

能量系统的焓分析方法

〔美〕 J. E. 艾亨 著

机械工业出版社

Ⅷ

q	热流量
R	热阻; 气体常数
S	熵
s	比熵
T	温度
t	时间
U, u	传热系数; 内能
u	比内能
V	体积; 速度
v	比体积
W, w	以功的形式所传递的能量
$\dot{w}$	功的传递速度
x	两相混合物的干度
z	高度坐标
γ	比热比
Δ	差值
ϵ	辐射率; 热交换器效率; 温度效率
η	循环效率
ν_i	物质 i 的化学位
μ	粘度
ρ	密度
σ	斯蒂芬-玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 常数
τ	时间

下角注:

hot——热 cold——冷 in——入 out——出

序

本书的主要目的是为工程师们提供一种把热力学第二定律应用于分析与设计能量系统的方法。糊分析方法可以很方便地用于系统分析，而且所得的结果可以使工程师对实际系统的特性有更充分的了解。热力学第二定律的历史是饶有兴味的。但是，只有当实际表明用第二定律进行补充分析是值得的时候，它才会得到广泛的应用。

节约能源现在是、将来也还会是我们经济领域的一个关键目标。除了那些强制放慢我们经济发展速度的极端措施以外，减少对能源需求的最有效的方法是更有效地利用能源。许多科学家现在都认识到热力学第二定律可以帮助人们找到能量利用效率不高的部位。能量的浪费使有限能源所提供的可用功部分地损失了。热力学第二定律可以实际确定这些损失的大小和形式，而普通第一定律热平衡方法却做不到这一点。

从卡诺 (Carnot)、克劳修斯 (Clausius) 和开尔文 (Kelvin) 的时代起，对热力学第二定律已广泛地进行过研究。各种热力学教科书中都有第二定律的章节，通常都是建立在经典方法的基础上的。这种方法试图用复杂的、有时是曲折的物理和数学方法来论证过程和循环的可逆性与不可逆性原理。为了证实热力学第二定律的论证和熵的定义，还引入了统计学和概率分析的方法。精通热力学概念的物理学家们对这些方法进行了分析，但迄今仍不易为想把这些原理用于系

统设计和性能分析的工程师们所接受。

焓分析方法是一种在苏联和欧洲已被广泛接受的方法。这种方法不需要很多复杂的、涉及不可逆性和熵的热力学分析,就能把热力学第二定律用于能量系统。本书就是从工程应用的观点来介绍焓分析方法的。书中对焓与热力学可逆性和焓与熵的关系只讨论到能把焓分析方法用于实际能量系统所需要的程度。读者如需深入研究热力学第二定律,可参阅参考文献。

本书第一章介绍第二定律和焓。第二章讨论该领域内进行过的工作的背景。第三章介绍焓的物理基础。虽然这部分对于有效地应用焓方法是重要的,但对于初步的焓分析却不是必须的。第四章给出应用焓方法的步骤,可以用各种过程的组合单元来分析任何能量系统,只要按具体的系统选出方程单元并加以组合即可。用这种方法可以分析到任意的繁简程度。第五章把分析步骤应用于实际能量系统,以说明如何使用这些步骤。本章还把焓分析的结果与普通热平衡方法作了比较,说明使用焓方法的优越性。第六章叙述了焓方法在有关节能和改进系统效率方面的各种可能的应用,还讨论了如何用焓方法设计新系统和改进现有系统。第七章提供了能量系统中许多常用工质的焓值图表。附录中则包括几篇讨论焓方法应用的苏联文献。

我最初的打算只不过是编一本苏联有关焓的论文的译文集。但在与一些工程师讨论之后,我意识到即便仅仅是一个分析步骤的详尽介绍也能促进焓方法的更广泛的应用。对能量系统应用焓方法,可以向工程师们表明在系统性能分析和节能方面能够得到的益处。

促使我决定写本书的重要因素是美国机械工程师学会

(ASME) 技术部门的一次成功的会议“**能源的有效利用**”，此会议是由美国机械工程师学会南加州咨询委员会和南加州大学洛杉矶分校联合主办的，于一九七五年五月十七日举行，并吸引了一大批对能源和有效利用能源表现出巨大兴趣的工程师。本书就是根据我在该次会议上所作的报告“**能量系统分析的能源方法**”撰写的。

