



REBENGDELI
LUNYUSHIJIAN

热泵 的理 论与 实践

中国建筑工业出版社

本书是介绍热泵及其应用的专著，全书共分九章，全面系统地介绍了各种热泵的分类、组成、热力学原理、热泵部件和热泵系统的设计选择原则、热泵的热源、与能源工业的关系、运行费和经济性计算基本原理及热泵的发展与沿革，并用大量篇幅介绍了各种热泵的应用实例。本书主要介绍热泵在联邦德国和英、美的使用情况，也涉及到其余许多欧洲国家的情况。

全书技术观点较新，理论分析与实际使用结果密切结合，适合供热通风、制冷及能源、节能研究方面的有关管理、科技和工程技术人员及大专院校师生阅读。

Heat Pump Technology

Dr. Hans Ludwig von Cube

and

Prof. Fritz Steimle

Translated by

Ilse M. Heinrich

BUTTERWORTH 1981

* * *

热泵的理论与实践

王子介 译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 14 字数: 338 千字

1986年9月第一版 1986年9月第一次印刷

印数: 1—4,700 册 定价: 2.20 元

统一书号: 15040·5008

译 者 的 话

本书原作者之一，联邦德国的弗里茨·斯泰姆莱教授是国际制冷学会主席、国际上知名的学者，曾来我国进行过讲学和访问；另一位作者冯·库伯博士是顾问工程师。本书系根据英译本转译。

科学技术是没有国界的，在日益走向信息化的当代社会尤为突出。本书所述内容实际是国际性的，这使我们能更全面地了解国外热泵技术发展的情况。

从书中可以看出，热泵在各国的发展很不平衡，其起源虽可追溯到上一世纪，但真正开始发展还是在二次大战前后，至六十年代在美国得到很大的发展，这种发展势头至今历久不衰。每一次能源危机和燃料涨价，总会引起大小不一、范围不等的“热泵热”。这给了我们一个重要启示：能源问题是今后长期存在的问题，所以节能工作及热泵技术的应用也决不会是昙花一现或权宜之计。国际能源机构（IEA）近几年来一直在大力推广热泵，要求各国政府、厂矿企业、公共事业等部门加强对热泵的推广和应用，并进一步研究制定热泵的国际标准。由于热泵又具有不污染环境、可同时利用冷、热量等突出优点，相信在我国，随着电力工业特别是水电、核电的发展，热泵的大量使用只是时间问题。

作为一个教育工作者，译者深感一项先进技术的推广和发展，除了其余众多的原因之外，社会及其成员，首先是决策者和第一线的科技人员（着眼于将来，则是有关专业的青年学生）对其认识和理解程度，将起到很大的影响，故新技术的推广宣传工作的重要性是不言而喻的。衷心希望本书能有助于热泵技术的普及推广。

由于本书涉及专业多、范围广，加之译者水平低、经验少，翻译时间也较仓促，故尽管作了不少努力仍难免出现错误，诚恳希望专家和广大读者予以指正。

为便于查对，书中的大量人名、公司名、团体机构名称及不常见的地名在书中首次出现时，大都注出了原文，对于英译本中出现的失误及译者认为需要说明的地方，作了一些注解，不妥之处也请指正。

在此一并向所有帮助过我的同志表示由衷的感谢。

译 者

1985年元月

前 言

毫无疑问, 热泵在当前比以往更富新闻性, 在能源短缺及能价上涨的影响下, 热泵变得引人注目了, 几年以前, 还没有多少人会想到这种可能。看来, 由于对旧有热泵理论的新应用或新发展缺乏了解, 难于运用, 故而引起了某些误解和混淆。

因此, 有必要编写一本基础性手册, 系统而综合地阐述问题, 分析理论原理并提供详细的实践经验。只有理论与实践成功地结合起来, 依靠测定、经验及基本理论, 才能形成人们可接受的概念。

由于在德国还未出版过有关热泵的综合性专著, 因此作者感到迫切需要写出这样一本书。书中对理论和实践各方面都按需要给予了考虑。实践经验不能从理论中演绎出来, 而缺乏理论基础的实践也不可能有持久的生命力, 理论与实践相结合是热泵理论及其应用的关键。

