



烟 方 法 及 其 应 用

〔俄〕B. M. 布 罗 章 斯 基
编译：王加璇 校阅：齐起生

电力科技专著出版基金资助项目

中国电力出版社

绪 论

在现代工程中,有许多装置跟系统的设计和完善,都在不同程度上有赖于热力学方法。这类工程的范围不断地扩大着,而其复杂程度也与日俱增。为了从理论上来充实这些领域中的科研人员和设计人员,作为理论工具的热力学本身也要随着发展。

分析现代工程系统中能量转换所用的热力学方法,可以归纳成原则上不同的两类:

第一类方法是在卡诺和克劳修斯所奠定的基础上,经过长期的运用于正向循环与逆向循环分析而不断完善和改进所形成的传统方法,并已得到广泛的应用。这些方法在热力学第一定律和第二定律所限制的框架内探究外部能流(热量与功)与系统参数之间以及某些内部参数之间的关系;利用系统能平衡概念来分析和完善所分析的循环,可以计算它们的能量转换系数(如热效率、制冷系数、热力装置的性能系数等)并表征它们的完善程度;把它们与理想循环或卡诺循环进行对比,看它能接近理想循环的程度。一部热力学的发展史可以概括地说,是在人们对实际循环向理想循环接近的不断追求中发展完善起来的。因此,它的深入人心再加上简单易行,使人们使用它已形成了习惯而不能轻易改变。这就是人们常把它归类为热力学第一定律分析方法。它的突出缺点是只考虑能的数量而忽视其质量,因而在系统分析中忽视了各种不可逆性造成的损失。

其实,在原本意义上的第一类热力学方法也不是绝对忽视不可逆性损失的,只是把它作为循环分析的补充计算,即在循环的能平衡计算之后再计算系统各部位上的熵增,得出的总熵增再乘以环境(基准态)温度,即得系统的总不可逆损失,然后从循环计算的总收益中减去这项总损失,这才是此第一类方法的完整内容。布罗章斯基称它为“熵-循环”方法。而且把不可逆性总损失又分成两部分:系统内部的,即与循环本身的过程不完善性有关的不可逆性损失;系统外部的,即与所分析系统间,与外部能库间,以及与能源之间,相互作用性质有关的不可逆损失。

可是长期以来,人们习惯地省略了此项熵统计的补充计算,只剩下了能平衡计算。于是得到了一个突出的“优点”:计算简单,却带来了重大缺欠——偏离了问题的实质,而成为片面地只考虑能的量而忽视其质的方法。

第二类方法是以吉布斯的理论为基础,利用热力学势的方法,在各种系统中分析能量转换过程时,用可靠的方法选定热力学势成为关键。热力学势具有非常重要的性质,它可以给出功在各种形式(机械的、电的、以及其他形式)下的数值。利用这一基本性质,可以评价所分析系统的任意点上的物质与能量,只作性能分析,而与系统的形式、结构以及复杂程度无关。因而利用这个性质可以计算下一步系统的或其任意部分的热力学特性,分析所需要的全部信息基础、逻辑顺序和方法。

在化学热力学中这种方法早就得到广泛应用,但在热力学的其他应用方面却仍然使用

熵-循环方法，即第一类方法。

近年来，利用以势性质为基础的分析方法越来越引起人们的兴趣，在热力学的工程应用领域也得到了广泛的重视。这首先是因为以热力学方法所研究的过程、工程对象的领域得到明显的拓宽，而许多过程变得越来越复杂的缘故。

相继出现了新型的热能装置（如核能、蒸汽/燃气联合循环、磁场流体动力等装置）。与热能装置同步发展的新型利用热能的制冷装置也在工程技术中得到广泛的应用，如热泵、气体混合物的离析、低温工程、热敏元件（燃料电池）、光电发电机等。越来越多地出现了全部实现或部分地实现闭口过程的新装置和工质输入和输出的系统。在能量转换中，化学反应所占位置越来越重要。在某些新的能量转换系统中，对热力学循环这个术语一般理解的概念已不复存在，例如在半导体热敏元件中，在化学热泵中等等。

须指出，与能量转换系统研究的同时，热力学研究的对象，作为动能学的侧面，更多地出现了物质转换的系统以及与它相关的工艺过程。这类问题主要是应用于化学工业部门和冶金工业部门的过程热力学，这里的课题第一位的是研究如何提高能量利用的有效性。面临这类问题，若还局限于第一类方法，即使把循环分析法的全部成就都用上，也不可能得到应用于这样广泛范围的对象的热力学分析的全部信息。

面临如此复杂的情况，以势为依据的分析方法的基本特征就具有越来越重要的意义，这个基本特征就是它的普适性。

这类方法的普适性可以这样理解：在被分析的系统中，过程的特征（闭口过程、开口过程、能的形式等）全然没有意义，应用于它们的问题的提法及其解法全部不需改变。因此，以利用势为基础的方法具有更强的逻辑能力和数学结构上的优越性，而其解题的方法一般来说都是既简要而又快速的。有些工程技术问题包括技术经济问题若不用势参数的方法，即使用专门技术也难解决，而若用势方法便可迎刃而解。随着分析对象的越来越复杂，上述这些优点将会越明显起来。

