

热 力 发 电 厂

重庆大学热电厂教研组编

电 力 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书着重阐述现代大、中型火力发电厂热力过程的基本原理，热力辅助设备和系统的技术经济分析、计算、运行的基本知识。主要内容包
括：热力发电厂的型式及其热经济性，发电厂的热力系统、汽水管道和热力设备的经济运行。此外，对原子能发电厂，蒸汽-燃气联合动力装置和地热电站也作了简要介绍。

本书可作为高等学校“电厂热能动力”专业热力发电厂课程的教材，也可供有关专业的工程技术人员参考。

热 力 发 电 厂

重庆大学热力发电厂教研组编

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17印张 386千字 2插页

1981年5月第一版 1981年5月北京第一次印刷

印数 0001—6820册 定价 1.95元

书号 15036·4185

前 言

本书着重阐明大、中型火力发电厂实际热力过程的基本原理，分析其经济性与合理性，论述发电厂热力设备及其系统技术经济分析、计算和运行的基本知识，并简要地介绍一些新的计算方法和热力发电厂的发展趋向。

全书取材以国内设备和经验为主，适当地引用国外资料，并注意反映现代国内外有关的先进科学技术水平。

本书由重庆大学瞿家同（第1~5、12~15章）、常国蓉（第7章、第10章第5节和第14章第4节）和郑体宽（绪论、第6、8~11、16章）三人编写，由郑体宽负责全书的统稿工作。

全书由南京工学院主审（汪孟乐、钟史明），华北电力学院参加审稿（叶昌仁、孙慧兰）。各有关兄弟院校、科研、设计和生产单位在本书编写过程中，提供了许多资料和宝贵建议，在此一并表示感谢。

限于编者水平，错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1980年8月

目 录

前 言	
绪 论	1

第一篇 热力发电厂的型式及其热经济性

第一章 发电厂热力过程的理论基础	3
1-1 发电厂热能转变过程及其评价基础	3
1-2 减少热力过程不可逆性的根本方向	7
第二章 凝汽式发电厂及其热经济性	10
2-1 蒸汽循环	10
2-2 凝汽式发电厂生产过程中各种热损失及其效率	11
2-3 凝汽式发电厂的主要热经济指标	13
第三章 热电厂及其热经济性	15
3-1 联合能量生产的概念	15
3-2 热电厂总热耗量的分配及热经济指标	16
3-3 联合能量生产的燃料节省	22
3-4 发展热化事业	25
第四章 蒸汽参数及中间再热	26
4-1 汽轮机发电厂的热经济性与蒸汽初参数的关系	27
4-2 蒸汽中间再热	40
4-3 高参数叠置扩建电厂的热经济性	47
4-4 蒸汽终参数	50
第五章 给水的回热加热	52
5-1 给水回热加热的热经济性	52
5-2 给水回热加热过程主要参数的选择	57
5-3 给水回热加热在中间再热机组中应用的效果	64

第二篇 发电厂的热力系统

第六章 给水回热加热系统	68
6-1 给水回热加热器	68
6-2 给水回热加热系统	74
6-3 给水回热系统的热力计算	78
6-4 给水回热加热器的运行	89
第七章 给水除氧系统	90
7-1 给水除氧的任务及热除氧原理	90

7-2	除氧器的种类和构造	93
7-3	除氧器的热力系统	98
7-4	除氧器的热平衡和自生沸腾	99
7-5	除氧器的运行	100
7-6	除氧器的滑压运行	101
第八章	发电厂的汽水损失及其补充	109
8-1	发电厂的汽水损失	109
8-2	锅炉连续排污利用系统	110
8-3	蒸发设备及其系统	112
第九章	热电厂的供热系统	116
9-1	热负荷的种类及其特性	116
9-2	汽网供汽方式及其热力系统	117
9-3	供暖载热质和供热调节的概念	118
9-4	热网加热器及其系统	120
9-5	减温减压器及其热力系统	121
第十章	发电厂的原则性热力系统	123
10-1	原则性热力系统的组成和应用	123
10-2	原则性热力系统的举例	123
10-3	原则性热力系统的计算	132
10-4	原则性热力系统计算例题	134
10-5	电子计算机计算热力系统	145
第十一章	发电厂的全面性热力系统	153
11-1	发电厂全面性热力系统的概念	153
11-2	发电厂主蒸汽管道系统	154
11-3	发电厂给水管道系统	157
11-4	发电厂的起动旁路系统	166
11-5	发电厂的疏放水系统	171
11-6	发电厂全面性热力系统举例	172

第三篇 发电厂热力设备的经济运行

第十二章	发电厂热力设备的经济运行	175
12-1	凝汽式汽轮机组的动力特性	175
12-2	热力设备并列运行时负荷经济分配的基本原理	180
12-3	锅炉及汽轮机组并列运行时负荷的经济分配	182
12-4	单元机组的经济运行	185

