

电力生产基本知识丛书

热工学基础

西安电力学校编

水利电力出版社

TK₁₂₂

222

电力生产基本知识丛书

热 工 学 基 础

西安电力学校编

内 容 提 要

本书共分四章,结合火力发电厂的生产过程,通俗地介绍工质状态参数、热力过程与热力循环的基本概念,讲述水蒸汽的性质及水蒸汽图表的应用方法,介绍了传热学基础知识,以便为读者进一步学习锅炉和汽轮机等热机设备打下理论基础。各章均有复习思考题,书末有水蒸汽性质图表附录。本书可供电力工业管理干部阅读,也可供发电厂新工人参考。

电力生产基本知识丛书

热 工 学 基 础

西安电力学校编

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六辅坑)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 2印张 50千字 插页1张

1980年1月第一版 1980年1月北京第一次印刷

印数 00001—27655册 每册 0.35元

书号 15143·3558

出版说明

为了加强干部培训工作，提高电力工业各级干部和管理人员的业务水平，电力工业部开办了局、厂长学习班，组织学习电力生产过程及生产技术管理知识；并委托有关单位和人员，在头几期学习班讲义的基础上，编写了这套《电力生产基本知识丛书》，交我社陆续出版，以满足广大干部学习的需要。

这套丛书共有《电力》、《热工学基础》、《锅炉》、《汽轮机》、《热力过程自动化》和《电厂化学》六个分册。

由于时间较紧，经验不足，书中不妥之处请读者批评指正。

水利电力出版社

一九七九年六月

目 录

出版说明

第一章 基本概念	1
1-1 火力发电厂的生产过程	1
1-2 工质的状态参数	3
1-3 热力过程及热力循环的基本概念	8
第二章 水蒸汽的性质	15
2-1 水蒸汽的发生过程	15
2-2 水蒸汽图表的应用	18
2-3 水蒸汽在喷管中的流动	23
2-4 蒸汽的节流	27
第三章 蒸汽动力循环	29
3-1 郎肯循环	29
3-2 回热循环	34
3-3 再热循环	35
3-4 热化	36
第四章 传热学基础知识	37
4-1 热交换的基本方式	37
4-2 传热过程简介	38
4-3 热交换器	40
附录一 饱和水和饱和蒸汽性质表 (按温度排列)	44
附录二 饱和水和饱和蒸汽性质表 (按压力排列)	46
附录三 水和过热蒸汽性质表	49

第一章 基本概念

《热工学基础》研究的内容，包括《工程热力学》和《传热学》两部分。其中《工程热力学》研究热能与机械能之间相互转变的客观规律；《传热学》研究热量的传递规律。热能转变为机械能是火力发电厂的主要工作内容之一，热量的传递是火力发电厂几乎所有设备（尤其是热力设备）都能遇到的工作过程。因此，《热工学基础》是学习火力发电厂热力设备所必须具备的基础知识。

为了对《热工学基础》有一个概括的了解，需要先介绍一些热工基础的基本概念。为了叙述的方便及具体，我们结合火力发电厂的生产过程来介绍。

1-1 火力发电厂的生产过程

图1-1是火力发电厂生产过程的简化系统图。图中每个数字代表一个生产设备。其中锅炉设备的任务是使水吸收燃料燃烧时

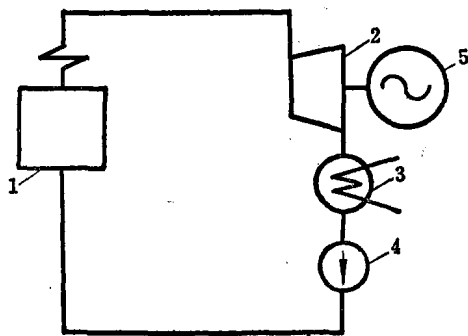


图 1-1 火力发电厂的生产过程简化系统图
1—锅炉；2—汽轮机；3—凝汽器；4—水泵；5—发电机

放出的热量，产生具有一定的压力和温度的蒸汽。这种具有一定压力和温度的蒸汽被送入汽轮机。蒸汽在流经汽轮机时，先在汽轮机的喷管部分降低压力和温度，提高流动速度，然后就用这种高速气流冲动汽轮机的转子使其旋转。汽轮机旋转时就带动同一轴上的发电机旋转而发出电来。在汽轮机中工作过了的蒸汽（又叫乏汽），在凝汽器中放热凝结成水，再由水泵提高压力送回锅炉继续工作。