J. E. 艾亨 (JOHN E. AHERN)

序于加利福尼亚州格兰多拉

一九八〇年一月

常用符号表

A	面积, 可用性, 可用功
C	热容量
c_p	定压比热
c_v	定容比热
E	能量, 辐射力
e	单位质量的能量
Ex, ex	烟 $\ominus$
F	形状因子, 力
f	摩擦系数
G	质量流速
g_c	牛顿定律常数
g	当地重力加速度
h	焓, 放热系数
k	比热比, 导热率
L	长度
M, m	质量
$\dot{m}$	质量流量
N, n	物质的量
p	压力
PE	势能
Q	以热量形式所传递的能量 $\ominus$

$\ominus$ 作者对于单位质量的物理量与非单位质量的物理量, 常常用同一个符号表示, 例如, E 既代表烟, 又代表单位质量的比烟。 Q 也是如此, 既代表热量, 也代表相对于单位质量的物质所传递的热量。对于这两个量我们未予订正。对于内能、体积等项, 我们已分别用 U 、 u 与 V 、 v 予以订正, 请读者注意。——译者注

目 录

常用符号表

第一章 能量的基本原理	1
1-1 功的原理	3
1-2 热力学与能的关系	4
1-3 热力过程及循环	5
1-4 热力学第一定律与能量平衡	28
1-5 热力学第二定律与熵产	35
1-6 焓的定义	39
1-7 焓与能的关系	42
第二章 背景	44
2-1 低温物理学的影响	45
2-2 焓的发展	48
2-3 有关的发展	50
第三章 焓的物理基础	53
3-1 可用功	54
3-2 基准系	56
3-3 普遍性的焓方程	58
3-4 焓与焓	64
3-5 焓损失, 可逆性与不可逆性	65
3-6 过程的损失	72
3-7 系统的损失	73
3-8 散入环境的损失	74
3-9 热交换器的焓损失	76
3-10 燃烧和化学过程的焓损失	84
3-11 流体流动过程的焓损失	90

3-12 能量系统的比较标准——烟	92
第四章 分析步骤	94
4-1 烟损失的基本计算	94
4-2 烟分析的单元法	103
4-3 结果介绍——表格与图表	113
第五章 烟分析举例	117
5-1 具体过程单元	117
5-2 热动力系统	118
5-3 制冷系统	140
第六章 烟方法的应用	157
6-1 节能	158
6-2 现行系统的烟分析	160
6-3 新的能量系统的烟分析	161
第七章 烟表和烟图	163
参考文献	186
附录 A 过程方程单元及计算示例	190
附录 B 关于烟的几篇苏联文献	222
附录 C 本书使用的单位及其换算	224
附录 D 英中人名对照表	226

第一章 能量的基本原理

能源的有效利用，与设备基建投资和总的生产费用相比，迄今一般被降到次要地位。随着常规燃料价格的增长及可用燃料日益减少的趋势，有效利用能源的重要性正得到它早应得到的重视。能量系统中能量未有效利用的程度和部位现在应该成为设计系统和分析其性能时需要考虑的首要因素。翔分析方法就是提供这方面情况的一种系统的方法。人们能够很容易地把这种方法补充到通常的设计和性能计算的程序中去。

能源价格的提高，使设计的经济准则，由占支配地位的基建投资最低的原则转变为更为关注整个使用期内费用最低的原则。此外，可用能源及其价格发生变化的可能性，决定了系统的设计应以使用多种能源为基础。根据这一原则，当主要能源无法得到或价格高于代用能源时，便可很容易地改用代用能源。

多种能源或复合能源的使用可有几种途径。一种办法是把系统一开始就设计得具有使用多种燃料的能力，就象五十年代使用的动力系统那样，一台锅炉只要稍加改变就可燃用煤、燃油或气体燃料。随着时间的推移将日益流行的另一种办法是使用新近开发的低质能源如太阳能、风能、海洋热能及潮汐能。当主要能源无法得到或不充分时，便辅之以消耗性的燃料。

