# 等效热降及其应用

陈国慧　林万超　邢秦安　严俊杰　著

西安交通大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

## 内 容 提 要

本书重点介绍了火电厂热力系统节能领域的理论及有关技术，它包括：等效热降理论；火电厂的节能诊断；火电厂补水系统改造；热力系统运行方式对经济性的影响；工业抽汽过热度利用；加热器水位控制的新方法；锅炉排烟余热在热力系统中的利用。

本书可供从事火电厂热机工作的工程技术人员使用，也可作为大专院校动力工程类师生的选修课教材或参考书。

**图书在版编目(CIP)数据**

等效热降及其应用/陈国慧等编. —西安：西安交通大学出版社，2000.2
ISBN 7-5605-1230-5

. .等… 2.陈… 0.热力工程-理论
Ⅰ.TK12

**中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 13102 号**

*

西安交通大学出版社出版发行
(西安市咸宁西路 28 号 邮政编码：710049 电话：(029)2668316)
西安电子科技大学印刷厂印装
各地新华书店经销

*

开本：787mm×1092mm 1/16 印张：9.125 字数：217 千字
2000 年 5 月第 1 版 2000 年 5 月第 1 次印刷
印数：0001 S 30 00 定价：15.00 元

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题，请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话：(029)2668357，2667874

# 序　　言

节约能源，降低消耗是我国的基本国策。火电厂热机方面的节能可以归结为两个方面：一是针对锅炉、汽轮机和辅机，着眼于提高主机的热效率并降低辅机的电耗，以达到节能目的；二是针对热力系统，着眼于优化和完善热力系统及其设备，改善运行操作，提高运行效率，以实现节能目标。等效热降（也称等效焓降）理论是 60 年代后期提出，并在 70 年代逐步完善、成熟的火电厂热力系统节能理论。在火电厂的设计中，该理论用于论证方案的技术经济性，探讨热力系统和设备中各种因素的影响以及局部变动后的经济效益，是热力工程和热力系统设计的有力工具。在运行电厂，等效热降理论作为节能诊断的理论基础，可用来进行定量分析，为热力系统节能改造提供确切的技术依据。

西安交通大学动力系统研究所从 70 年代开始研究等效热降理论，并将其推广应用于火电厂的热力系统节能领域，取得了显著的经济效益和社会效益，深受工程界的好评。该理论被能源部列为重点节能措施在全国推广，并被国家科学技术委员会列入“国家级科技成果重点推广计划”。

《等效热降及其应用》一书，是作者多年来研究等效热降理论及其在火电厂节能领域应用成果的汇总。本书由以下章节组成：等效热降基本理论；火电厂节能诊断；火电厂补水系统改造；热力系统运行方式对经济性的影响；工业抽汽过热度利用；加热器水位控制的新方法；锅炉排烟余热在热力系统中的利用。

本书得以出版，还包含了动力系统研究所研究生所作的工作，在此对他们表示感谢。

由于作者水平有限，书中错误之处在所难免，恳请专家和读者给予指正。

编者

2000 年 4 月

# 目　　录


序　言

第 1 章　等效热降基本理论 …… (1)

1.1　等效热降 …… (1)

1.2　等效热降应用的基本法则 …… (5)

1.3　再热机组的等效热降 …… (11)

1.4　供热机组的等效热降 …… (15)

1.5　等效热降法的矩阵表述 …… (22)

第 2 章　火电厂节能诊断 …… (28)

2.1　火电厂节能诊断系统 …… (28)

2.2　供热机组热力系统经济性诊断方法 …… (30)

2.3　火电厂微机在线运行经济性诊断系统 …… (35)

2.4　确定锅炉运行参数基准值的新方法 …… (38)

2.5　锅炉机械不完全燃烧损失 $q_4$ 的模糊定量分析 …… (41)

2.6　火电机组运行中多因素偏差的分析 …… (45)

2.7　冷却塔的节能分析 …… (50)

第 3 章　火电厂补水系统改造 …… (54)

3.1　热电厂补水入凝汽器对真空的影响 …… (54)

3.2　火电厂补水系统改进的经济性分析 …… (59)

3.3　热电厂母管制补水系统的热经济性分析 …… (61)

第 4 章　热力系统运行方式对经济性的影响 …… (66)

4.1　火电机组运行优化通用软件包 …… (66)

4.2　减少热力系统运行的作功能力损失 …… (70)

4.3　热电厂最佳负荷的分配方法 …… (76)

4.4　火电厂机组间给水分配的热经济性分析 …… (81)

4.5　供热机组供汽方式对热经济性的影响 …… (87)

第 5 章　工业抽汽过热度利用 …… (91)

5.1　工业抽汽过热度利用的定量分析 …… (91)

5.2　背压机组供汽过热度利用的定量分析 …… (95)

5.3 抽汽背压机组工业供汽过热度利用 …… (100)
5.4 抽凝机组工业抽汽过热度利用 …… (103)

第 6 章 加热器水位控制的新方法 …… (106)
6.1 加热器无水位运行的经济性影响及对策 …… (106)
6.2 利用汽液流动特性控制液位的新方法 …… (110)
6.3 大机组加热器水位调节的新方法 …… (112)
6.4 大机组卧式高压加热器水位异常对经济性影响的定量分析 …… (115)
6.5 两相流水位控制器的调节特性 …… (120)
6.6 两相流水位控制器变工况特性 …… (124)

第 7 章 锅炉排烟余热在热力系统中的利用 …… (128)
7.1 利用排烟余热的低压省煤器 …… (128)
7.2 暖风器系统的经济性定量分析 …… (131)
7.3 暖风器与低压省煤器的联合系统 …… (136)
参考文献

需要全本请访问 www.ertongbook.com

# 第 1 章　等效热降基本理论

## 1.1　等效热降

### 1.1.1　抽汽等效热降

研究图 1.1 这样一个简单的热力系统，假设一个纯热量 $q$（即无工质带入系统）进入№3 加热器中，使№3 加热器的抽汽减少 1kg，这 1kg 蒸汽称为排挤抽汽。这个被排挤的抽汽中有一部分作功到汽轮机的出口，另一部分作功到后面各抽汽口再被抽出用以加热给水。

