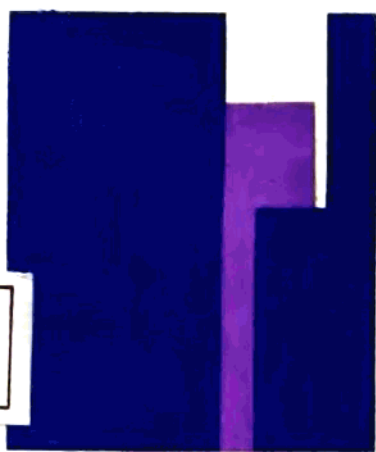


高等学校试用教材

热泵

徐邦裕 陆亚俊 马最良 编

彦启森 审



中国建筑工业出版社

前 言

随着人口和经济的迅速增长,加剧了矿物能源的消耗和枯竭,导致环境的污染和破坏。因此,人们正以极大的努力去寻找能源的出路。出路无非是两个,一是开发新能源,二是节约能量消耗。直到目前为止,节能技术一方面是以热力学第一定律为基础,从量的方面着手,减少各种损失和浪费,这是目前人们较熟悉的。另一方面是从热力学第二定律出发,从质的方面着手研究,利用低位能源(空气、土地、水、太阳能、工业废热等)代替一部分高位能源(煤、石油、电能等),以达到节约高位能源的目的。为此,利用低位能量的热泵技术已引起人们的重视。热泵技术经历了一段很难的发展过程,在目前无疑已经得到了突破。热泵装置已进入了家庭、公共建筑物、厂房,以提供空调、采暖、热水供应所需的热量,而且也已工业的一些工艺过程中得到应用。目前热泵主要用来解决 100°C 以下的低温用能。据估计,欧洲在 100°C 以下的低温用能方面的耗能量约占总能耗量的50%左右。而这些耗能量主要用在建筑物的采暖。

我国是一个能源并不富裕的国家,有着辽阔的采暖区域,同时也大量存在着可供利用的低位热源。发展热泵技术为解决工业和民用对 100°C 以下用能的需要,节省高位能量的消耗,将会有广阔的前景。热泵技术在我国尚属起步阶段,尚不为人所熟知。因此本书除了作为高等工业学校“供热通风与空气调节”专业本科生及研究生的选修教材以外,还希望给我国的工程技术人员介绍热泵的基本原理和应用实例,以期推动我国热泵事业的发展。

本书主要阐述了热泵的基本原理、热泵的低位热源及驱动、热泵系统的主要设备,以及热泵在供热空调和工业方面的应用实例。本书除了介绍国外热泵技术发展的最新成果外,力求结合我国情况,介绍我国近期在热泵技术方面的研究及应用成果。

全书共分九章。其中第一、二、三、四、五章由徐邦裕、马最良合编,第六、七章由徐邦裕、陆亚俊合编,第八、九章由陆亚俊编写,全书插图由马最良描绘。

本书承清华大学彦启森教授审定,使书的质量得到了保证。编者对此表示衷心感谢。

限于编者水平和经验,缺点和不妥之处在所难免,恳请读者提出批评、指正。

编者

1987年5月 于哈尔滨建筑工程学院

目 录

第一章 概 论	1
第一节 能源与环境污染	1
第二节 高位能与低位能	6
第三节 能量的传递与转化	9
第四节 热泵的历史	14
第二章 热泵的理论循环	17
第一节 逆卡诺循环	17
第二节 洛伦兹 (Lorenz) 循环	20
第三节 蒸气压缩式热泵的理论循环	21
第四节 布雷顿 (Brayton) 热泵循环	22
第五节 斯特林 (Stirling) 循环	24
第六节 吸收式热泵理论循环	25
第七节 蒸气喷射式热泵理论循环	29
第八节 温差电热泵	31
第九节 化学热泵	33
第三章 热泵工质	36
第一节 蒸气压缩式热泵对工质的要求	36
第二节 蒸气压缩式热泵工质的种类和选择	38
第三节 蒸气压缩式热泵的混合工质	41
第四节 吸收式热泵工质对	46
第四章 热泵的低位热源	52
第一节 概述	52
第二节 空气	53
第三节 水	62
第四节 土壤	66
第五节 太阳能	68
第六节 热泵系统中的蓄热	72
第五章 热泵的驱动能源和驱动装置	76
第一节 热泵的驱动能源和能源利用系数	76
第二节 电动机驱动	77
第三节 燃料发动机驱动	83
第四节 蒸汽透平 (蒸汽轮机) 驱动	87
第六章 吸收式热泵	92
第一节 实际吸收式热泵对比循环	92
第二节 实际吸收式热泵循环	98
第三节 再吸收式热泵	101

第四节	两级吸收式热泵和绝热吸收式热泵	103
第七章	机械压缩式热泵装置	107
第一节	概述	107
第二节	往复式压缩机	108
第三节	回转式压缩机	115
第四节	离心式压缩机	126
第五节	空气压缩式热泵	132
第六节	蒸气压缩式热泵中的其他构件	133
第八章	热泵在空调与供热方面的应用	137
第一节	概述	137
第二节	空气热源热泵的应用	138
第三节	水热源热泵的应用	144
第四节	热泵用于建筑中热回收	148
第五节	其他热源热泵的应用	160
第六节	热泵在游泳池及人工冰场中的应用	164
第七节	热泵与区域供热	167
第九章	热泵在工业中的应用	170
第一节	干燥	170
第二节	热泵在蒸发工艺中的应用	175
第三节	热泵在蒸馏工艺中的应用	176
第四节	工艺过程中的热回收	178
附录		182
附录一	工质对(73种)	182
附录二	适用的工质对	184
主要参考文献		187