从以上的叙述中可以看出，火力发电厂生产过程的实质，是在实现我们所要求的能量转变。即在锅炉设备的工作过程中把燃料的化学能转变成蒸汽的热能；在汽轮机的工作过程中，把蒸汽的热能转变成汽轮机轴的机械能；在发电机的工作过程中，把机械能转变成电能。这些转变连起来就是：

燃料化学能 \rightarrow 热能 \rightarrow 机械能 \rightarrow 电能。

火力发电厂中，属于从燃料的化学能转变为汽轮机的机械能的范围，我们习惯上叫做火力发电厂的热力部分；属于机械能转变为电能的范围叫做电气部分。

在上述的转变中，我们最关心的是热能转变为机械能这一过程，它是发电厂热力部分的主要工作内容，也是《工程热力学》的研究内容。所以现在让我们再来仔细分析一下，看看这一转变过程有些什么特点。结合以上所述的实际工作情况我们可以看出，在实现这一转变时，必须有下述条件：

第一、在实现这一转变时，总要有一种工作物质，借助于这种工作物质在热机中的膨胀而作功。这种工作物质简称为工质。火力发电厂生产过程中的工质就是水蒸汽。

第二、为了使工质在热机中作功，工质应按照我们的要求进行状态的变化。例如进入汽轮机的蒸汽，是从锅炉送来的压力、温度较高的蒸汽；在工作时，蒸汽的压力和温度要降低，这样才能获得冲动汽轮机转子的流动速度，才能获得对外作功的力量。我们把工质发生了状态变化，叫做工质进行了一个热力过程。

第三、为了使热机的工作连续地不中断地进行，热机中工质

的状态变化过程也必须连续地不中断地重复进行。这就要求热力系统中任何部分的工作不能有停顿。工质在热力系统中各个部分的一个连一个的状态变化，形成了一个状态变化的“圈子”。在这一变化圈子中，不管从那一点看起，工质的状态变化从这一点开始，经过一圈变化，还要回到这一点，然后继续重复这种变化。例如凝汽器中得到的凝结水，经过水泵、锅炉、汽轮机又回到凝汽器，经过这一圈的工作，它的状态又就恢复到原来的凝结水状态。这种从某一点开始，又回到这一点的状态变化过程（变化成封闭形）叫做**热力循环**。所以我们现在可以这样说，为了使生产连续的进行下去，工质应该不断地循环。

我们把上边的内容可以小结一下：火力发电厂的生产过程实质是实现能量形式的转变，从这种转变中获得电能。为了连续地实现这种转变，通常采用水蒸汽做为工质，使其在热力设备中不断地进行热力循环。

当然，以上我们是结合着火力发电厂的生产过程而讲的，但我们得到的上述结论，对任何以燃料做为原动力来源的热机来说，都是正确的。

通过上述对热能转变为机械能的分析，我们还可以对《工程热力学》的具体内容有个大致的了解。《工程热力学》是研究工质的性质、热力过程的规律和热力循环的应用等方面的科学。

1-2 工质的状态参数

我们在上一节已经说过，用水蒸汽做为工质，在电厂的汽轮机中作功时，水蒸汽的状态必须发生变化。因此，作功是与工质的状态变化有密切关系的。在我们研究工质作功的问题时，就首先要解决一个问题：就是如何表示工质的状态。

工质的状态，我们是用工质的压力、温度、比容……等这些物理量来确定的。我们把这些说明工质状态特征的物理量叫做工质的**状态参数**。这就是说，工质有了一组确定的状态参数，标志

着工质处于一个确定的状态。如果工质确定状态所对应的状态参数中有一个或几个发生了变化，那就意味着工质的状态发生了相应的变化。

这一节，我们将介绍压力、温度、比容、内能、焓和熵等几个状态参数。

一、压力

压力即工质（气体）对器壁单位面积上的作用力。压力的大小可用单位面积上作用力的大小或液柱的高度来表示，如公斤/厘米²、公斤/米²和毫米汞柱、毫米水柱等。此外，电厂中还常用工程压力（也叫工程大气压）这个单位。我们规定：

$$1 \text{ 工程压力} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10^4 \text{ 公斤/米}^2$$