这 1kg 排挤抽汽返回汽轮机以及随后在各抽汽口上的分配，可按照热平衡方程计算如下。

由于№3 加热器抽汽减少 1kg，在仅有热量加入而无工质加入时，其疏水也相应减少 1kg，因而使疏水在№2 加热器的放热量减少 $\gamma_2 = \bar{t}_{s3} - \bar{t}_1$。这个减少的热量应由№2 段抽汽来补偿，其补偿量为

$$\alpha_{\alpha 03} = \frac{\gamma_2}{q_2}$$

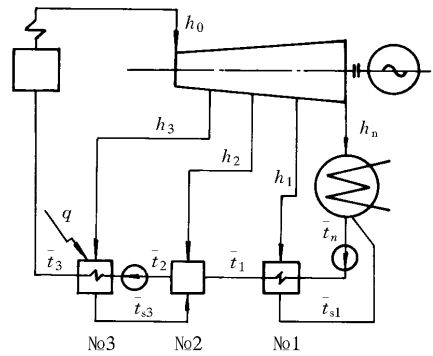



图 1.1　机组热力系统

式中　$q_2 = h_2 - \bar{t}_1$，为№2 加热器 1kg 抽汽的放热量；

$\alpha_{\alpha 03}$ ——排挤№3 加热器 1kg 抽汽中分配到№2 加热器中的份额。

排挤抽汽继续向后流动的份额只有 $(A - \alpha_{\alpha 03})$ 了。这部分蒸汽膨胀作功并凝结后，产生相同数量的水返回№1 加热器。№1 加热器为了加热这部分水，因而抽汽量应增加

$$\alpha_{\beta 03} = (A - \alpha_{\alpha 03})\tau_1 / q_1$$

式中　$\tau_1 = \bar{t}_1 - \bar{t}_n$ ——№1 加热器中 1kg 水的焓升　[kJ/kg]；

$q_1 = h_1 - \bar{t}_{s1}$ ——№1 加热器中 1kg 抽汽的放热量　[kJ/kg]；

$\alpha_{\beta 03}$ ——是排挤№3 加热器 1kg 抽汽时，分配到№1 加热器中的份额。

由于在№1 和№2 加热器中增加了抽汽份额，并产生了作功不足，故№3 加热器排挤 1kg 抽汽返回汽轮机的作功等于

$$H_3 = (h_3 - h_n) - \alpha_{\alpha 03}(h_2 - h_n) - \alpha_{\beta 03}(h_1 - h_n) \quad [kJ/kg] \qquad (1.1)$$

这个作功称为抽汽的等效热降，用符号 $H_j$ 表示。

抽汽等效热降 $H_j$，在抽汽减少情况下表示 1kg 排挤抽汽作功的增加值；反之，抽汽量增加时，则表示作功的减少值。显然，它考虑了比该抽汽压力更低的所有抽汽量的变化。

抽汽效率 $\eta_j$，同一般效率概念一样，是作功与加入热量之比。这里排挤 1kg 抽汽，需要加入的热量为 $q_j$，而排挤 1kg 抽汽获得的功为 $H_j$，$H_j$ 与 $q_j$ 之比是热效率的含意，故称之为抽汽效率 $\eta_j$。它反映任意抽汽能级 $j$ 处热变功的程度和该能级以下（由于加入热量引起的）一切作功变化。即

$$\eta_j = \frac{H_j}{q_j} \tag{1.2}$$

### 1.1.2 $H_j$ 的计算

计算抽汽等效热降从冷凝器开始较易确定。现以图 1.2 所示的系统为例进行分析。

假定№1 加热器获得热量 $q_1$，恰使其抽汽减少 1kg，则该排挤蒸汽返回汽轮机中继续作功，其等效热降等于它的实际焓降。即

$$H_1 = h_1 - h_n \qquad [\mathrm{kJ/kg}] \tag{1.3}$$

№2 加热器如获得热量 $q_2$，恰使抽汽减少 1kg。这时进入№1 加热器中的疏水也将相应减少 1kg，因而疏水在№1 加热器中的放热量将减少 $\gamma_1$。为了补偿这个加热不足，№1 加热器抽汽将增加

$$\alpha_{\beta 02} = \frac{\gamma_1}{q_1} \tag{1.4}$$

余下的排挤抽汽（$1 - \alpha_{③S2}$）将直达冷凝器。因此，第二段抽汽的等效热降等于

$$H_2 = (h_2 - h_n) - \alpha_{\beta 02}(h_1 - h_n) \qquad [\mathrm{kJ/kg}] \tag{1.5}$$

将公式（1.3），（1.4）代入公式（1.5）中得到

$$H_2 = (h_2 - h_n) - \frac{\gamma_1}{q_1} H_1 \qquad [\mathrm{kJ/kg}] \tag{1.6}$$

№3 加热器如获得热量 $q_3$，恰使其抽汽减少 1kg。该排挤抽汽的一部分将作功到冷凝器，另一部分将作功到№1 和№2 抽汽口后被抽出，用以加热 1kg 增添的凝结水。

№3 汇集式加热器排挤 1kg 抽汽，经过不同途径最终都将变为凝结水并汇集于凝汽器，使主凝结水增添了 1kg。因而№2 加热器的抽汽将增加

$$\alpha_{\alpha 03} = \frac{\tau_2}{q_2}$$

同理，增添的 1kg 主凝结水，也将流过№1 加热器。同时№2 加热器增加的抽汽份额 $\alpha_{\mathrm{II}S3}$，其疏水将在№1 加热器中放出热量 $\alpha_{\mathrm{II}S3}\gamma_1$，因此，№1 加热器的抽汽将增加

$$\alpha_{\beta 03} = \frac{\tau_1 - \alpha_{\alpha 03}\gamma_1}{q_1} = \frac{\tau_1}{q_1} - \frac{\tau_2\gamma_1}{q_1 q_2}$$

由此，第三段抽汽的等效热降

$$H_3 = (h_3 - h_n) - \alpha_{\alpha 03}(h_2 - h_n) - \alpha_{\beta 03}(h_1 - h_n)$$