在分析工程系统中运用势参数方法解题时，需写出其热力学函数，这种热力学函数将单值地表征系统的做功性能，在给定了外部条件后，可求得物流与能流的能量价值。

这样的函数与化学热力学中使用的函数是有区别的。在大多数的化学热力学的问题中，只分析系统的内部参数与过程。其特征函数不能反映系统的外界所进行的或可能进行的过程，它与能流和物流，其能量作用的结果如何，它们与环境介质相互作用的可能性等，都不可能反映出来。

对于工程上应用的热力学来说，不仅要研究系统内部的过程与参数，而且更重要的是分析所研究系统的能流和物流与系统外部的外界之间各种形式的相互作用。只有经过这种分析才能得出工程效益的评价，所有的能流或物流的有效性在给定参数与其基础，从动力学的角度进行的系统分析。对可能在系统之外进行的过程的分析的要求意味着系统的环境的一般概念应理解为在其极限之外所存在的一切。在这种情况下，一般概念是不够的，而应发展更详细的与实际情况相吻合的系统概念。

首先要分出系统之外的环境，必须以在其中没有大的势差，其范围应该大得使系统对它的任何作用也不会改变其参数的程度。因此，这种平衡的（准确点说是准平衡的）环境

(周围介质)本身是不能成为任何形式的功源。

与此同时,在系统的环境中可能有其他客体,以这样或那样的强度因素(如温度、压力、化学势等)与平衡部分相区别,它们却可能成为所分析系统的能流与物流。

求取决定能流和物流的最大功的热力学势与这些外部客体以及被分析系统本身是有关的。在一般情况下,应按系统外界平衡部分——环境介质进行。此环境介质在计算任意势时都起作用。这样的环境模型应最大限度地符合实际工程系统的工作条件。根据具体情况,环境介质的平衡部分可能是大气圈、海域、土壤、宇宙空间等。在本书中我们对“环境”的概念将理解为环境的平衡态部分,而它在热力学分析中将起决定性的作用。

同样地,对于承担分析任务的热力学函数来说,在描述它的条件中除上述物流参数或能流参数外,还应包括与它们同等重要的环境介质的平衡参数,这样,这些函数才能起势参数的作用,才能在任意情况下确定系统或其局部(子系统)能够获取功的能源,因而也能得到在已知环境介质条件下可以实际利用的任何能量转换。

对所分析的系统与其在边界上与环境作用所进行的能量转换,一般应理解为在给定的环境条件下“其运动形式的变化”,而功量的计算是从数量方面来分析此运动形式的变化而已。

决定能流和物流这种作用的量(工作性能)叫做焵,而决定其数值的函数叫做焵函数。焵(Exergy)这个术语是Rant在1956年提出的。Rant按照Plank的理论^[1]把能分成在一定环境条件下可以转换的和不可转换的两部分,采用了希腊字“ergo”(意为功或力)加上前缀“ex”(意为从其中,外部)来命名可以转换部分的能为“Exergy”,而把不可转换的部分叫“Anergy”。

Rant提出的这个术语可以满足国际间关于术语所有的要求,能反映所代表的概念,而且形式上也非常接近同类术语能(Energy)、熵(Entropy)和焓(Enthalpy)等。仿此,在我国也把它译成与其同类的术语,焵与熵相近的形式——焵,意为可用的能。

焵和能在概念上是有区别的。如果说能是与物质的基本属性有关,那么焵虽然重要,但它却是个局部概念。焵表征能的各个侧面中的一个侧面,是能的可转换性,因而也是其有效性的分界。在给定的环境条件下,其参数与所分析的系统的作用无关。在这个意义上焵又具有了相对独立的品格,因而不必再分什么形式的能(机械的、电的等),凡是焵都是等同的,视为焵的等效性。这样就使焵在它自己的基础上所建立的统一的逻辑推理的热力学方法,而能解决范围广泛的工程和技术经济问题。自然,这种方法仍然保持着作为演绎科学的热力学特点,但焵在热力学概念中的地位却取决于事物的方法论的侧面。

科学发展的历史表明,其发展的方向之一是对已知规律性在理论方法描述上的完善,使之有更多的共性和更概括的形式、概念和特性,在这方面已经取得两个重大成就:

第一个成就是利用更严密和充实的方法来描述所获得的信息,使之缩短事前思考的过程,并准确地掌握新事物的概念,加速探究到事物实质的过程。

第二个成就是利用更充实的方法解决新问题,可成倍地简化并加速求解过程,使新事物更好地展开。

充实的表述方法的经典形式是由数学提供的,如利用矢量计算和矩阵分析等。

具体到热力学,属于第二个成就的,首推引入了势函数,如焓、吉布斯自由焓、亥姆霍斯自由能等。自从引进了这类函数,就可以不再附加任何补充计算,而直接求得特定条件下的功。物流和能流的焓也属于这类函数。在热力学中自从引入了焓函数就开始焓方法的发展。

