

— 高等学校教材 —

977787

0414.1

1042

熵与信息

王 彬 编著



西北工业大学出版社

高等学校教材

熵 与 信 息

王 彬 编著

西北工业大学出版社

1994年10月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书阐述了有关熵的概念和规律,回顾了熵理论在科学发展中的重大贡献,讨论了围绕熵的尚未解决或有待澄清的问题,着重论述了熵与信息的关系、最大信息熵原理及其在现代自然科学中的应用,同时探讨了熵基础理论的深化问题,并介绍了熵在社会科学中的泛化与影响,是一本全面介绍熵与信息这一新兴交叉学科的教科书。

本书可作为理工科大学生的选修课教材,也可供研究生、大、中学教师及科技工作者参考。

高等学校教材

熵与信息

王彬 编著

责任编辑 孙华荃

责任校对 享邑

©1994 西北工业大学出版社出版

(710072 西安市友谊西路 127 号 电话 4253407)

陕西省新华书店发行

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0599-6/O·79(课)

开本:787×1092毫米 1/32 印张:5.6875 字数:117千字

1994年10月第1版

1994年10月第1次印刷

印数:1-2000册

定价:3.45元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

编者的话

本书是为开设熵与信息选修课编写的教材。

熵是源于物理学的基本概念，熵原理是自然界的基本规律，熵与信息有密切的联系。

目前，熵理论及其应用在各个领域得到迅速而广泛的发展，正成为众多学科研究的一个新焦点，熵与信息成为一门新兴的交叉科学，有人指出，当代的工业革命是一场熵的革命。20世纪后期引为自豪的信息革命仅是熵研究高潮的一个前奏，对于这一新的知识动态，当代的大学生应该有所了解。

《熵与信息》对熵的理论、熵与信息的联系及应用，力图作出深入浅出的讨论，涉及了很多领域，还介绍了一些新的观点。全书分七章，第一章追溯了熵的渊源和含义；第二章探讨了熵定律的实质及作用；第三章回顾了熵理论在科学发展中的重大贡献；第四章讨论了围绕熵的没有解决或尚待澄清的几个问题；第五章分析了熵与信息的联系，介绍了最大信息熵原理及其应用；第六章用熵的观点研究了地球的演化、生物的进化和人类的发展；第七章总结了熵基础理论研究的主要问题，并简述了熵在社会科学中的影响和泛化。

《熵与信息》力求理论性与应用性并重，学术性和普及性兼顾，使具有大学物理和高等数学基础知识的学生，了解这一接受了物理学的基本概念和基本理论渗透、交叉、移植的新兴学科，在掌握知识的同时，开阔视野，启迪思维。

CA854/07

在本书编写过程中，我的老师张学文先生给予了精心指导和热诚鼓励，笔者的一些观点受益于同张先生的多次讨论中。罗长薰教授在审稿中提出了许多具体宝贵意见，没有他倾注的真诚爱护，就没有本书。西北工业大学出版社也给予了极力扶持和帮助。本书参阅了许多学者的有关论著和文章。在此，一并向他们表示真诚的谢意。

对书中存在的种种不足之处，恳请读者批评指正。

王 彬

1993年10月于西北工业大学

目 录

第一章 熵的诞生	1
一、渊源	1
(一) 热机与卡诺循环的启示	1
(二) 克劳修斯的发现	5
(三) 熵及其性质	17
二、含义	20
(一) 熵的热力学意义	20
(二) 熵的统计物理意义	22
(三) 熵概念的推广	25
附录 1-1 克劳修斯等式与不等式的证明	27
附录 1-2 理想气体熵变的计算	29
思考题	30
第二章 熵增加原理	31
一、热力学第二定律及其数学表述	31
(一) 不可逆过程与热力学第二定律	31
(二) 热力学第二定律的数学表述	
——熵增加原理	32

(三) 正确把握熵增加原理	36
二、熵增加原理的实质	37
三、自然界中的极值原理	39
四、时间之箭	42
附录 2-1 热力学第二定律的两种表述详析	45
附录 2-2 从费马原理推导光的反射定律 和折射定律	46
附录 2-3 计算机游戏	49
思考题	55
第三章 熵理论对科学发展的贡献	56
一、漫漫探索中的指路明灯	56
二、诱发新理论的“营养基”	58
(一) 饱和蒸汽压公式	58
(二) 质量作用定律	59
(三) 黑体辐射公式	60
三、熵理论的拓广——耗散结构论	64
(一) 耗散结构	65
(二) 系统和状态	68
(三) 局域平衡假设	69
(四) 李雅甫诺夫稳定性判据	69
(五) 耗散结构出现的条件	70
附录 克拉珀龙方程的推导	79
思考题	81
第四章 围绕熵的一团团疑云	82
一、热寂说与宇宙学	83