第一章 概 论

第一节 能源与环境污染

能源与环境污染问题是当代世界各国面临的重大社会问题之一。能源是现代生活和生活的物质基础。也就是说现代文明是建立在对能源和物质大量消耗的前提下。但是，随着世界人口和经济的迅速增长，能源的消耗急剧地增加，并导致环境的日益污染。因此，目前摆在我们面前的新任务是：我们既要力争使现有的能源获得更充分地利用和防止大气污染，又要全力探索无公害的新能源。

一、能源的开发和利用对国民经济发展的重大意义

世界各国经济、技术发展的事实表明：机械化、自动化水平越高，电气化程度越高，经济和技术发展、劳动生产率越高，产品就越多，能源的消耗量也就越多。在正常情况下，各国工业化初期，能源消耗量（包括电能消耗在内）与国民生产总值同步增长。表1-1列出了各主要工业发达国家能源消耗年平均增长率与国民生产总值年平均增长率的比值（称能源弹性系数 C_E ）；表1-2表示了1975年各主要工业发达国家能源消耗指标及国民生产总值指标^[1]。

主要工业发达国家能源弹性系数（1950~1975）

表 1-1

国 别	国民生产总值年平均增长率 α_{GNP} (%)	能源消耗年平均增长率 α_E (%)	能源弹性系数 $C_E = \frac{\alpha_E}{\alpha_{GNP}}$ (%)
日 本	8.7	8.8	1.01
苏 联	8.3	6.5	0.78
联邦德国	5.4	4.0	0.74
法 国	4.8	3.9	0.81
美 国	3.3	2.9	0.88
英 国	2.6	1.2	0.46

主要工业发达国家的能源消耗指标与国民生产总值指标（1975年）

表 1-2

国 别	国民生产总值 (亿美元)	能源消耗数量 (10 ⁸ t标准煤)	每人平均产值 (美元/人)	每人平均能耗 (kg/人)	每人平均耗电 (kWh/人)
美 国	15057	23.50	7051	11000	9370
日 本	4906	4.02	4397	3600	4265
联邦德国	4247	3.30	7098	5524	5044
法 国	3357	2.00	6359	3957	3381
英 国	2293	2.95	4191	5280	4864

从世界范围来看, 1950年到1975年, 在主要工业发达国家中, 日本国民生产总值增长最快, 平均每年增长8.7%, 它的能源消耗量也增长最快, 平均每年增长8.8%。而英国国民生产总值增长最慢, 平均每年增长为2.6%, 它的能源消耗量也最小, 平均每年增长只有1.2%。就同一个国家来说, 不同时期也是这样。例如, 日本在60年代国民生产总值的增长速度最快, 平均每年为10.8%, 此时它的能源消耗量增长速度也最快, 平均每年为12.2%。70年代国民生产总值增长速度慢, 平均每年为8.4%, 能源消耗量增长速度也慢, 平均每年只为3%。我国也是如此, 第一个五年计划时期, 国民生产总值的增长速度最快, 平均每年为10.9%, 这时能源消耗量增长速度也最快, 平均每年为15%。

由表1-2也可看出, 1975年, 在主要工业发达国家中, 国民生产总值美国最多, 日本次之, 联邦德国第三, 英国和法国最少。能源消耗量也是美国最多, 日本次之, 联邦德国第三, 英国和法国最少。

二、能源的开发和利用对人类现代化生活水平改善的重大意义

人的生活与能源消费息息相关, 人的生活中衣、食、住、行、文化娱乐等等, 都需要消费大量的能源。具体来说, 人的生活能源消费包括两部分: 直接能耗和间接能耗。直接能耗是指烧饭、点灯、采暖、自来水、各种家用电器等所需要消耗的能源。间接能耗是指盖房子、生产吃穿用的消费品、交通运输等等所需要消费的能源。

随着社会生产的发展, 人的现代化生活水平不断地提高, 能耗也不断地增加。在最近二、三十年里, 世界各国生产用电大幅度增加。在一些工业发达国家, 现代化水平较高的城市, 民用电量比例很大。例如, 日本生活用电量占总数的25%, 联邦德国生活用电量占总数的30%, 瑞士生活用电量占总数的40%, 美国生活用电量比例更高, 占总数的45%, 平均每个家庭每月用电300kWh。同时, 由于人们对舒适条件要求提高了, 用于采暖和空气调节方面的能耗占能源总用量的比例很大, 欧洲约占50%, 美国和日本也占到33%左右, 而且自1945年以来, 采暖和空气调节用能量每年平均以4~5%的速度增长着。因此, 采暖和空气调节的节约能源问题十分重要。

三、将来的能源

本世纪以来, 世界能源消费大幅度地增长。在世界经济发展的几个阶段中能源消费的增长情况列入表1-3中^[1]。由表1-3可见, 第二次世界大战以来, 能源的消费量直线上升。在此期间, 能源的消费量比前亿年所消费的能源量还要多, 据估计, 现在全世界每年所消耗的矿物燃料相当于地球史前二百万年地球所储存的。如仍按现在的消费增长率持续下去, 估计在今后30~40年内矿物燃料即将枯竭。固然, 如目前所预测那样, 通过发现一些新油田, 事态会缓和若干年, 但从具有数千年的人类文明史来看, 这对问题的本质却毫无

20世纪世界能源消耗的增长

表 1-3

年 份	消耗总量 (10 ⁴ t标准煤)	人平均占有量 (kg标准煤/人·年)
1800	7.75	493
1925	15.65	793
1950	26.64	1080
1975	85.70	2140
2000	>200.00	>4000

影响。

图1-1是矿物燃料的消耗模式图。按当前能源消耗增长速率来增加消费量的话,则包括煤在内的矿物燃料即将象A曲线所示,到21世纪中叶就要耗尽。因此人类应把矿物燃料的消费量控制成B曲线那样。

