



電力工業技工學校教材試用本

汽輪機設備

上 册

沈陽電力技工學校編

水利電力出版社



內 容 提 要

“汽輪机設備”分上、下兩册，上册叙述汽輪机工作原理，下册介紹汽輪机的構造及它的各主要部件。上册分为五章，分別講述了蒸汽能量在汽輪机中的轉換，汽輪机的損失和效率及蒸汽在噴嘴和工作叶片中的工作过程。还着重介紹了冲動式和反动式汽輪机的工作原理。

本書內容較淺顯，适用于电力技工学校的教材，也可作为現場工人培訓教材，並可作为汽輪机工人的進修讀物。

汽 輪 机 設 备 上 册

沈陽電力技工学校編

*

422R95

水利电力出版社出版（北京西便門外大街2號）

北京市書刊出版業營業許可證出字第105号

北京市印刷三厂印刷 新華書店發行

*

787×1092毫米开本 * 2页印張 * 45千字

1956年10月北京第1版

1959年4月北京第4次印刷(17,641—22,170册)

統一書号：15143·367 定价（第8类）0.24元

序 言

“电力工业技工学校教材試用本”原是沈阳电力技工学校1955年的教材，內包括鍋爐、汽机、电气三个专业（每一专业分运行和检修两班）的20余种教材。沈阳电力技工学校編写这套教材是以本校的教学计划和教学大綱为根据，这个教学计划和教学大綱是参照苏联技工学校的教学计划和教学大綱制定，經前电力工业部审查批准的。

由于电力技工学校的學員大都是初中程度的青年，他們都不懂技术，生活經驗也不丰富，因此，在編写这套教材时，尽量使內容浅显，說理簡明，通俗易懂，并且避免了一些复杂公式的煩瑣推演和証明。另外，因为这些學員在校毕业以后，經過現場短期的实习，就要投入生产，担負火力发电厂的运行或检修工作，所以教材的內容就特別注意到贯彻法規和規程，結合現場实习的需要，并在必要的地方作了浅近的解释，目的是使學員到达現場以后，很快地熟悉生产过程并掌握操作技术。因此，“电力工业技工学校教材試用本”不仅可供电力技工学校的學員学习，而且也可作为各发电厂培訓技术工人的教材，还可作为工人讀物。

随着国家电力工业蓬勃发展，电力技工学校和現場培訓工作也在迅速地前进。根据客观需要，决定将1955年的教材修訂出版。这套教材經中华人民共和国前电力工业部

教育司推荐作为电力工业技工学校教材試用本。

在編写此書时，主要的参考了C. M. 洛謝夫著的“汽輪机”和H. H. 施亚新著、庄前鼎、方崇智、敦瑞堂譯的“汽輪机”等書，在这里謹向著譯者致謝。

由于修訂時間短促，虽然尽了最大努力，但限于水平，因而不完善的地方无疑是存在的，我們誠懇地希望讀者提出意見和批評，以便再版时修正。

瀋陽電力技工学校

目 录

序言

第一篇 汽轮机工作原理

第一章 蒸汽的能量在汽轮机中的转变过程	4
第1节 热能转变为动能	4
第2节 临界压力和临界速度	8
第3节 汽轮机内蒸汽工作的两种原理	10
第二章 冲动原理及冲动式汽轮机	12
第1节 冲动原理	12
第2节 单级汽轮机	15
第3节 汽轮机转轮圆周的适当速度	17
第4节 压力多级汽轮机	22
第5节 速度多级汽轮机	27
第三章 反动原理及反动式汽轮机	33
第1节 反动原理	33
第2节 反动式汽轮机	35
第3节 反动度	42
第四章 汽轮机的损失和效率	44
第1节 汽轮机的各项损失	44
第2节 汽轮机内部损失	45
第3节 汽轮机外部损失	52
第4节 热力过程在 $i-s$ 图上的表示	54
第5节 汽轮机的功率和效率	59
第五章 蒸汽在喷嘴和工作叶片中的工作过程	63
第1节 蒸汽在喷嘴内的工作过程	63
第2节 蒸汽在工作叶片中的工作过程	71

第一篇

汽輪机工作原理

第一章 蒸汽的能量在汽輪机中的轉变过程

第1节 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迴轉机械能。

蒸汽机和汽輪机的工作原理不同。

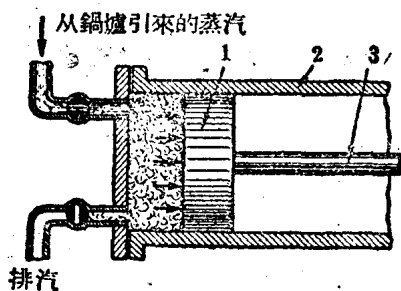


圖 1 活塞式蒸汽机的作用圖
1—活塞； 2—汽缸； 3—活塞桿。

如圖 1，蒸汽的位能在蒸汽机內直接轉变为活塞的动能，表现为活塞在汽缸內运动。通过連桿及拐臂机构，再

把活塞的直綫运动变成蒸汽机軸的迴轉运动，蒸汽机就是这样进行工作的。

在蒸汽机上，轉动軸每迴轉一周，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。往复运动可使各零件發生很大的变形，在机器迅速轉动时并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它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，如圖 2 所示，蒸汽在特殊形状的导汽槽道中——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迴轉机械能。