将 $\alpha_{\alpha 03}$ 和 $\alpha_{\beta 03}$ 代入，经简化得

$$H_3 = (h_3 - h_n) - \frac{\tau_1}{q_1} H_1 - \frac{\tau_2}{q_2} H_2 \qquad [\mathrm{kJ/kg}] \tag{1.7}$$

第四段抽汽的等效热降，按照上述分析方法，如果№4 加热器获得热量 $q_4$，将产生 1kg 排

挤抽汽，该排挤抽汽的一部分分配在№1，№2 和№3 加热器中，剩余的排挤抽汽将直达冷凝器。各分配份额可分析计算如下。

由于排挤 1kg 抽汽，№4 加热器排出的疏水也相应减少 1kg，因而疏水在№3 加热器中的放热量将减少 $\gamma_3$，为了补偿这个加热不足，№3 加热器的抽汽将增加

$$\alpha_{\pi 04}=\frac{\gamma_3}{q_3}$$

排挤抽汽的剩余部分 $(A-\alpha_{\pi 04})$，经过不同途径最终将变为凝结水而汇集于冷凝器，使主凝结水增添了 $(A-\alpha_{\pi 04})$。因而№2 加热器的抽汽将增加

$$\alpha_{\alpha 04}=\frac{(A-\alpha_{\pi 04})\tau_2}{q_2}=\frac{\tau_2}{q_2}-\frac{\gamma_3\tau_2}{q_3 q_2}$$

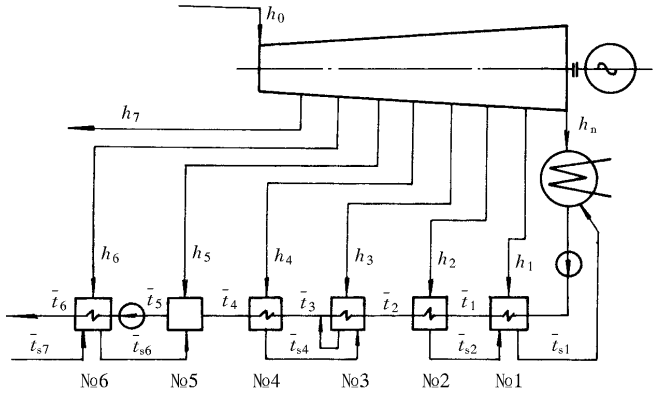



图 1.2　机组局部热力系统

同理，增添的 $(A-\alpha_{\pi 04})$ kg 主凝结水，也将流过№1 加热器。同时№2 加热器增加的抽汽份额 $\alpha_{\alpha 04}$，其疏水将在№1 加热器中放出热量 $\alpha_{\alpha 04}\gamma_1$。因此，№1 加热器的抽汽将增加

$$\alpha_{\beta 04}=\frac{(A-\alpha_{\pi 04})\tau_1-\alpha_{\alpha 04}\gamma_1}{q_1}$$

$$=\frac{\tau_1}{q_1}-\frac{\gamma_3\tau_1}{q_3 q_1}-\frac{\tau_2\gamma_1}{q_2 q_1}+\frac{\gamma_3\tau_2\gamma_1}{q_3 q_2 q_1}$$

因此，第四段抽汽的等效热降

$$H_4=(h_4-h_n)-\alpha_{\pi 04}(h_3-h_n)-\alpha_{\alpha 04}(h_2-h_n)-\alpha_{\beta 04}(h_1-h_n)$$

代入各抽汽份额并简化得

$$H_4=h_4-h_n-\frac{\tau_1}{q_1}H_1-\frac{\tau_2}{q_2}H_2-\frac{\gamma_3}{q_3}H_3 \qquad [\mathrm{kJ/kg}] \qquad (1.8)$$

### 1.1.3　$H_j$ 的计算通式及 $\eta_j$ 的计算

从上述实例可以看出，$H_j$ 计算公式的规律是，从排挤 1kg 抽汽的焓降 $(h_j-h_n)$ 中减去某些固定成分，因此可归纳为下列通式

$$H_j = (h_j - h_n) - \sum_{r21}^{jS1} \frac{A_r}{q_r} H_r \qquad [kJ/kg] \tag{1.9}$$

式中 $A_r$ ——取 $\gamma_r$ 或者 $\tau_r$，视加热器型式而定；

$r$ ——加热器 $j$ 后更低压力抽汽口脚码。

如果 $j$ 为汇集式加热器，则 $A_r$ 均以 $\tau_r$ 代之。如果 $j$ 为疏水放流式加热器，则从 $j$ 以下直到(包括)汇集式加热器用 $\gamma_r$ 代替 $A_r$，而在汇集加热器以下，无论是汇集式或疏水放流式加热器，则一律以 $\tau_r$ 代替 $A_r$。

各抽汽等效热降 $H_j$ 算出后，按作功与加入热量之比，可得相应的抽汽效率

$$\eta_j = \frac{H_j}{q_j}$$

式中 $H_j$ 和 $q_j$ 均为已知数，故 $\eta_j$ 的计算极为方便。

上述推导中所用 $\tau_j$，$q_j$，$r_j$ 的计算公式，随加热器型式是汇集式或疏水放流式而变，具体详情请查参考文献[1]。

### 1.1.4 新蒸汽等效热降

1kg 新蒸汽的实际作功，即新蒸汽的等效热降为

$$H_M = (h_0 - h_n) - \alpha_1(h_1 - h_n) - \alpha_2(h_2 - h_n) - \cdots - \alpha_z(h_z - h_n)$$

与抽汽等效热降一样推演，整理后可得

$$H_M = (h_0 - h_n) - \sum_{r21}^{z} \tau_r \frac{H_r}{q_r} \qquad [kJ/kg]$$

由此看出，新蒸汽等效热降的计算也可用通式(1.9)按汇集式加热器计算。因此，抽汽等效热降的计算通式也可运用于新蒸汽。这时，把锅炉视为汇集式加热器即可。由于这样的计算没有考虑轴封蒸汽的渗漏及利用、加热器的散热、抽气器耗汽及泵功能量消耗等辅助成分的作功损耗，所以得到的等效热降称为毛等效热降。如果扣除这些附加成分的作功损失，则称为净等效热降。