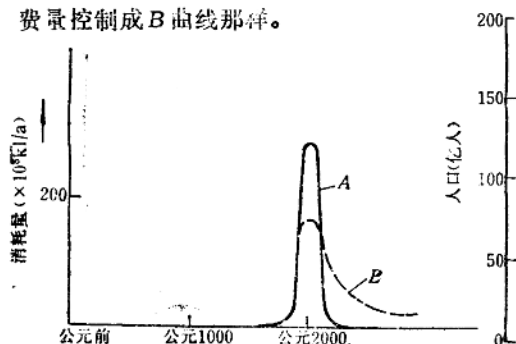


图 1-1 矿物燃料的消耗模式

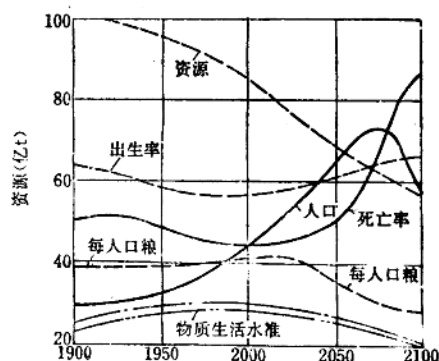


图 1-2 世界人口、资源动态模拟之一例

世界人口的急剧增长,是人类将面临的最重要的问题之一。世界的总人口在15世纪时,据估算不过3亿人左右,其生活可以靠再生产的资源、能量,即农、林、牧、渔业等来维持。自公元1400至1900年间,人口的年增长率也只不过为0~0.75%,人口的增长较缓慢。但进入20世纪后,主要由于卫生条件的改善,人口年增长率约达2%。这意味着,30多年,人口就要翻一番。这就加剧了能源的消耗和枯竭。

人类今后能永久维持这样的经济增长速度吗?

图1-2是美国麻省理工学院的福雷斯特教授等人绘制的人类未来景象的模拟结果,在罗马俱乐部的《增长极限》上发表后,引起了很大反响^[1]。当然,对这种模拟的假定条件,也有持批判态度的。但是,若不立即阻止这种呈指数函数增长的人口,最后不可避免地要出现该论文所指出的状况。

总之,人类消费的能量,今后要大幅度增加是无疑的,1975年间消耗能量约 $2.093 \times 10^{17} \text{ kJ}$ 到2000年将达 $5.024 \sim 5.862 \times 10^{17} \text{ kJ}$ 。那么,是不是说能源即将枯竭呢?我们的回答是否定的。大可不必忧虑。我们尚可利用太阳能和核聚变能;也可以利用生物能、风能、水力能、波涛能、地下热能等新能源;更可以利用地球表面的大气、土地、水中含有的低位热能和工业废热等。这些低位热能处处皆是,形式颇多,数量可观,利用的前景远大。我们将在第四章中详细叙述。但是,要利用这些能源还存在一些技术和经济上的困难,尚有大量的科学研究工作待做。为此,向我们提出了如何利用低位热源的新课题,热泵在此课题中将会占有重要的地位。热泵是回收和利用低位热能的有效手段之一,研究和推广应用热泵技术对于节约能量,提高经济效益,促进生产发展有重要意义。

四、我国节能的意义

我国要在本世纪末实现工农业的年总产值翻两番的奋斗目标。但能源供应量只能翻一番。在能源如此短缺的情况下,节能问题就显得更为突出。

建国以来能源工业有了很大发展。但能源的供应仍然不能满足工农业生产和人民生活的需要。能源供应紧张,但又存在产品能耗高,能源利用率低,浪费严重的现象。它表现在,

1.单位产量能耗高。我国能耗比发达国家能耗高得多(见表1-4);国内企业之间,特别是大、小企业之间差距也很大(见表1-5)。

2.能源利用率低。表1-6列出我国与发达国家的能源利用率对比。

中日几项工业产品单位综合能耗(1979年)

表 1-4

国 家	火力发电、供电煤耗 (g标煤/(kW·h))	钢铁可比能耗(t标煤/t钢)	合成氨能耗(t标煤/t氨)
中 国	474(包括小机组)	1.6	2.84
日 本	335	0.8	1.2

我国合成氨综合能耗对比t标煤/t氨

表 1-5

企 业	1979年	1980年	1981年
大型企业	1.61	1.46	1.44
中型企业	2.57	2.50	2.38
小型企业	3.41	3.14	2.94

表 1-6

项 目	发 达 国 家	中 国 (1979年)
火力发电效率, %	35~40	28(包括小发电机组)
工业锅炉热效率, %	70~80	55
钢铁工业综合热效率, %	50~80	28
合成氨生产热效率, %	50~60	25
铁路运输热效率, %	20~25	6~8
炊事热效率, %	60~70	15~18(城镇小煤炉) 10(农村柴灶)

3.在使用能源方面存在许多不合理现象,造成利用率低和很大的浪费。人们一方面把大量石油、煤、天然气等高热值能源当作燃料,用以获得100°C左右的低温介质;另一方面又把稍低于这一温度的大量余热丢弃不用。据国内调查所作的不完全统计,各行各业的余热资源大约占其燃料消耗总量的17~67%不等,可回收利用的余热资源大约为余热资源总数的60%。表1-7列出我国各部门的余热资源,表1-8列出北京、天津及上海市余热资源^[8]。

我国各部门的余热资源

表 1-7

部 门	总余热资源占其燃料消耗量 (%)	可回收余热资源占其燃料消耗量 (%)
冶 金	>50	>30
化 工	>25	>15
机 械	>25	>15
玻璃、搪瓷	>25	>15
造纸、木材	>28	>17
纺 织	~17	~10
建材(轮窑)	67	40
其 他	17	10