作者希望本书能为读者在热泵理论和实践方面打下一个坚实的基础, 并使之避免前人所犯的错误及付出的代价。

汉斯·路德维希·冯·库伯

弗里茨·斯泰姆莱

目 录

第一章 绪论.....	1	(二) 原状土和经采热土的全年温度分布.....	37
第二章 热泵的应用及其分类.....	2	三、水.....	39
第一节 热源.....	2	(一) 地下水.....	39
第二节 热泵的组成.....	2	(二) 地表水.....	40
第三节 应用.....	3	四、太阳辐射.....	41
第四节 热泵的分类.....	4	(一) 观测值.....	41
第三章 热力学原理	6	(二) 组合式系统.....	43
第一节 内能、焓、热量和熵.....	6	(三) 最新发展.....	43
第二节 能、烟和焓.....	7	第二节 蓄能.....	45
第三节 采暖需热量.....	8	一、采暖季节的温度和需热量分布.....	45
第四节 逆温度梯度的传热.....	9	二、使用蓄热带来的改进.....	47
第五节 压缩式热泵.....	10	三、蓄热装置容量的确定.....	48
一、理论循环.....	10	四、平衡冷、热负荷的蓄热装置.....	51
二、蒸汽压缩式热泵的工作.....	11	第五章 运行费及经济性计算的基本原理	52
三、理论循环的偏离.....	12	第一节 能价.....	52
四、用过冷改善循环特性.....	13	第二节 运行费计算.....	54
五、烟-焓流图	13	第三节 经济性计算.....	60
六、成绩系数 (COP)	14	一、需热量.....	61
七、制冷剂.....	15	二、系统的选择.....	61
八、空气压缩式装置.....	17	三、结论.....	62
第六节 吸收式热泵.....	18	第四节 几点意见.....	65
一、吸收式热泵的工作.....	18	第六章 热泵与能源工业	66
二、工作过程.....	18	第一节 能源的总形势.....	66
三、吸收过程的各种特性参数.....	21	第二节 区域供热与热泵.....	70
四、通过内部热交换提高热力系数.....	23	第三节 双动力供热系统.....	70
五、工质.....	23	第七章 热泵组成——热泵系统	74
第七节 蒸气喷射式热泵.....	24	第一节 各类蒸汽压缩式热泵.....	74
第八节 热电热泵.....	25	一、单级压缩循环.....	75
一、原理.....	25	二、近似劳伦兹循环.....	75
二、构造.....	25	三、双级压缩循环.....	76
三、热电过程的特性.....	25	第二节 热泵部件及其最优化.....	77
第四章 热源.....	29	一、压缩机.....	78
第一节 天然热源.....	30	(一) 往复式压缩机.....	79
一、空气.....	30	(二) 罗茨式压缩机.....	80
二、土壤.....	36		
(一) 土壤特性.....	37		

(三) 其余的容积式压缩机.....	81	第四节 热泵在另一些国家的发展	121
(四) 离心式压缩机.....	81	一、比利时	121
二、热交换器.....	82	二、法国	122
(一) 热交换器的设计.....	82	三、联邦德国	122
(二) 传热系数.....	82	四、英国	123
(三) 流动阻力.....	83	五、瑞士	126
(四) 最优化计算.....	83	六、瑞典	126
(五) 旋转式热交换器.....	84	七、荷兰	127
三、热泵循环控制的专用设备.....	85	第九章 应用实例	128
(一) 制冷剂循环量的控制.....	85	第一节 单元住宅用单一供热热泵	128
(二) 制冷剂转换阀.....	86	一、用空气作热源的热泵	128
(三) 电气控制设备和安全继电器.....	87	二、用水作热源的热泵	134
1. 供热—制冷转换的温控开关.....	88	三、用土壤作热源的热泵	136
2. 辅助供热的开关控制.....	88	四、用太阳能集热器作热源的热泵	140
3. 自动融霜.....	88	五、小结	140
4. 电动机保护装置.....	90	第二节 私人室内游泳池用热泵	141
第三节 组装设备.....	90	一、物理现象, 耗能量	141
一、小型热泵.....	90	二、减湿—加热用热泵机组	143
(一) 生活热水制备装置.....	90	(一) 热泵机组的工作及输出量	143
(二) 供暖—空调机组.....	92	(二) 可用的减湿机组	146
(三) 连接于封闭水循环系统的小型		三、现有装置实例	146
热泵(空调系统的基本单元).....	93	四、运行费	147
二、家用和中型商业建筑用热泵机组.....	94	第三节 商业建筑空调用热泵	148
(一) 空气—空气热泵	94	一、大型建筑用小型热泵空调	148
(二) 水—空气热泵	98	(一) 现有装置实例	150
(三) 水—水热泵	99	(二) 使用经验, 运行费	151
(四) 土壤—水热泵.....	100	二、小型建筑用空气—空气热泵机组	
(五) 空气—水热泵.....	100	空调	155
第四节 冷—热水机组.....	102	(一) 现有装置实例	156
第五节 蒸汽压缩式热泵装置	104	(二) 供热—制冷热泵选型一般原则.....	159
第六节 空气热泵	105	第四节 大型建筑用带有集中热泵热	
一、带膨胀机的空气热泵	105	回收的空调装置	160
二、带有多重转子及热交换器的空气		一、排风热回收热泵实例	163
热泵	105	二、使用热泵以及室外热源的综合热回	
第七节 吸收式热泵	107	收(全年运行的热泵空调装置)	
一、单纯吸收式热泵	107	实例	165
二、吸收式热泵的输出调节	109	三、热泵与热回收系统的综合使用	172
三、吸收—压缩式热泵系统	110	第五节 使用室外热源、无热回收的建筑	
第八节 电热热泵	111	供热用大型热泵	175
第八章 发展和经验	113	一、用水作热源的热泵	176
第一节 初创时期	113	二、用空气作热源的热泵	180
第二节 第一次能源危机的影响	116	三、相邻工厂的废热用于加热—冷却	
第三节 热泵在美国的首次发展高潮	118	设备	180