新蒸汽的净等效热降可表示为

$$H = h_0 - h_n - \sum_{r21}^{z} \tau_r \frac{H_r}{q_r} - \sum \Pi \qquad [kJ/kg] \tag{1.10}$$

式中 $\sum \Pi$ ——轴封漏汽及利用、加热器散热、抽气器耗汽和泵功耗能等辅助成分的作功损失的总和。其计算以后讨论。

汽轮机的装置效率，即实际循环效率 $\eta_i$ 可按新蒸汽等效热降与加入热量求得，即

$$\eta_i = \frac{H}{Q}$$

式中 $Q$ ——加入循环的热量 [kJ/kg]。

### 1.1.5 等效热降的条件

从等效热降的推演过程可知，等效热降的计算是以新蒸汽流量保持不变为前提条件的。这样就避免了热力系统一般计算方法的缺点，即热力系统中影响热经济性的任何变化，其最终结果都将导致各抽汽量和总汽耗量的变化，因而要求全部从头开始计算，只有这样，才能求得

热经济性变化的结果。如果把新蒸汽流量固定不变，则热力系统中出现的任何影响经济性的变化，只是改变了汽轮机的功率和该变动以后的抽汽份额，各级抽汽流量不致全部变动。因此，有可能就抽汽量和热量的局部变化进行分析，从而直接求得经济性变化的结果。这样就能简化计算，使局部定量成为可能。此外，在计算等效热降时，认为新蒸汽参数、再热参数、终参数以及各抽汽参数均为已知，且保持不变，即汽轮机膨胀过程线的变化暂时不予考虑。所有这些都是建立等效热降概念和推导公式的前提条件。另外，为了局部定量分析的方便，认为加入循环的热量 $Q$ 也保持不变。

在这些前提条件下，求得的全部抽汽等效热降和抽汽效率，是一些完全确定的数值和物理含意明确的参量。它们以一次性参数供给，不必经常计算，成为分析热力系统的重要参数。新机组的这些参数，最好由制造厂提供。运行多年或参数有变化的机组，可通过热力试验给予确定。其物理意义是 等效热降 $H_j$ 是 1kg 抽汽流从№$j$ 处返回汽轮机的真实作功能力，它标志着汽轮机各抽汽口蒸汽的能级或能位高低。$H_j$ 愈大，它所处的能级就愈高，汽流的作功能力也就愈大 抽汽效率 $\eta_j$ 表示任意热量加到汽轮机的回热系统№$j$ 处时，该热量在汽轮机中转变为功的程度或份额。在新蒸汽部位的 $\eta_j$ 最大，等于装置效率 $\eta_i$ ，而冷凝器的 $\eta_j$ 最小，等于零（即 $\eta_n=0$），所以抽汽效率 $\eta_j$ 的数值处于 $\eta_i$ 和零之间。

应当指出，在实际工程计算中，大量应用的是 $\eta_j$ ，尤其在局部定量计算中使用更为普遍。因为热力系统中任意地方发生热量的增减变化，它所引起的作功变化就等于该热量与所处能级的抽汽效率的乘积。还应当明确地认识，所得的作功变化，已毫无遗漏地考虑了该能级以下所有加热器的抽汽量、疏水量等的全部变化。这是因为 $\eta_j$ 中反应了这些变化的缘故。所以 $\eta_j$ 是等效热降的核心，是等效热降能使局部定量简便、准确的根本所在。

## 1.2 等效热降应用的基本法则

### 1.2.1 概述

火电厂的热力设备和系统，无论是发生热量和工质的损失，还是工质和热量利用于系统，都将影响装置的经济性。通常工质损失的同时总伴随有热量损失。热力设备和管道的散热，排污以及汽、水渗漏和取样等就属于工质和热量损失。工质和热量利用于热力系统，包括来自循环内部（简称内部）的工质和热量，以及循环外部（简称外部）的工质和热量。比如轴封漏气、抽气器排汽、除氧器余汽的利用以及给水在泵内的焓升等均属于内部热量和工质的利用 ;而外来蒸汽或热水、排污扩容蒸汽、发电机冷却热量以及锅炉排烟余热等的利用都属于外部热量和工质利用于系统。应当指出，内、外热量的利用，从热力学角度来讲，它们对装置热经济性的影响有原则性区别，不能混为一谈。

内部热量利用，使循环作功增加 $\Delta H$ ，其装置效率

$$\eta_i = \frac{H\ \alpha\ \Delta H}{Q}$$

式中 $H$ ——1kg 新蒸汽的实际作功，即新蒸汽等效热降 [kJ/kg]；

$Q$ ——循环的吸热量 [kJ/kg]；

$\Delta H$ ——内部热量回收利用的作功 [kJ/kg]。

由此可知，任何内部热量的利用，都使装置效率得以提高，因为内部损失热量再次回收利

用，终将提高循环吸热的利用程度，提高热变功的份额，故而装置效率总是提高的。

而外部热量的利用，若按热力学原理分析，这时，除循环作功增加 $\Delta H$ 外，循环吸热量也将增加。即外部热量被利用的热量 $\Delta Q$ 也是循环吸热的一部分。故装置效率

$$\eta_i = \frac{H \alpha \Delta H}{Q \alpha \Delta Q}$$

由此可知，外部热量的利用，通常都使装置效率降低。因为外部余热的品位一般低于新蒸汽能级，热变功的程度较低，余热的大部分将变为冷源损耗，从而大大增加了循环的冷源损失，降低了装置效率。

如若外部热量利用按余热利用原理处理，其装置效率

$$\eta_i = \frac{H \alpha \Delta H}{Q}$$

所谓按余热利用处理，系指余热不利用就废弃了，若给予利用，则利用一点就回收一点。表现在装置效率的计算上，就是只计作功收益而不计热量支出。因而，尽管余热品位虽低，但毕竟有一部分转变为功，转变一点，作功就增加一点，装置效率总是提高的。当然，这样的提高完全不同于热力学的提高，但有利于推动节能，鼓励利用余热。本书将用这种方法分析讨论问题。

