。

用汽輪機帶動發電機，必須要有鍋爐來供給蒸汽，而鍋爐必須燒煤，所以這種發電廠叫做火力發電廠。

汽輪發電機能够發出多少電力，叫做汽輪發電機的“容量”。容量的大小用千瓦來表示，寫作“瓩”。一個瓩大約等於一個“馬力”的1.35倍。在農村里，發電廠的容量都比較小，因此，本書下面所講的內容，主要是以小型汽輪機作為討論的對象。

## 第一節 發電廠的汽水系統

在火力發電廠里，水蒸汽佔着相當重要的地位，通過它才能推動汽輪機轉動，帶着發電機發電。火力發電廠的汽水系統以及系統內的各項設備如圖5所示。煤在燃燒的時候發出熱能，使燃燒所形成的煙氣具有很高的溫度，煙氣帶着熱量從鍋爐水管外面穿過去，把大部分的熱量傳給管內的水，使水的溫度昇高到相當於鍋爐壓力的沸點，然後蒸發成蒸汽。蒸汽從鍋爐汽包里流出來，然後流進過熱器管，再從煙氣里吸收更多的熱量，成為含熱量很多的高壓力、高溫度的過熱蒸汽。通過蒸汽管路，過熱蒸汽流到汽輪機去，蒸汽在這裡膨脹產生很高的速度，推動汽輪機轉子上的葉片，使轉子轉動起來，汽輪機帶着發電機轉動，發出電來。

隨着蒸汽在汽輪機里膨脹，蒸汽的壓力和溫度逐漸地降下來，在離開汽輪機的時候，壓力已經比大氣壓力低了很多，溫度也已接近空氣的溫度。工作後的蒸汽直接進入凝汽器，在凝汽器里，蒸汽遇到凝汽器銅管，被銅管里的冷卻水吸收去大部分的热量，又凝結成水，流到凝汽器下部的小水包里。用來冷卻蒸汽用的冷卻水，一般是從河里或湖里用水泵打進凝汽器的銅管里，吸收了蒸汽的熱量以後，又流回到河里或湖里去，這種冷卻水叫做循環水。

小水包里的凝結水由凝結水泵吸出來，經過加熱器，打

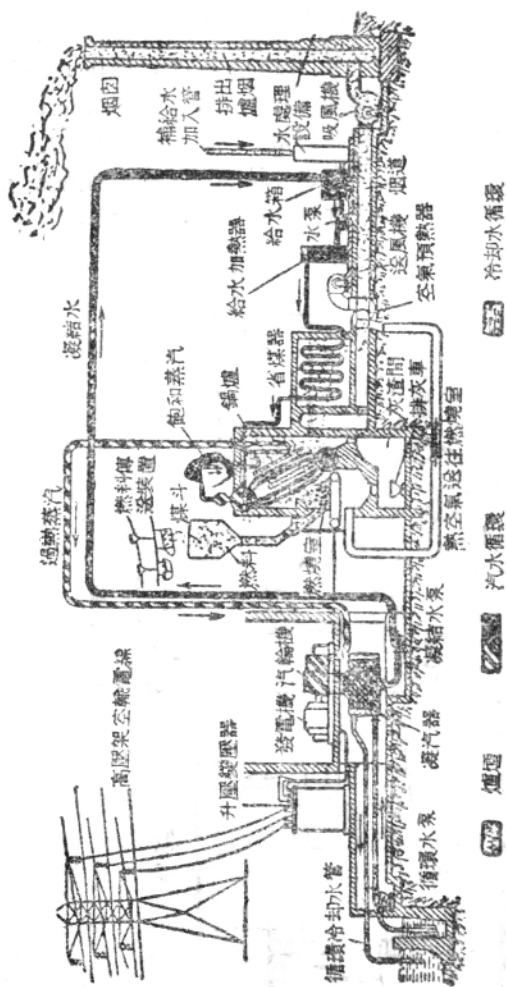


圖 5 火力發電廠設備示意圖

进热水箱。从汽轮机里抽出来的一小部分蒸汽送到加热器内给凝结水加热，这部分蒸汽在汽轮机里已经作了一些工作，压力降低了一些，温度还不很低，还含有相当的热量。这部分蒸汽在加热器里把热量传给凝结水，在它的温度与凝结水温度平衡了以后，它本身也凝结成水，离开加热器的时候，就同凝结水混在一起流进热水箱。加热凝结水，目的是使它