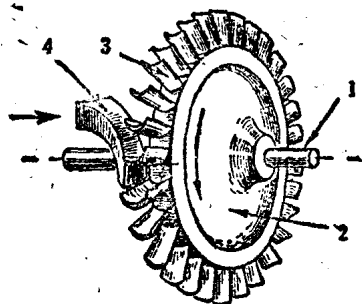


圖 2 簡單冲動式汽輪机結構圖
1—軸；2—輪盤；3—叶片；4—噴咀。

为了把蒸汽的位能变成动能，必須使来自鍋爐的有一

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决定的。对于一定的噴咀，蒸汽的初压力、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 $i-s$ 圖中可以看出，蒸汽初压力、温度愈高和背压愈低，通过噴咀的蒸汽的热焓降下就愈大；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 $P_0 = 16$ 千克重/厘米²(絕對)，温度 $t_0 = 300^\circ\text{C}$ ，絕热膨脹后的压力 $P_1 = 0.2$ 千克重/厘米²(絕對)，那么，热焓降下 183 大卡/千克，即每千克蒸汽失掉了 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，它不会無影無踪的消失掉，这 183 大卡热能是轉变为蒸汽的动能了。

由此可見，热能轉变成动能的規律可以用下面的話來說：1 千克蒸汽所获得的动能，相当于蒸汽在膨脹时的热焓降下。

以上所說，是指蒸汽在膨脹中沒有对外損失、蒸汽本身也沒有任何热交換的情況下产生的現象。因此可以推論：蒸汽在汽輪机中工作时，热焓降下的愈大，蒸汽噴射速度就愈高；也就是热能轉变成动能愈多，它作用于汽輪

机叶片上成为迴轉机械能也愈多。

1 千克蒸汽在膨胀时，所获得动能的量可按下列公式求得(这个公式是由工程力学中引来的)。

$$E = \frac{c^2}{2g} = \frac{c^2}{2 \times 9.81} = \frac{c^2}{19.62} \text{ 千克重米,} \quad (1)$$

E ——动能量(千克重米);

c ——蒸汽的喷射速度(米/秒);

g ——自由落体的加速度，等于 9.81 米/秒²。

另一方面，1 千克蒸汽在膨胀时，压力由 P_0 降到 P_1 ，热焓降下为 $i_0 - i_1$ ，利用以前学过的关于热功当量的概念，可以知道 1 千克蒸汽在膨胀时所做的功为：

$$W = 427(i_0 - i_1) \text{ 千克重米.} \quad (2)$$

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
$$c = 91.5\sqrt{(i_0 - i_1)} \text{ 米/秒.} \quad (3)$$

例如从 $i-s$ 圖查得，噴咀前蒸汽初压力 $P_0 = 16$ 千克重/厘米²(绝对)，温度 $t_0 = 300^\circ\text{C}$ ，热焓 $i_0 = 725$ 大卡/千克，絕热膨胀到終点压力 $P_1 = 0.2$ 千克重/厘米²(绝对)，热焓 $i_1 = 542$ 大卡/千克。

解
$$(i_0 - i_1) = 183 \text{ 大卡/千克,}$$

那么，蒸汽速度是：

$$c = 91.5 \times \sqrt{183}$$

$$= 1237 \text{ 米/秒}$$

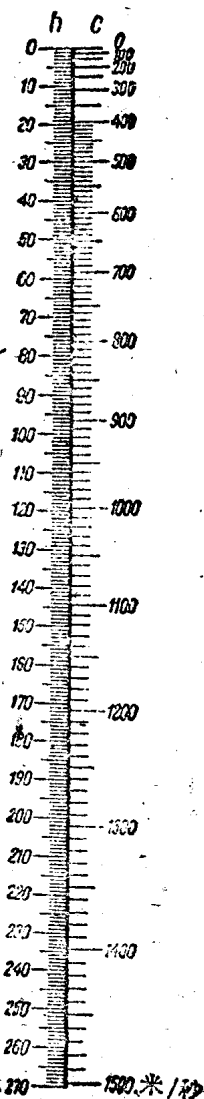
平方根值可利用数学表格查出。

喷射速度和它相对应的热焓降下 $h = (i_0 - i_1)$ 之间的关系，可以用圖 3 綫格表查出。左边表示热焓降下 h ，右边表示相应速度 $c = 91.5 \sqrt{(i_0 - i_1)}$ 米/秒。

