

西安交通大学 林万超

火力发电厂

热力系统节能分析

621.4

水利电力出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了“等效热降理论”，重点讨论了热力系统的节能途径和方法，并用等效热降方法给予定量分析和计算，探讨节能效果的大小和潜力。每章均有应用举例。

本书可供从事火力发电和工业企业蒸汽动力装置设计、运行、管理、科研的工程技术人员阅读和使用，并可供大专院校热能专业师生作选修课教材或参考书。

火力发电厂

热力系统节能分析

西安交通大学 林万超

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

水利电力出版社印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

787×1092毫米 32开本 6.125印张 132千字

1987年12月第一版 1987年12月北京第一次印刷

印数0001—5600册

ISBN7-120-00023-3/TK·8

15143·6511 定价1.30元



序 言

节能是当前的一项重要工作，是“四化”建设的一项既定方针。消耗能源的工厂要节能，实现能量转换的工厂——电厂也要大力节能，而且是节约能源的一个重要方面。

热力系统节能是电厂节能的内容之一，它包括热力系统优化分析和技术改造，热力系统设备的完善以及定量分析运行参数和操作管理等方面的节能工作。热力系统节能可以同热平衡查定相结合，即对热平衡查定的数据进行优化处理，发现存在问题，提出改造方案，确定节能的潜力。

热力系统节能分析一书，是根据著者在刊物上发表的文章，经过系统的加工整理而成。全书由八章组成，它们是：等效热降的理论基础；等效热降应用的基本法则；再热机组的等效热降；热力系统的节能改造分析；热力系统设备的节能分析；热力系统运行中的作功能力和损失分析；余热回收利用分析；热力系统优化及节能潜力分析。

本书在阐述等效热降理论的同时，重点讨论了热力系统节能的途径和方法，并用“等效热降”理论指导热力系统的节能分析和定量计算，探讨节能效果的大小和潜力。全书各个章节均有举例示范，力图使读者学以致用，掌握分析计算的方法。本书可供从事热经济分析和节能工作的科技工作者参考。

由于著者水平有限，书中错误之处在所难免，恳请专家和读者给予批评指正。

本书承贺来、杨锦生细心审阅，谨此致谢。

著 者

一九八四年十一月

目 录

序言

第一章 等效热降的理论基础

1.1 概述	1
1.2 等效热降概念	2
1.3 H_i 和 η_i 的计算	6
1.4 新蒸汽等效热降	13
1.5 等效热降的条件	14
1.6 等效热降计算实例	15
参考文献	21

第二章 等效热降应用的基本法则

2.1 概述	22
2.2 内、外纯热量出入热力系统	24
2.3 工质携带的内、外热源进入热力系统	28
2.4 带工质的热量输出系统	32
2.5 补水地点引起的做功差异及多种形式的计算 公式问题	35
2.6 热力系统辅助成份做功损失总和 ΣII	37
参考文献	39

第三章 再热机组的等效热降

3.1 概述	40
3.2 定热量等效热降	41
3.3 定热量等效热降的应用特点	47

3.4	变热量等效热降	61
3.5	变热量分析计算	63
	参考文献	70

第四章 热力系统的节能改造分析

4.1	轴封系统	71
4.2	抽气器系统	75
4.3	补充水系统	78
4.4	厂用蒸汽系统	81
4.5	除氧器的联结系统	84
4.6	蒸发器联结系统	87
4.7	喷水减温系统	91
4.8	疏水系统	97
	参考文献	102

第五章 热力系统设备的节能分析

5.1	加热器	103
5.2	疏水冷却器	114
5.3	疏水泵	117
5.4	蒸汽冷却器	122
	参考文献	132

第六章 热力系统运行的作功能力损失分析

6.1	工质渗漏的作功能力损失	133
6.2	蒸汽压损的作功能力损失	136
6.3	凝汽器过冷度的作功能力损失	139
6.4	热能品位贬值的作功能力损失	140
6.5	给水温度变动的作功能力损失	142
6.6	运行中倒换疏水系统的作功能力损失	144
6.7	再循环系统的作功能力损失	146