第四篇 发电厂的汽水管道

第十三章	发电厂汽水管道的组成	198
13-1	发电厂管道的技术规范及数据	198

13-2	管道连接件和附件	200
13-3	管道支吊架	205
第十四章	管道的技术计算和布置	207
14-1	管道的技术计算	207
14-2	管道热伸长和应力计算	213
14-3	发电厂的管道布置	229
14-4	有限单元法计算管道应力	231

第五篇 其它热力发电厂

第十五章	原子能发电厂	252
15-1	概述	252
15-2	原子能发电厂的反应堆	252
15-3	原子能发电厂的热力系统	254
15-4	原子能发电厂的经济问题	259
第十六章	蒸汽-燃气联合动力装置和地热电站	260
16-1	蒸汽-燃气联合动力装置	260
16-2	地热电站	263
附录	常用物理量的单位换算表	266

绪 论

电力是现代化生产的主要动力。它是促进现代工农业生产，推动科学技术发展，实现国防现代化的重要物质技术基础。它也是不断地提高人们物质文化生活的重要条件。电力的耗费已成为衡量一个国家技术和经济发展水平高低的重要标志之一。

实践表明，电力工业的发展必须超前国民经济各部门的发展。近十五年来，世界国民经济生产总值平均年增长率为5.3%，而电力消费的年增长率为7.5%，电力超前系数为1.41。我国要实现四个现代化，同样地也必须使电力工业先行，电力超前系数应大于1。

解放前，我国的电力工业基础很薄弱，生产技术水平极为落后。1949年全国装机容量仅185万千瓦（其中火力发电容量为169万千瓦），年发电量只有43.1亿度，居世界第二十五位。所建电厂的90%以上分布在沿海地区。电网和单机容量都很小。运行水平很低，多数电厂的发电标准煤耗率在1200克/千瓦·时以上。

解放后，我国电力工业有了很大的发展。相继建成一批现代化的电厂，电厂的布局趋于合理，并形成了不同规模的电网。1979年，全国发电设备的容量已达5712万千瓦（其中火电厂容量为3984万千瓦），年发电量为2819.5亿度，居世界第七位。从五十年代起我国开始试制中参数6000千瓦凝汽式汽轮发电机组，到现在已能制造亚临界参数单机容量为20万、30万千瓦的成套火力发电设备。电厂的运行水平有了较大的提高，1979年全国平均发电煤耗率为422克/千瓦·时。但是，我国的电力工业与一些工业技术水平较高的国家相比，还有差距。从我国国民经济的发展需要来看，电力工业还是一个薄弱环节。

我国电力工业技术的发展动向为：（1）水火并举，因地制宜。在有水力资源的地区应优先发展水电，在煤炭资源丰富的地区应建设大型的火力发电基地。（2）大中小并举，以大型为骨干。大型电厂的单位造价低，发电煤耗率低，运行经济，所以它是发展方向；小型电厂所需资金少，建厂快，可充分利用当地燃料，推动地方工农业生产，从而有助于整个国民经济的发展。1990年前新建电厂的主力机组是国产20万、30万千瓦机组，今后20万千瓦以上大机组的比重应超过三分之二。（3）火电立足于燃煤。我国有丰富的煤炭资源，火电优先利用劣质煤。（4）节约与合理使用能源。能源方面必须认真贯彻执行“开发和节约并重，近期把节能放在优先地位”的原则，充分发挥现有设备的潜力，提高热能的综合利用程度。（5）控制污染，保护环境。火电厂在生产过程中产生的灰尘、SO₂、NO_x、废水、灰渣和噪音都要污染环境，应采取有效措施，严加控制，保护环境。（6）提高火电厂的自动化水平。尽快解决大机组实现集中控制的技术问题，并掌握用电子计算机对机组安全监控和程序起动的先进技术以及大电厂输煤系统的集中控制。（7）广开发电能源的门路。原子能是发电的一种新能源，我国目前已经具备发展核电站的基本条件。要研究利用太阳能、地热能、潮汐能、海洋能、风能等来发电。此外，要利用余热发电，蒸汽-燃气联合循环发电，使发电能源的路子越走越宽。