由此看出,我国技术水平低,能源利用率低,能源浪费大。同时也说明我国节能潜力很大,范围很广。

北京、天津及上海的余热资源

表 1-8

按 行 业 分		按 种 类 分	
冶 金	43.5~54.0%	高温废气	48.4~54.0%
化 工	28.0~33.3%	冷却介质	14.9~23.0%
机 械	4.5~12.3%	废汽废水	10.3~16.0%
轻 纺	6.1~8.1 %	高温产品和炉渣	6.4~13.5%
建 材	3.2~4.8 %	可燃废气、废液、废料	8.3%
其 他	5.4~7.0 %	化学反应	4.6~8.8%

按照我国社会主义建设的实际情况,国家提出的能源政策是“开发能源与节约能源并重”,“近期要把节能放在优先地位”。因此,节能技术和利用低位能的热泵技术必然会在我国得到迅速的发展。

五、环境污染

当前,世界上开发利用的能源,主要是煤、石油、天然气等矿物能源和水力资料,原子能也有一定的开发,其他如太阳能、地热能等等只有小规模的开发利用。煤、石油、天然气等矿物燃料的燃烧生成二氧化碳、烟尘和硫化物等等有害物质,造成大气污染,对人类威胁很大,20世纪初,能源燃料主要是煤,英国伦敦陆续发生了三次由于燃煤造成的烟雾事件,死亡人数约1800名,成为伦敦型烟雾的典型例子。20世纪20年代以后,能源除煤外,又增加了石油,而且它所占的比重急剧上升。二次世界大战以后,有机化学工业和汽车工业迅速发展,使环境污染问题更带有社会普遍性。在此期间,曾先后发生过几起世界闻名的公害事件。例如,比利时马斯河谷工业区,各类工厂排出的二氧化碳气体使数千人呼吸道发病,60人死亡;美国洛杉矶因大量汽车排出废气而生成光化学烟雾,每年受害人达数百人;美国多诺拉地区烟雾事件则使数千人患病。50年代以后,环境污染问题发展到了高潮阶段,环境公害泛滥成灾。1952年12月伦敦有五天连续大雾无风,再次发生更严重的烟雾事件,数日内死亡达4000人,以后又陆续发生多次。表1-9列入了伦敦的主要烟雾

伦 敦 大 气 污 染 事 件

表 1-9

年 代	1873	1880	1891	1948	1952	1956	1962
死亡人数	268	692	572	221	4000	1000	750

事件的死亡人数。

据估计,全世界每年燃用约 $70 \times 10^8 \text{t}$ 燃料,燃烧排放到大气中的二氧化碳有 $20 \times 10^8 \text{t}$ 。目前,大气中二氧化碳年增长率达1.5ppm。二氧化碳增长一倍,就会使低层大气年平均温度升高 $1.5 \sim 3^\circ\text{C}$,破坏了自然界的正常生态循环。

目前,我国能源构成中煤占70%以上,石油及天然气占25%,能量利用率都在30%以下。加上我国城市民用炉灶烟囱低矮,燃烧率只有百分之十几;采暖锅炉吨位小,效率低,燃烧点严重分散等,更加重了大气污染。例如,北京采暖季排入大气中的二氧化碳比

东京、纽约70年代中期还高，飘尘比东京、伦敦60年代还高。人们对未来环境危机感日益加深。

因此，环境污染问题还为采暖通风工作者提出新课题。即如何减少使用矿物燃料，以减少环境污染；如何发展城市热化系统，如何把防治污染同能源的合理开发利用结合起来。重视和研究热泵装置是解决当前供热、通风和空气调节上用能源的供需矛盾，减少环境污染的有效而可靠的办法之一。借助于热泵装置，人们能把自然界或废弃的工业低温余热，变为较高温度的有用热能，供应生产和生活上的需要。这样就给人们提出了一条节约矿物燃料、合理利用能源、减轻环境污染的途径。

现在，各种节能技术的研究和应用在我国已受到应有的重视。热泵技术在我国虽然起步较晚，但有广阔的前景。随着热泵及其各种驱动装置的研制和热泵系统的试验研究工作的开展，热泵技术将在我国得到日益广泛的应用，在节能工作中发挥应有的作用。

第二节 高位能与低位能

通常，以作功本领来描述能量的大小。在封闭系统中，各种形式的能量无论发生什么变化过程，都可以互相转换，但其总和恒定不变。换言之，我们可根据需要把自然界中存在的各种形形色色的能转化为其他各种形式的能。所以，能量利用的过程实质就是能量的转化、传递过程。能量由某一状态转化或传递到另一状态时，因能源状态的不同，其转换效果亦不同，也就是说，能源因所处的状态不同，而其价值也不同。

例如，某城镇供水池位于100m水坝之下，而又高出了某湖面10m的地方（图1-3）。该城镇供水的取水方案有二，一是由水坝直接供水，似乎未消耗任何能量；二是用水泵从湖中取水，即以坝中水作为动力驱动一个水轮机，水轮机再拖动水泵，将低于10m以下的湖水，输入供水池之中。若向供水池供水 10t/s ，且不计机械摩擦损失（认为机械效率 $\eta = 1$ ）和管路阻力损失时，则水坝直接供水的方案，不需要外界作功，而水由100m高处流下的势能将损失掉，其量为 $100 \times 10 \times 1000 \times 9.81 = 9.81 \times 10^6 \text{W}$ ；用水泵从湖中取水的方案将需要由外界供给一定量的能量，其值为 $9.09 \times 1000 \times 10 \times 9.81 = 8.92 \times 10^6 \text{W}$ 。如果用水坝中 0.91t/s 水（仅方案一供水量的1/11）拖动水轮机（ $0.91 \times 1000 \times 100 \times 9.81 = 8.92 \times 10^6 \text{W}$ ），即能完成由湖中取水的任务。由此可见，水坝中的水和湖中的水，虽然都是水，但其价值是不同的。就其供水而言，坝中水有作功的能力，可自动地流向水池。坝中水的价值随其位置的高低而变，若坝的位置降至50m，则它的价值亦降一半；而大量的低位湖水需要外界对它作功，方能取得，外界作功的大小也与湖水的位置有关。因此，湖中水的价值为负。坝中水的价值为正。供水方案二用了 0.91t/s 水坝中高价值的水，而利用了 9.09t/s 低价值的湖水。