第六节 带有大量技术装备的建筑物	184	(二) 实例	196
一、室外和室内公共游泳池与滑冰场		(三) 经济性	197
相结合	184	第七节 工业用热泵	197
(一) 室外游泳池	184	一、干燥工艺	198
(二) 室外游泳池与滑冰场的结合	185	二、蒸馏和浓缩工艺	199
(三) 室内游泳池	187	三、热回收	202
二、水厂	193	四、综合供能	203
三、计算机中心热泵空调装置	195	参考文献	204
(一) 计算机中心的能量平衡	195	索引(汉英对照)	210

第一章 绪 论

使封闭空间和流体的温度低于环境温度并保持这种低温的方法，人们已在120多年前就知道了。由物体或空间吸收来的热量必须以较高的温度排入环境，热量由低温级上升到高温级只有通过消耗高品位的能量才能实现。以吸收低温热源的热量（输出冷量）为目的的装置叫作制冷机，以输出较高温度的热量或同时（或交替）输出冷、热量为目的的装置叫作热泵。家用冰箱也可看作热泵；压缩机消耗能量把由冰箱内部空间和食品中吸收来的热量升温，并经过冰箱后部的热交换器传到房间里去。

因为目前尚无更好的连续冷却方法，故尽管上述人工制冷方法成本较高，仍具有重要的商业价值。

然而，使用热泵时却必须与所有可供选择的传统供热方法进行比较。只要有充足、廉价的矿物燃料来供应热能，热泵就要退居其次。使用热泵的诱因仅仅是由于：

1. 各种性能可靠、价格适宜的制冷机械的发展，尤其是在广大的国内市场上的发展；
2. 第二次世界大战期间在瑞士发生的首次能源危机；
3. 未来的能源需求量还将明显增长；
4. 由矿物燃料转向使用核能；
5. 由于能源短缺引起石油和天然气的涨价。

由于经常显示出理想的经济性，所以自本世纪三十年代起，热泵技术一直不断地发展着。1939年到1945年德国停止煤炭供应期间，瑞士工程师们制造了一些引人注目的热泵装置；本世纪六十年代美国空调工业生产了千百台热泵；这两个事件大大推进了热泵的发展。在德意志联邦共和国，也需要象能源危机这样的刺激，以促使热泵由少数人的业余科技爱好发展为今天这样大批生产的产品项目。

因为矿物燃料的减少和日益被核能所取代，二次能源，特别是电力的重要性必然增长。如果影响因素只是需要大量投资，德国大部分地区将只供应一种能源——电能，那些地区可供选择的采暖方式是唯一的，那就是热泵。

1967年，汉斯·冯·库伯曾写过：“无疑，在不久的将来，热泵会身价大增并将在气候适合的地区取代传统的供热方式。”^{〔1〕}这个时机目前已经到来了。

“热泵”这个易记而又恰当的名称的广泛采用是在约四十年前，遗憾的是不能确定谁最早使用了该名称。在德国大概是G.弗吕格尔（G. Flügel）^{〔2〕}在1920年率先使用这个名称，F.克劳斯（F. Kraus）^{〔3〕}于次年在美国作了有关热泵的报导。

第二章 热泵的应用及其分类

第一节 热 源

为了理解热泵的基本原理，必须搞清楚，热是一种能量形式，热量的多少和同时存在的温度的高低是完全无关的。在空气、土壤和水中，在建筑物内排出的空气中，在任何形式的废水中都有大量的热，仅因其温度太低才弃置不用。而从所有这些热源中，可将热量采集起来，花费少量外加的、高品位能量的代价，用热泵将废热升级至适于房间采暖的温度。

第二节 热 泵 的 组 成

热泵这个名称系指整套装置中的制冷部分，通常包括冷侧热交换器、带有驱动能输入设备的升温装置、热侧热交换器，在多数情况下，还包括完成制冷循环所需的膨胀机构。

所有制冷机都可用作热泵，常用的有：

1. 使用空气作为工质的空气制冷机。
2. 依靠水蒸汽或制冷剂工质的蒸发和冷凝进行工作的蒸气制冷机；可用压缩、吸收或蒸气喷射原理供给能量。
3. 热电原理（珀尔帖效应）。