根据热力发电厂的能源利用, 能量供应的类型, 热力原动机的种类, 发电厂的容量和蒸汽初参数等, 热力发电厂可划分为不同的类别, 如表0-1所示。

表 0-1 热 力 发 电 厂 的 分 类

能源利用	利用化石燃料的发电厂	原子能发电厂	地热发电厂	太阳能发电厂	磁流体发电厂
能量供应	供应电能的凝汽式发电厂	供应电能、热能的热电厂			
原动机种类	汽轮机发电厂	燃气轮机发电厂	内燃机发电厂	蒸汽-燃气轮机发电厂	
服务规模	区域性发电厂	自备发电厂	列车电站	孤立发电厂	
电厂容量	小容量发电厂 (全厂容量2.5万千瓦以下)	中容量发电厂 (全厂容量5~10万千瓦)	大容量发电厂 (全厂容量10万千瓦以上)		
蒸汽初参数	中、低压发电厂 (汽轮机进汽压力为35绝对大气压以下)	高压发电厂(汽轮机进汽压力为90绝对大气压)	超高压发电厂(汽轮机进汽压力为130绝对大气压)	亚临界发电厂(汽轮机进汽压力为165绝对大气压)	超临界发电厂(汽轮机进汽压力为225绝对大气压以上)
机炉配合	非单元机组发电厂	单元式机组发电厂			

对热力发电厂的基本要求:

1. 必须安全可靠地生产

电能主要是作为动力用的, 它不能储存, 若电厂生产中断, 就要影响工农业生产, 或造成设备事故, 甚至导致全网解列。因此, 热力发电厂必须坚持“安全第一”、“质量第一”, 即安全地、持续地、保质(电压、周波以及蒸汽或热水的压力、温度等)定量地满足用户所需要的电能或热能。

2. 力求经济

建设热力发电厂特别是大机组的热力发电厂需大量的人力、物力和财力, 投资达数千万元或上亿元, 耗钢材上万吨。为此, 应在保证安全生产的条件下力求经济, 即每千瓦的计算费用最小, 生产(发电、供热)成本最低。机组投产后, 还应不断改进, 降低发电煤耗率。

3. 便于施工、维修和扩建

建设发电厂是国家基本建设的大计, 不仅要考虑满足施工的要求, 而且还要考虑今后数十年运行和维修的方便。扩建电厂较之新建电厂要节省得多, 建设周期短, 是促进电力快上的有效措施, 所以一般在建设新电厂时, 均应考虑发电厂的扩建, 根据规划容量留有余地。

4. 提高劳动生产率, 搞好环境保护

在卸煤、除灰、化学药品转运以及大件设备检修方面, 应减轻笨重体力劳动, 保障职工的人身安全。应改变高温、严寒、潮湿、粉尘、黑暗等不良工作环境, 改善职工的劳动条件。

环境保护是关系到广大人民和子孙后代健康的大事, 必须高度重视, 切实搞好发电厂的环境保护工作。

第一篇 热力发电厂的型式及其热经济性

第一章 发电厂热力过程的理论基础

1-1 发电厂热能转变过程及其评价基础

在现代的汽轮机发电厂中，燃料的化学能转变为电能是在复杂热力循环的基础上完成的，这种循环促进发电厂的热经济性得到很大的提高。发电厂的复杂循环是在简单的基本循环基础上，利用抽汽回热加热给水和对外供热，以及采用中间再热，高压叠置等形成的。

在上述的能量转变过程中，存在着热能释放，热能传递及热功转换。从热力学观点来看，燃料燃烧产生高温热源，传给工质（水蒸汽），工质流过汽轮机完成热功转换过程，然后在凝汽器内放热给冷源，恢复其初始状态，再重新由热源获得热能，从而完成一个循环，并周而复始，使热功转换连续进行。

热功转换效果对发电厂的热经济性有很大影响，热变为功的效果愈大，发电厂的热经济性愈高，因此如何正确评价热功转换效果，对分析和提高发电厂的热经济性非常重要。

由于热功转换既不能违反能量守恒定律，又要考虑到热能质量的差别（不同参数的热量，其做功的可能性有很大的差别），所以对发电厂热力学完善程度作出全面的和正确的评价，必须建立在热力学第一，第二定律的基础上。

卡诺循环和理想的朗肯循环是研究汽轮机发电厂的基本循环。

一、分析循环的理论基础

热力学第二定律指出：不可能制造一个热机把热源加给工质的热量全部变为功。所以理想的卡诺循环热机也只能将热源（温度 T_1 ）加给工质的热量 Q_1 的一部分变为功 AL ，其余部分 $Q_1 - AL = Q_2$ 向冷源（温度 T_2 ）排出，卡诺循环的效率

$$\eta_c = \frac{AL}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1-1)$$

卡诺定理指出：在热源和冷源之间（ T_1, T_2 ）任何可逆循环（例如两个等温过程和相互平行的两个任意多变过程所组成的广义卡诺循环）的热效率都等于卡诺循环的效率，即

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1-2)$$

实际的理想热力循环的工作过程是在可逆情况下完成的，若把理想循环转变为和它们的热效率 η_t 相同的一些等价的卡诺循环以后，则理想循环的热经济性就可以极其简便的进行比较了。

