

学术讨论

结构热力学原理

顾维军 (北京华盟能源工程公司)

〔提要〕 本文给出了结构热力学的相关定义,探讨了结构热力学的对象,方向及方法。明确了热力系集和热力学载体的概念。揭示了结构热力学的发展方向和应用背景。本文还从结构热力学的观点,提出了热力学参数不对等原理,从而为结构热力学奠定了选取其结构特征参数的基础。

主题词 热力学 研究

一、导 言

多年来,在热力学分析中有些问题一直困扰着人们,给热力学深入研究造成了一些困难。

算上热力学第零定律,经典热力学共有四个基本定律。它们的表述都与热力系统内外的工质种类没有关系。当一系统对外放出热量 Q 时,系统内能就减少 Q ,不管系统内物质的种类如何,其结果都一样。如一卡诺循环系统,它的放热率只决定于高低温热源的温度,而与循环工质的种类无关。但是,在实际分析中,却往往不根据某一具体物质的热力性质表,分析就无法进行。到底麻烦出在哪里呢?

对于某一些热力装置,影响该装置性能有各种因素,哪些因素来源于装置的结构,哪些因素来源于工质的热力性质?以及当装

置结构发生变化时,工质的热力性质应该怎样选择才能使装置的热力性能最佳。这些问题一直令人棘手。特别是对一些复杂的装置,严格的分析往往变得如此复杂,以至无法进行。

对于一热力循环,它的每个循环特征点,都有一些热力参数。如温度、压力、比容及熵等等。当工质确定时,这些参数之间是可以相互推导的,但是哪些参数是决定循环特性的本质参数呢?

本文旨在从结构热力学的观点澄清上述问题,给出结构热力学的相关定义,探讨结构热力学的研究对象、目的和方法。

二、热力学系集和热力学载体

定义1: 由一些热力过程依据一定的相互关系组成的热力过程集合,称为热力学系集(简称热力系集)。

【编者按】 结构热力学概念的提出是一个新问题。对于建立这门热力学分支的必要性以及它的研究方法和内容值得探讨。本刊发表“结构热力学原理”一文,旨在引起学界的关注。欢迎国内外学者广泛来稿参加讨论。

收稿日期: 1989-10-14

每一热工设备, 实际上就是一热力系集, 两者之间具有一一对应的关系。

一个复杂的热力系集常可视为由几个热力子集组成。其划分是相对的, 不具有唯一性, 一般以便于分析为依据。

热力系集的各子集之间依据相互关系的不同, 可分为并联子集系统、串联子集系统和混合子集系统。

定义2: 只有能量交换而无质量交换的两个热力子集称为并联子集系统。如图1所示。极限情况是两个子集的能量交换为零。即无质量交换也无能量交换的两个子集称为相互独立子集。

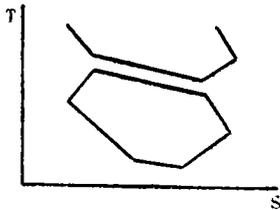


图1 并联子集系统

应该指出的是, 不管是一般的并联子集还是独立子集, 为了保证整个系统是一完整的系统, 应选取两子集熵的基准态相同。

定义3: 有质量交换的两个热力子集称为串联子集系统。

如图2所示, A、B两子集的划分不是唯一的, 可因研究的方便而确定。

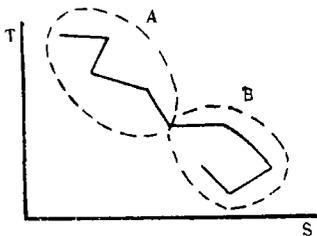


图2 串联子集系统

定义4: 同时含有串联子集和并联集的热力系集称为混合子集系统。如图3所示。

定义5: 组成一热力系集各热力过程之间的内在关系称为热力系集的结构。

如热力循环的形成, 化工厂及动力厂各

热力装置中各热力过程的组合形式等, 都是热力系集结构的例子。

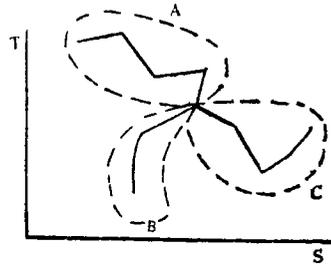


图3 混合子集系统

定义6: 热力过程赖以发生和进行的物质称为热力学载体 (简称热力载体)。

热力循环的工质、传热介质、化学反应的反应物和生成物都是热力载体。

三、结构热力学的定义

结构热力学有它自己的研究对象和目的。

定义7: 结构热力学的研究对象是热力系集结构的热力学特性以及热力系集的结构与支承该系集的热力载体的关系。

定义8: 结构热力学的研究目的是通过研究热力系集结构的热力学特性的优劣, 以改进热力系集的结构。并根据热力系集结构与该系集的热力载体的关系寻求与热力系集结构最佳匹配的热力载体。