因为在制冷中，靠对制冷剂蒸气进行机械压缩而工作的压缩式制冷机^①最为重要，故可充分依靠其高度发展的技术来发展压缩式热泵。

上述各种热泵可以根据使用要求同时制冷和制热，也可以在不同季节改变使用要求，即根据需要在夏季制冷、冬季制热，特别对于空气调节，尤为适宜。这种转换运行，有两种作法：

1. 改变热交换器用的流体介质，即在冷侧热交换器中，夏季空调（制冷）时使用冷水，冬季用地下水作热源；在热侧换热器中，夏季用水作冷却系统，冬季供应热水用于建筑物采暖。

2. 改变制冷剂的流向，使得夏季运行时向地下水散热的热侧换热器在冬季变成由地下水吸热的冷侧换热器；同样地，另一个换热器在夏季作为冷侧依靠空调用冷水的循环来制冷，到冬季变成热侧换热器，加热空气处理用的供热水。制冷剂循环方向的切换只有在热电制冷系统和配备活塞式压缩机及适当的换向阀的蒸气制冷系统才有可能，在其他系统中，困难太大。

因为有2.中所讨论的这种作用方式，热泵常被称为“逆向运行制冷机，”这种名称目前也被用于美国可逆循环的空气-空气热泵。

① 原文此处误作“压缩式热泵”——译者注

第三节 应 用

热泵的可用范围很广，从连接负荷为几瓦特的热电式婴儿奶瓶加热—冷却设备到负荷为若干兆瓦的工业用大型蒸气压缩装置，下面是几种重要用途：

1. 大量生产的小型水加热器，有时和冰箱连在一起，连接负荷在200~800W之间。
2. 全年运行空调机组和采暖热泵，用于单独房间、单元住宅、小型办公楼、餐馆及类似建筑。组装式热泵（装在封闭箱内）也可制成分为室内部分和露天安装的室外部分的分离式机组。大量生产（有时生产规模相当大）的热泵常在热输出中增加辅助（电、液化气、热水）加热设备，辅助加热量一般 $\leq 120\text{kW}$ （约100000kcal/h）连接负荷为2~30kW。
3. 供热及热回收热泵，用于办公楼、百货商店及类似建筑的大型空调装置中，这时要恰当配上成批生产的冷水机组或者用大型制冷装置中的常用零部件装配成的制冷系统。这种热泵热输出可大到1200kW（约1Gcal/h）以上，连接负荷介于20~400kW之间。如果热泵同时用于夏季制冷，那么在冬季用它从排风中回收热量往往比加用一个间壁式换热器要好。
4. 供热—制冷热泵，用于房间、物体或流体的冷却和加热。这类装置的主要任务（和其控制方式）根据需要而定，通常是或者用来制冷或者用来加热，而不是冷热同时使用。因为热泵的附加作用在系统停机时也就得不到了，此时只能启用诸如热水锅炉之类的备用装置。表2-1列出了这类热泵许多可能的用途中的部分例子。

供 热—制 冷 装 置

表 2-1

装置的用途	用 热	用 冷
鱼类加工厂	清洗用温水	制 冰
肉类加工厂	清洗用温水	冷却和制冰
农 舍	清洗机器和清洁用温水	牛奶冷却，空调用冷
乳 品 厂	清洗用温水	牛奶冷却，储存室冷却
屠 宰 场	清洗用温水	冷藏室及冷冻储藏室
溜 冰 场	采暖，必要的话还有大厅用热	冰 场
大型冷库	供暖，也可出售热量	冷 藏 间
啤 酒 厂	温 水	啤酒窖冷却及（制啤酒的）麦芽汁冷却
工业能源中心	温水和热水	冷盐水，冰，冰水

5. 废热利用热泵，供利用或重复利用由于温度低而不能直接回用的废热。经常用在通过热泵可以实现热量再循环的工艺过程中。例如，在干燥过程中，排出的水蒸汽包含的废热用来加热干空气；洗衣房里，所有可用的热能实际上都由废水带走了，可以用热泵来回收。这类装置根据需热量来控制，经常与多余热量储存装置结合使用，可能的应用实例见表2-2。

6. 蒸气压缩机及蒸馏装置^①，用于溶液蒸发，果汁、牛奶、药水等溶液的浓缩。这类装置用蒸汽充当制冷剂。为了抽出蒸发产生的大量蒸汽，需要使用涡轮压缩机。这类系统

① 原文为Vapour Compressor and boiling plants，详见9-7节——译者注

废 热 利 用 装 置

表 2-2

装 置 用 途	用 热	废 热 来 源
洗 衣 房	热 水	废 水
旅馆、医院	温 水	废 水
印染和其它纺织工业	热水、热碱水	废 水
造纸及其它加工工业	热水、干燥过程	排汽、废水
麦芽作坊	干 燥 室	蒸 汽
农用空调装置	采暖、热水	马棚、孵化器、水果储存
香蕉催熟装置	催 熟 间	冷 藏 室
干燥装置	干燥空气	排汽、排出空气的减湿