实际的理想热力循环是可逆循环，其平均吸热温度 \bar{T}_1 低于 T_1 ，平均放热温度 \bar{T}_2 高于 T_2 。

因此，在相同的热源和冷源 (T_1, T_2) 之间，实际的不可逆循环的热效率 η_i 小于它们的可逆循环的热效率，当然更小于卡诺循环的效率，即

$$\eta_i < \eta_t = 1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1-3)$$

从上述的热力循环基本规律，可以推论出以下的重要结论：

1. 任何热力循环的热效率永远小于 1，其极限值等于 $1 - \frac{T_2}{T_1}$ 。
2. 实际的理想热力循环是可逆循环，它的热效率小于 $1 - \frac{T_2}{T_1}$ 。
3. 提高不可逆循环热效率的根本方向是：提高平均吸热温度 \bar{T}_1 ，降低平均放热温度 \bar{T}_2 ；减少循环过程的不可逆性。

所以卡诺循环对于现代热力发电厂的意义在于：它的效率确定了实际循环效率经过改善后可以接近到的上限数值，而且卡诺循环也很方便地作为比较各种循环热经济性的度量。

当现代的汽轮机发电厂采用初温度为 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ 时，卡诺循环的效率约为 $61 \sim 66\%$ 。

二、评价发电厂热经济性的基础

评价热力发电厂（即热力循环及其设备）热经济性的目的是为了比较热力发电厂生产过程及其设备的热经济性以便提出改进的措施，以达到节约燃料。

通常对热力循环的研究大致分为两步骤：首先，将实际循环简化为理想的可逆循环，即暂时忽略不可逆因素来分析所研究的可逆循环接近卡诺循环的程度，也即研究该循环的热效率及其影响因素与可能采取的提高热效率的措施。其次，在上述可逆循环的基础上，进一步分析所研究的实际循环有哪些不可逆损失，以便找出这些损失的部位、大小、原因及其相互关系，并为设法减少不可逆损失提供办法和计算出可能提高的程度。

下面就以上两步骤分别予以讨论。

（一）评价可逆循环的一般方法

评价可逆循环最常用的是以“热效率”和“平均温度”为指标的方法。

1. 热效率法

可逆循环的热效率是指循环完成理想功量 AL 与其吸入热量 Q_1 之比，即

$$\eta_t = \frac{AL}{Q_1} \quad (1-4)$$

热效率是评价可逆循环热功转换效果的主要指标，它从数量上揭示了热能在循环中可能利用的程度，它用得最多、最普遍。

2. 平均温度法

根据热力学第二定律，在一定温度范围内工作的任何循环以卡诺循环的热效率为最高，且卡诺循环具有最简单的表达式，即它仅与热源的温度 T_1 和冷源的温度 T_2 有关。为了评价循环在热力学上的完善性，同时为了能够极其简便地将各种可逆循环进行定性比较，采用了平均温度的方法，即任何可逆循环的热效率用平均温度表示为

$$\eta_t = 1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1} \quad (1-5)$$

即任何可逆循环的热效率仅与吸热和放热过程的平均温度 \bar{T}_1 、 \bar{T}_2 有关。

运用吸、放热平均温度的概念，使分析比较任何可逆循环的热效率变得极其简便，这时只比较它们的平均吸、放热的温度就可以了。因此，要提高循环的热效率必须尽可能提高吸热的平均温度 \bar{T}_1 ，降低放热的平均温度 \bar{T}_2 ，这就是提高循环热效率的根本途径。

这个结论对今后分析影响热力循环的热功转换各种因素以及探讨提高热效率的途径具有重要的指导意义。

(二) 评价动力装置不可逆循环的方法

评价实际循环主要是分析所研究的实际动力装置循环中的各种不可逆损失，以及这些不可逆损失在各部件中或在各热力过程中的分布情况及其影响。评价不可逆循环通常采用的方法有：效率法，熵方法及焓方法。现分别介绍如下：