除了在未来的系统设计中使用复合能源外，还应强调单

一能源的综合利用，以提高这种能源中可用功的有效利用程度。这一方法在正在研究的燃气轮机电站的设计中已经得到应用，即用燃气轮机电站的余热提供蒸汽以用于发电、供暖和为化工过程提供蒸汽与热量。诸如燃气轮机——蒸汽电站的顶循环及蒸汽——氟利昂电站的底循环今后将会在能源的有效利用方面获得应用。这些系统比传统的系统复杂，而且涉及具有不同运行特性的独立系统之间的相互作用。为了估价这些系统中能源的有效利用程度，需要一个能量利用率的实用尺度。通过综合应用热力学第一和第二定律，焓分析方法可提供这种有效利用能源的真实尺度。焓方法还可从总体经济观点对能量系统提供更精确的分析。这些特点将在本书以后各章中举例说明。

焓分析方法是把热力学第一和第二定律用于部件和过程的一种系统方法。本书介绍的单元法可用于任何系统。这种方法便于使用，而且在提高精确度和对系统认识的完整性方面所得到的收益远远超过在分析上所付出的额外努力。

焓方法的基础是熵产原理和热力学第二定律。这些原理在热力学教科书中已有详尽的叙述，其中一些教科书已列入本书最后的参考书目中。然而，热力学第二定律的应用至今仍是相当有限的。在工程系统的分析和设计中忽视第二定律的原因显然是由于以下三个方面：

(1) 在书籍和报告中，工程系统的分析通常仅仅建立在第一定律热平衡的基础上；

(2) 应用第二定律的例子通常只限于简单过程或简单循环，而在这类场合下应用第二定律进行分析的好处并不明显；

(3) 能量相关工厂的设计和运行条件，一般是建立在

包括能源费用在内的工厂生产成本的基础上的，而节能的考虑被降到次要地位。

由于对节能的日益关心和降低能源费用的需要，对能量相关的工业系统的设计要求日益苛刻，设计本身也日趋复杂。为了最大限度地利用高品质能源，各种系统将变得更加综合化，只要实际可能便倾向于采用联合系统。在选择设计准则和运行准则时，这些系统中的不可逆损失将成为一个重要的因素。

1-1 功 的 原 理

为了满足现代工业化社会的需要，我们的能源正以十分可观的速度被消耗掉。功就是这些能源消耗后所得到的最后结果。我们用它来完成各种任务，如开动汽车或拖拉机、向城市供水以及家庭照明等。可以以各种形式由能源产生可用功。例如，电厂中燃烧燃油或气体燃料便可提供高压、高温蒸汽，如使之通过一个透平发电机组便可作功。随着蒸汽流经系统的管路、阀门及透平，其温度和压力逐渐下降，蒸汽中的可用功也随之减少。当蒸汽的温度和压力接近周围环境条件（冷凝液体接近环境温度），蒸汽中的可用功即消失殆尽。让河流中被水坝拦住的水流经一台水轮发电机组，也会作功。当水位降到海平面，水坝后面的水的可用功即恢复到零。因此，对于地面上的所有系统，周围环境的稳态条件是功的良好参照标准。正是这种参照周围环境的可用功的概念，构成了能量系统的焓分析方法的基础。

尽管可用功可以取各种形式（如压力、温度及速度），其数值又与周围环境的不同，但它们彼此之间可以通过各种换算系数及热功当量直接建立联系。因此，用可用功或焓来

比较能源有效利用的程度是一种实际可行的方法。应当注意，一种与周围环境不相平衡的液体或气体，当它的条件向着环境条件转化时（象任何事物都会自发地进行这种转化一样），就具有作功的能力。这就是说，一种低于环境温度的流体在被加热到环境温度的过程中将具有作功的能力，正象一种热流体在向环境条件变化的过程中具有作功能力一样。