的热输出极大，连接负荷可高达若干兆瓦。

7. 热泵蒸馏系统供制取饮用水。根据用途不同，系统可以象蒸气压缩装置一样大，也可以是每小时制几升水的船用或军用的小型装置。

第四节 热 泵 的 分 类

对不同类型热泵进行系统分类是很困难的，因为可以从很多方面来分类，如用途、热输出量、热源类型、热泵工艺类型等等。表2-3是可能的分类。如果热量是经过流体如热空气或热水来传送的，那么这种流体称为热媒。

热 泵 可 能 的 分 类

表 2-3

应用场合及大小	家用(1~70kW)	商业及农业用(2~120kW)	工业用(0.1~10MW)
用 途	供 暖	制备热水，浓缩	干 燥
热分配类型 (主要根据供热)	热空气，热水	直接接触：接触，辐射	
热 源	空气，地表水	地下水：土壤，太阳	废 热
热泵工艺	蒸气压缩式，吸收式	空气制冷机，蒸气压缩式	蒸气压缩式，机械压缩式
主要输出 (经控制)	热量用于供热； 同时供冷和供热	带蓄热的供冷和供热； 夏季供冷，冬季供热	带废热利用的供冷

在美国，暂时仍按长期形成的习惯来划分建筑供热用热泵的种类，即按热源种类（放在首位）和热媒种类（放在第二位）来划分。这种分类法已被德国工业标准8900第一篇热泵；定义（DIN 8900 part1 Heat pumps; definitions）所采用，这种标准目前还是初步的（注：尚无英国标准）。但该标准在以下名称的解释上不同于美国：（1）热泵，仅包括制冷机方面；（2）热泵装置，除了热泵本身以外，还包括热源。

这样划分是必需的，因为热量从热源传到热泵的冷侧要经过冷媒循环来实现，按照这种划分进行的分类见表2-4。因为用太阳能作热源是通过适用的辐射热集热器（太阳能集热器）将热能传到热泵冷侧的，这在目前还处于试验阶段，故该表未列入。太阳能结合其余热能（如土壤热能）联合使用具有特别大的重要性，对这种综合系统，还有待于制定明确的名称。

建筑供暖用热泵的分类

表 2-4

热 源	冷 媒	热 媒	热 泵 名 称	热 泵 装 置 名 称
水	—	温 水	水-水热泵	水-水热泵装置
水	—	暖 空气	水-空气热泵	水-空气热泵装置
空 气	—	温 水	空气-水热泵	空气-水热泵装置
空 气	—	暖 空气	空气-空气热泵	空气-空气热泵装置
空 气	冷 盐 水	温 水	盐水-水热泵	空气-水热泵装置
空 气	冷 盐 水	暖 空气	盐水-空气热泵	空气-空气热泵装置
土 壤	—	温 水	土壤-水热泵	土壤-水热泵装置
土 壤	—	暖 空气	土壤-空气热泵	土壤-空气热泵装置
土 壤	冷 盐 水	温 水	盐水-水热泵	土壤-水热泵装置
土 壤	冷 盐 水	暖 空气	盐水-空气热泵	土壤-空气热泵装置

其余常用的不同分类法是：

1.初级热泵 (primary heat pumps)，使用环境中存在的天然能源如室外空气、土壤、地下水、地表水作热源。

2.次级热泵 (Secondary heat pumps)，回用废热 (即已用过的热) 作为热源，如由室内排出有待于降温的排气、废水、废热。

3.第三级热泵 (tertiary heat pumps)，与初级或次级热泵联合使用，以便将前一级制得的温度还不够高的热量再升温，如制备热水。

第三章 热力学原理

第一节 内能、焓、热量和熵

内能是每个系统所固有的能量形式，它的产生是由于物质分子处于运动状态。内能随着温度升高以及从固态到液态、从液态到气态的相变而增大。在绝对零度即0K或-273.15°C时，分子运动停止，内能等于零。

用字母 U 表示内能，单位是焦耳(J)。

在封闭系统中，仅有内能存在，而含有液态或气态物质运动的开口系统中，既有动能又有内能。内能和动能之和叫做焓(H)。因此，

$$H = U + pV$$

该方程中 p 是压力，N/m²； V 是容积，m³，所以焓的单位是焦耳(J)。

和内能 U 、容积 V 一样，焓 H 也是所讨论系统的特性。容积 V 、内能 U 以及焓 H 都用来讨论系统的状态，它们和压力、温度一样被称为状态参数。压力 p 和温度 T 与所讨论系统的大小无关，因此可随时测定。然而这对容积 V 、内能 U 和焓 H 是不可能的，因此这些参数与系统的质量有关。与系统无关的状态参数，如压力和温度，称为状态的强度量参数。和系统质量有关的参数（如内能，焓，容积）称为状态的广延量参数。为了把广延量参数表示为强度量参数以脱离特定的系统，引入单位质量物质的参数称为状态的比参数。因此对于总质量为 M 的系统，