焓方法或其一些分支解法具有几乎与热力学本身一样长的历史。起初使用过“availability”的名称,其意为能的可用性。最早期著作里使用此术语的有 P. Tait^[2], J. Maxwell^[3], W. Thomson^[4]等人。在法国, M. Gauy^[5]与 E. Jouquet^[6]曾从事过封闭系统中物质最大功的计算。在早些时候,此问题的解就已经由美国的 J. Gibbs^[7]得出过。沿着他的足迹, A. Stodola^[8]把其先行者的理论又向前大大地推进了一步,使它成为在工业技术领域能直接应用的形式,并引入了“技术自由焓”的概念。Stodola 的贡献还在于他在实践中导出了一种超出纯热力学的分析方法,把问题立足于热力学系统的分析,并把它扩展到工程系统。必须指出,这方面工作的开拓者应该是卡诺。卡诺的科学抽象方法的提出,使热力学更接近于工程与经济。用现代语言说,使它走出抽象概念而变得更具体了。这时,在分析的范围又引进了一些量,如时间(把功过渡到功率)与技术特性、时间与热力学特性之间的关系等。

这些早期工作的结果并未得到广泛的响应,因为那时的工业对热力学分析的要求尚未达到这样的水平。但是这些成就为其以后的发展奠定了基础。

在本世纪的 30 年代焓方法的理论基础研究得到了更广阔的发展而且在具体的工程中也出现应用的实例。在此阶段,在英文文献上 J. Keenan^[9]名字与焓方法联系起来,在法文文献中出现了 W. Keesom^[10]和 G. Darrieus^[11],而在德国出现 F. Bosnjakovic^[12]。

Keenan 在 1932 年发表的文章中研究了焓函数 $h-\tau_{0,c}s$ 的性质,制订了第一张以焓作纵坐标的水蒸气的焓图,为焓方法的应用奠定了基础。他还首次以焓方法分析了凝汽式电厂的热力循环。1933 年, W. Keesom 首次把焓函数运用于氮的分级液化的低温工程的热力学分析。Keesom 的工作为以后低温领域工程过程的热力学研究开了先河。在 F. Bosnjakovic 的著名的《热力学教程》中,他详细地研究了焓函数 $h-T_{0,c}s$ 的一系列特性,并给焓命名为“技术做功能力”(Technische Arbeitsfähigkeit)。该书附有相当多的 $h-s$ 焓图应用的实例,他也作了空气液化过程的热力学图论法的部分工作。Bosnjakovic 和他的同事们和学派在热力学的这个方向上作出过突出的贡献。

在前苏联需指出的学者有 М. В. Кирпичев^[13], В. С. Жуковский^[14], Д. П. Гохштейн^[15], 他们利用了焓方法与循环法作了大量的分析研究工作。П. Л. Капица^[16]与 В. С. Мартыновский^[17]在低温工程方面开发了当时焓分析的新方法。

从 50 年代开始,不论理论研究或实际应用方面使用焓概念的文章骤增,这种增长的趋势可以从图 0-1 上的曲线上清楚地看出来。关于焓方法的热力学基础,在 P. Grassmann^[19], Z. Rant^[20], G. Kalitzen^[21], И. П. Инкин, В. М. Бродянский^[22], N. Elsner, W. Fratzcher^[23], J. Szargut^[24], А. П. Андрищенко^[25]以及其他许多作者们的一系列的论文中都有系统的研究。

须特别指出的是 Z. Rant 与 P. Grassmann 在 1950 年发表的文章,其中首次提出关于任

何能量转换系统中熵效率的概括性的概念。与专论文章出现的同时,首次出现了一批专著,其中不仅讨论了方法论的问题,也讨论了熵的实际应用。这些专著的作者有:W. Fratzcher (1962年)^[26]、J. Szargut 与 R. Petela (1965年)^[27], B. M. Бродянский (1966年, 1973年) 与 J. Ahern (1980年)^[32]。

在现代工程热力学的教科书中,几乎都有专门的章节讨论熵概念,如 H. Bahr 的《工程热力学》(1977年版)^[29], M. Elsner 的《工程热力学基础》(1982年版)^[33], 等等。

总之,在现代的热力学著作中,都分出很大篇幅来讨论熵方法的应用问题。须指出,近年来熵方法的研究更深入、更系统化了,并且与技术经济问题结合方面的研究也在发展,这类问题将在后面各章涉及到时再详述。