1. 效率法

在实际循环的每一设备中都有损失存在，为了表明有效利用能量多少，对于每种设备均采用相应的效率，即某设备实际得到（或利用）的能量与所消耗的能量之比，称为该设备的效率

$$\eta = \frac{\text{实际得到（或利用）的能量}}{\text{所消耗的能量}} \quad (1-6)$$

效率的大小反映该设备的完善程度。有了各设备的效率值，则很容易对整个动力装置进行计算。

设燃料在动力装置不可逆循环中释放出 Q_1 的热量，最后得到输出能量为 L' ，即

$$Q_1 \prod_1^n \eta = L'$$

式中 $\prod_1^n \eta$ ——由 n 个设备组成的动力装置各设备效率的连乘积。

则整个装置的总效率 η_s 可表示为

$$\eta_s = \frac{L'}{Q_1} = \prod_1^n \eta$$

由实际动力装置的总效率 η_s ，便可求出该装置对外作功量和损失的能量，即对外作功量

$$L' = \eta_s Q_1 \quad (1-7)$$

损失的能量

$$\sum_1^n Q = (1 - \eta_s) Q_1 \quad (1-8)$$

效率法既可以比较各种实际动力装置的能量转换效果，又可以通过它的各设备效率求出各设备能量损失的具体数字，所以它在工程上得到极广泛的应用。

2. 熵方法

不可逆过程中必有熵增，熵增引起了能量贬值和功的耗散（即作功能力或附加冷源损

失，即由于不可逆过程所引起的冷源损失），因此可以用衡量不可逆熵增的方法来判断循环的不可逆损失及其可用功的耗散，并由此来评价实际动力装置的工作效果。

在温度为 T_h 的环境中，某设备或不可逆过程中的熵增 Δs 所引起的可用功的耗散功为

$$\Delta l = T_h \Delta s \quad (1-9)$$

式中 T_h ——环境绝对温度；

Δs ——不可逆性所引起该设备或该过程的熵增量。

求得各设备或各过程的耗散功后，相加即可求得整个动力装置或整个系统可用功总的损失为

$$\Delta L = \sum_1^n \Delta l = \sum_1^n T_h \Delta s \quad (1-10)$$

求得各设备可用功的耗散及其总的功量损失后，即可分析该动力装置工作效果及其导致功量耗散的原因，从而设法改进这些热力设备和热力过程，以使整个动力装置热经济性得到提高。

3. 焓方法

稳定流动热力系从热源 T_1 吸入热量 Q_1 ，并对外作功 L' 时的焓平衡方程式可写为

$$L' \leq Q_1 \left(1 - \frac{T_h}{T_1} \right) + E_1 - E_2 = E_r + E_1 - E_2$$

式中 E_1 、 E_2 ——进、出热力系工质的焓；

E_r ——热流焓。

上式等号为可逆过程，小于号为不可逆过程，因为可逆过程的作功量 L 大于不可逆过程的作功量 L' 。因此热力系作功能力的损失（即耗散功）为

$$\Delta l = L - L' = E_r + E_1 - E_2 - L' \quad (1-11)$$

利用式（1-11）可依次求得各设备中作功能力的损失，从而可算出整个动力装置总的作功能力损失为

$$\Delta L = \sum_1^n \Delta l \quad (1-12)$$

从各设备作功能力损失的数量中，可以判明哪些部分不可逆损失最大，并找出造成整个动力装置热力学不完善的原因之所在。

上述的效率法、熵方法、焓方法的三种评价方法是从不同的角度去评价实际动力装置循环的热经济性。

效率法是以热力学第一定律（能量传递和转换的数量关系）为基础，从正面提出评价循环的指标，着眼于能量数量上的分析，即对循环进行定量分析。它的评价指标主要是各种效率，这类评价方法的实质是能量的平衡。

熵方法和焓方法是同一类的衡量方法，以热力学第一及第二定律为依据，都研究循环中由于不可逆性而引起的作功能力损失的程 度，是熵和焓平衡方法。它们评价的指标是作功能力损失的数值。

但还应指出：熵方法是从耗散功的方面研究不可逆性，而焓方法是从可用功方面研究不可逆性，其本质都是计算不可逆引起的作功能力损失，二者得出的结论是完全一致的。

所以评价实际动力装置不可逆循环有两类方法：一类是以“效率”为指标的方法；一

类是以“作功能力损失”为指标的方法。而后者又分为用“熵增”表示的方法和用参数“焓”表示的方法。

必须注意这两类方法之间的区别：效率法着重考虑热的数量关系，而在熵方法和焓方法中，不仅涉及热的质，而且也研究量的变化，即热的可用性与它的贬值问题。因此，两类方法所揭示出来的实际动力装置不完善性的部位、大小、原因是不同的（图1-1）。

图1-1所示为最简单蒸汽循环的T-s图。燃料燃烧的热损失为面积a—b—b''—a''—a，其余的热量全部传给循环的工质，即面积b—c—c''—b''—b=面积1—2—3—g—g''—b''—1。

如以熵和焓方法来分析：面积1—n—n'—b'—1为凝汽器中不可逆换热损失，面积b'—c'—c''—b''—b'为燃烧的化学能变为热能时作功能力损失，面积c'—g'—g''—c''—c'为锅炉内不可逆传热损失，面积g'—o'—o''—g''—g'为蒸汽管道的摩擦损失。如用效率法来分析：面积1—n—n''—b''—1为凝汽器中的放热损失。