(一) 热寂说带来的冲击	83
(二) 无效的抗争——麦克斯韦妖及其他	84
(三) 新的曙光——大爆炸理论	86
(四) 大爆炸宇宙的勃勃生机	88
二、关于负熵的争论	93
三、物理学与生物学的鸿沟	97
四、可逆佯谬	102
五、吉布斯悖论	106
六、新的挑战	108
(一) 相空间与相轨道	109
(二) 可积系统与不可积系统	110
(三) KAM 定理揭示的新问题	115
附录 L-V 模型数值解的计算机程序	119
思考题	120
第五章 熵与信息	121
一、什么是信息	121
二、信息熵是对信息的量度	123
三、最大信息熵原理	132
(一) 什么是最大信息熵原理	132
(二) 最大信息熵原理的数学描述	135
四、最大信息熵原理的应用	141
(一) 等几率分布和均匀分布	142
(二) 指数分布	143
(三) 高斯(正态)分布	145
思考题	150

第六章 自然界中的熵理论.....	151
一、地球的演化	151
二、生物的进化	155
三、人类的发展	159
附录 地球表层的辐射收支和负熵流	163
思考题	166
第七章 熵理论的深化和泛化	167
一、深化的主线	167
(一) 关于非平衡熵的研究	167
(二) 关于复杂性的研究	169
二、熵在社会科学中的应用	170
思考题	172
参考文献	173

第一章 熵的诞生

熵是一个古老而又难懂的概念。从它确立至今 100 多年来，踪迹遍于自然、社会乃至哲学等各个领域。今天，熵已成为众多学科研究的一个新焦点。熵这个概念，最初是怎样提出来的？它是如何定义的？它的含义是什么？能够开拓到什么程度？这是我们在这一章首先要搞清楚的问题。

一、渊 源

科学的发生和发展总是由生产决定的，熵的概念是生产发展到一定阶段的必然产物。人们在研究如何提高热机效率的过程中，涉及自然界状态转化的方向问题，逐步发现和建立了熵的概念，可以说，涉及状态的转化就必然触及熵的问题。

（一）热机与卡诺循环的启示

18 世纪，英国人瓦特发明了蒸汽机，人类找到了把热能变成机械能的具体方法，蒸汽机的问世使人类进入了火热的工业社会。蒸汽机为社会带来极大的生机，使英国日益强盛，成为“日不落帝国”。法国物理学家萨蒂·卡诺（Sadi Carnot）当时就指出，夺去英国的蒸气机，就意味着枯竭英国所有的富源和毁灭它的繁荣。但是，当时的蒸汽机效率还非

常低，一般只有5%左右，有的甚至不到1%，95%以上的热量都没有得到利用。于是，改进蒸汽机，提高它的热效率就成为许多科学家和工程师毕生追求的目标，卡诺是其中最杰出的代表。

卡诺是一个军事工程师，他曾参加过军打过仗，对物理学有很深的造诣。卡诺认为，从实验上去改进蒸汽机的效率，只能靠碰运气，只有从理论上找出依据，才能切实改进它。卡诺从热力学理论的高度着手研究热机的效率，他首先提出了两个问题：

第一，热机依靠热产生动力，热产生的动力是有限的，还是无限的？能否无限地改善热机？也就是说，热机效率是否存在一个极限？

第二，是否存在比水蒸气更优越的工作物质？换句话说，热机效率与工作物质有没有关系？

针对上述问题，卡诺对实用蒸汽机的工作过程——升温与降温，膨胀与收缩（即工作物质状态的变化），进行抽象处理，简化复杂因素、纯化主要因素，以理想化的热机代替实际的热机，提出了由四个等值的热力学阶段构成的著名的卡诺循环：