6.8 高压加热器运行水量自然分配的作功能力损失	147
参考文献	151

第七章 余热回收利用分析

7.1 概述	152
7.2 排污利用分析	153
7.3 除氧器排气及轴封排汽余热利用	155
7.4 发电机、冷油器余热利用	157
7.5 锅炉排烟余热利用	159
7.6 其他余热利用	161
参考文献	162

第八章 热力系统优化及节能潜力分析

8.1 概述	163
8.2 热力系统优化	164
8.3 热力系统节能潜力分析	165
参考文献	187

第一章 等效热降的理论基础

1.1 概 述

等效热降是一种新的热工理论，产生于六十年代后期，首先由库兹涅佐夫提出，并在七十年代初逐步完善、成熟，形成了一套完整的理论体系。

等效热降法是基于热力学的热功转换原理，考虑到设备质量、热力系统结构和参数的特点，经过严密地理论推演，导出几个热力分析参量 H_i 及 η_i 等，用以研究热工转换及能量利用程度的一种方法。各种实际热力系统，在系统和参数确定后，这些参量也就随之确定，并可通过一定公式计算，转换成为一次性参数给出。利用这些参数就可直接对热力设备和系统进行分析和计算。

等效热降法既可用于整体热力系统的计算，也可用于热力系统的局部分析定量。它基本上属于能量转换热平衡法。但是，它摒弃了常规计算的缺点，不需要全盘重新计算就能查明系统变化后的热经济性，即用简捷的局部运算代替整个系统的繁杂计算。具体讲，它只研究与系统改变有关的那些部分，并用给出的一次性参数进行局部定量，确定变化的经济效果。这种方法经实践应用颇为简便。

等效热降法主要用来分析蒸汽动力装置和热力系统。在火电厂的设计中，这一方法可用以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优化设计的有力工具。用等

等效热降分析运行电厂的技术改造，尤其是热力系统节能技术改造，将收到良好效果，为改造提供确切的技术依据。等效热降法在诊断电厂能量损耗、查明能量耗损的大小、发现机组存在的缺陷和问题、指出节能改造的途径与措施，以及评定机组的完善程度和挖掘节能潜力等工作中将发挥重要作用，真正达到热耗查定的目的。

除此以外，等效热降法还是管理电厂运行经济性的好办法，它为小指标的定量计算提供了简捷方法，为制定指标定额和管理措施以及改进运行操作提供了根据。借此可对全厂实施定时热经济管理，是提高运行管理水平和加强管理的重要途径。

等效热降法不仅适用于凝汽机组，同时也适用于供热机组。利用等效热降方法可以制订供热机组的工况图，分析供热方案和供热系统变化等方面的技术经济问题。

等效热降法的特点是：局部运算的热工概念清晰，与一般热力学分析完全一致，因此，容易掌握应用；其次，计算简捷而又准确，与真实热力系统相符，且无论是手工计算或是电子计算机计算都很方便。分析问题时，这种方法能充分剖析事物的本质和矛盾，分清问题的主次，从而有利于问题的正确解决。

1.2 等效热降概念

1.2.1 什么是等效热降

为了说明什么是等效热降，首先研究一下新蒸汽的做功是很有助益的。对纯凝汽式汽轮机，如图1.1所示，显然，1kg新蒸汽的做功就等于它的热降（即焓降）。

$$H = h_0 - h_n \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.1)$$

式中 h_0 —— 进汽轮机蒸汽的初焓, kJ/kg;

h_n —— 汽轮机排汽的焓, kJ/kg。

对于有回热抽汽的汽轮机, 如图1.2所示, 1kg新蒸汽
 做功

$$\begin{aligned} H &= (h_0 - h_n) - \alpha_1(h_1 - h_n) - \alpha_2(h_2 - h_n) - \dots \\ &\quad - \alpha_z(h_z - h_n) \\ &= (h_0 - h_n) \left(1 - \sum_{r=1}^z \alpha_r y_r \right) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.2) \end{aligned}$$