综上历史的回顾,可以说明熵方法的理论基础到 80 年代中期已臻完善且非常清楚了。虽然与当前热能动力方面所提出来的问题相比,熵方法在实际方面的应用还十分不够,而工程技术的评估又向前发展了。很多能源用户(甚至于产能户)在实践上甚至于不清楚能量形式在质上的差别,还停留在“熵-循环”(即能平衡)分析的概念上。另一方面正利用着的“熵-循环”方法,也只在一定程度上考虑热力学第二定律的要求。后者更高一点水平的研究还要求有更多的解释与分析。但在某些情况下又有大量的问题限制了使用熵方法的可行性,因而不能保证随时找到解决工程决策的正确建议。关于这一点, J. Soma^[37]定义了一个术语——“熵管理”(Exergy Management), 这术语已经被使用。熵管理可以理解为把工程-能源思维过渡到第三层次或更高的层次,将各种能源以及热能动力与工艺的各部门和企业的问题分解后,以熵参数来考虑热力学第二定律。这种分析利用了一系列的成就,最后达到获得技术-经济特性的目的,并以它作为优化和作决策的基础。

朝着这个方向走出的第一步就是在许多国家已利用熵分析使国民经济各部门用能的合理化,一些先进的国家在审查设计、规划生产模拟等工作中引入了熵分析,并利用它来评估天然资源。例如,美国地质委员会以含熵量来评估地热资源^[19]。

与此同时也不能不考虑某些工程技术人员与经济工作人员还习惯于“能平衡”的概念。他们认为一切能量形式都是等价的,或者按比例关系从一个折算成另一个,这是没有科学根据的。此外熵方法的实际应用可在若干方面同时开发使用。在各种工业领域,由于传统习惯不同,解题方法可能是多种多样的,最终都与社会的经济结构有关系。也就是说有不

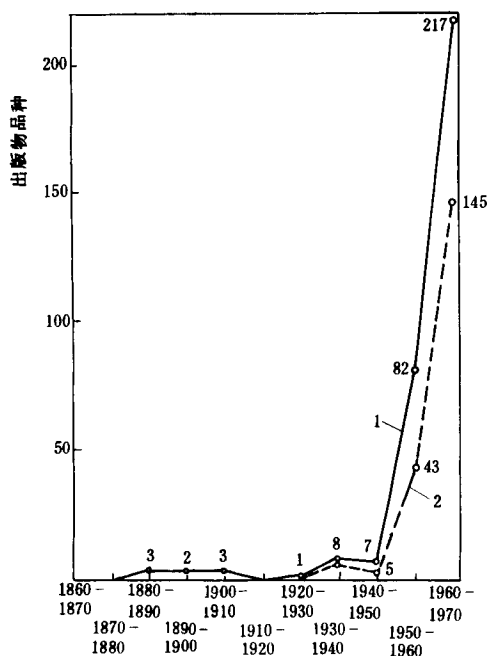


图 0-1 70 年代前熵方法方面出版物品种

1—总量；2—熵方法方面出版物品种

第四节 物质转换的工程系统分析	196
第五节 工程系统工况的热力学优化与设备的综合能量特性	204
第七章 焓在技术-经济分析中的应用	209
第一节 概述	209
第二节 ETE 优化法的目标函数	211
第三节 焓技术-经济优化方法	220
第四节 多目标工程系统的费用分摊	225
第五节 生态学与焓	230
关于基本术语的定义	243
本书使用的基本符号表	246
系统图上的符号	246
参考文献	247

目 录

前 言	
绪论	1
第一章 物质与能量转换系统——热力学分析的一般问题	7
第一节 热力学分析的任务、对象与可能性	7
第二节 能量的形式与可转换性	9
第三节 焓及其形式与组成	11
第二章 焓值与其方程式	17
第一节 环境介质概念在焓分析中的特定意义	17
第二节 物质焓	18
第三节 能流焓	33
第四节 焓	41
第三章 物流焓计算与焓图	47
第一节 综述	47
第二节 纯物质焓	47
第三节 混合物的焓	67
第四节 化学反应系的焓	77
第四章 焓平衡与工程系统的特性	93
第一节 有因次的与无因次的焓特性	93
第二节 焓流与焓损	97
第三节 能量转换系数与效率	101
第四节 工程系统结构与其内部和外部联系的焓特性	114
第五节 工程系统可行性分析	122
第五章 基本过程分析	128
第一节 基本过程特性与分类	128
第二节 气体和液体的压缩	129
第三节 气体和液体的膨胀	136
第四节 热交换	147
第五节 物流的混合与离析	156
第六节 不同组分物流的混合与离析	160
第七节 具有化学反应的过程	165
第六章 工程系统的热力学分析与优化	173
第一节 概述	173
第二节 能量转换的工程系统分析	176
第三节 生产电能的工程系统分析	187

第四节 物质转换的工程系统分析	196
第五节 工程系统工况的热力学优化与设备的综合能量特性	204
第七章 烟在技术-经济分析中的应用	209
第一节 概述	209
第二节 ETE 优化法的目标函数	211
第三节 烟技术-经济优化方法	220
第四节 多目标工程系统的费用分摊	225
第五节 生态学与烟	230
关于基本术语的定义	243
本书使用的基本符号表	246
系统图上的符号	246
参考文献	247

绪 论

在现代工程中,有许多装置跟系统的设计和完善,都在不同程度上有赖于热力学方法。这类工程的范围不断地扩大着,而其复杂程度也与日俱增。为了从理论上来充实这些领域中的科研人员和设计人员,作为理论工具的热力学本身也要随着发展。