能源中可用功的利用方式对于节能是一个十分重要的因素。如果不能有效地利用可用功，我们就会在完成相同的任务时更迅速地耗尽能源。当系统中流动工质经过能量相关的各种过程而使其可用功减少时，就会产生可用功的损失。因为没有任何一种传热过程或机械功与热的转换过程能够在没有不可逆性的情况下进行。在一个包括有许多过程的系统中，功的损失将遍布每一个子过程。我们要想有效地改进系统的效率，重要的是要确定每个过程的相对损失。只有掌握了这些情况，才能知道应当在哪儿进行节能的努力。

应当注意的是，评价系统损失和效率的传统热平衡方法会使人产生误解，并不能真正表示系统的效能。只有通过对整个系统的可用功的评价，才能对系统各个过程的损失有一个真实的量度。这对在系统的设计和运行中有效地节约能源是十分必要的。

1-2 热力学与能的关系

功与热之间的转换属于热力学学科范畴。热转变为功及其逆过程只能在热力学两个定律所限定的范围内进行。由于多数能量系统都包括有热及机械功或电功，热力学不论对产生能量的或是使用能量的工业设备的设计和运行，都起着重要的作用。

在包括有热和机械功或电功的系统中，由于过程的不可逆性，热与功的转换将导致可用功的巨大损失。从过程中可用功损失的观点来看，即使是化学能向热能的转换，也是一种效能很低的过程。

只有少数能量系统不涉及热力学原理。但是在许多机械或电气系统中是可以忽略热力效应的，因为在系统总的设计与运行中它们只占次要地位。配有电驱动泵的管路系统便是其中一例。如果被泵送的流体无需像泵送重油那样加热，则系统的性能和效率只用机械功和电功原理即可给予完全的评价。另一个例子是输电系统，其中变压器和线路中的焦耳热是如此之小，以致在系统总的能量平衡中可以略去。

能量系统中热力学的主要作用是通过第一和第二定律来体现的。热力学第一定律广泛用于工程实际，是热平衡分析法的基础，通常就用这种方法分析能量系统的性能。本书对此有专节讨论。第二定律涉及过程的可逆性与不可逆性，它在能量系统分析的焓方法中是一个很重要的方面。热力学第二定律在大多数热力学教科书中都有论述，但它在工程实际中的应用还受到限制。本书叙述的焓分析方法给出了把第二定律用于整个系统的一种实际而有效的方法。

1-3 热力过程及循环

能量系统由一系列组成闭式或开式循环的独立过程所构成。系统或循环中的每个过程都可以从系统中分离出来单独地进行分析，只要对此过程所涉及的部件建立第一定律的能量平衡即可。图 1-1 表示一个气体压缩机的能量平衡。过程的性质可用压容图和温熵图完善地加以描述。气体最常见的各种热力过程示于图 1-2，相应于这些过程的方程见表 1-1。

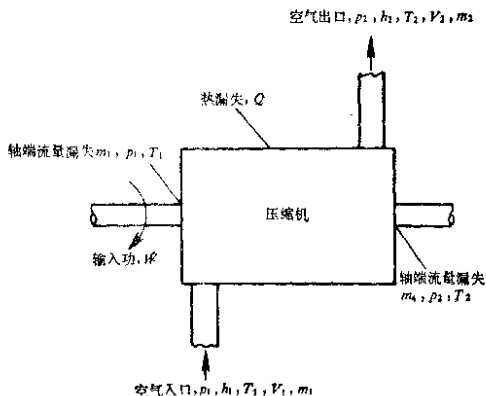


图1-1 系统一个部件的能量平衡

在工程实际中，用这些方程计算过程中工质的条件变化。这些方程加上本书以后还要讨论的能量平衡关系式，便可算出任何循环或系统中工作气体的状态。若工质是液体，且在循环过程中发生相变（沸腾或冷凝），工质的状态可由其物性参数、表格和能量平衡关系式求出。

循环是一系列过程的组合，有开式、闭式和联合循环之分（图1-3）。所有循环均具有一个与周围环境或另外一个循环相联系的界面，不同类型的循环对此界面的处理也不相同。在闭式循环中，工质保留在封闭系统内，与周围环境的界面位于系统的边界处，热或功的传递就通过这个边界进行。普通家用电冰箱和一般电厂的蒸汽系统都是闭式循环的例子，在循环过程中工质保留在系统之内。