式中 $y_r = \frac{h_r - h_n}{h_0 - h_n}$

α —— 抽汽份额;

y —— 抽汽做功不足系数;

r —— 任意抽汽级的编号;

z —— 抽汽级数。

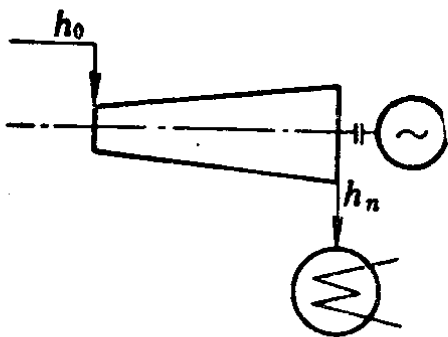


图 1.1 纯凝汽机组

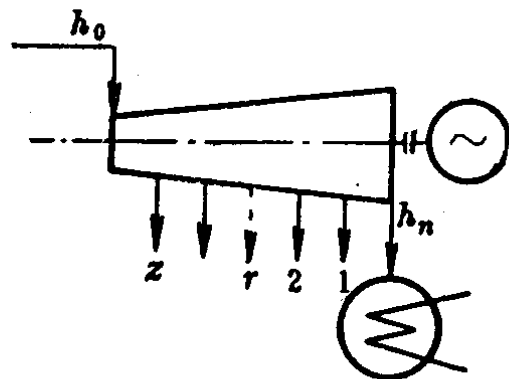


图 1.2 回热汽轮机组

显然, 这个做功不是1kg新蒸汽的简单热降, 它比纯凝汽新蒸汽热降 $H = h_0 - h_n$ 小, 但是, 它与纯凝汽式汽轮机中的 H 又有类似之处, 它们都是1kg新蒸汽的实际做功。为了有别于纯凝汽热降 H , 称这个做功为**等效热降**。等效的数量含

抽汽来补偿，其补偿量为

$$\alpha_{2-3} = \frac{\gamma_2}{q_2}$$

式中 $q_2 = h_2 - \bar{t}_1$ 即No2加热器1kg抽汽的放热量， α_{2-3} 是排挤No3加热器1kg抽汽中分配到No2加热器中的份额。

排挤抽汽继续向后流动的份额只有 $(1 - \alpha_{2-3})$ 了。这部分蒸汽膨胀做功并凝结后，产生相同数量的水返回No1加热器。No1加热器为了加热这部分水，因而抽汽量应增加

$$\alpha_{1-3} = (1 - \alpha_{2-3}) \tau_1 / q_1$$

式中 $\tau_1 = \bar{t}_1 - \bar{t}_n$ —— No1加热器中1kg水的焓升，kJ/kg；

$q_1 = h_1 - \bar{t}_{s,1}$ —— No1加热器中1kg抽汽的放热量，kJ/kg；

α_{1-3} —— 是排挤No3加热器1kg抽汽时，分配到No1加热器中的份额。

由于在No1和No2加热器中增加了抽汽份额，并产生了做功不足，故No3加热器排挤1kg抽汽返回汽轮机的做功量等于

$$H_3 = (h_3 - h_n) - \alpha_{2-3}(h_2 - h_n) - \alpha_{1-3}(h_1 - h_n) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.3)$$

这个做功称为**抽汽的等效热降**，并用符号 H_j 表示。

抽汽等效热降 H_j ，表示在抽汽减少情况下1kg排挤抽汽做功的增加值，反之，抽汽量增加时，则表示做功的减少值。显然，它考虑了比该抽汽压力更低的抽汽量的变化。

抽汽效率用 η_j 表示。如同一般效率概念一样， η_j 也是做功与加入热量之比。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 。因而， H_j 和 q_j 之比是一个热效率含义，故称它为**抽汽效率**

$$\eta_j = \frac{H_j}{q_j} \quad (1.4)$$

1.3 H_j 和 η_j 的计算

1.3.1 计算符号和公式的规定

为了计算方便和统一，规定计算公式和符号如下：

τ —— 加热器给水焓升，kJ/kg；

q —— 加热蒸汽在加热器内的放热量，kJ/kg；

γ —— 疏水在加热器中的放热量，kJ/kg。

它们的计算与加热器的形式和连接方式有关。对混合式加热器以及用水泵将疏水打入主凝结水管的加热器，统称“**汇集式加热器**”；而面式加热器，且疏水逐级回流时，则称作“**疏水放流式加热器**”。