分析现代工程系统中能量转换所用的热力学方法,可以归纳成原则上不同的两类:

第一类方法是在卡诺和克劳修斯所奠定的基础上,经过长期的运用于正向循环与逆向循环分析而不断完善和改进所形成的传统方法,并已得到广泛的应用。这些方法在热力学第一定律和第二定律所限制的框架内探究外部能流(热量与功)与系统参数之间以及某些内部参数之间的关系;利用系统能平衡概念来分析和完善所分析的循环,可以计算它们的能量转换系数(如热效率、制冷系数、热力装置的性能系数等)并表征它们的完善程度;把它们与理想循环或卡诺循环进行对比,看它能接近理想循环的程度。一部热力学的发展史可以概括地说,是在人们对实际循环向理想循环接近的不断追求中发展完善起来的。因此,它的深入人心再加上简单易行,使人们使用它已形成了习惯而不能轻易改变。这就是人们常把它归类为热力学第一定律分析方法。它的突出缺点是只考虑能的数量而忽视其质量,因而在系统分析中忽视了各种不可逆性造成的损失。

其实,在原本意义上的第一类热力学方法也不是绝对忽视不可逆性损失的,只是把它作为循环分析的补充计算,即在循环的能平衡计算之后再计算系统各部位上的熵增,得出的总熵增再乘以环境(基准态)温度,即得系统的总不可逆损失,然后从循环计算的总收益中减去这项总损失,这才是此第一类方法的完整内容。布罗章斯基称它为“熵-循环”方法。而且把不可逆性总损失又分成两部分:系统内部的,即与循环本身的过程不完善性有关的不可逆性损失;系统外部的,即与所分析系统间,与外部能库间,以及与能源之间,相互作用性质有关的不可逆损失。

可是长期以来,人们习惯地省略了此项熵统计的补充计算,只剩下了能平衡计算。于是得到了一个突出的“优点”:计算简单,却带来了重大缺欠——偏离了问题的实质,而成为片面地只考虑能的量而忽视其质的方法。

第二类方法是以吉布斯的理论为基础,利用热力学势的方法,在各种系统中分析能量转换过程时,用可靠的方法选定热力学势成为关键。热力学势具有非常重要的性质,它可以给出功在各种形式(机械的、电的、以及其他形式)下的数值。利用这一基本性质,可以评价所分析系统的任意点上的物质与能量,只作性能分析,而与系统的形式、结构以及复杂程度无关。因而利用这个性质可以计算下一步系统的或其任意部分的热力学特性,分析所需要的全部信息基础、逻辑顺序和方法。

在化学热力学中这种方法早就得到广泛应用,但在热力学的其他应用方面却仍然使用

熵-循环方法，即第一类方法。

近年来，利用以势性质为基础的分析方法越来越引起人们的兴趣，在热力学的工程应用领域也得到了广泛的重视。这首先是因为以热力学方法所研究的过程、工程对象的领域得到明显的拓宽，而许多过程变得越来越复杂的缘故。

相继出现了新型的热能装置（如核能、蒸汽/燃气联合循环、磁场流体动力等装置）。与热能装置同步发展的新型利用热能的制冷装置也在工程技术中得到广泛的应用，如热泵、气体混合物的离析、低温工程、热敏元件（燃料电池）、光电发电机等。越来越多地出现了全部实现或部分地实现闭口过程的新装置和工质输入和输出的系统。在能量转换中，化学反应所占位置越来越重要。在某些新的能量转换系统中，对热力学循环这个术语一般理解的概念已不复存在，例如在半导体热敏元件中，在化学热泵中等等。

须指出，与能量转换系统研究的同时，热力学研究的对象，作为动能学的侧面，更多地出现了物质转换的系统以及与它相关的工艺过程。这类问题主要是应用于化学工业部门和冶金工业部门的过程热力学，这里的课题第一位的是研究如何提高能量利用的有效性。面临这类问题，若还局限于第一类方法，即使把循环分析法的全部成就都用上，也不可能得到应用于这样广泛范围的对象的热力学分析的全部信息。

面临如此复杂的情况，以势为依据的分析方法的基本特征就具有越来越重要的意义，这个基本特征就是它的普适性。

这类方法的普适性可以这样理解：在被分析的系统中，过程的特征（闭口过程、开口过程、能的形式等）全然没有意义，应用于它们的问题的提法及其解法全部不需改变。因此，以利用势为基础的方法具有更强的逻辑能力和数学结构上的优越性，而其解题的方法一般来说都是既简要而又快速的。有些工程技术问题包括技术经济问题若不用势参数的方法，即使用专门技术也难解决，而若用势方法便可迎刃而解。随着分析对象的越来越复杂，上述这些优点将会越明显起来。