第 2 节 临界压力 和临界速度

最初設計和制造汽輪机的人們，在研究蒸汽在噴咀中膨脹过程时，遇到如下的問題：如圖 4 所示，容器內裝着有相当压力的蒸汽，对外有圓筒型的（如圖 4 甲所示的）噴咀。汽流通过噴咀进入压力較低的空間，产生压力降下并获得一定的速度，

圖 3 綫格表
用以查出蒸汽的喷射速度
和对应的热焓降下



大卡/千克 270 1500 米/秒

但这些压力降下和获得的速度只能达到某一極限值。如容器內的蒸汽是干飽和蒸汽，那么，噴咀出口处蒸汽压力不能低于容器內蒸汽压力的 58% (較准确点說是 57.7%)，这个压力称为临界压力；和这个压力相适应的，有一極限速度，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。

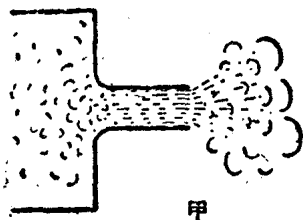


圖 4甲 蒸汽从等截面噴管噴出情况

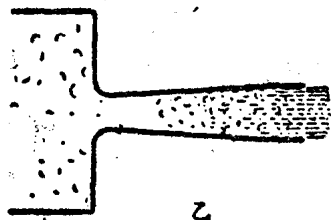


圖 4乙 蒸汽从漸扩噴管噴出情况

如：某容器內蒸汽是初压 $P_0 = 10$ 千克重/厘米² (绝对) 的干飽和蒸汽，容器外为大气，則圓筒噴咀出口处压力为：

$$P_1 = 10 \times 0.58 = 5.8 \text{ 千克重/厘米}^2 \text{ (绝对),}$$

也就是用以轉变为速度能的压力降下只有：

$$10 - 5.8 = 4.2 \text{ 千克重/厘米}^2.$$

蒸汽离开噴咀出口，在大气中繼續膨脹，發生扰动，在噴咀中心綫上不再增加速度；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。这件事事实告訴我們，蒸汽在圓筒噴咀中不能無限制的膨脹，只能达到某一定限度为止。可見初压力不超过背压一倍时，利用这种形状的噴咀才是合适的。比如把蒸汽

排到大气，那么，容器内压力 P_0 不应超过 1.8 千克重/厘米²（绝对），这样的喷嘴被称为渐缩喷嘴。

如果采用如图 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，压力继续降低，流速继续增加。渐扩部分的形状可以设计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有可能超过临界速度，这样，我们就可以把全部压力降和相应的热焓降都利用了。可见，在喷嘴后背压力小于临界压力的时候，采用渐缩喷嘴是不合适的，必须采用渐缩渐扩喷嘴；因为，渐缩渐扩喷嘴在使用上不受压力降的限制，无论压力降下多少，都可利用它把蒸汽的位能变成冲击的动能。

第 3 节 汽轮机内蒸汽工作的两种原理

前面说过，利用蒸汽在汽轮机内膨胀时所做的功，获得有用的回转机械能，其大小决定于蒸汽在汽轮机内产生的热焓降下的大小，在实际汽轮机中，热能从转变成汽流的动能，再转变成回转机械能有不同的方式，这要随着汽轮机的型式决定。汽轮机有两种基本型式：1) 冲动式；2) 反动式。

在本章第 1 节里介绍的蒸汽膨胀只发生在固定喷嘴内，实际上现代所采用的汽轮机中，蒸汽的热焓降下仅仅发生在喷嘴中的情形是很少见的，蒸汽的膨胀不仅发生在

进入可动的工作叶片以前(即喷嘴内),同时还发生在工作叶片本身的槽道内,这种汽轮机称为带有反动度的冲动式汽轮机。因为这样做蒸汽才能在工作叶片内顺利地通过;另外还有许多好处,将在以后的几节里说明。

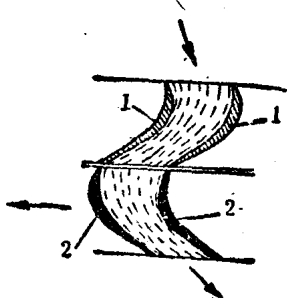


圖 5 反动級

在最简单的反动式汽轮机中,如图 5 所示,蒸汽的膨胀开始时发生在由静止叶片 1 所形成的喷嘴槽道中;蒸汽以一定的速度进入工作叶片(即动叶片) 2 的槽道中。蒸汽对工作叶片的作用,按冲动原理把自己的一部分能量给予叶片。