比容

$$v = V/M$$

比内能

$$u = U/M$$

比焓

$$h = H/M$$

因此，比容的单位是m³/kg；比内能和比焓的单位是J/kg。

在计算有关的比内能和比焓时，我们感兴趣的主要是差值，因此与绝对零度无关，而是与某一参照温度有关。

除了上述状态参数以外，还要讨论与环境进行能量交换的可变过程。能量交换有两种形式，以机械功 L 的形式传播或以热量 Q 传播，二者的单位都是焦耳(J)。与环境进行能量交换导致系统状态参数的变化。

描述无损失的传热过程中系统变化的状态参数，叫做熵。它可表示为：

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

方程中 Q 表示无损失的（可逆的）传热量。熵 S 的单位是J/K，与内能和焓相同，熵也是状态的广延量参数，并且状态的比参数：

$$\text{比熵 } s = S/M$$

比熵的单位是J/kg·K。

熵是常数的状态变化，即 dS 或 ds 为零，叫作等熵过程，这种状态变化是绝热的，又

是无损失的，因此是可逆的过程。弄清绝热过程和等熵过程的区别是重要的，因为在制冷和热泵技术中，常用等熵膨胀（等熵减压）来表示状态的不可逆绝热变化。

由内能和焓的定义可知，温度高于绝对零度的系统含有热能，因此“冷”这个词并不表示能量形式，仅表示所讨论系统的温度低于某一参考温度。制冷机和冷冻装置不能产生“冷，”只能在设计低温下从被冷却的系统中吸收一定的热量。按照能量守恒定律，即热力学第一定律，这些热量必须在相应的高温下排出。因此，制冷机实际是在低温下吸热，高温下排热的热泵。

第二节 能、焓和熵

能量可按两种标准区分，一是按照其形式，另一个是按其可变性区分。

就能量形式而论，有系统固有的能例如内能和焓，有越过系统边界的能，即热和功。在通常是周期性进行的工艺过程中，功和热作用特别大。

能量的第二特性是可转变为其它形式的能量。电能可以转化为其余任何一种能，例如机械能、热能；而热能不能完全转化为电能，热能温度越低，能量转变效率越低。为了描述已知总热能中可变部分的比例，将热能又分为可以完全转化的部分，称为焓，以及不能转化的部分，称为熵。

按照这种定义，热力学第一定律又可表示如下：

在一个封闭系统中，焓和熵的和保持常数。

然而，可以看出系统中焓和熵的比是可变的，下面的热力学第二定律是这种变化的最好说明：

在一个封闭系统中发生不可逆过程时，焓转变为熵；在可逆过程中，焓保持不变。熵不能转变为焓。

可以看出，不管环境温度高低，热量总可由焓变为熵，而熵不能产生焓。

如 $T-S$ 图（图3-1）所示，状态1到2这个过程中，系统的热量经过边界传出，所减少的热量 Q_{12} 可表示为两部分：焓 $E_{Q_{12}}$ 和熵 $B_{Q_{12}}$ 。因为在 $T-S$ 图上，热量表示为一块面积，总热量 Q_{12} 表示为曲线1—2下的面积。高于环境温度 T_a （这里角标 a 表示“环境” ambient）的部分即可变能——焓，而低于 T_a 的部分是热量的熵。由图中所示的面积可导出焓和熵的下列公式：

$$Q_{12} = \int_1^2 T dS$$

$$Q_{12} = E_{Q_{12}} + B_{Q_{12}}$$

$$B_{Q_{12}} = T_a \int_1^2 dS$$

$$E_{Q_{12}} = \int_1^2 (T - T_a) dS = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_a}{T} \right) dQ$$

$$E_{Q_{12}} = Q_{12} - T_a \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

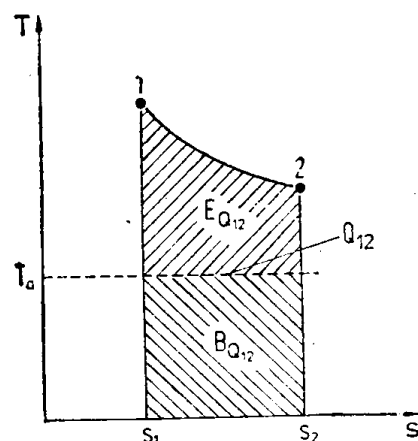


图 3-1 热量分为焓和熵

由以上公式可清楚地看出，过程发生时的温度对焓和熵的比例影响很大，温度越接近周围环境温度，焓^①的比例越小。

热量在环境温度下就成为熵，新能量的输入意味着系统焓的增加，因此一个过程中焓向熵的转变应减至最小，以便获得最佳的能量使用效果。从热力学第二定律的叙述中可看到，从熵当中回收焓是不可能的。