此外，由于系统和热力设备的更动，引起系统内部热量利用的场所和完善程度发生变化，也将影响装置的经济性。

本节的任务是对上述热力系统中的各种热经济性问题用等效热降法进行局部定量分析，探讨其规律，得出等效热降应用的一般原则和基本法则。

热力系统中的各种热经济性问题，可以归纳为两大类：一类是纯热量变动或出入系统，它只有热量变迁或进出系统，没有工质伴随，简称“纯热量”；另一类是带工质的热量变动或出入系统，这不仅有热量变迁，而且还伴随有工质的变迁，简称“带工质的热量”。显然，两类热经济性问题有质的区别。它们对经济性的影响和效果以及分析计算的方法都将因此而有很大不同。所以，在研究等效热降应用的基本法则时，将按纯热量和带工质的热量分别予以讨论。

### 1.2.2 内、外纯热量进出热力系统

(1)外部热量利用于系统

热力循环以外的任何热量，比如电机冷却热量、工艺余热以及锅炉排烟热量等，均属无工质携带的外部热量，它们进入热力系统是外部纯热量的利用问题。

图 1.3 为 1kg 工质的局部热力系统，当有外部纯热量 $q_w$ 进入系统时，如果将该热量视为余热利用处理，即只计它的作功收入而不计循环加入热量的增加。这时，装置的热经济性将因余热利用而得到提高。

纯热量 $q_w$ 加入系统，与等效热降性质和概念完全相同。因而，该热量的作功也就是新蒸汽等效热降的变化，能够按等效热降概念直接写出。由于该热量从加热器 $j$ 和 $j-1$ 之间进入系统，热量利用在能级 $j$ 上，故新蒸汽等效热降的增量

$$\Delta H = q_w \eta_j \quad [kJ/kg] \qquad (1.11)$$

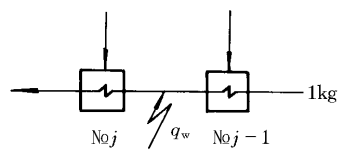


图 1.3 外部热量进入系统

装置热经济性的变化，因视外来热量为余热利用，则循环加入热量 $Q$ 保持不变，而利用外


需要全本请访问 www.ertongbook.com

部热量后的新蒸汽等效热降为 $H' = H \alpha \Delta H$，故装置效率相对提高为

$$\delta\eta_i = \frac{-'_i - \eta_i}{-'_i} \times 100$$

$$= \frac{\frac{H'}{Q} - \frac{H}{Q}}{\frac{H'}{Q}} \times 100$$

$$= \frac{H' - H}{H'} \times 100$$

$$\text{Ⅱ} \frac{\Delta H}{H \alpha \Delta H} \text{P } 100 \quad [\%]$$

或

$$\delta -'_i = \frac{-'_i - \eta_i}{\eta_i} \times 100$$

$$\text{Ⅱ} \frac{\Delta H}{H} \text{P } 100 \quad [\%]$$

应当指出，这里的 $\delta\eta_i$ 或 $\delta\eta'_i$ 计算公式在 $Q$ 不变时才成立，否则要另行推导。

(2)内部热量进出系统

给水泵的焓升、除氧器排气余热的回收利用、以及热力设备和管道的散热等均属无工质携带的内部热量。它们进入系统是一个内部纯热量的利用问题，出系统则是纯热量损失问题。因而，它们引起的作功变化可用等效热降原理直接求得。

图 1.4 为给水泵焓升 $\tau_b$ 的示意图。由于 $\tau_b$ 是纯热量进入系统，并利用在 $\eta_j$ 能级上，因而按等效热降概念，新蒸汽等效热降的增量

$$\Delta H = \tau_b \eta_j \quad [\text{kJ/kg}]$$

故泵功焓升热量回收的经济效果

$$\delta\eta_i \text{ Ⅱ } \frac{\Delta H}{H'} \text{P } 100 \quad [\%]$$

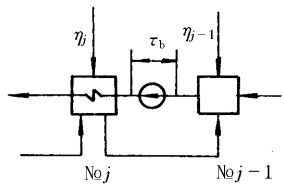



图 1.4　给水泵焓升示意图

同样，热力设备出现某种热量损失或热量输出时，即内部纯热量出系统的问题，按其所处能级可用等效热降原理简便地求得该热量引起的作功损失和热经济性的降低，其计算公式与内部热量利用一样，不同的只是一个表示作功增加和经济性提高，另一个表示作功减少和经济性降低。其装置效率的相对降低为

$$\delta\eta_i \text{ Ⅱ } \frac{\Delta H}{H \sim \Delta H} \text{P } 100 \quad [\%]$$

### 1.2.3　携带工质的内、外热量进出热力系统

携带工质的热量，无论是外部热量还是内部热量，除了热量进出系统外，还有工质进出系统。因此，这类问题的处理不同于纯热量，不能简单地应用等效热降原理，必须考虑系统工质的变化。具体分析时，还应当区分携带热量的工质是蒸汽还是热水。

(1)蒸汽携带热量进入系统

图 1.5 表示具有焓值 $h_f$，份额为 $\alpha_f$ 的蒸汽，从 $\eta_j$ 能级进入系统。比如轴封漏汽回收利用

于加热器，或者外部蒸汽引用于加热器就属于这种情况。其目的是提高装置的经济性。

为了确定蒸汽携带热量进入系统引起热量作功和装置经济性的变化，把这个热量分成两部分来研究：一部分为纯热量 $\alpha_f(h_f - h_j)$；另一部分为带工质的热量 $\alpha_f h_j$。显然，纯热量进入系统的作功是一个用等效热降概念容易解决的问题。由于这个热量利用于抽汽效率为 $\eta_j$ 的能级上，因而作功为

$$\alpha_f(h_f - h_j)\eta_j$$

剩余的带工质的 $\alpha_f h_j$ 热量，正好与该级抽汽焓值 $h_j$ 一致，因此 $\alpha_f$kg 来汽恰好顶替 $\alpha_f$kg 抽汽，不产生疏水的变化。为了保持系统工质的平衡，进入冷凝器的化学补水量必须相应减少 $\alpha_f$，这样主凝结水量将保持不变。由于疏水量及主凝结水量均未发生变化，因而不影响各加热器的抽汽量。所以被顶替的抽汽返回汽轮机，是全部直达冷凝器，其作功为 $\alpha_f(h_j - h_n)$。由此可知，蒸汽携带热量的全部作功应是两部分热量作功的代数和。即