工程压力折合成液柱高度就是：

$$1 \text{ 工程压力} = 735.6 \text{ 毫米汞柱} = 10 \text{ 米水柱}$$

不同的压力单位用于不同的场合下：如锅炉蒸汽的压力比较高，我们用工程压力作单位来表示；锅炉炉膛的压力较低，我们一般就用水柱作单位来表示。

当利用压力表测量工质的压力时，由于压力表本身的特点，压力表的指示数并不是工质的真实压力，而是工质的真实压力与大气压力的差值。为了区分，我们把工质的真实压力值叫做工质的绝对压力 $p_{绝}$ 。至于压力表上的指示值则有两种情形，图 1-2 表示的是第一种情形，这时容器中工质的压力（ $p_{绝}$ ）大于大气压力，这时压力表上的指示值是工质压力大于大气压力的数值，这个指示值叫做工质的表压力 $p_{表}$ ， $p_{绝}$ 、 $p_{表}$ 及大气压力 B 之间的关系如下：

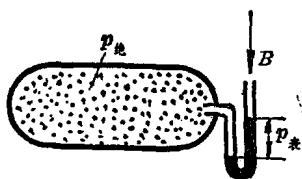


图 1-2 绝对压力与表压力的关系

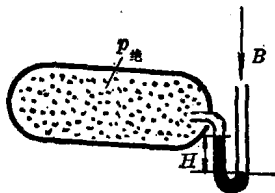


图 1-3 绝对压力与真空度关系

$$p_{表} = p_{绝} - B \quad (1-1)$$

图 1-3 所示是第二种情形，这时容器中工质的压力小于大气压力，这时表上的指示值是工质压力小于大气压力的数值，叫做工质的真空度。即

$$H = B - p_{绝} \quad (1-2)$$

式中 H ——真空度。

因大气压力 B 是随时间、地点而变的。在绝对压力 ($p_{绝}$) 一定时，表压力 ($p_{表}$) 及真空度 (H) 要随 B 的变化而变化，故在今后的计算中均用绝对压力。

【例 1-1】 某电厂锅炉汽包压力表指示为 39 公斤/厘米²，周围大气压力为 740 毫米汞柱，求汽包内的绝对压力。

解：

$$p_{绝} = p_{表} + B = 39 + \frac{740}{735.6} = 39 + 1.01 = 40.01 \text{ 工程压力}$$

在一般计算中，往往近似取 $B = 1$ 工程压力，这时

$$p_{绝} = p_{表} + B = 39 + 1 = 40 \text{ 工程压力}$$

【例 1-2】 某电厂汽轮机凝汽器的真空度为 700 毫米汞柱，当时当地的大气压力 $B = 750$ 毫米汞柱，求凝汽器的绝对压力。

解：

$$p_{绝} = B - H = 750 - 700 = 50 \text{ 毫米汞柱}$$

折合成工程压力为

$$\frac{50}{735.6} = 0.07 \text{ 工程压力}$$

压力的单位除上述公斤/厘米²和液柱高度外，国际单位制中采用巴 (bar) 做为压力单位。

$$1 \text{ 巴} = 10^5 \text{ 牛顿/米}^2 = 1.01972 \text{ 工程压力}$$

此外还有皮兹、毫巴及磅/英寸²等单位，在我国电厂中应用较少，故不再讲述，仅把这些压力单位之间的换算关系列于表 1-1 中供以后使用时参考。

表 1-1

1 公斤/厘米 ² = 980.665 达因/厘米 ²	1 百皮兹 = 1 巴 = 10.1972 米水柱
1 公斤/厘米 ² = 0.9806 百皮兹	1 百皮兹 = 1 巴 = 750.06 毫米汞柱
1 公斤/厘米 ² = 10 ⁴ 公斤/米 ²	1 毫巴 = 0.75 毫米汞柱
1 公斤/厘米 ² = 0.9678 物理大气压	1 物理大气压 = 1.0332 公斤/厘米 ²
1 公斤/厘米 ² = 10 米水柱	1 物理大气压 = 10.332 米水柱
1 公斤/厘米 ² = 735.56 毫米汞柱	1 磅/英寸 ² = 0.0703 公斤/厘米 ²
1 公斤/厘米 ² = 14.223 磅/英寸 ²	1 磅/英寸 ² = 703 公斤/米 ²
1 公斤/米 ² = 1 毫米水柱	1 磅/英寸 ² = 51.715 毫米汞柱