第三节 采暖需焓量

冬季，室内供暖使室温高于外界环境温度。由于室内外存在着温差，故经过建筑围护结构（墙、顶棚等）有热流存在。热流量的大小取决于建筑隔热好坏以及内外温差的大小。

相对于绝对温度而言，室内外空气温差很小，这时从房间到环境的热流中焓占的比例很少。

图3-2是热流的示意图， $\dot{Q}$ 是穿过墙的热流。在室外温度下，这部分热量是纯熵，而在室内，由于温度高于环境温度，含有一定比例的焓 $\dot{E}_q$ 。在热流穿过墙壁的传递过程中由于温度下降，故焓含量也下降。按照热力学第一定律，这种焓的降低意味着增加了等量的熵，因为焓、熵二者的总和必定保持常数。因此可得出结论：一个从焓的观点来看最优的供暖系统向房间供热中含有的焓量应该与图3-2中所表示的情形相同。

房间使用电热供暖时的焓流见图3-3。按照前文所述，电能是纯焓，电能转化为热能是通过电阻来实现的，这些热能中或多或少含有熵，其含量多少取决于电阻的温度。如图3-3所示^②，因为供暖房间的温度一定，焓含量也一定，并且可看出，在室内外不大的温差下，电热供暖焓损较大。

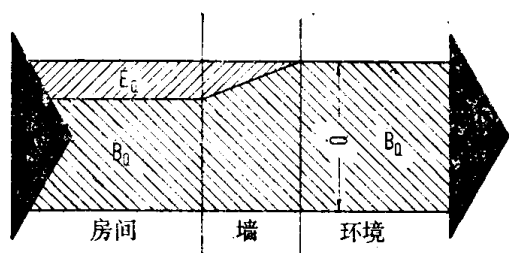


图 3-2 穿过墙壁的热流

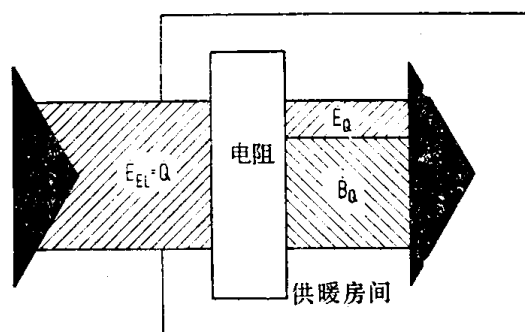


图 3-3 电热供暖时的焓流

用焓效率（exergy quality coefficient） φ_e 来评价不同系统是很适宜的，如下所示：

$$\varphi_e = E_q / E,$$

$$E = E_q + B_q,$$

所以

$$\varphi_e = \frac{E_q}{E_q + B_q} = \frac{1}{1 + B_q / E_q}$$

① 原文此处误为“熵”。——译者注

② 原文误作图3-2——译者注

这里 E_Q 是收益的焓， E 是供给的焓。

如果注意一下图3-3中所描述的电热供暖，可看出供暖过程的焓效率是很低的。就 能流而言，经过了由初级能到电站再到直接供暖房间的变化，其能-焓流见图3-4。

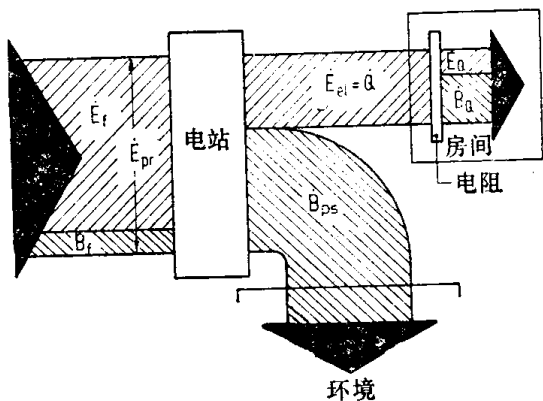


图 3-4 焓流：燃料—电站—电热供暖

初级能 E_{pr} 中的主要成分是燃料的 焓 E_f ， 在电站， 大部分焓转变为经由冷 却 装置放入环境的熵， 剩余的焓以电能的形式供给电阻加热器， 所以到达电阻加热器的只是初级焓中的一小部分。如果不同供暖系统的焓效率用燃料焓和供暖房间内空气焓的比来计算， 所得值见表3-1。 可以看出， 使用热泵供暖比起诸如火炉取暖要有效得多。

不同供暖系统的焓效率				表 3-1	
供 暖 类 型		$\varphi_e = E_Q / E^{①}$	供 暖 类 型		$\varphi_e = E_Q / E^{①}$
燃烧取暖		3.8%	使用供热站或发电站的蒸汽供暖		7.7%
使用电力的	} 火电	2.4%	电 动 热	} 火电	7.1%
直接供暖		5.3%	泵 供 暖		} 水电