疏水放流式加热器的 τ 、 q 和 γ 按下面公式计算

$$\left. \begin{aligned} \tau_j &= \bar{t}_j - \bar{t}_{j-1} \quad [\text{kJ/kg}] \\ q_j &= h_j - \bar{t}_{s,j} \quad [\text{kJ/kg}] \\ \gamma_j &= \bar{t}_{s,(j+1)} - \bar{t}_{s,j} \quad [\text{kJ/kg}] \end{aligned} \right\}$$

汇集式加热器的 τ 、 q 和 γ 按下面公式计算

$$\left. \begin{aligned} \tau_j &= \bar{t}_j - \bar{t}_{j-1} \quad [\text{kJ/kg}] \\ q_j &= h_j - \bar{t}_{j-1} \quad [\text{kJ/kg}] \\ \gamma_j &= \bar{t}_{s,(j+1)} - \bar{t}_{j-1} \quad [\text{kJ/kg}] \end{aligned} \right\}$$

式中 \bar{t} —— 加热器出口水焓，kJ/kg；

h —— 加热蒸汽焓，kJ/kg；

j —— 加热器脚码编号；

s —— 脚码，表示疏水。

1.3.2 H_j 的计算

计算抽汽等效热降从凝汽器开始较易确定。以图1.4系统为例进行分析。

假定No1加热器获得热量 q_1 ，恰使其抽汽减少1kg，则该

排挤抽汽返回汽轮机中继续做功，其等效热降等于它的实际焓降，即

$$H_1 = h_1 - h_n \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.5)$$

No2加热器如获得热量 q_2 ，恰使抽汽减少1kg，这时进入No1加热器中的疏水也将相应减少1kg，因而疏水在No1加热器中的放热量将减少 γ_1 ，为了补偿这个加热不足，No1加热器抽汽将增加

$$\alpha_{1-2} = \frac{\gamma_1}{q_1} \quad (1.6)$$

余下的排挤抽汽 $(1 - \alpha_{1-2})$ 将直达凝汽器。因此，第二段抽汽的等效热降等于

$$H_2 = (h_2 - h_n) - \alpha_{1-2}(h_1 - h_n) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.7)$$

将公式(1.5)、(1.6)代入公式(1.7)中得到

$$H_2 = (h_2 - h_n) - \frac{\gamma_1}{q_1} H_1 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.8)$$

No3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做功到凝汽器，另一部分将做功到No1和No2抽汽口后被抽出，用以加热1kg增添的凝结水。

No3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No2加热器的抽汽将增加

$$\alpha_{2-3} = \frac{\tau_2}{q_2}$$

同理，增添的1kg主凝结水，也将流过No1加热器，同时No2加热器增加的抽汽份额 α_{2-3} ，其疏水将在No1加热器中放出热量 $\alpha_{2-3}\gamma_1$ ，因此，No1加热器的抽汽将增加

$$\alpha_{1-3} = \frac{\tau_1 - \alpha_{2-3}\gamma_1}{q_1} = \frac{\tau_1}{q_1} - \frac{\tau_2\gamma_1}{q_2q_1}$$

由此，第三段抽汽的等效热降

$$H_3 = (h_3 - h_n) - \alpha_{2-3}(h_2 - h_n) - \alpha_{1-3}(h_1 - h_n)$$

将 α_{2-3} 和 α_{1-3} 代入，经简化得

$$H_3 = (h_3 - h_n) - \frac{\tau_1}{q_1} H_1 - \frac{\tau_2}{q_2} H_2 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.9)$$

第四段抽汽的等效热降，仍按照上述分析方法推导。如果No4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No1、No2和No3加热器中，剩余的排挤抽汽将直达凝汽器。各分配份额可分析计算如下。

由于排挤1kg抽汽，No4加热器排出的疏水也相应减少1kg，因而疏水在No3加热器中的放热量将减少 γ_3 ，为了补偿这个加热不足，No3加热器的抽汽将增加

$$\alpha_{3-4} = \frac{\gamma_3}{q_3}$$

排挤抽汽的剩余部分 $(1 - \alpha_{3-4})$ ，经过不同途径最终将变为凝结水而汇集于凝汽器，使主凝结水增添了 $(1 - \alpha_{3-4})$ ，因而No2加热器的抽汽将增加

$$\begin{aligned} \alpha_{2-4} &= \frac{(1 - \alpha_{3-4})\tau_2}{q_2} \\ &= \frac{\tau_2}{q_2} - \frac{\gamma_3}{q_3} \frac{\tau_2}{q_2} \end{aligned}$$