水位不同，其作功的能力不同。热能也是一样，不仅有其数量，而且也有其质量问题。现以室内采暖为例说明之。

若向室内供热 10kW （ 8600kcal/h ），现在有两种用电能的供热方案：

第一方案，采用电阻式加热器，直接加热室内空气，则需要供给的电能为 10kW 。

第二方案，用电能拖动制冷机向室内供热，即热泵供热。若供热温度 $t_2 = 45^\circ\text{C}$ ，低温热源的温度 $t_1 = 0^\circ\text{C}$ ，热泵采用如图1-4所示的最理想循环——逆卡诺循环（参见第二

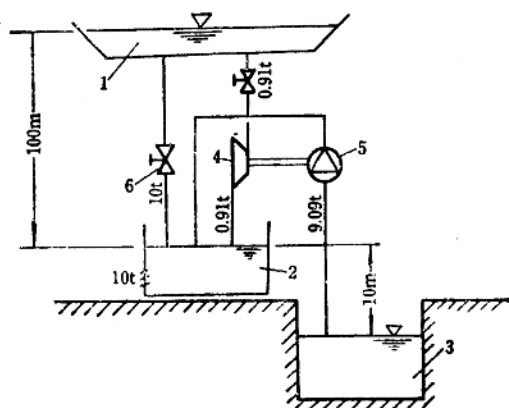


图 1-3 某城镇供水方案

1—水坝中的水；2—供水池；3—湖中的水；4—水轮机；5—水泵

章第一节)，则热泵的制热性能系数

$$\varepsilon_h = \frac{\dot{Q}_h}{\dot{W}} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} = \frac{273 + 45}{45} = 7.07$$

如向室内供热10kW，驱动热泵所消耗的电能为

$$\dot{W} = \frac{\dot{Q}}{\varepsilon_h} = \frac{10}{7.07} = 1.414 \text{ kW}$$

用第二方案供热仅消耗1.414kW的电能，约为第一方案的1/7。这似乎违背了热力学第一定律——能量守恒定律。事实上则不然，由于此方案中约6/7的供热量利用了温度低于室温的低温热源的热量，因此，节省了高位能源（电能）的消耗量。

又如，室温以下的4.1868kJ（1kcal）热量与100°C下的4.1868kJ（1kcal）热量比较，从其数量上说是相等的，但其品质却大不一样。例如，用这两种温度下的热量来向室内供热时，则温度为室温以下的4.1868kJ热量不能自动传递到室内，而温度为100°C的4.1868kJ可自动传递到室内。那么，品质如何衡量呢？一般来说，品质的高低完全取决于它作功的本领，温度为室温以下的热量毫无作功能力，温度为100°C的热量具有作功能力。

综上所述，可归纳以下几点：

1. 评价能源的价值时，既要其数量，又要看其质量。能量按其质量可划分为高位能和低位能两种。在理论上可以完全转化为功的能量，称为高位能，或称高质量的能量。属于这一类的有电能、机械能、化学能、高位的水力和风力、高位的物质等，从本质上说，高位能是完全有用的能量。不能全部而只能部分地转化为功的能量，称为低位能，或称低质量的能量。属于这一类的有物质的内能、低温的物质等。

热源也同样分为高位热源和低位热源。一般高位热源系指温度较高而能直接应用的热源。如蒸汽、热水、燃气以及燃料化学能、生物能等等。而低位热源系指无价值，不能直接应用的热源。如：取之不竭的贮存在周围空气、水、大地之中的热能，生活中所排出的废热（如排水和排气中的废热）；生产的排除物（水、气、渣等）中的含热量；能量密度较小的太阳能等等。

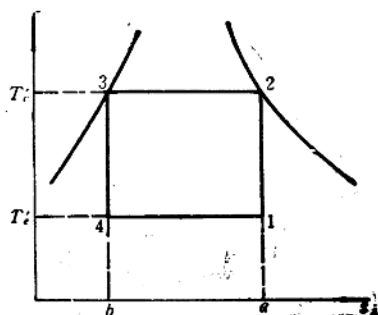


图 1-4

能量质量上的高低或者说能量品位的差别，实际上就是能量可用性的差别。能量的质量高，表示做功的能力大；能量的质量低，表示做功的能力小；能量的质量完全由做功的本领确定的。如果高位能变为低位能，就表明能量在做功的本领上变小了，在质量上已经降级或贬值了。

2. 合理地使用高位能的问题是十分重要的。因为实际的能量利用过程具有两个特性：量的守恒性和质的贬值性。任何用能过程实质上也可以说成能的量与质的利用过程。要使热能得到合理利用，必须合理使用高位能，必须做到按质用能。例如，由燃料直接提供给采暖等所需的低温热量，即使在不损失热量的条件下，室内所得到的热量最多为燃料发热量的100%，也应该认为是一种巨大的浪费。因为在这种情况下，贮藏在燃料中的化学能所具有的做功能力并未加以合理利用而被贬值了。假如采用上述例子中提供的高位能利用方案。即利用高位能来推动一台动力机，然后再由动力机来驱动工作机（例如，制冷压缩机）运转，工作机象泵的作用一样地将低位能的位势提高。如图1-3中利用水泵取水提高了湖水的水位，合理地使用水坝中的高位水。又如例2中利用制冷循环供热，提高了低位热能的质量，节省了高位的电能。这种系统的工作流程如图1-5所示。