在分析工程系统中运用势参数方法解题时，需写出其热力学函数，这种热力学函数将单值地表征系统的做功性能，在给定了外部条件后，可求得物流与能流的能量价值。

这样的函数与化学热力学中使用的函数是有区别的。在大多数的化学热力学的问题中，只分析系统的内部参数与过程。其特征函数不能反映系统的外界所进行的或可能进行的过程，它与能流和物流，其能量作用的结果如何，它们与环境介质相互作用的可能性等，都不可能反映出来。

对于工程上应用的热力学来说，不仅要研究系统内部的过程与参数，而且更重要的是分析所研究系统的能流和物流与系统外部的外界之间各种形式的相互作用。只有经过这种分析才能得出工程效益的评价，所有的能流或物流的有效性在给定参数与其基础，从动力学的角度进行的系统分析。对可能在系统之外进行的过程的分析的要求意味着系统的环境的一般概念应理解为在其极限之外所存在的一切。在这种情况下，一般概念是不够的，而应发展更详细的与实际情况相吻合的系统概念。

首先要分出系统之外的环境，必须以在其中没有大的势差，其范围应该大得使系统对它的任何作用也不会改变其参数的程度。因此，这种平衡的（准确点说是准平衡的）环境

(周围介质)本身是不能成为任何形式的功源。

与此同时,在系统的环境中可能有其他客体,以这样或那样的强度因素(如温度、压力、化学势等)与平衡部分相区别,它们却可能成为所分析系统的能流与物流。

求取决定能流和物流的最大功的热力学势与这些外部客体以及被分析系统本身是有关的。在一般情况下,应按系统外界平衡部分——环境介质进行。此环境介质在计算任意势时都起作用。这样的环境模型应最大限度地符合实际工程系统的工作条件。根据具体情况,环境介质的平衡部分可能是大气圈、海域、土壤、宇宙空间等。在本书中我们对“环境”的概念将理解为环境的平衡态部分,而它在热力学分析中将起决定性的作用。

同样地,对于承担分析任务的热力学函数来说,在描述它的条件中除上述物流参数或能流参数外,还应包括与它们同等重要的环境介质的平衡参数,这样,这些函数才能起势参数的作用,才能在任意情况下确定系统或其局部(子系统)能够获取功的能源,因而也能得到在已知环境介质条件下可以实际利用的任何能量转换。

对所分析的系统与其在边界上与环境作用所进行的能量转换,一般应理解为在给定的环境条件下“其运动形式的变化”,而功量的计算是从数量方面来分析此运动形式的变化而已。

决定能流和物流这种作用的量(工作性能)叫做焵,而决定其数值的函数叫做焵函数。焵(Exergy)这个术语是Rant在1956年提出的。Rant按照Plank的理论^[1]把能分成在一定环境条件下可以转换的和不可转换的两部分,采用了希腊字“ergo”(意为功或力)加上前缀“ex”(意为从其中,外部)来命名可以转换部分的能为“Exergy”,而把不可转换的部分叫“Anergy”。

Rant提出的这个术语可以满足国际间关于术语所有的要求,能反映所代表的概念,而且形式上也非常接近同类术语能(Energy)、熵(Entropy)和焓(Enthalpy)等。仿此,在我国也把它译成与其同类的术语,焵与熵相近的形式——焵,意为可用的能。

焵和能在概念上是有区别的。如果说能是与物质的基本属性有关,那么焵虽然重要,但它却是个局部概念。焵表征能的各个侧面中的一个侧面,是能的可转换性,因而也是其有效性的分界。在给定的环境条件下,其参数与所分析的系统的作用无关。在这个意义上焵又具有了相对独立的品格,因而不必再分什么形式的能(机械的、电的等),凡是焵都是等同的,视为焵的等效性。这样就使焵在它自己的基础上所建立的统一的逻辑推理的热力学方法,而能解决范围广泛的工程和技术经济问题。自然,这种方法仍然保持着作为演绎科学的热力学特点,但焵在热力学概念中的地位却取决于事物的方法论的侧面。

科学发展的历史表明,其发展的方向之一是对已知规律性在理论方法描述上的完善,使之有更多的共性和更概括的形式、概念和特性,在这方面已经取得两个重大成就:

第一个成就是利用更严密和充实的方法来描述所获得的信息,使之缩短事前思考的过程,并准确地掌握新事物的概念,加速探究到事物实质的过程。

第二个成就是利用更充实的方法解决新问题,可成倍地简化并加速求解过程,使新事物更好地展开。

充实的表述方法的经典形式是由数学提供的,如利用矢量计算和矩阵分析等。

具体到热力学,属于第二个成就的,首推引入了势函数,如焓、吉布斯自由焓、亥姆霍斯自由能等。自从引进了这类函数,就可以不再附加任何补充计算,而直接求得特定条件下的功。物流和能流的焓也属于这类函数。在热力学中自从引入了焓函数就开始焓方法的发展。