二、温度

温度表示物体的冷热程度。在工程上一般都用摄氏温标(°C)与绝对温标(K)来度量温度。摄氏温标把压力在 760 毫米汞柱时水的冰点定为 0°C, 水的沸点定为 100°C, 从 0°C 到 100°C 之间分为一百个刻度, 每一刻度就是摄氏温标的一度。绝对温标与摄氏温标每一度的大小是相等的, 但绝对温标的零度(0 K)则是摄氏温标的 -273°C, 所以两者有如下的关系:

$$T = t + 273 \quad \text{K} \quad (1-3)$$

式中 T —— 绝对温度, K;

t —— 摄氏温度, °C。

三、比容

一公斤重的工质(气体)所占容积的大小, 称为工质的**比容**, 其单位为米³/公斤。

一立方米容积工质(气体)的重量, 称为**比重**, 单位为公斤/米³。

设有 G 公斤工质占据容积 V 米³, 则其比容为

$$v = \frac{V}{G} \quad (1-4a)$$

比重即为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-4b)$$

或

$$v\gamma = 1 \quad (1-4c)$$

式中 v ——比容, 米³/公斤;
 γ ——比重, 公斤/米³;
 G ——气体的重量, 公斤;
 V ——气体的容积, 米³。

四、气体的内能

组成气体的分子, 处在不断地紊乱运动中, 其运动的形式有: 分子的直线运动; 分子的旋转运动; 分子内部原子的振动。这些运动都具有一定的能量, 我们叫它为气体的内动能。内动能的大小决定于温度。气体分子之间还存在着吸引力, 因此除了内动能以外, 还具有用以克服分子间吸引力的位能, 叫做气体的内位能。内位能随气体的比容或压力而变。

内动能与内位能组成了气体的内能, 通常用符号 u 来表示一公斤气体的内能, 它的单位是大卡/公斤

五、气体的焓

在热力计算中, 常遇到一组数值

$$u + Apv$$

为方便起见, 我们就令

$$i = u + Apv \quad (1-5)$$

式中 u 为工质的内能, 而 p 及 v 是与所取内能数值相同状态工质的压力和比容。 A 是把公斤·米单位换算为热量单位大卡的换算系数, 叫做功的热当量, 其数值为:

$$A = \frac{1}{427} \text{大卡/公斤} \cdot \text{米}$$

在式(1-5)中, 每个量均由工质的状态所决定, 可知 i 也必是一个状态参数, 称为焓。

六、工质的熵

熵是一个导出的状态参数, 它是通过其它可以测量的数值间接计算出来的。我们把给一公斤工质加入的热量与加热当时绝对温度的比值叫做工质在这个加热过程中的熵的增加量。

例如一公斤工质, 在绝对温度 T 保持不变的情况下, 加入了

q 大卡的热量，那末：

$$\frac{q}{T}$$

这个比值就是在这一加热中工质熵的增加量。我们用 s 表示工质的熵，用 Δs 表示熵的增加量 $s_2 - s_1$ ，则这一等温加热例子中各量的关系就可写为：

$$\Delta s = \frac{q}{T} \quad (1-6)$$

式中 s —— 熵，大卡/公斤·K；

q —— 1 公斤工质所获得热量，大卡/公斤；

T —— 工质在获得热量时的温度，K。

如果加热过程不是等温情况，熵的定义仍如上述。这时熵的增量的计算可以这样来进行：即把整个加热过程分割成很多很多小的加热阶段，在每一个小加热阶段中，加入的热量是很少的，因而温度的变化也就很小。加热阶段分割得愈多，在小加热阶段中温度的变化就愈小。当把整个加热过程分割成无穷多个小加热阶段时，这时每个小加热阶段都可看成是在等温下进行的加热。这样在求得了每个小加热阶段工质熵的增量后，再把每个小加热阶段熵的增量相加，就是整个加热过程熵的增量。具体计算公式应用到一点高等数学，这里就不再说了。

从上述熵的定义我们不难想到：给工质加热，工质的熵增加；从工质取出热，工质的熵减小；不加热也不取出热量，工质的熵保持不变。所以可以反过来用熵的变化来判断过程是加入还是取出热量。