简言之, 结构热力学的研究目的有两点, 一是优化热力系集的结构, 二是优化热力载体。

可给结构热力学下一个完整的定义:

定义9: 结构热力学是研究热力系集结构的热力学特性以及系集结构与热力载体的关系, 以优化热力系集结构与热力载体的一门经典热力学的分支学科。

四、热力参数的不对等原理

在一个热力系集中, 有许多种热力学参数, 如温度、压力、比容、熵、内能、焓等。其中温度和熵, 压力和比容常被用作自

变量。温度和压力常统称广义力,熵和比容称为广义位移。这两对广义力和广义位移在能量表达式中的地位通常被认为是平等的。当存在弹性力、表面张力和电磁力时,则存在另外几种广义力和广义位移。现代热力学理论越来越倾向于认为所有广义力和广义位移在热力学地位上是平等的。

在一充满热力载体的简单可压缩热力系统中,当已知其压力和比容值时,就可以知道其温度和熵值。反之亦然。这一现象似乎也表明,压力和比容作为决定系统状态的自变量与温度和熵作为自变量是等价的。

但是,多年来,人们一直不太重视这样一个事实:对于一卡诺循环系统(参见图4),当循环特征的温度和熵都确定时,该系统的吸热量、做功及放热量就都确定了。但是,当用来实现该循环的工质不同时,则各循环特征点的压力、比容、内能等都是不同的。

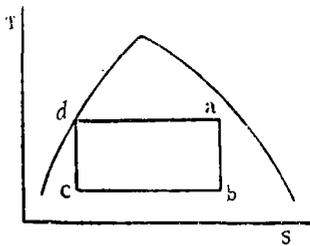


图 4 卡诺循环系统

这一结论对 $T-S$ 图上的任一循环都是正确的。但对于 $P-V$ 图上的任一循环,我们除了能说出它对外界做了多少功之外,并不能确定它从高温热源吸了多少热和向低温热源放了多少热。

因此,结构热力学认为,热力系集的温度和熵这对广义力和广义位移,其热力学地位高于其他的广义力和广义位移。这就是热力参数的不对等原理。

由于温度和熵在热力学中的地位特殊,等温过程和等熵过程在所有热力过程中的地位也是特殊的。众所周知,卡诺循环在热力学中的地位是极其重要的。如果没有卡诺循

环,热力学作为一个完整而独立的学科很可能至今仍未建立。卡诺循环的这种地位是不是仅仅因为十分简单,还是因为有更深刻的原因呢?由于卡诺循环仅由等温和等熵过程组成,因此,完全有理由猜想,本文提出的热力参数不对等原理很可能是这个问题的谜底。

五、结构热力学的研究方法

结构热力学也有自己独特的研究方法。其思路是,将热力系集的结构从其热力载体中合理地抽象出来,然后研究热力系集结构本身的热力性能,并进而寻找与系集结构相匹配的热力载体。

结构热力学的研究方法,一般可分为三个步骤:

1. 热力系集的结构化;
2. 研究结构化系集结构的热力学性能;
3. 研究系集结构与载体热物性的匹配关系,以寻找与结构相匹配的载体。

热力系集结构化过程是整个结构热力学研究方法的关键,也需要一定的技巧。象每一种工程学的研究方法一样,合理的抽象和近似在结构化过程中也是完全必要的。

热力系集的结构化过程有三:

1. 增加一些虚拟的热力过程,使热力系集封闭,进而使热力系集从其载体中分离出来;
2. 选取热力系集的结构特征参数。这里是指热力系集各特征点的热力参数。按照热力参数的不对等原理,应选各特征点的温度及熵作为结构特征参数。由于热力系集已从其热力载体中分离出来了,故一旦选取特征点的温度和熵作为结构特征参数,则特征点的压力和比容就变成无定义的量了。这是结构热力学的独特之处。