开式循环利用周围大气使循环闭合或利用周围大气作为

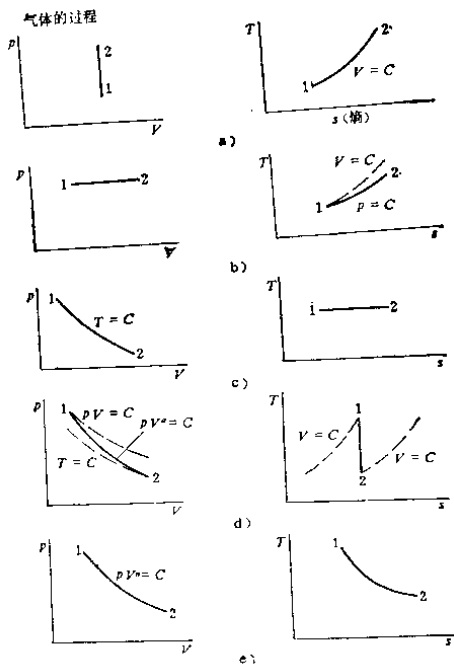


图1-2 常见的热力过程

- a) 定容过程 b) 定压过程 c) 定温过程 d) 定熵过程
e) 多变过程

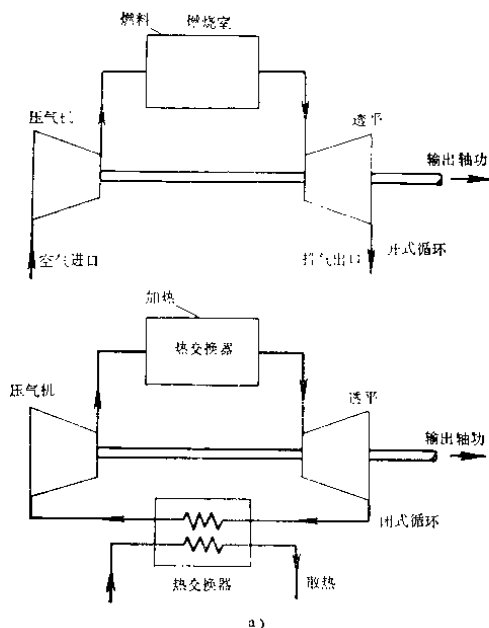
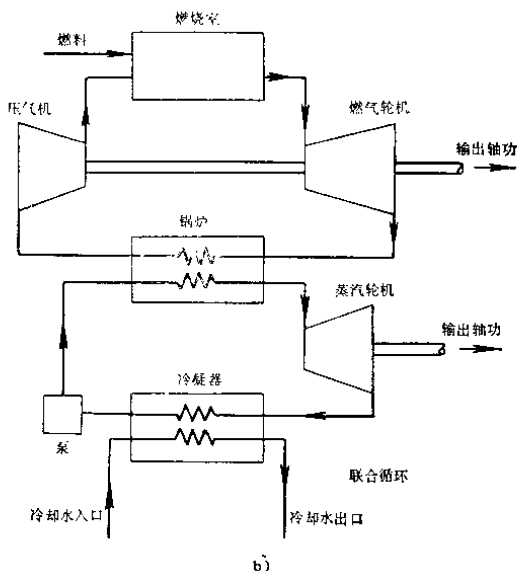


图1-3 能量循

工质。飞机喷气发动机是开式循环的例子。空气被吸入发动机中参与燃烧并在喷回大气之前对外作功。生产炼钢所需氧气的空气液化系统亦可看成开式循环，因为空气被引入循环，并参与生产液态氧的一系列过程。

此外还有用各种方式将开式循环与闭式循环组合起来的系统，以便更经济地完成各种任务。其中，一种现在正得到



环的类型

认真注意的系统就是图 1-3 中所示的联合循环。在此循环中，燃气轮机的排气被用于一个蒸汽或氟利昂闭式循环，以提供额外的功。另一种实用的联合循环系统是热电合供，它同时提供本系统内加热及工艺过程所需的热量。这种系统在苏联很普遍。

有几种不同型式的循环都可用于发电和制冷。选择时取