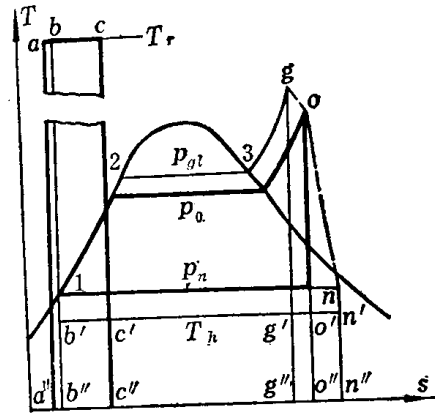


图 1-1 蒸汽循环的T-s图
T_r—燃气平均绝对温度

从以上的两类评价方法的比较中可以看出：以效率法分析时工质排给冷却水的热量（面积1—n—n''—b''—1）很多，所以损失极大，而以熵方法和焓方法分析该热量损失虽多，温度却很低，所以作功能力损失（面积1—n—n'—b'—1）并不大。又如锅炉，以效率法分析该设备热损失（面积a—b—b''—a''—a）不多，效率很高，而以熵方法及焓方法分析高温燃气与锅炉内的水和蒸汽存在很大温差，因此该温差传热的不可逆性所引起的作功能力损失（面积c'—g'—g''—c''—c'）极大。

两类评价方法所得的结论除上述差别的一面外，还有联系的一面，这是因为它们都是研究同一对象，两者之间必有内在联系，可由下面的总效率公式直接表明

$$\eta_{\Sigma} = \frac{L'}{Q_1} = \frac{L - \Delta L}{Q_1}$$

上式说明两类方法算出的结果是可以相互校核的，而且算出的总损失的数量也是一致的。所以不论采用哪一类方法分析时，所选择的热力系可以是整个循环，也可以是其中的一部分。

由于效率法能够简单地算出整个热力装置以及它的各个设备中有效利用和损失的实际情况具体数字，便于比较在相同条件下工作的循环以及热力设备制造及运行等方面的完善程度，所以它的各种效率至今仍然在热能动力工业上广泛的被采用，并作为评价热力发电厂及其设备经济性的极其重要的热经济指标。

1-2 减少热力过程不可逆性的根本方向

熵增原理指出：在孤立系（即与外界既无能量交换又无质量交换的热力系）内进行可

逆过程时, $\Delta s^* = 0$, 放热量的变化 $\Delta Q_2 = 0$, $\Delta L = 0$, 而进行不可逆过程时, $\Delta s^* > 0$, $\Delta Q_2 > 0$, $\Delta L > 0$ 。所以若 Δs^* 或 ΔQ_2 愈小, 则所进行的过程愈接近可逆过程, 作功能力损失也愈小。因此, 孤立系的熵增的大小, 即附加冷源损失的大小, 可以作为衡量过程不可逆性的程度。由此可见, 减少过程不可逆性的根本方向就是减少孤立系的熵增量或附加冷源损失的增量, 从而减少作功能力损失, 以提高热能的利用效果。

发电厂的热力过程可以概括为有温度差的热交换(或传热), 绝热节流, 有摩阻的膨胀(或压缩)等三种典型过程。为了减少发电厂实际热力循环的不可逆性以提高循环效率, 就要减少循环中这三种典型过程的不可逆性以减少作功能力损失。

一、温度差对热交换过程作功能力损失的影响

图1-2所示为A工质经ab过程被冷却(平均温度为 \bar{T}_1), B工质经cd过程被加热(平均温度为 \bar{T}_2), 则A工质传热 dQ 给B工质时作功能力减少了 $(1 - \frac{T_h}{\bar{T}_1})dQ$, 同时B工质的

作功能力增加了 $(1 - \frac{T_h}{\bar{T}_2})dQ$, 因而不可逆热交换过程引起的作功能力损失为

$$\begin{aligned} \Delta l &= \left(1 - \frac{T_h}{\bar{T}_1}\right) dQ - \left(1 - \frac{T_h}{\bar{T}_2}\right) dQ \\ &= T_h \frac{\bar{T}_1 - \bar{T}_2}{\bar{T}_1 \bar{T}_2} dQ = \frac{T_h \Delta T}{\bar{T}_1 \bar{T}_2} dQ \end{aligned} \quad (1-13)$$

可见, 有温差的热交换过程的温差 ΔT 愈大, 作功能力损失愈大。因此, 温差是热交换过程不可逆性的起因, 而温差的大小又决定了不可逆热交换的后果, 所以要减少温差热交换的不可逆性, 以减少作功能力损失, 就是要减少热交换过程的温差。

当热交换的温差 ΔT 为一定时, 工质的平均温度(\bar{T}_1, \bar{T}_2)愈高, 作功能力损失愈小, 所以从热能有效利用来看, 高温热交换比低温热交换更为有利。