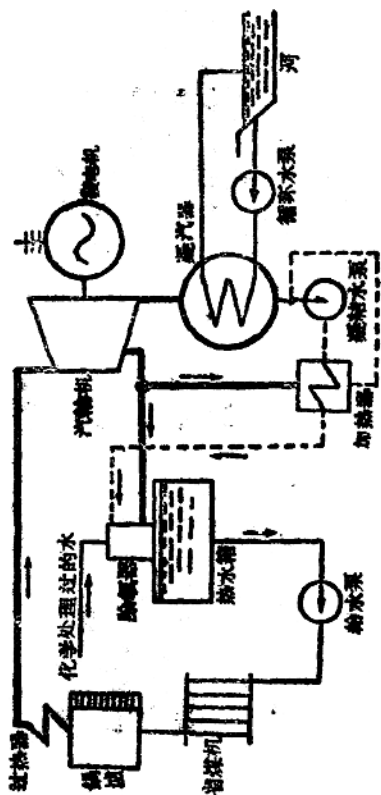


图 6 简单的热力系统图

在回到鍋爐以前，溫度升高一些，到鍋爐后能少吸收一些熱量就又蒸發成蒸汽，可使鍋爐少燒一些煤。

用鍋爐給水泵把热水箱里的热水打进鍋爐的省煤器去，利用从鍋爐里出来的热烟气把这热水的溫度提高到接近蒸發的溫度，然后进入鍋爐，重新蒸發。

水和水蒸汽就这样在鍋爐里吸收煤的熱能，在汽輪机里把熱能变成动能。蒸汽在汽輪机里工作之后凝結成水。这样不断的循环着，就組成了發電厂的汽水系統。

水和水蒸汽在这样的循环工作过程中，总会有少量的蒸汽或水被損失掉，所以必須不断补充生水。补充的水需要先經過水处理設備，减小水的硬度并去掉水里的氧气才不致在鍋爐和汽輪机里結成水垢或發生腐蝕。补充水經处理后，直接进入热水箱里。

在实际生产工作中，所有的設備都是用代表符号来表示的，如圖 6 所示。从圖上可以看出热力系統的組織和各項設備彼此之間的关系。圖上的粗綫代表主蒸汽管路，細綫代表水管，虛綫代表凝結水管路。

## 第二节 汽輪机的工作原理

前面講过，汽輪机是利用蒸汽作功的一种原动机。它的工作原理，可用一簡單的風車來說明，如圖 7 所示。風車上的四个帆裝在一根軸上，軸和風的方向平行，而帆則和風的方向成一相当角度。当風吹到帆上时，帆和軸則一起轉动。并且可以利用它來作功，例如磨面粉，抽水等。

汽輪机的工作原理和風車相似，不过不是用天然的風，而是用人工制造的蒸汽來代替。它的工作原理，可用圖 8 來加以說明。在一根軸上，裝着一個輪盤，輪盤的邊緣上裝着



圖 7 風車的轉動

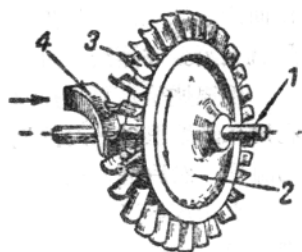


圖 8 汽輪機的工作示意圖

1—軸；2—輪盤；3—葉片；4—噴嘴。

很多弧形的葉片，用流動着的蒸汽推動葉片，輪盤就可以轉動，正如風車被風一吹就可以轉動一樣。風越大，風車轉動得越快。汽輪機也是一樣，蒸汽流動得越快（即速度越大），輪盤轉動也越快。

為了增大蒸汽流動的速度，並且能按照一定的方向流動，先讓高壓高溫的蒸汽通過一個叫做噴嘴的固定導管，蒸汽在噴嘴里膨脹，壓力降低，流動速度就增大，高速度蒸汽吹向鑲在輪盤上的葉片的凹面，輪盤就可以轉動。裝着弧形葉片的輪盤，叫做葉輪。