1-3 热力过程及热力循环的基本概念

在第一节我们已经介绍过，工质在作功中，它的状态必须发生变化；为了得到连续的功，工质的状态变化应该组成循环。这一节我们再来介绍一些热力过程及循环的有关问题。

一、热力过程

气体受外界作用时，则状态发生变化，由初始参数 p_1 、 v_1 和 T_1 经过一系列的中间状态后变化到最终状态参数 p_2 、 v_2 和 T_2 。气体的这种状态的连续变化过程，就叫做气体的热力过程。

所谓气体的外界作用，有下列两类情况：

(1) 对工质加入热量或自工质中取出热量。

(2) 工质克服外力增大体积，输出膨胀功；或者工质受外力压缩，减小体积，而消耗压缩功。

由此可见，热能和机械能的相互转变，是和气体的状态变化过程分不开的。

通常研究热力过程时，为了明显起见，总是把过程用图线表示出来。我们知道，在一般的情况下，有两个独立的状态参数就可以确定工质的一个状态。因此，我们如果用两个状态参数组成平面坐标，那末平面坐标上的点就和工质的状态有着一一对应的关系。这样就可以用这种平面坐标上的点，形象的表示状态。又因为热力过程是由连续的状态组成的，因而热力过程表示在这种坐标上就是一条曲线。

我们经常用来表示热力过程的坐标是采用 $p-v$ 坐标及 $T-s$ 坐标，又叫做 $p-v$ 图及 $T-s$ 图。 $p-v$ 图的纵坐标表示工质的压力 p ，横坐标表示比容 v ，如图 1-4 所示。 $T-s$ 图的纵坐标表示工质的绝对温度 T ，横坐标表示熵 s ，如图 1-5 所示。我们所以选用 p 及 v ， T 及 s 组成坐标，是因为这样的坐标不仅能很方便很明显的表示热力过程，而且还有下述的好处：在 $p-v$ 图上过程曲线下

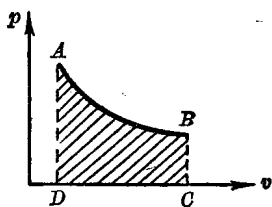


图 1-4 $p-v$ 图

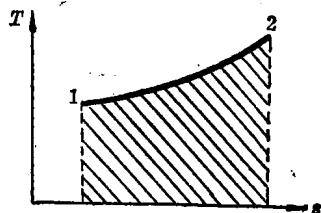


图 1-5 $T-s$ 图

与横坐标所组成的面积的大小（图1-4中画斜线的部分），正好就表示这个过程做功的多少。在 $T-s$ 图上过程曲线下与横坐标所组成的面积的大小（图1-5中画斜线的部分）正好就表示这个过程加入热量的多少。因此，把过程画在 $p-v$ 图及 $T-s$ 图上，不仅可以明显地看出过程变化的情形，而且还从图上面积的大小可以看出做功或加入热量的多少。