① 原文误作 $\varphi_e = E_Q E$ 。——译者注

第四节 逆温度梯度的传热

逆温度梯度的传热意味着焓量增大。按照前面的讨论，焓的增大只能通过向循环加入外来焓来实现， 热泵就可向能流加入焓。所输入的能量可能含有100%的焓， 也可能仅包含需要的焓量， 其余是熵。作为例证， 图3-5画出了压缩式热泵和吸收式热泵的焓流图。

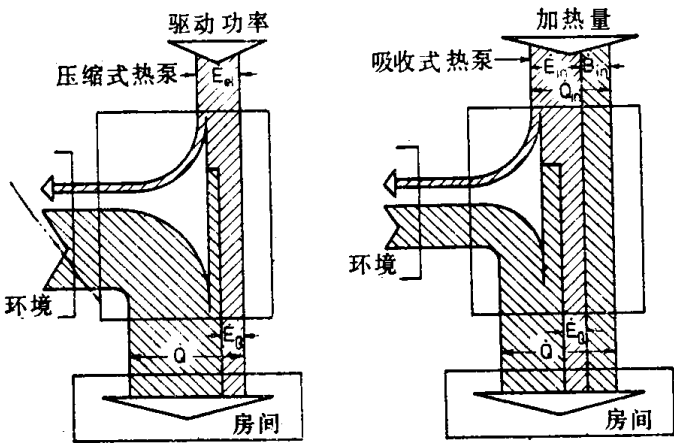


图 3-5 吸收式和压缩式热泵的焓流图

二者都只须输入少量的熵，而由被冷却的空气流中带入大量的熵。所需的一定比例的熵进入被加热的空气流中，如前所述，这些熵①中最终只有一部分供给房间。如果所需要的能流（表现为输入功率或输出热量）中已经包含有一定量的熵，那么由环境吸收的熵将相应减少。在上述两种情况下，供暖房间里熵和熵之比相同。因此，热泵可以有两种驱动方式：

1. 用电能或机械能，即纯熵来驱动，象使用离心式或容积式压缩机的压缩式热泵。
2. 靠输入热能来驱动，其中所需熵量只占总输入热能的一部分，属于这一类的有蒸汽喷射式压缩机和带有发生器、吸收器的系统（吸收式热泵）。

第五节 压缩式热泵

一、理论循环

由理想气体的状态方程 $pv = RT$ 可知，具有气体常数 R 的理想气体的状态，可以由 p （压力）、 v （比容）、 T （绝对温度）这三个参数中的两个来确定，如果一个参数发生变化，则其余两个参数中至少有一个也要发生变化，这种状态变化的最基本的形式如下：

多变过程	$pv^n = \text{常数}$
定压过程	压力 $p = \text{常数} (n=0)$
等温过程	温度 $T = \text{常数} (n=1)$
定容过程	比容 $v = \text{常数} (n=\infty)$
等熵过程	熵 $s = \text{常数} (n=k=c_p/c_v)$

如果经过若干状态变化之后，气体又恢复到它原有的状态，这种过程叫做循环。卡诺循环被用作所有热机的理想循环过程，它包括两个等熵过程和两个等温过程，后者是分别在设计的或可达到的高、低温之下实现的。这种循环过程用 $T-S$ 图（图3-6）表示很方便，由图中看出制冷机或热泵的理想循环包括：

- 1—2 等熵压缩过程
- 2—3 等温热输出过程
- 3—4 等熵膨胀过程
- 4—1 等温吸热过程

在 $T-S$ 图上，热量表示为一块面积，因此有：

面积14ab表示低温下的吸热量 $Q_0 = T_0 \Delta S$

面积23ab表示高温下的输出热量 $Q = T \Delta S$

面积1234表示输入的功熵即驱动能 $L = (T - T_0) \Delta S$

如果系统中的质量循环流量为 $\dot{M}$ ，则以上三参数可

表示如下：

输出冷量 $\dot{Q}_0 = \dot{M} T_0 \Delta s$

输出热量 $\dot{Q} = \dot{M} T \Delta s$

输入功率 $N = \dot{M} (T - T_0) \Delta s$

等温输入和输出热的状态变化过程是在等温定压的饱和蒸气相区实现的，压缩开始点

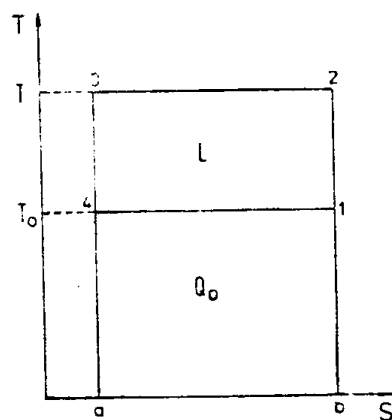


图 3-6 理想循环

① 原文误作energy。——译者注