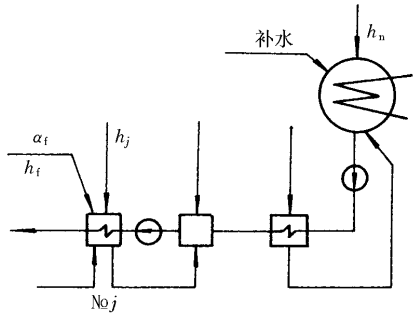



图 1.5　蒸汽携带热量进入系统

$$\Delta H = \alpha_f[(h_f - h_j)\eta_j + (h_j - h_n)] \quad [\text{kJ/kg}] \tag{1.12}$$

装置经济性的相对变化为

$$\delta\eta_i \approx \frac{\Delta H}{H'} \times 100 \quad [\%]$$

上述讨论不仅对 $h_f > h_j$ 适用，同样对 $h_f \leqslant h_j$ 也适用。只是在 $h_f = h_j$ 时纯热量部分的作功等于零，而在 $h_f < h_j$ 时纯热量部分的作功为负值而已。

(2)热水携带热量进入系统

无论外部热水抑或内部热水进入系统，其方式有两种：一是从主凝结水管路进入，二是从疏水管路进入(见图 1.6 及图 1.7)。由于热水进入地点不同，产生的经济效果和计算方法也不相同。

①热水从主凝结水管路进入系统。图 1.6 表示具有焓值 $h_f$，份额为 $\alpha_f$ 的热水从加热器 $j$ 后进入凝结水管路。为了确定该热水携带热量进入系统引起的作功和装置经济性的变化，把这个热量分成两部分来研究：一部分是纯热量 $\alpha_f(h_f - \bar{t}_j)$；另一部分是带工质的热量 $\alpha_f \bar{t}_j$。显然，纯热量进入系统引起的作功变化是一个与等效热降概念一致的问题，由于这个热量利用于抽汽效率为 $\eta_{j+1}$ 的能级，因而作功为

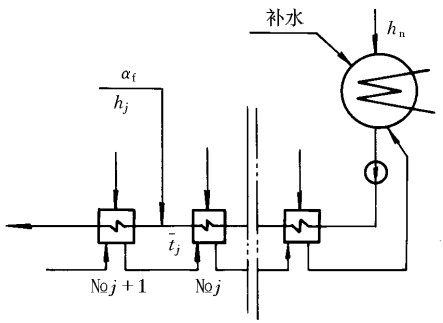



图 1.6　热水从主凝结水管进入系统

$$\alpha_f(h_f - \bar{t}_j)\eta_{j51}$$

另一部分带工质的热量 $\alpha_f \bar{t}_j$，正好与混合点凝结水焓 $\bar{t}_j$ 相同，因此，$\alpha_f$kg 热水恰好顶替 $\alpha_f$kg 主凝结水。为了保持系统工质的平衡，这时进入凝汽器的化学补给水应相应减少 $\alpha_f$kg。

显然，它使加热器№1到№$j$中流过的主凝结水减少$\alpha_f$kg，因而获得作功$\alpha_f\sum_{r21}^{j}\tau_r\eta_r$。

由此可知，热水从主凝结水管路进入系统的全部作功，应是两部分热量作功的代数和。

即
$$\Delta H = \alpha_f[(h_f - h_j)\eta_{j51} + \sum_{r21}^{j}\tau_r\eta_r] \quad [kJ/kg] \tag{1.13}$$

装置经济性的相对变化为

$$\delta\eta_i \approx \frac{\Delta H}{H\ \alpha\ \Delta H} \times 100 \quad [\%]$$

②热水从疏水管路进入系统。图1.7是具有焓值$h_f$，份额为$\alpha_f$的热水从加热器$j$的疏水管路进入系统。为了确定该热水进入系统的作功和装置经济性的变化，同样把它分成两部分，即纯热量$\alpha_f(h_f - h_{sj})$和带工质的热量$\alpha_f h_{sj}$。显然，纯热量利用在$j-1$加热器中，因而作功为

$$\alpha_f(h_f - h_{sj})\eta_{jS1}$$

带工质的热量$\alpha_f h_{sj}$沿疏水线逐级自流，在加热器$j$ S 1到$m$中分别放出热量$\alpha_f\gamma_r$，故作功为$\alpha_f\sum_{r=m}^{jS1}\gamma_r\eta_r$。当该热水进入汇集加热器$m$后，正好顶替$\alpha_f$kg主凝结水，为了保持系统工质平衡，这时进入冷凝器的化学补给水将相应减少$\alpha_f$kg，因而获得作功为$\alpha_f\sum_{r21}^{mS1}\tau_r\eta_r$。

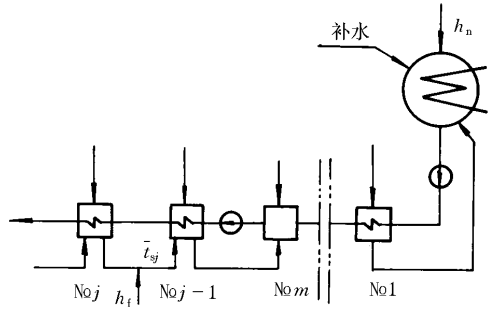



图1.7 热水从疏水管道进入系统

因此可知，热水从疏水管路进入系统的全部作功，应是两部分热量作功的代数和，即

$$\Delta H = \alpha_f[(h_f - h_{sj})\eta_{jS1} + \sum_{r=m}^{jS1}\gamma_r\eta_r + \sum_{r21}^{mS1}\tau_r\eta_r] \quad [kJ/kg] \tag{1.14}$$

装置热经济性相对变化为

$$\delta\eta_i \approx \frac{\Delta H}{H\ \alpha\ \Delta H} \times 100 \quad [\%]$$