除此以外,还由于工作叶片间具有逐渐缩小的槽道形状,在该槽道内也发生蒸汽的膨胀及蒸汽压力降下的情况。由于蒸汽进入工作叶片和离开工作叶片时有压力差,反动力将作用于工作叶片,反动力和冲动力就一起迫使工作叶片按箭头所指的方向运动。

不论汽轮机的工作是按着冲动或反动方式,它们的实质是相同的,都是把喷嘴射出的汽流导向工作叶片。工作叶片是装在转子上的,叶片的作用是使转子转动。

第二章 冲动原理及冲动式汽轮机

第1节 冲动原理

在这一节里，我们将要研究蒸汽的动能如何使汽轮机转子转动。

动能即物体移动的能力，可用公式表示如下：

$$E = \frac{mv^2}{2} \text{ 千克重米。} \quad (4)$$

m ——物体的质量；

v ——物体移动的速度。

由此可见，物体的动能与其移动速度的平方成正比；即使物体质量很小，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传递给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传递给叶片的过程。试验证明，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，

而是平穩地滑過去。下面可以說明這一點。

在汽流沖向和汽流運動方向垂直的平面時，可設想有兩種情況。如圖 6 甲所示。

(1) 平面固定不動，則汽流本身的動能，一部分轉變成熱能，一部分就散開或反跳回來。在這種平面不動的情況下，汽流沒有發生有用的功。

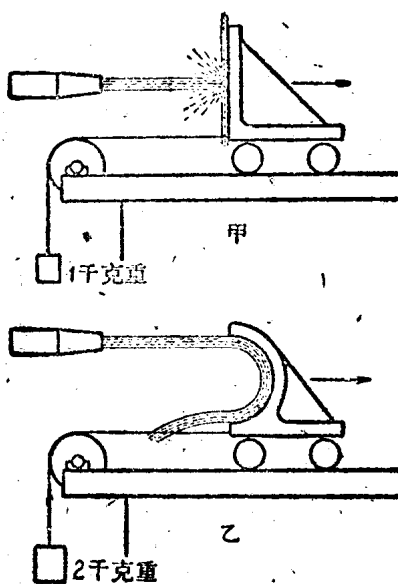


圖 6 汽流作用在不同表面葉片上的情形

(2) 平面可以移動，則汽流的部分動能轉變為使平面移動的有用的功，另一部分動能如同作用在不動平面上的情況一樣，被浪費了。

很明顯，我們應盡量減少不能轉變為有用功的能量；此外，還應避免汽流沖壞葉片的現象。因此必須選擇適當的汽輪機葉片的形狀，使噴出來的汽流平滑的進入葉片，并把最大一部分能量傳遞給葉片。

根據理論上的研究和實驗證明，汽流沖向的葉片表面形狀最好是採用能引導汽流轉換方向的，并使進退方向彼此相反，因為汽流對這種形狀的葉片的作用力將等於對平面葉片的作用力的二倍（如圖 6 乙）。也可以證明，汽流對

叶片的作用力將随着进、出叶片方向的夾角增大而减小。

用力学知識可以解釋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。

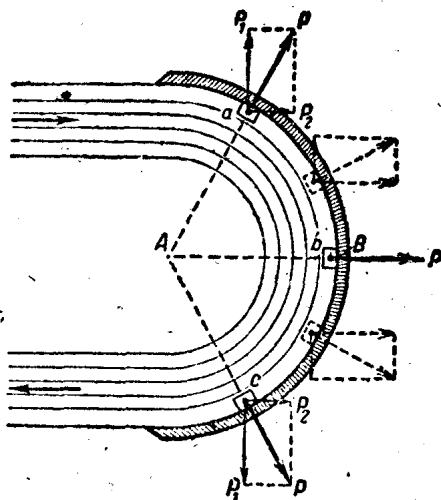


圖 7 在叶片上汽流的离心力作用

圖 7 表示一个半圓形叶片，蒸汽沿着叶片表面流动。蒸汽所以能沿着曲面做曲綫运动，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)。离心力作用在汽叶的每一点上，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綜合力量，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相垂直的兩個分力 P_2 和 P_1 。

現在我們来看 a 、 b 、 c 三小节汽流的作用情况。

这三小节汽流的质量相同，运动速度相等，因此它们作用在叶片上的离心力相等，都等于 $\rho v^2 r$ 。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，因为它的垂直方向的分力 $P_1=0$ ， P 和叶片运动方向一致，全部有效。

同理可以证明，所有作用在叶片上的汽流与叶片垂直方向的分力都将互相抵消，对叶片运动没有任何影响。在 B 点两侧的其他汽流，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圆形的。为了使汽流进入叶片没有撞击，叶片横截面形状是由一些直线和曲线组成的，这样能很好地利用汽流速度。

第2节·单级汽轮机

从前面的几节里，我们了解到蒸汽在喷嘴和叶片中的工作过程和工作原理。喷嘴和叶片是冲动式汽轮机的基本部