二、压力降对绝热节流过程作功能力损失的影响

因为节流过程中(图1-3), $di=0$, 所以

$$Tds = di - Avdp = -Avdp$$

$$ds = -\frac{Av}{T} dp$$

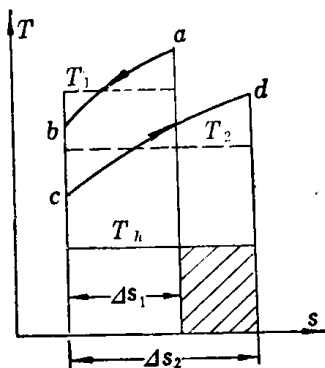


图 1-2 热交换过程

Δs_1 —A工质冷却过程的熵增;
 Δs_2 —B工质吸热过程的熵增

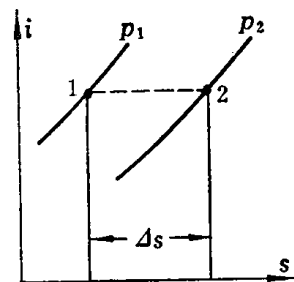


图 1-3 绝热节流过程

又因在节流过程中，工质的压力一定下降，所以在节流过程中工质的熵总是增加，而熵增是压降的随增函数。

对理想气体而言

$$\Delta s = \int_1^2 ds = -A \int_1^2 \frac{v}{T} dp = -AR \int_1^2 \frac{dp}{p} = AR \ln \frac{p_1}{p_2} = AR \ln \frac{p_1}{p_1 - \Delta p}$$

式中 $\Delta p = p_1 - p_2$ —— 压力降。

根据 $\Delta l = T_h \Delta s$ ，则理想气体的节流过程的作功能力损失应为

$$\Delta l = T_h AR \ln \frac{p_1}{p_1 - \Delta p}$$

对目前广泛采用的蒸汽参数而言，节流过程的熵增及作功能力损失可用下式计算

$$\left. \begin{aligned} \Delta s &= 0.107 \ln \frac{p_1}{p_1 - \Delta p} \\ \Delta l &= 0.107 T_h \ln \frac{p_1}{p_1 - \Delta p} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

也可以用焓方法直接求出蒸汽在节流过程中的作功能力损失，即

$$\begin{aligned} \Delta l &= E_1 - E_2 = (i_1 - T_h s_1) - (i_2 - T_h s_2) \\ &= (i_1 - i_2) + T_h (s_2 - s_1) \\ &= T_h \Delta s \end{aligned}$$

所以，可知节流过程中的作功能力损失是压力降的随增函数，因此要减少节流过程的不可逆性和作功能力损失，就是要减少工质的压力降。

三、摩擦对热力过程作功能力损失的影响

1. 有摩擦的不作功的绝热流动过程（如蒸汽在热绝缘管道中流动），工质的作功能力损失可按绝热节流过程来处理。

2. 有摩擦、有散热、不作功的流动过程（如蒸汽在保温条件差或未保温的管道中流动），工质作功能力损失应为

$$\Delta l = T_h (s_2 - s_1) + i_1 - i_2 \quad (1-15)$$

3. 有摩擦的绝热作功（或压缩）过程，工质作功能力损失应为

$$\Delta l = T_h (s_2 - s_1) \quad (1-16)$$

在绝热膨胀作功（或压缩）过程中摩擦所引起的熵增是摩擦大小或摩擦系数的函数（因摩擦消耗的功又转变为热，并为工质所吸收）。因此，要减少绝热膨胀作功（或压缩）过程的不可逆性以减少作功能力损失，就要减少工质流动的摩擦或阻力系数。

现代热力发电厂的生产过程是由许多复杂的热力过程所组成，要使热能得到有效利用，就需要减少能量（或作功能力）的损失。综合前面所述，可知提高发电厂热经济性的基本方向如下：

1. 提高蒸汽初参数（温度和压力）以提高循环平均吸热温度，并减少吸热温度差；
2. 保持排汽压力尽可能最低数值以减少冷源损失；
3. 采用给水回热加热以减少给水在锅炉中换热温度差；

4. 采用中间再热以提高吸热过程的平均温度；

5. 尽可能减少工作过程的不可逆性，如减少热交换设备中的换热的温度差，汽水管道中工质流动的压力降和散热损失以及蒸汽在汽轮机中膨胀做功的摩阻损失；

6. 低值热能的利用，如利用汽轮机抽汽及乏汽供热等。

当然，提高发电厂热经济性还要受到技术经济因素的限制，在实际工作中，如何全面考虑技术经济比较，合理地具体采用上述措施，将在以后各章节中加以讨论。

第二章 凝汽式发电厂及其热经济性

2-1 蒸汽循环

由于水蒸汽热力性质的特点，被压缩时要消耗极大的能量，实现卡诺循环要带来设备结构上的困难。因此，在发电厂中无法实现卡诺循环。

所以在汽轮机发电厂中，燃料的化学能变为电能是在朗肯蒸汽循环的基础上完成的，研究热力发电厂的热经济性通常是以理想朗肯循环为出发点。图 2-1 所示为最简单的凝汽式发电厂热力系统图。