应当指出，公式(1.13)，(1.14)对$h_f \leqslant h_j$或$h_f \leqslant h_{sj}$同样适用。

(3)带工质的热量出系统

热系统设备存在的工质渗漏以及为满足外部的各种需要而提供的带工质的热量，都属带工质的热量出系统。其形式可以是蒸汽，也可以是热水，热水可以是给水或疏水。带工质的热量出系统将使装置经济性降低，但影响的程度将随工质的形态不同而不相同。

带工质的热量出系统的定量分析公式是带工质的热量入系统的定量公式的一个特例，即令入系统的公式中的纯热量部分等于零即可。因为出系统不存在该纯热量的问题。

蒸汽携带热量出系统的定量公式是将蒸汽携带热量入系统公式(1.12)中的纯热量$(h_f - h_j)\eta_j$项视为零，其作功损失为

$$\Delta H = \alpha_f(h_f - h_n) \quad [kJ/kg] \tag{1.15}$$

装置热经济性相对降低为

$$\delta\eta_{\mathrm{i}} \approx \frac{\Delta H}{H - \Delta H} \times 100 \quad [\%]$$

公式(1.15)的物理意义是蒸汽出系统损失工质 $\alpha_{\mathrm{f}}$,为了维持系统工质的平衡,必须从凝汽器补入相同数量的化学除盐水,由此可知出系统的蒸汽是直达凝汽器的汽流,故作功损失为 $\alpha_{\mathrm{f}}(h_{\mathrm{f}} - h_{\mathrm{n}})$。

应当指出,公式(1.15)只适用于从汽轮机本体出系统的蒸汽。若从系统的其他地方出系统的蒸汽,其作功损失不能简单套用(1.15)式,必须根据系统情况,寻找蒸汽从汽轮机本体出系统的源头,按汽轮机本体源头参数出系统用(1.15)式计算作功损失,然后,扣除该蒸汽沿系统发生的热量变迁引起的作功变化(按等效热降计算)才是该蒸汽的作功损失。

给水携带热量出系统的定量公式是将热水携带热量进主凝结水系统公式(1.13)中的纯热量 $(h_{\mathrm{f}} - h_j)\eta_{j51}$ 项视为零,其作功损失为

$$\Delta H = \alpha_{\mathrm{f}} \sum_{r=1}^{j} \tau_r \eta_r \qquad [\mathrm{kJ/kg}] \tag{1.16}$$

装置热经济性相对降低为

$$\delta\eta_{\mathrm{i}} \approx \frac{\Delta H}{H - \Delta H} \times 100 \quad [\%]$$

公式(1.16)的物理意义是给水出系统损失工质 $\alpha_{\mathrm{f}}\mathrm{kg}$,为了保持系统工质的平衡,必须从凝汽器补入相同数量的化学除盐水,由此可知,通过加热器№1至№$j$的水量均增加了 $\alpha_{\mathrm{f}}\mathrm{kg}$,沿途将多吸热 $\alpha_{\mathrm{f}} \sum_{r=1}^{j} \tau_r$,故损失作功 $\alpha_{\mathrm{f}} \sum_{r=1}^{j} \tau_r \eta_r$。

疏水携带热量出系统的定量公式是将热水携带热量进疏水系统公式(1.14)中的纯热量 $(h_{\mathrm{f}} - h_{\mathrm{sj}})\eta_{j\mathrm{S1}}$ 项视为零,其作功损失为

$$\Delta H = \alpha_{\mathrm{f}} \left( \sum_{r=m}^{j\mathrm{S1}} \gamma_r \eta_r + \sum_{r=1}^{m\mathrm{S1}} \tau_r \eta_r \right) \qquad [\mathrm{kJ/kg}] \tag{1.17}$$

装置热经济性相对降低为

$$\delta\eta_{\mathrm{i}} \approx \frac{\Delta H}{H - \Delta H} \times 100 \quad [\%]$$

公式(1.17)的物理意义是疏水出系统损失工质 $\alpha_{\mathrm{f}}\mathrm{kg}$,为保持系统工质的平衡,必须从凝汽器补入 $\alpha_{\mathrm{f}}\mathrm{kg}$ 的化学除盐水,由此可知,流经加热器№1至№$m-1$的水量增加 $\alpha_{\mathrm{f}}\mathrm{kg}$,多吸热 $\alpha_{\mathrm{f}} \sum_{r=1}^{m\mathrm{S1}} \tau_r$,同样流经加热器№$m$至№$j-1$的疏水量减少 $\alpha_{\mathrm{f}}\mathrm{kg}$,使疏水放热量减少 $\alpha_{\mathrm{f}} \sum_{r=1}^{j\mathrm{S1}} \gamma_r$,故损失作功 $\alpha_{\mathrm{f}} \left( \sum_{r=m}^{j\mathrm{S1}} \gamma_r \eta_r + \sum_{r=1}^{m\mathrm{S1}} \tau_r \eta_r \right)$。

综上所述,带工质热量进系统与出系统的定量公式是通用的。从热力过程知道,工质携带热量出系统不存在纯热量部分,所以取消进系统公式中的纯热量项就是出系统的定量公式。所不同者,进系统是作功增加,出系统是作功减少。

### 1.2.4 补水地点的作功差异

前面论述携带工质的内、外热量用于系统,以及带工质的热量出系统的分析计算,均以补水进入冷凝器为基点。如果实际补水进入除氧器时,则前述诸计算公式都应增添一项补水地

点引起的作功差异。

由冷凝器补入改为从除氧器补入引起的作功差异(如图 1.8 所示系统),按等效热降定量分析,其值为

$$\Delta H_{bs} = \alpha_{bs}\left[-(h_{mS1} - h_{bs})\eta_m + \sum_{r21}^{mS1}\tau_r\eta_r\right] \quad [kJ/kg] \tag{1.18}$$

它的物理意义是,由于补水进入除氧器增加了除氧器用汽,因而新蒸汽作功减少了

$$\alpha_{bs}(h_{mS1} - h_{bs})\eta_m$$

但补水不进冷凝器,也不沿低压加热器逐级吸热,故获得作功为 $\alpha_{bs}\sum_{r21}^{mS1}\tau_r\eta_r$。两者的代数和就是补水地点引起的作功差异。