同理，增添的 $(1 - \alpha_{3-4})$ kg主凝结水，也将流过No1加热器，同时No2加热器增加的抽汽份额 α_{2-4} ，其疏水将在No1加热器中放出热量 $\alpha_{2-4}\gamma_1$ ，因此，No1加热器的抽汽将增加

$$\begin{aligned} \alpha_{1-4} &= \frac{(1 - \alpha_{3-4})\tau_1 - \alpha_{2-4}\gamma_1}{q_1} \\ &= \frac{\tau_1}{q_1} - \frac{\gamma_3\tau_1}{q_3q_1} - \frac{\tau_2\gamma_1}{q_2q_1} + \frac{\gamma_3\tau_2\gamma_1}{q_3q_2q_1} \end{aligned}$$

因此，第四段抽汽的等效热降

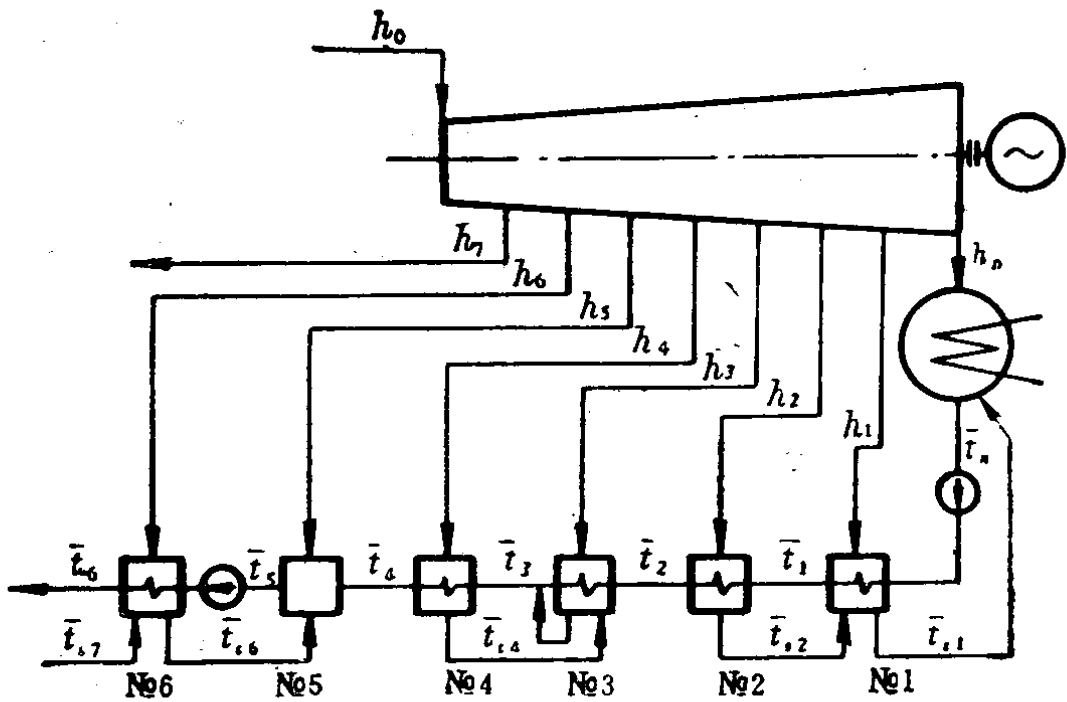


图 1.4 机组局部热力系统

$$H_4 = (h_4 - h_n) - \alpha_{3-4}(h_3 - h_n) - \alpha_{2-4}(h_2 - h_n) - \alpha_{1-4}(h_1 - h_n)$$

代入各抽汽份额并简化得

$$H_4 = (h_4 - h_n) - \frac{\tau_1}{q_1} H_1 - \frac{\tau_2}{q_2} H_2 - \frac{\gamma_3}{q_3} H_3 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.10)$$

1.3.3 H_j 的计算通式及 η_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

$$H_j = (h_j - h_n) - \sum_{r=1}^{j-1} \frac{A_r}{q_r} H_r \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.11)$$