显然，这种以动力机和工作机联动组合机组作为供热之热源，所供的热能远远大于高位热源所消耗的热能。

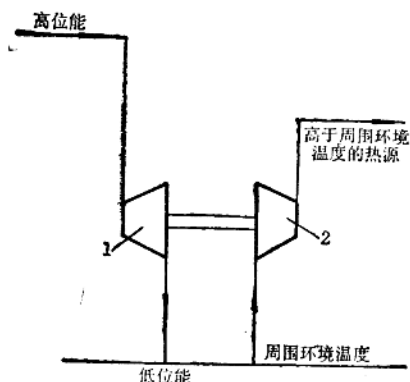


图 1-5 动力机和工作机联动组合机

1—动力机；2—工作机

3. 通常，制冷机可作为这种泵式工作机。因为制冷循环既制造了低于环境温度的物质，并从环境温度下的物体中吸取热量，又制造了高于周围环境温度的热量，而获得供热效果，形成了所谓热泵的作用。这种靠高位能拖动，迫使热量从低位热源流向高位热源的装置，称为热泵，美国西屋公司又称为“温度升高器”。顾名思义，热泵也就是象泵那样把低位热源的热能转移至高位热源。热泵虽然需要用一定量的高位能，但供给的热量却是消耗的高位能和吸取的低位热量的总和。因此，节约了高位能，而且，对于某些工业部门（如

肉类加工、食品、乳制品加工等）中，工艺上同时需要供冷和供热的场合，运用热泵装置进行综合供冷和供热，就显得更为经济合理。此时，热泵装置既是工艺上所需要的冷源，又是工艺上所需要的热源。

4. 按照热力学第一定律，在一系统内，能量既不能产生，也不能消失，只能从一种形式转变为另一种形式，而且转换的方向也是一定的，只能由高位能变为低位能。因此，一般所谓“节约能量”之说，严格而言是不十分确切的。因为仅仅节约了高位能，利用了部分低位热能，也就是说，能量是守恒的，一切能量使用到最后，都成废热传递给大气环境了，虽然它在数量上看是守恒的，但质量上已经越来越不中用，最后降级到无用了。因此，在节约能量问题上，要把能量贬值看为重要问题。

5. 由上述例子可见, 应用第二方案供热比采用第一方案要大大节省高位能源的能量, 其减少的数量与供热温度和周围环境温度之差有关。假设周围环境温度为 0°C , 则在不同的供热温度时, 两个方案所消耗的高位能源的能量之比不同, 其比值列入表 1-10 中。

表 1-10

供 热 温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	20	34	40	45	50	60	70
第一方案所耗高位能 第二方案所耗高位能	14.75	10.1	7.82	7.07	6.5	5.54	4.9

第三节 能量的传递与转化

一、热力学第一定律及热力学第二定律

众所周知, 能量的传递与转化过程必须遵循热力学第一定律和热力学第二定律。

热力学第一定律是能量守恒与转换定律在热现象上的应用, 它指明了热和功在相互转换中的等量性。看起来, 热力学第一定律比较直观、明确。但是, 热力学第一定律只说明了能量传递与转化过程中的数量关系, 并未涉及过程自发进行的方向性, 或者说过程得以实现的条件问题。热力学第二定律则指明了自发过程的方向性。并指明了某些过程的不可逆性。它的表达式有多种, 各种表达形式是彼此一致的。

按克劳休斯 (Clousuis) 说法。热能不可能从低温物体传递到高温物体而不引起其他变化。也就是说, 热能不可能自发地、不付代价地、自动地从低温物体转移至高温物体。

按开尔文——浦朗克 (Kelvin—Plank) 说法。单一热源的热机是不存在的。也就是说, 永远不可能制造出将单一热源传递给工质的 Q_1 全部转化为机械功 W , 而又不引起其他变化的热机。

由此可见, 热量的传递与转化过程是有条件的, 而且热能转为机械能时是有限的, 不能全部变为机械能。

对于一个孤立系统, 热力学第二定律表达式为 $\Delta S \geq 0$ 。即著名的熵增定理。孤立系统中的熵只能增加, 而不可能减少。然而, 对于与环境有热量和功交换的非孤立系统。如图 1-6 所示。

闭口系统熵的变化:

$$ds_{sys} = \frac{dQ}{T} + \frac{dW_{lost}}{T} \quad (1-1)$$

式中 dQ ——从环境传入系统的热量;

dW_{lost} ——系统损失功;

T ——系统的绝对温度。

周围环境熵的变化:

$$ds_{sur} = -\frac{dQ}{T_s} \quad (1-2)$$

式中 T_s ——环境温度。

$$\text{则} \quad ds_{sys} + ds_{sur} = \frac{dQ}{T} + \frac{dW_{lost}}{T} - \frac{dQ}{T_s} \quad (1-3)$$

上式中去掉第二项 $\frac{dW_{lost}}{T}$, 则有

$$\begin{aligned} ds_{sys} + ds_{sur} &\geq \frac{dQ}{T} - \frac{dQ}{T_0} \\ &= \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) dQ \end{aligned} \quad (1-4)$$