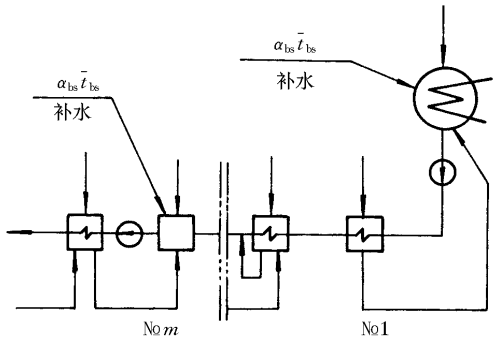



图 1.8 补水方式系统图

应当指出,凡有工质进出系统,且补水地点又在除氧器时,若引用以冷凝器为补水基点的计算公式,都应在该公式中增补这项作功差异。

### 1.2.5 热力系统辅助成分作功损失总和 $\sum \Pi$

在 1.1.4 节计算新蒸汽等效热降时指出,新蒸汽毛等效热降 $H_M$ 扣除热力系统全部辅助成分的作功损失 $\sum \Pi$,就得到新蒸汽净等效热降。即

$$H = H_M - \sum \Pi$$

热力系统的辅助成分,是指除了抽汽回热加热以外的一切附加成分。它一般包括:门杆漏汽及其利用;轴封漏汽及其利用;抽气器用汽及其回收利用;给水泵的焓升;加热器的散热损失等等。各种热力系统都有自己的辅助成分。它们的作功损失和回收利用的作功,均可以用本章讨论的基本法则给予局部定量计算。这些作功损失和回收利用作功的代数和,就是我们所求的 $\sum \Pi$。

## 1.3 再热机组的等效热降

### 1.3.1 概述

再热机组热力系统如图 1.9 所示。其高压缸的排汽,在流经再热器之前叫再热冷段,经再热器加热升温后叫再热热段。由于有再热及其吸热量 $\sigma$ 的存在,给等效热降的计算及其应用带来了一些特点,不同于非再热机组。这些特点主要表现于再热冷段及其以上区段,在这区间出现任何排挤抽汽都将流经再热器而吸热。这时将引起两个问题:首先,它引起汽轮机热耗量变化,与等效热降保持热量不变不一致;其次,排挤抽汽的作功不仅包含加入热量 $q_j$ 本身在汽轮机中的继续作功,而且还包含再热器增加吸热的作功。这就不是我们讨论中的等效热降了。因此,研究再热机组等效热降时,应当考虑这两个方面的影响。

解决上述问题的方法有两种。其一,是继续保持循环热 $Q$ 不变,称为定热量等效热降;其二,顺其自然,恢复循环吸热的真实性,使它随系统的变动而变,这样的等效热降及其应用称之为再热机组的变热量等效热降。

两种等效热降各具特色。它们的分析计算方法虽不相同,但所得结果是完全相等的。经实践证实,变热量法比定热量法在概念上更直观、清晰、易于理解和掌握。在计算上更为简捷,已为工程界广泛应用。为此,本章将只对变热量方法及其应用分别给予论述。

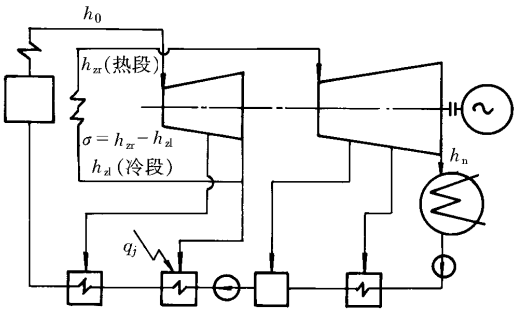



图 1.9　再热机组系统

### 1.3.2　变热量等效热降

所谓变热量等效热降,就是顺其自然,恢复循环吸热的真实性,让它随系统的改变而变。这样就与常规方法和习惯一致,使问题既变得直观易懂,又维持了等效热降分析问题简捷、准确的特色。

再热热段以后的 $H_j^0$ 由于再热热段以后排挤抽汽不影响通过再热器的蒸汽份额 $\alpha_{zr}$,也就不影响再热器的吸热量。因而,这时变热量等效热降的计算与非再热机组一样,也与定热量等效热降一样,其通式是

$$H_j^0 = h_j - h_n - \sum_{r=21}^{jS1} A_r \eta_r \qquad [kJ/kg] \tag{1.19}$$

再热冷段及其以上的 $H_j^0$ 根据等效热降的定义,再热冷段及其以上产生 1kg 排挤抽汽,按前面基础理论的推演方法,可以导出该蒸汽返回汽轮机的实际作功为

$$H_j^0 = h_j + \sigma - h_n - \sum_{r=21}^{jS1} A_r \eta_r \qquad [kJ/kg] \tag{1.20}$$

应当指出,这是 1kg 蒸汽返回汽轮机的真实作功,它不但包括排挤 1kg 蒸汽所需加入热量的作功,而且还包含排挤抽汽引起再热器吸热增量的作功。这是它与定热量等效热降 $H_j$ 的本质区别。显然,再热冷段以上出现任何排挤抽汽(包括增加抽汽),都将改变通过再热器的蒸汽份额,因而改变了再热器的吸热量,这就是所谓变热量的含意。让循环吸热量自然变动而求得的抽汽等效热降称之为变热量等效热降。为了有别于定热量等效热降 $H_j$,用符号 $H_j^0$ 表示。

当再热冷段等效热降按变热量公式(1.20)求出后,以它为基础,借助于等效热降之间的关系式,可以计算冷段以上的变热量等效热降,其结果自然与通式(1.20)所得变热量等效热降相同。

(1)变热量抽汽效率

变热量抽汽等效热降 $H_j^0$ 与排挤 1kg 抽汽所需热量 $q_j$ 之比,称之为变热量抽汽效率。即

$$\eta_j^0 = \frac{H_j^0}{q_j}$$


需要全本请访问 www.ertongbook.com