式中 A_r —— 取 γ_r 或者 τ_r , 视加热器形式而定, 见下面规定;

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 τ_r 代之。如果 j 为疏水

放流式加热器，则从 j 以下直到（包括）汇集加热器用 γ_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 τ_r 代替 A_r 。

各抽汽等效热降 H_j 算出后，相应的抽汽效率按下式求得

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

式中 H_j 和 q_j 均为已知数，故 η_j 的计算极为方便。

1.3.4 等效热降之间的关系

前面曾经讲过，计算等效热降从凝汽器开始，由低向高逐级计算较为方便。如若掌握了等效热降之间的关系，计算将更为简捷。可由已知的等效热降去求取更高抽汽级的等效热降。

1.3.4.1 疏水放流式加热器与其后相邻加热器之间的等效热降关系

疏水放流式加热器与其后相邻加热器之间的等效热降关系，可用图 1.5 所示的两种情况进行分析。图中（a）表示其后相邻加热器是疏水放流式加热器联接系统；图中（b）表示其后相邻加热器是汇集式加热器联接系统。

按照图 1.5(a)，根据通式（1.11）求等效热降有：

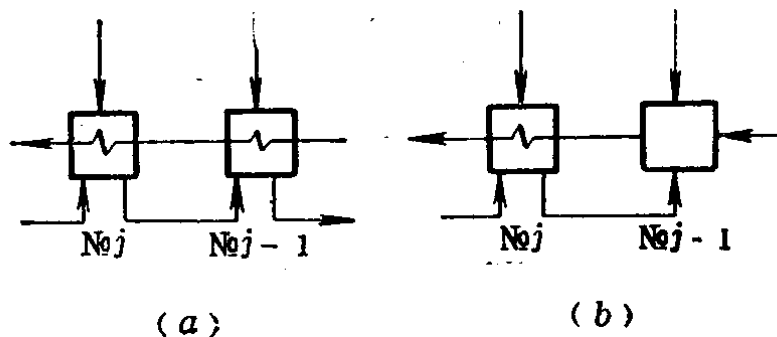


图 1.5 相邻加热器联接系统

$$H_j = (h_j - h_n) - \sum_{r=1}^{j-1} \frac{A_r}{q_r} H_r \quad (1.12)$$

$$H_{j-1} = (h_{j-1} - h_n) - \sum_{r=1}^{j-2} \frac{A_r}{q_r} H_r \quad (1.13)$$

从 H_j 中减去 H_{j-1} 得

$$H_j - H_{j-1} = (h_j - h_{j-1}) - \frac{A_{j-1}}{q_{j-1}} H_{j-1}$$

由于图1.5(a)中的Noj-1为疏水放流式加热器，其 A_{j-1} 应为 γ_{j-1} ，故

$$H_j = (h_j - h_{j-1}) + \left(1 - \frac{\gamma_{j-1}}{q_{j-1}}\right) H_{j-1} \quad (1.14)$$

按照图1.5(b)，根据通式(1.11)求等效热降有：

$$\begin{aligned} H_j &= (h_j - h_n) - \sum_{r=1}^{j-1} \frac{A_r}{q_r} H_r \\ &= (h_j - h_n) - \frac{\gamma_{j-1}}{q_{j-1}} H_{j-1} - \sum_{r=1}^{j-2} \frac{\tau_r}{q_r} H_r \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$H_{j-1} = (h_{j-1} - h_n) - \sum_{r=1}^{j-2} \frac{\tau_r}{q_r} H_r \quad (1.16)$$

从 H_j 中减去 H_{j-1} 得

$$H_j - H_{j-1} = (h_j - h_{j-1}) - \frac{\gamma_{j-1}}{q_{j-1}} H_{j-1}$$

$$H_j = (h_j - h_{j-1}) + H_{j-1} - \frac{\gamma_{j-1}}{q_{j-1}} H_{j-1}$$

$$= (h_j - h_{j-1}) + \left(1 - \frac{\gamma_{j-1}}{q_{j-1}}\right) H_{j-1} \quad (1.17)$$

比较式(1.14)与式(1.17)可知，尽管图1.5(a)与图1.5(b)中Noj-1加热器形式不相同，但相邻加热器之间的等效热降的关系式是相同的。由此得出，疏水放流式加热器与其后