焓方法或其一些分支解法具有几乎与热力学本身一样长的历史。起初使用过“availability”的名称,其意为能的可用性。最早期著作里使用此术语的有 P. Tait^[2], J. Maxwell^[3], W. Thomson^[4]等人。在法国, M. Gauy^[5]与 E. Jouquet^[6]曾从事过封闭系统中物质最大功的计算。在早些时候,此问题的解就已经由美国的 J. Gibbs^[7]得出过。沿着他的足迹, A. Stodola^[8]把其先行者的理论又向前大大地推进了一步,使它成为在工业技术领域能直接应用的形式,并引入了“技术自由焓”的概念。Stodola 的贡献还在于他在实践中导出了一种超出纯热力学的分析方法,把问题立足于热力学系统的分析,并把它扩展到工程系统。必须指出,这方面工作的开拓者应该是卡诺。卡诺的科学抽象方法的提出,使热力学更接近于工程与经济。用现代语言说,使它走出抽象概念而变得更具体了。这时,在分析的范围又引进了一些量,如时间(把功过渡到功率)与技术特性、时间与热力学特性之间的关系等。

这些早期工作的结果并未得到广泛的响应,因为那时的工业对热力学分析的要求尚未达到这样的水平。但是这些成就为其以后的发展奠定了基础。

在本世纪的 30 年代焓方法的理论基础研究得到了更广阔的发展而且在具体的工程中也出现应用的实例。在此阶段,在英文文献上 J. Keenan^[9]名字与焓方法联系起来,在法文文献中出现了 W. Keesom^[10]和 G. Darrieus^[11],而在德国出现 F. Bosnjakovic^[12]。

Keenan 在 1932 年发表的文章中研究了焓函数 $h-\tau_{0,c}s$ 的性质,制订了第一张以焓作纵坐标的水蒸气的焓图,为焓方法的应用奠定了基础。他还首次以焓方法分析了凝汽式电厂的热力循环。1933 年, W. Keesom 首次把焓函数运用于氮的分级液化的低温工程的热力学分析。Keesom 的工作为以后低温领域工程过程的热力学研究开了先河。在 F. Bosnjakovic 的著名的《热力学教程》中,他详细地研究了焓函数 $h-T_{0,c}s$ 的一系列特性,并给焓命名为“技术做功能力”(Technische Arbeitsfähigkeit)。该书附有相当多的 $h-s$ 焓图应用的实例,他也作了空气液化过程的热力学图论法的部分工作。Bosnjakovic 和他的同事们和学派在热力学的这个方向上作出过突出的贡献。

在前苏联需指出的学者有 М. В. Кирпичев^[13], В. С. Жуковский^[14], Д. П. Гохштейн^[15], 他们利用了焓方法与循环法作了大量的分析研究工作。П. Л. Капица^[16]与 В. С. Мартыновский^[17]在低温工程方面开发了当时焓分析的新方法。

从 50 年代开始,不论理论研究或实际应用方面使用焓概念的文章骤增,这种增长的趋势可以从图 0-1 上的曲线上清楚地看出来。关于焓方法的热力学基础,在 P. Grassmann^[19]、Z. Rant^[20]、G. Kalitzen^[21]、И. П. Инкин、В. М. Бродянский^[22]、N. Elsner、W. Fratzcher^[23]、J. Szargut^[24]、А. П. Андрищенко^[25]以及其他许多作者们的一系列的论文中都有系统的研究。

须特别指出的是 Z. Rant 与 P. Grassmann 在 1950 年发表的文章,其中首次提出关于任

何能量转换系统中熵效率的概括性的概念。与专论文章出现的同时,首次出现了一批专著,其中不仅讨论了方法论的问题,也讨论了熵的实际应用。这些专著的作者有:W. Fratzcher (1962年)^[26]、J. Szargut 与 R. Petela (1965年)^[27], B. M. Бродянский (1966年, 1973年) 与 J. Ahern (1980年)^[32]。

在现代工程热力学的教科书中,几乎都有专门的章节讨论熵概念,如 H. Bahr 的《工程热力学》(1977年版)^[29], M. Elsner 的《工程热力学基础》(1982年版)^[33], 等等。

总之,在现代的热力学著作中,都分出很大篇幅来讨论熵方法的应用问题。须指出,近年来熵方法的研究更深入、更系统化了,并且与技术经济问题结合方面的研究也在发展,这类问题将在后面各章涉及到时再详述。

综上历史的回顾,可以说明熵方法的理论基础到 80 年代中期已臻完善且非常清楚了。虽然与当前热能动力方面所提出来的问题相比,熵方法在实际方面的应用还十分不够,而工程技术的评估又向前发展了。很多能源用户(甚至于产能户)在实践上甚至于不清楚能量形式在质上的差别,还停留在“熵-循环”(即能平衡)分析的概念上。另一方面正利用着的“熵-循环”方法,也只在一定程度上考虑热力学第二定律的要求。后者更高一点水平的研究还要求有更多的解释与分析。但在某些情况下又有大量的问题限制了使用熵方法的可行性,因而不能保证随时找到解决工程决策的正确建议。关于这一点, J. Soma^[37]定义了一个术语——“熵管理”(Exergy Management), 这术语已经被使用。熵管理可以理解为把工程-能源思维过渡到第三层次或更高的层次,将各种能源以及热能动力与工艺的各部门和企业的问题分解后,以熵参数来考虑热力学第二定律。这种分析利用了一系列的成就,最后达到获得技术-经济特性的目的,并以它作为优化和作决策的基础。