蒸汽的全部膨脹過程均發生在固定不動的噴嘴里的汽輪機，叫做衝動式汽輪機。簡單的衝動式汽輪機，如圖 9 所示，只有一個葉輪，叫做單級衝動式汽輪機。

在這種汽輪機里，為了有效地利用蒸汽的能量，葉輪的圓周速度（或者說葉片速度）最好是等於蒸汽從噴嘴中流出的速度的一半。例如蒸汽的速度是 1000 公尺/秒，葉輪的圓周速度應當是 500 公尺/秒。我們知道，蒸汽噴射的速度是根據壓力降來決定的。即使是用我們目前的 15 大氣壓和  $300^{\circ}\text{C}$  的低壓蒸汽，凝汽器里也只有不太高的 90% 的真空（相當於 0.1 大

气压的出汽压力), 经过喷嘴可以得到的喷射速度就有 1280 公尺/秒。根据以上所述, 叶轮的圆周速度就应当是 640 公尺/秒。以这样高的速度旋转着的叶轮, 将会因为所产生的离心力太大而找不到适合的制造材料。因此, 单级冲动式汽轮机的容量被限制在不超过 1000 瓩的范围内。

为了充分地利用可能从蒸汽中获得的比较大的热能, 同时减低旋转速度到适当的转数, 可以采取两种办法来提高汽轮机的效率, 一种是速度分段的办法, 另一种是压力分级的办法。

速度分段的办法也是把压力差, 一次在一排喷嘴里降低下来, 使蒸汽以相当大的速度喷射出来。但是在一个叶轮上装有兩排或三排叶片, 从喷嘴出来的高速度蒸汽, 先喷向第一排叶片, 然后再经过一排静止不动的叶片, 使蒸汽的方向改变成原来的方向, 再喷射到第二排叶片上去。具有这样构造的汽轮机, 叶轮的圆周速度最好是等于蒸汽喷射速度的四分之一, 因而叶轮的圆周速度可以减小, 也就是说可以使汽轮机的转数减低一些, 这样就有条件制造出适用的汽轮机来。

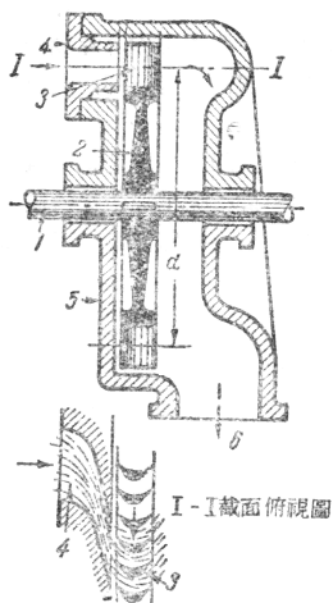


圖 9 單級冲动式汽轮机剖面图  
1—主軸; 2—叶轮; 3—叶片; 4—喷嘴; 5—汽缸; 6—出汽口。



上面所講，靜止的叶片，叫做导向叶片或靜叶片，叶輪上的叶片，叫做工作叶片或动叶片。圖 10 是一台 双速度 段冲動式單級汽輪機簡圖，圖中還示有蒸汽在叶片中的流动情况。

压力分級的办法是把可供利用的压力差分为若干級，每一級由一排噴嘴把那一級的壓力降变成噴射速度。适当的選擇級数，以便使每一級的壓力降不太大，蒸汽的噴射速度也

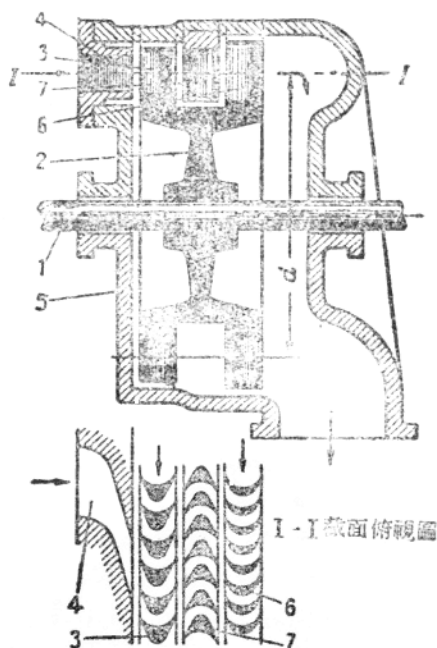


圖 10 双速度段冲動式單級汽輪機剖面簡圖  
1—軸；2—葉輪；3—第一速度段叶片；4—噴嘴；  
5—汽缸；6—第二速度段叶片；7—导向叶片。