3. 选取热力系集的结构特征泛函。这里是指热力系集中那些非等温和非等熵的热

力过程,当热力系集的结构和载体分离后,它们从原载体所定义的确切函数中游离出来所形成的泛函。这些泛函可以是原热力系集真实的热力过程,也可以是虚拟热力过程。在温度和熵图上,由于温度和熵都可以被选为函数或自变量,因此,这种选择应以便于分析为准。

在热力系集的结构化过程中,增加一些虚拟的热力过程,使热力系集封闭是十分重要的。由于热力系集结构化之后,其结构已同其载体分离,这时任一热力过程在温熵图上表示时,只有热量信息,而没有功量信息,因此,只能依靠热力系集的自我封闭去产生功量信息。

例1,在大型制冷装置中,如果用全流液体膨胀机代替节流阀,能回收可观的动力,将全流膨胀过程结构化。

全流膨胀装置的热力系集只包含一个热力过程1-2。要使其结构化,必须增加两个虚拟过程2-3,3-1(参见图5,6)。2-3为等温冷凝过程,3-1为液体定压加热过程。三个过程中只有1-2为做功过程。所做功量为曲边三角1-2-3的面积。

这个结构化系集的结构特征参数为 T_1 、 S_1 、 T_2 、 S_2 、 T_3 、 S_3 六个,结构特征泛函只有一个,就是曲线3-1。就例1而言,选取熵为函数,温度为自变量更方便些。因此,结构特征泛函可写成: $S = f(T)$ 。

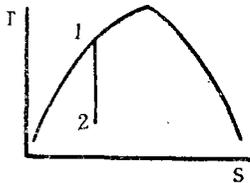


图5 全流膨胀系集

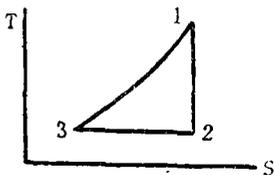


图6 结构全流膨胀系集

第二个步骤与第三个步骤没有先后次序关系,也不是所有结构热力学研究中都包括这二步,可根据实际情况,省略其中的一步。

第三步,实际上是根据实际问题对结构特征泛函进行定量和定性分析。在许多实际问题中,可化为求泛函极端曲线问题。在一些简单情况下,可化为求函数极值和分析函数变化趋势问题。

简言之,其主要思想是,在热力系集结构一定的情况下,寻找一泛函的极端曲线,使系集的热力性能(如热效率、焓效率等)最佳。这一极端曲线代表一种载体的热物性,具有这种热物性的载体就是这一热力系集的最佳载体。尽管热物性与极端曲线一样的载体可能不存在,有极端曲线提供了寻找这种载体的方向。特别是在混合工质倍受重视的现在和未来,这种研究方法的结论将是十分重要的。

对例1,可写出结构化全流膨胀系集做功量的泛函

$$W = \int_{T_2}^{T_1} S'(T - T_2) dT \quad (1)$$

式中, $S' = dS/dT = C_p/T$

根据变分法可知,这一泛函没有极端曲线,给 C_p 加一限制条件,则式(1)的泛函可变成一函数。如规定 C_p 为常数,则

$$\begin{aligned} W &= \int_{T_2}^{T_1} C_p \left(1 - \frac{T_2}{T}\right) dT \\ &= C_p \int_{T_2}^{T_1} \left(1 - \frac{T_2}{T}\right) dT \\ &= C_p \left(T_1 - T_2 - T_2 \ln \frac{T_1}{T_2}\right) \quad (2) \end{aligned}$$

求 W 关于 T_1 的导数,得

$$\partial W / \partial T_1 = C_p (1 - T_2 / T_1) > 0 \quad (3)$$

$$\partial W / \partial T_2 = C_p \left(-1 - \ln \frac{T_1}{T_2} + T_2 / T_2\right)$$

$$= -C_p \ln \frac{T_1}{T_2} < 0 \quad (4)$$

由这个例子可见,应用结构热力学的方法很容易分析出系集的性能与系集结构特征参数的关系,对于系集载体的优化也十分方便。

六、结构化系集的基本性质

定义10: 决定结构热力系集全部能量转换性质的参数和函数个数称为该结构热力系集的自由度。

定理1: 结构热力系集的自由度等于系集的结构特征参数的个数与结构特征泛函的个数之和,减去他们之间的约束关系式的个数,再减去1。定理1的前一部分是明显的。最后减去1的要求是由于熵的基准点可以任意选取。