由于热量 dQ 从环境传入系统, 所以 $T_0 > T$, 上式括号中为正值, 因此非孤立系统的热力学第二定律表达式为

$$ds_{sys} + ds_{sur} \geq 0 \quad (1-5)$$

此式说明, 当一个系统进行任一个热力过程时, 系统进行过程的方向总是使系统熵的变化和环境熵的变化之和为一个正值或零, 决不会出现负值。

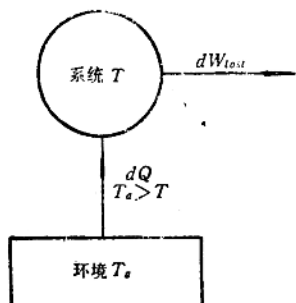


图 1-6 非孤立系统的能量变化

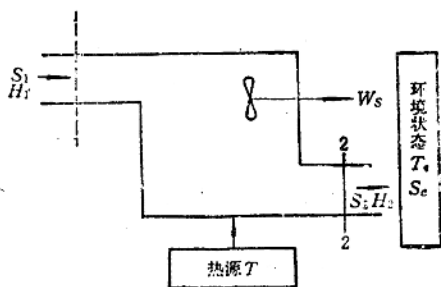


图 1-7 热力系统的能量平衡

利用熵方程式可以分析出整个系统的能量损失, 但分析不出每个部件的损失情况, 而且, 熵这个函数比较抽象, 以此来处理实际问题比较困难。

热力学第一定律又未考虑到各种形式能量质量不同, 结果把热能与电能, 热能与机械能, 高位能与低位能等量齐观, 掩盖了能量利用过程的价值性和方向性。

二、㶲与㶇的概念

为了求出不可逆过程的能量损失与熵增量之间的关系, 必须把热力学第一定律与热力学第二定律联系起来。因此, 目前采用了一个新参数——㶲。用㶲分析问题就克服了如上缺点。

一个热力系统中的工质, 只要它的状态和周围环境 (一般指给定的自然环境, 例如: 大气、地壳、海水、湖水、河水等) 有差别, 那么系统和环境之间就存在有做功的能力。即不是系统对环境做功, 就是环境对系统做功。从热力学可知, 如果系统从某一已知状态, 在可逆条件下过渡到与环境平衡的状态, 则系统对环境作的功达到最大值。这不仅适用于某定量工质一次进行的状态变化, 而且也适用于连续工质的流动过程。1956年在德国工程研究室杂志上, 朗特 (Z. Rant) 把它称为“最大有用功” (Exergy) ^[4], 1957年南京工学院动力系将它译为“㶲” ^[5]。

假设工质的状态变化是在一个热力系统中进行, 当工质为稳定流, 并且不考虑流动工质的动能和位能时, 则图 1-7 所表示的热力系统的热学第一定律表达式为,

$$H_1 + \int_1^2 dQ = H_2 + W_s \quad (1-6)$$

式中 H_1 ——流入系统的工质的焓;
 H_2 ——流出系统的工质的焓;

$Q_{12} = \int_1^2 dQ$ ——进入系统的热流;

W_s ——系统输出的轴功。

又设 s_1 和 s_2 分别表示进入和流出系统的工质的熵, 若系统内的过程都是可逆的, 并设从热源传给系统的热量 dQ 为正值, 则熵的平衡式为:

$$(s_2 - s_1) + \int_1^2 \left(-\frac{dQ}{T} \right) = 0 \quad (1-7)$$

式中 T ——热源的温度。

用环境温度 T_a 乘式 (1-7) 后, 与式 (1-6) 相加得:

$$W_s = (H_1 - H_2) - T_a (S_1 - S_2) + \int_1^2 \frac{T - T_a}{T} dQ \quad (1-8)$$

式中 W_s ——系统输出的最大功。

若无温度为 T 的热源存在, 即仅有环境温度 T_a 的热源, 那么式 (1-8) 右端最后一项就消失了。这时工质所做的最大功为:

$$W_{s,*},_{\max} = (H_1 - H_2) - T_a (s_1 - s_2) \quad (1-8a)$$

若令状态 2 为环境状态 a , 即 $T_2 = T_a$, 则 (1-8a) 式变为:

$$W_{s,*},_{\max} = (H_1 - H_a) - T_a (s_1 - s_a)$$

由于环境状态是不变的 (H_a , T_a , s_a 为定值), 通常将 $W_{s,*},_{\max}$ 这个量称为状态 1 的工质具有的最大作功能力。热力学把它定义为“㶲”, 以符号 E 表示。对于任意状态下工质的最大作功能力, 亦即任意状态下工质的㶲可表示为

$$E = W_{s,*},_{\max} = (H - H_a) - T_a (s - s_a) \quad (1-9)$$

每公斤工质的㶲称比㶲, 即

$$e = (h - h_a) - T_a (s - s_a) \quad (1-9a)$$

如将 (1-9) 式, 分别应用于稳定流动系统的两个状态 1 和 2, 则分别得:

$$E_1 = (H_1 - H_a) - T_a (s_1 - s_a)$$

$$E_2 = (H_2 - H_a) - T_a (s_2 - s_a)$$

$$\Delta E = E_1 - E_2 = (H_1 - H_2) - T_a (s_1 - s_2)$$

$$= \Delta H - T_a \Delta s \quad (1-10)$$

或

$$\Delta H = \Delta E + T_a \Delta s \quad (1-10a)$$

上式中 ΔE 为稳定流动系统从状态 1 到 2 时, 最大有用功的变化值, ΔH 为稳定流动从状态 1 到 2 时焓的变化值。

(1-10a) 式表明, ΔH 中的 $T_a \Delta s$ 是系统总能量变化中不能转变功的部分, 叫无用功, 一般称为熵 (Aergy), 用符号 A 表示。任意状态下工质的熵可表示为:

$$A = H - E = H_2 + T_a (s - s_a) \quad (1-11)$$

每公斤工质的熵称比熵, 为

$$a = h_a + T_a (s - s_a) \quad (1-11a)$$

由上述可见, 熵直接与系统熵变化有关。熵变化大, 㶲减小, 而熵增大, 反之, 则相

反。由此可得:

$$H = E + A \quad (1-12)$$

即系统的总能量分为焓和熵两部分, 总能量是守恒的, 但有用功却不能守恒。

用焓分析循环, 可有下述优点:

1、既考虑能量的“数量”, 又考虑能量的“质量”, 即焓是一个综合考虑了热力学第一定律和第二定律的状态参数。焓大者, 则作功能力就大, 焓小者, 作功能力亦小。

2、用焓函数不仅能分析系统总的损失, 而且也能分析各部件的损失。可以更确切地揭示过程的不足之处, 探索改进的途径。它对不可逆过程的探讨具有重要意义。

当环境温度为 T_0 , 工质从温度 T 的热源处吸收的热量 Q 所能转变为功的最大值等于在 T 、 T_0 温度范围内工质按卡诺循环作的功, 即:

$$W_{c,s} = W_{\max} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

热量 Q 中, $Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$ 这部分热量称为热的可用性热量。根据焓的概念, 称它为焓。