朝着这个方向走出的第一步就是在许多国家已利用熵分析使国民经济各部门用能的合理化,一些先进的国家在审查设计、规划生产模拟等工作中引入了熵分析,并利用它来评估天然资源。例如,美国地质委员会以含熵量来评估地热资源^[19]。

与此同时也不能不考虑某些工程技术人员与经济工作人员还习惯于“能平衡”的概念。他们认为一切能量形式都是等价的,或者按比例关系从一个折算成另一个,这是没有科学根据的。此外熵方法的实际应用可在若干方面同时开发使用。在各种工业领域,由于传统习惯不同,解题方法可能是多种多样的,最终都与社会的经济结构有关系。也就是说有不

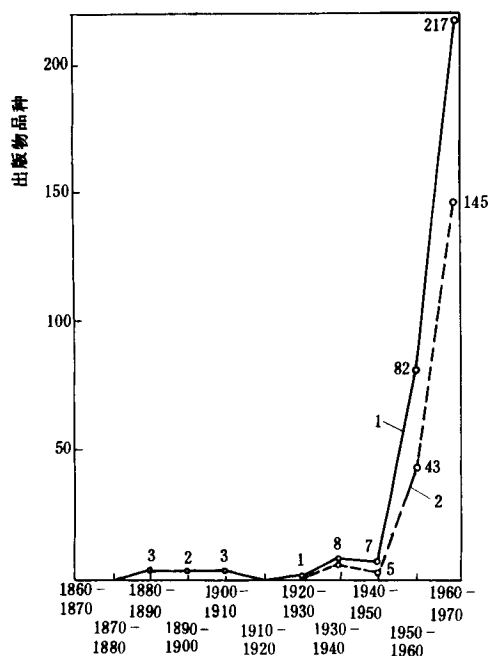


图 0-1 70 年代前熵方法方面出版物品种

1—总量；2—熵方法方面出版物品种

少的问题都与技术经济分析相联系，因此，都可以用炯方法进行。炯方法也常用来计算有效能。有时也会涉及到与资金费用有关的问题。

鉴于这种情况，布氏与他的同事们对上述问题十分注意，他们准备一方面依靠确凿的一般理论研究，另一方面充分利用炯方法提供的可能性，其中包括一些尚在讨论研究的新理论。

第一章 物质与能量转换系统

——热力学分析的一般问题

第一节 热力学分析的任务、对象与可能性

世间所有的技术，即人类所创造的技术对象的总和，都是以能量利用为基础的。因此，在研究、设计、运行与改进它们的各种方法中，能量分析占有极重要的位置。为此，与其他方法，如结构的、工艺的、生产的以及经济的方法一样，首先要针对分析的问题，实际的或所设计的技术对象建立相应的理论与方法。建立其模型，这种模型能反映所取的参数与此技术对象中的大多数元件，以及这些元件与对外界的联系和相互作用。在极端的情况下，即当理想化的程度很低时的技术对象就可视为系统。

以焓方法为基础的热力学分析本身可理解为研究和分析工程系统的能量分析法，但若把所有的工业系统都视为热力学分析的对象，就不恰当了。因为热力学分析只在于研究所分析的对象能对工程实践提供有益信息的工程系统。

这类工程系统具有哪些特点呢？

首先，在所分析的系统中能量传递与转换占有相当重要的位置，在研究它们的时候必须用热力学第一定律和第二定律。换言之，在能量转换和传递中，由熵不等于零所表征的过程将起足够重要的作用。以此观点来分析，诸如机械型的工程系统、电力型的工程系统以及电力机械型的工程系统，一般地如果它们不伴随显著的耗散效应时，可以不用热力学分析的方法。

其次，适于运用热力学分析法求解的工程系统的另一特点是，这类系统与周围介质处于平衡态。周围介质的温度、压力、成分等参数是不受系统影响的，但在分析中一般不可能脱离它们，而从实质上把它视为包括所分析的系统在内的与周围介质共同构成的大系统。这种方法在很大程度上能适应工程实践，其中包括与在本书中所分析的工程系统有重大区别的若干热力学所研究的其他系统。当然，平衡态时周围介质的参数不在分析的范围之内，而只是考虑通过系统界面与周围介质发生的作用。

根据上述一些特点，工程系统可以分成两大类。一类是能量系统，包括具有相应能量转换的工艺系统，如火力发电厂、热能动力装置、热泵站、深冷装置与制冷装置等。另一类是与物质转换有关的系统，如化工、冶金、食品等工业系统。将工程系统划分为能量系统和工艺系统的方法在相当程度上是有条件的，因为物质转换和能量转换是不可分的。从原则上讲，几乎是任一物质转换系统同时也是能量转换系统。从热力学的角度，现代火力发电厂可视为燃料与空气中氧气转换成固态燃烧生成物与二氧化碳的系统。同样，冶金厂