第一阶段，温度为 T_1 （绝对温度，下同）的等温膨胀过程，系统从高温热源 T_1 吸收热量 Q_1 。

第二阶段，绝热膨胀过程，系统的温度从 T_1 下降到 T_2 。

第三阶段，温度为 T_2 的等温压缩过程，系统把热量 Q_2 释放给低温热源 T_2 。

第四阶段，绝热压缩过程，系统的温度从 T_2 升高到 T_1 。

克拉珀龙很巧妙地用工作物质的压强 (p)—体积 (V) 曲

线，描述了由这四个阶段构成的卡诺循环过程，如图 1 所示。

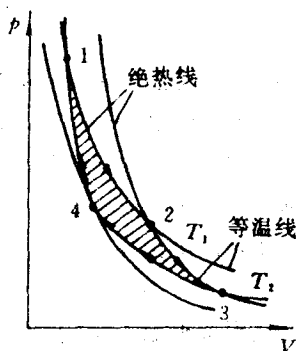


图 1

1~2—等温膨胀过程 2~3—绝热膨胀过程
3~4—等温压缩过程 4~1—绝热压缩过程

卡诺循环与实际的热机循环过程并不一一对应，但却高度概括了循环的本质，成为一个热机循环的理想模型。恩格斯曾评价卡诺的工作说：“他撇开了对主要过程无关重要的次要情况而设计了一部理想的蒸汽机，这样一部机器就像几何学上的线和面一样是决不会制造出来的，但是它按照自己的方式起了像这些数学抽象所起的同样的作用，它表现纯粹的、独立的真正的过程。”

卡诺经过潜心研究，于 1824 年发表了《关于火的动力的研究》一书，论证了三条结论：

(1) 任何热机的最大效率与工作物质无关。卡诺把热产生的动力与瀑布产生的动力相类比，他认为两种情况下都有一个最大值，这个最大值与水作用于什么机器无关，同样与

热作用于什么物质也无关,卡诺从理论上计算了这个最大值。

(2) 产生最大效率的必要条件是,在实现热的动力过程中,不应该存在任何不是由于体积变化而引起的温度变化。所谓体积变化,就是指由于体积膨胀或收缩所做出或得到的功。不应该存在其他原因引起的温度变化,是指不应由热辐射、传导、摩擦、漏气等造成温度变化。卡诺这种产生最大效率的热机后来被称为可逆卡诺热机。

(3) 单独提供热不足以给出推动力,必须还要有冷,没有冷,热将是无用的。只有热从高温传向低温的过程,才有可能产生推动力。但从高温向低温发生的“热质降落”,要让它再完成相反的过程,是不可能的。

前两条结论被人们总结为卡诺定理的核心内容,即在相同高温热源 T_1 与相同低温热源 T_2 之间工作的一切可逆卡诺热机(在实现热的动力过程中,不存在任何不是由于体积变化而引起的温度变化的热机),不论用什么工作物质,效率 η 均为

$$\eta_{\text{可逆}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Q_1 、 Q_2 分别是在高温热源 T_1 吸收的热量和在低温热源 T_2 放出的热量。而在相同高温热源 T_1 与相同低温热源 T_2 之间工作的一切不可逆卡诺热机的效率总小于可逆卡诺热机的效率

$$\eta_{\text{不可逆}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

卡诺从理论上论证了热机效率存在着极限和可逆卡诺热机的效率最大,这就揭示了提高热机效率的两条根本途径:第

一,增加高温热源的温度 T_1 并降低低温热源的温度 T_2 ,即增大高、低温热源的温度差;第二,提高热机的可逆性,即减少热辐射、传导、摩擦、漏气等因素。卡诺的工作为改进蒸汽机做出了重大的理论突破,同时也为热力学的进一步发展奠定了坚实的基础。

卡诺的第三条结论,后来由德国物理学家鲁道夫·克劳修斯(R. Clausius)扬弃了其中“热质”的错误观点,总结成著名的结论“热不能自动地从低温物体传到高温物体”。这就是反映过程自发进行方向的热力学第二定律。

卡诺在研究热机效率这样一个工程技术问题时,已经触及一条反映状态转化方向的自然规律。就像恩格斯指出的那样:“他差不多已经探究到问题的底蕴;阻碍他完全解决这个问题的,并不是事实材料的不足,而只是一个先入为主的错误理论……”这个错误理论就是“热质说”,它使卡诺失去了揭示热力学第二定律的机遇。

(二) 克劳修斯的发现

1842年确立了能量转换与守恒定律,人们认识到热不是流体,不存在什么“热质”或者“热素”,热是组成物体的大量粒子无规则运动的宏观表现。热只是能量存在的一种形式,热和功可以互相转化。但是,人们马上发现能量守恒定律与卡诺定理存在着矛盾。能量守恒定律指出,能量既不会创生,也不会消灭,它只能从一种形式转化成另一种形式,总能量保持不变。这就是说,功可以转变成热,热也可以转变成功,数量上保持守恒。而卡诺定理却表明,热不能全部转变成功。因为热量 Q_1 从高温 T_1 流向低温 T_2 时, $Q_1 - Q_2$ 用来做了功, Q_2 在低温

T_2 处传给了外界。热不能自动地全部变成功,虽然转化过程中数量是守恒的。由此可见,虽然自然界中违背能量守恒的过程是不可能发生的,但是满足能量守恒的过程却并不一定都能实现。