为了与流动工质的焓相区别, 称能转变为功的这部分热量为热量焓。用符号 E_q 或 e_q 表示, 即:

$$E_q = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (1-13)$$

或

$$e_q = q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (1-13a)$$

令式中 $1 - \frac{T_0}{T} = \theta$, 称 θ 为卡诺(Carnot)系数, 它的范围为 $-\infty < \theta < 1$ 。

当 $T > T_0$ 时, 工质在温度 T 下吸收热量, 此时 $0 < \theta < 1$, E_q 与 Q 的符号相同。

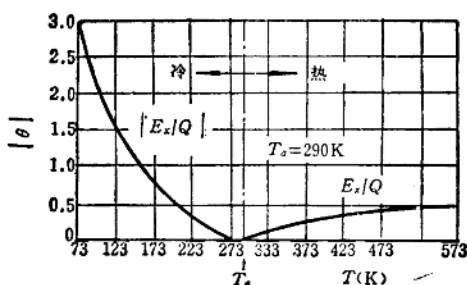


图 1-8 $|\theta| = \left| \frac{E}{Q} \right|$ 与温度 T 的关系图

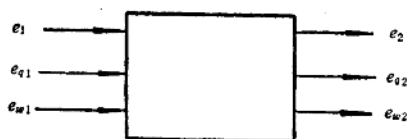


图 1-9 平衡热力系统图

当 $T < T_0$ 时, $-\infty < \theta < 0$, 这是属于低温工程领域中的传热。此时 E_q 表示从低温物体(温度为 T)中取出热量(制冷量)需要消耗的最小功。从式(1-13)得知, 对于同样数量的制冷量, 温度 T 越低其热量焓的绝对值越大, 即温度越低消耗的最小功越多。而且从图1-8得知, 在低温领域, 随着 T 的降低 $|\theta| = \left| \frac{E}{Q} \right|$ 急剧增大。这说明在低温工程中, 温度降低将导致获得低温所需要的最小功急剧增加。

三、稳定流动系统的焓平衡方程、焓流图及焓效率

1. 稳定流动系统的熵平衡方程

若单位质量的工质稳定流过某一热力系统（见图1-9）时，同时有热量及机械功的输入与输出。设 e_1 、 e_{q1} 、 e_{w1} 分别表示输入系统的工质熵、热量熵、机械熵； e_2 、 e_{q2} 、 e_{w2} 分别表示输出系统的工质熵、热量熵、机械熵；又设工质流过热力系统时，它的位能与动能的变化可忽略不计，而且所有的热力变化都是可逆的，那么，输入该热力系统的各项比熵之和应等于从该热力系统输出的各项比熵之和，即

$$e_1 + e_{q1} + e_{w1} = e_2 + e_{q2} + e_{w2} \quad (1-14)$$

对于流过一定量的工质来说，则有：

$$E_1 + E_{q1} + E_{w1} = E_2 + E_{q2} + E_{w2} \quad (1-14a)$$

如果所经历的热力过程是不可逆的，则有：

$$e_1 + e_{q1} + e_{w1} = e_2 + e_{q2} + e_{w2} + \Delta e_{loss} \quad (1-15)$$

$$\text{或} \quad E_1 + E_{q1} + E_{w1} = E_2 + E_{q2} + E_{w2} + \Delta E_{loss} \quad (1-15a)$$

式中 ΔE_{loss} ——系统内部各种不可逆过程引起的熵损失之和，即

$$\Delta E_{loss} = T_0 \Delta S_i$$

从形式上看，熵平衡方程式，与普通的热平衡方程相似，然而它们之间却有质的区别，其区别可归结为二点：

（1）热平衡是能量衡算的一种普通形式，是根据热力学第一定律进行衡算的，但它是不同品位的能量总量的数量衡算，只反映了用能系统中能量的“量”上的利用情况，而熵平衡方程式，则既根据热力学第一定律，又根据热力学第二定律，它包括了两个定律的概念，表示相同品位能量或者说是理论最大有用功的衡算，它反映了用能系统中能量有效性及无效性的“质”的利用情况。

（2）能量是守恒的，但熵并不守恒，在利用过程中，一部分熵转化为熵。生产过程中，不可能完全避免不可逆性，因而一部分熵转化为熵损失掉或散逸掉了，而使有效能在质量上降了级。

2. 熵流图

任一热力系统的熵平衡及熵损失分配图，称熵流图。熵流图中向内的箭头表示输入热力系统的熵，向外的箭头表示热力系统输出的熵，热力过程中的各项熵损失用转向同一侧面的箭头表示。宽度以熵量的实际大小为依据，按比例画出。图1-10为制冷系统的熵流图^[4]，从图中可看出能量的利用率及能量损失分配情况，从而找出熵损失最大的热力学薄弱环节，予以改进，以提高热力过程及整个热力系统的效率。

3. 熵效率

为了统一确定各类热工设备的质量优劣，而采用一个统一的完善性尺度——熵效率 η_{es} 来衡量。

规定热力系统的熵效率 η_{es} 为系统输出的熵（即收益的熵）与输入系统的熵（即消耗的熵）之比，即

$$\eta_{es} = \frac{\text{收益的熵}}{\text{消耗的熵}} = \frac{E_g}{E_{con}} \quad (1-16)$$

式中“收益的熵”和“消耗的熵”将视各类热工设备的具体功能而定。 η_{es} 越大，说明熵损失越小，不可逆性越小，热力完善程度越好；反之， η_{es} 越小，则熵损失越大，不可逆