理想的朗肯循环的特点是工质吸热和放热在等压过程下进行，而湿蒸汽凝结时放热是在等温过程下进行的，但是水在液态阶段吸热和蒸汽过热都是在温度增高情况下进行的，而水在等温下汽化时的温度要比循环的初温度（即过热蒸汽温度）低得多（图 2-2）。因此，理想的朗肯循环效率要比同一初温度的卡诺循环效率低很多。

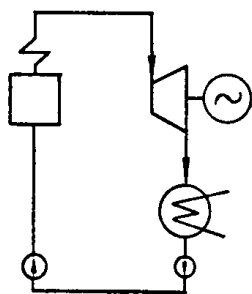


图 2-1 最简单的凝汽式发电厂热力系统图

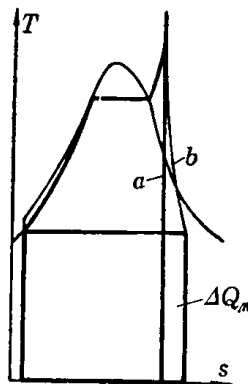


图 2-2 朗肯蒸汽循环的 $T-s$ 图
 ΔQ_n —实际膨胀过程所引起的附加冷源损失
 a —理想的膨胀过程， b —实际的膨胀过程

朗肯循环效率可用下式表示

$$\eta_t = \frac{(i_0 - \bar{t}_{gs}) - (i_{na} - \bar{t}_n)}{i_0 - \bar{t}_{gs}}$$

$$= \frac{(i_0 - i_{na}) - (\bar{t}_{gs} - \bar{t}_n)}{i_0 - \bar{t}_{gs}}$$

$$= \frac{H_a - H_{g_0}}{q_0} \quad (2-1)$$

式中 i_0 和 i_{na} —— 蒸汽在汽轮机理想过程中的初焓和终焓，大卡/公斤；

\bar{t}_{g_s} 和 \bar{t}_n —— 锅炉给水焓和汽轮机凝结水的焓，两者之差等于给水泵的焓升，大卡/公斤；

H_a 和 H_{g_0} —— 汽轮机中蒸汽的可用（等熵的，绝热的）焓降和给水泵的焓升（理想压缩功），大卡/公斤；

q_0 —— 循环中工质的吸热量，大卡/公斤。

当发电厂的蒸汽初压力不高时，给水泵的压缩功可忽略不计，于是朗肯循环的效率可简单表示如下

$$\eta_t = \frac{i_0 - i_{na}}{i_0 - \bar{t}_{g_s}} = \frac{H_a}{q_0} \quad (2-2)$$

在朗肯循环的基础上，采用多级给水回热加热及蒸汽中间再热形成了复杂的蒸汽循环，是为了提高循环的效率使之接近卡诺循环效率。

2-2 凝汽式发电厂生产过程中各种热损失及其效率

在发电厂生产过程中，任何情况下都不可能把燃料中的热能全部变为电能，总是存在着数量不等，原因不同的各种热损失。因此，提高发电厂热经济性的任务，就是要尽可能地减少这些热损失。

现按热力发电厂工作过程的顺序列述各项热损失：

1. 锅炉设备中的热损失

锅炉设备中的热损失包括排烟带走的热损失，化学不完全燃烧热损失，机械不完全燃烧热损失，散热损失，以及其它热损失（如燃烧残物的物理热，液态排渣带走的热量以及设备冷却水带走的热损失等）。

锅炉设备的各项热损失愈小，表示锅炉完善程度愈高。锅炉效率 η_{gl} 是反映锅炉设备运行经济性完善程度的指标，可用下列公式表示

$$\eta_{gl} = \frac{D_{gl}(i_{gr} - \bar{t}_{g_s})}{BQ_d^g} \quad (2-3)$$

式中 D_{gl} 和 B —— 锅炉每小时蒸汽产量和燃料消耗量，公斤/时；

Q_d^g —— 燃料的低位发热量，大卡/公斤；

i_{gr} —— 过热器出口蒸汽焓，大卡/公斤。

一般锅炉的效率约为90~94%。

2. 管道的热损失*

管道热损失是由于工质在管道中通过时向外界散热所引起的，管道绝热程度愈高，这

* 实际的管道中存在两种损失：散热损失及节流损失（即压降损失），根据热平衡的观点来看，就有条件地只考虑对外的散热损失，即管道的热损失。