我们在电厂中经常见到的热力过程，经过分类，有以下几种：

1. 等压过程

工质在状态变化时，压力维持不变的过程叫等压过程。锅炉中水的汽化过程，凝汽器中乏汽的凝结过程就都是等压过程。此外，各种加热器中水的加热过程，也几乎都是等压过程。

等压过程表示在 $p-v$ 图上是一条平行于横坐标的水平线（图1-6）。等压过程表示在 $T-s$ 图上是一条对数曲线（图1-7）。

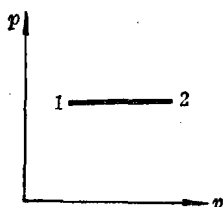


图 1-6 等压过程的 $p-v$ 图

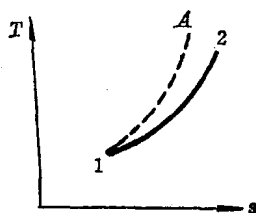


图 1-7 等压过程的 $T-s$ 图

等压过程多用为加热过程，等压过程中加给一公斤工质的热量 q_p 可以按下式计算：

$$q_p = i_2 - i_1 \quad \text{大卡/公斤} \quad (1-7)$$

式中 q_p ——等压过程加给 1 公斤工质的热量，大卡/公斤；

i_1 ——工质在加热前状态的焓，大卡/公斤；

i_2 ——工质在加热后状态的焓，大卡/公斤。

例如：进入锅炉的给水状态的焓为200大卡/公斤，加热变为蒸汽后的焓为800大卡/公斤，问每公斤水变为蒸汽在锅炉中加了多少热？

因为锅炉中的工作过程是等压过程，按公式(1-7)计算就

是

$$q_p = i_2 - i_1 = 800 - 200 = 600 \text{大卡/公斤}$$

即每公斤水变为蒸汽加热为600大卡/公斤。

2. 定容过程

工质在状态变化时，容积（或比容）保持不变的过程叫做定容过程。

如果把水看成是不可压缩的，则水在水泵中的升压过程就是定容过程。定容过程表示在 $p-v$ 图上是一条垂直横坐标的直线（如图1-8）。表示在 $T-s$ 图上也是一条对数曲线（如图1-9）。

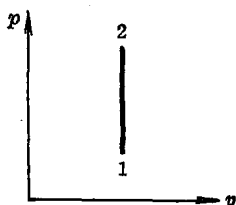


图 1-8 定容过程的 $p-v$ 图

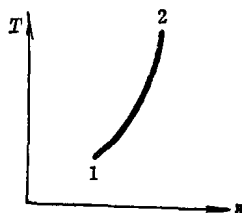


图 1-9 定容过程的 $T-s$ 图

3. 等温过程

工质在状态变化时，温度保持不变的过程叫做等温过程。乏汽在凝汽器中的凝结过程，水在水泵中的升压过程都是等温过程的实例。等温过程表示在 $p-v$ 图上是一条双曲线（图1-10）；表示在 $T-s$ 图上是一条平行于横坐标轴的直线（图1-11）。

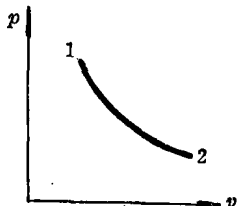


图 1-10 等温过程的 $p-v$ 图

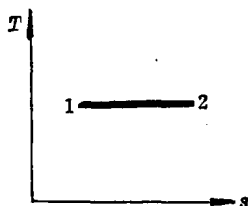


图 1-11 等温过程的 $T-s$ 图

4. 绝热过程

工质在状态变化中与外界物体间没有热量的交换，这种过程

叫做绝热过程。由熵的意义知，在这种不给工质加热也不从工质取出热的情况下，工质的熵的数值也就不会发生变化，所以绝热过程又叫做等熵过程。

绝热过程在 $p-v$ 图上的过程线是一条双曲线，如图 1-12，在 $T-s$ 图上则是一条垂直横坐标的直线，如图 1-13 所示。

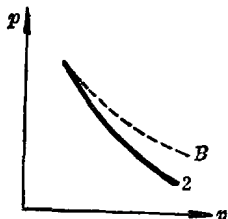


图 1-12 绝热过程的 $p-v$ 图

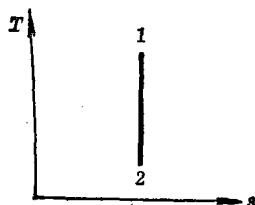


图 1-13 绝热过程的 $T-s$ 图

电厂中蒸汽在汽轮机中的工作过程，可以看作是绝热过程。因为蒸汽流经汽轮机时，流速很快，在汽轮机中的时间很短，汽轮机的汽缸又包了很厚的绝热层，在这样的情况下蒸汽通过汽缸壁传递到汽缸外的热量是很少的，与蒸汽用来作功的热量相比，可以忽略不计。

蒸汽在汽轮机绝热流动中所作的功的大小，也可以用焓进行计算：

$$Al = h = i_1 - i_2 \quad (1-8)$$

式中 Al ——每公斤蒸汽在汽轮机内绝热流动中做的功，大卡/公斤；

i_1 ——蒸汽作功前状态的焓，大卡/公斤；

i_2 ——蒸汽作功后状态的焓，大卡/公斤；

h ——蒸汽的焓降，大卡/公斤。

例如，已知中压电厂蒸汽进入汽轮机前的焓 i_1 为 795 大卡/公斤，从汽轮机出来的做过功的乏汽的焓 i_2 为 505 大卡/公斤。根据式 (1-8)，则每公斤蒸汽在汽轮机中做的功为：

$$h = i_1 - i_2 = 795 - 505 = 290 \text{ 大卡/公斤。}$$