例1的结构全流膨胀系集(见图6)共有六个结构特征参数和一个结构特征泛函。它们之间有如下的约束关系:

$$T_2 = T_3; \quad S_1 = S_2$$

$$S_1 - S_3 = \int_{T_3}^{T_1} S' dT$$

故,该系集的自由度为

$$F = 7 - 3 - 1 = 3$$

定义11: 选来决定结构热力系集全部能量转换性质的结构特征参数和结构特征泛函,称为独立结构参数和独立结构泛函(简称独立参数和独立泛函)。

定理2: 结构热力系集独立参数的个数与独立泛函的个数之和等于该系集的自由度。

证明简略。

选取那些结构特征参数作为独立参数有一定的人为性,同样,选取那些结构特征泛函作为独立泛函也有一定的人为性。

了解研究方法及技巧的例子从略,另文再述。

七、结构热力学的发展展望

结构热力学进一步研究的主要方向有三:

1. 存在性问题。弄清是不是所有热力系集都可以结构化?

2. 结构特征泛函的极端曲线求解问题。结构热力学提出的泛函一般都是分子和分母上都存在泛函的积分表达式,需要找出这类泛函的求解模式。

3. 探讨各种并、串联热力系集的基本特性及其结构化方法。还需要研究大量的实例,以便归纳出一般性的结论。

可以预料,结构热力学在下面几个应用领域是会有所作为的:

1. 帮助对复杂的热力装置进行结构优化,以寻找服务于同一热力工程目标的最佳热结构装置;

2. 帮助寻找热力装置的最佳工作介质,以提高热力装置的能量利用率;

3. 为计算热力学的创立扫清了道路。因为,它保证了热力系集研究程序的通用性;

4. 为化学及化工热力学提供新的研究课题。因它将提供一大批需要寻找的新物质。

参 考 文 献

- [1] 顾维军. 一个新型热力循环的研究. 中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议, 1986年11月
- [2] 顾维军. G热力循环的焓分析. 能源工程, 1987, (4): 10
- [3] 顾维军, 吕灿仁. 全流热水发电的热力学原理. 中国工程热物理学会年会, 1987年11月

Structural Thermodynamic Principles

Gu Chujun

(Beijing Huazhao Energy Source Engineering Company)

Abstract

The author presents a related definition of structural thermodynamics, investigates the orientation and method of structural thermodynamic research, clarifies the concepts of thermodynamic system set and thermodynamic carrier, points out the way forward for development and the backgrounds for application of structural thermodynamics and advances a thermodynamic parameter non-equality principle from the viewpoint of structural thermodynamics, thus laying down a foundation for the selection of structural characteristic parameters for structural thermodynamics.

Key Words: *thermodynamics, research*

Editor's note

The concept of structural thermodynamics advanced in the paper entitled "Structural Thermodynamic Principles" is a new subject. It is worth while investigating the necessity of establishing this branch of thermodynamics as well as its researching method and contents. This paper is published for the purpose of bringing it to the related academic circles' attention. Contributions on this subject from researchers abroad and at home are welcome.

简讯

美亚湛江炼油厂采用国产航空改型燃气轮机

香港美亚石油有限公司在湛江独资新建美亚湛江炼油厂。总规模为年加工原油 150 万吨，总投资 2 亿元。该厂同时建设自备电站，其装机容量 12000 千瓦。经考察后，厂方选用我国南方燃机公司生产的航空改型 WJ6GI 燃气轮机，组成 HER2 型热电联供机组。于 1989 年 8 月正式签订了 6 套机组 2 台备用机组的合同。该机单台功率 2000kW。该机组被港商炼油厂选中，说明我国航空改型燃机已达到成熟的商品化阶段。

该电站与炼油厂建设同步进行，6 套机组集中控制，适应当地环保要求，采用集中排气，噪音限制严格，还附加了燃料油罐工程。1990 年 5 月底前厂内建造完工，6 月开始运输、安装、调试，9 月底交付投产。

卓文 摘