能量守恒定律与卡诺定理都是经过事实验证而确立的基本规律,二者的差别说明了什么呢?是不是仅用能量一个概念不能完全描述状态转化过程的差异呢?这个矛盾的解决,导致了熵这个新概念的诞生。

克劳修斯首先考察了大量的能量转化现象,如摩擦生热、气体膨胀与压缩、水的流动、热的传递、氢氧化合与分解等等。发现各种各样的能量转化,可以分成两类。一类是在没有外界干预,无需任何补偿的情况下,能够自行发生的转变,例如摩擦生热、气体真空膨胀、电池放电、热从高温到低温的传导等等。这些过程是“自发”的、“自动”的、“自然”发生的,克劳修斯称之为正转变。另一类是必须在外界干预或补偿的条件下才能实现的转变,例如热变功、气体压缩、电池充电、电化分解、热从低温向高温的传递等等。这些过程是非自发的、非自动的、非自然发生的,克劳修斯称之为负转变。要使负转变发生,必须由外界提供补偿,也就是要由正转变伴随着一同发生。例如热机的工作是把热转变成功,这是一个负转变,与此同时,还要有热从高温向低温传递的正转变相伴随。由于这一正转变提供补偿,热转变成功的负转变才得以实现。

克劳修斯还发现,负转变就是正转变的逆过程,它是使正转变复原的过程。正转变可以自发进行,而负转变不能自发进行,这说明正转变是不能自动复原的,也就是说正转变是一种不可逆的变化。热机从高温热源吸收热量,决不会按卡诺的理

论效率做出最大功,最初的蒸汽机效率只有1%左右,说明大部分热量因辐射、传导、摩擦等原因消耗掉了。这种热机所做的功远小于可逆卡诺热机所做的功,用这样小的功,不可能通过逆循环,把热源提供的热再全部还给它。也就是说,在不可逆过程中所发生的变化已经不能复原了。自然界中的各种正转变都是不可逆转变,克劳修斯从自发变化的方向认识到不可逆变化的方向,这是人类在认识自然变化的方向上的深入和飞跃。

为了度量正、负转变的数量,为了度量不可逆性,克劳修斯从1850年到1865年化了15年的时间寻找各种转变之间的定量关系。19世纪中叶,由于引入了“热功当量”,使热、机械、光、电、化学等各种不同形式的能量可以相互比较,从而使热力学第一定律(即包含热现象在内的能量守恒定律)有了数学解析表达式。这给克劳修斯一个有益的启示,应该寻找一个“转变含量”或“变换容度”(transformation content),把不同形式的转变相互比较,从而使热力学第二定律定量化。下面我们来追溯克劳修斯创建熵的道路,其中包含着丰富而深邃的内容和涵义。

克劳修斯从热变换理论着手,在计算变换的“等价量”中揭示了熵。熵是作为变换的等价量而提出来的,它的变化规律表征了不可逆过程的共同特征。

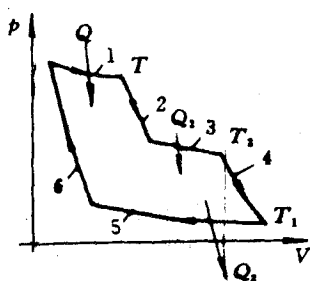
热量可以经历两种变换,一种是从高温物体传到低温物体的热传递变换,一种是热量转化为功的热转化变换。这两种变换都有两个可能的方向,即正转变和负转变。热传递的正转变是热量从高温物体传到低温物体,负转变则相反,是热量从低温物体传到高温物体,如果要发生热传递的负转

变，必须要有外界的作用。热转化的正转变是功变成热，而由热产生功是负转变，它不能自动发生，而必须在热机的驱动下才能实现。

在热机循环过程中，热传递和热转化是同时发生的。在一个循环中，热传递沿正方向进行——热量从高温物体传到低温物体，则热转化就沿负方向进行——热转化为功。就好像是热传递的正转变驱使热转化的负转变发生。若循环反向进行，热转化沿正方向进行——功转化为热，它就推动热传递沿负方向进行——热量从低温物体传到高温物体。这就成为致冷机。为了阐述热机循环过程中能量不同形式的转变，克劳修斯进一步发挥了卡诺的思想，设计了一个包括六个阶段的可逆循环过程，其中包括四个膨胀阶段和两个压缩阶段。它们依次是：

第一阶段，温度为 T 的等温膨胀过程，在这一过程中，系统从高温热源 K 吸收热量 Q 。

第二阶段，绝热膨胀过程，系统的温度由 T 下降到 T_2 。



- 1—等温膨胀过程
- 2—绝热膨胀过程
- 3—等温膨胀过程
- 4—绝热膨胀过程
- 5—等温压缩过程
- 6—绝热压缩过程

图 2