

高等学校建筑环境与设备工程专业规划教材

暖通空调热泵技术

马最良 姚 杨 姜益强 编著
姚 杨 主 编



中国建筑工业出版社

高等学校建筑环境与设备工程专业规划教材

暖通空调热泵技术

马最良 姚 杨 姜益强 编著
姚 杨 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

暖通空调热泵技术/姚杨主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2008

高等学校建筑环境与设备工程专业规划教材
ISBN 978-7-112-10135-1

I. 暖… II. 姚… III. ①采暖设备-热泵-高等学校-教材②通风设备-热泵-高等学校-教材③空气调节设备-热泵-高等学校-教材 IV. TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 113262 号

本书既是一本有关热泵空调技术的教材, 又是内容丰富、深入浅出、图文并茂、理论与实际并重的工程技术书籍。

本书系统地阐述了热泵技术的基础知识与原理, 介绍了在暖通空调领域中应用广泛、技术成熟的蒸气压缩式热泵技术与系统 (包括空气源、水源、土壤耦合热泵系统及水环热泵、变制冷剂流量的热泵多联机系统等), 介绍了吸收式热泵技术, 还对典型热泵工程进行了案例分析。

本书可供建筑环境与设备工程专业的学生阅读, 同时也可供从事暖通空调和热泵工程的专业技术人员阅读。

* * *

责任编辑: 齐庆梅

责任设计: 郑秋菊

责任校对: 刘 钰 关 键

高等学校建筑环境与设备工程专业规划教材

暖通空调热泵技术

马最良 姚 杨 姜益强 编著

姚 杨 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京市彩桥印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17¼ 字数: 420 千字

2008 年 11 月第一版 2008 年 11 月第一次印刷

定价: 29.00 元

ISBN 978-7-112-10135-1

(16938)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

早在 20 世纪 80 年代初,徐邦裕教授率先在原哈尔滨建筑工程学院(现哈尔滨工业大学)为“供热通风与空调”专业研究生开设出“热泵”选修课程,并于 1988 年正式出版国内第一本《热泵》高等学校试用教材(中国建筑工业出版社)。当时,热泵技术在我国属起步阶段,尚不为人所知。但国外热泵技术发展迅速,在暖通空调中得到日益广泛的应用。因此,在我国有必要普及与推广热泵技术,应在暖通空调中大力提倡应用与发展热泵技术。正如《热泵》前言所指出的:“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艰难的发展过程,在目前无疑已经得到了突破。热泵装置进入了家庭、公共建筑物、厂房,以提供空调、采暖、热水供应所需的热量,而且也已在工业的一些工艺工程中得到应用。目前热泵主要用来解决 100℃ 以下的低温用能。据估计,欧洲在 100℃ 以下的低温用能方面的耗能量约占总耗能量的 50% 左右。而这些能量主要用在建筑物的采暖。”

20 多年后的今天,热泵技术在我国进入飞速发展的阶段。已在热泵理论、系统创新、实验研究、产品开发、工程应用诸方面取得可喜成果,显示出热泵技术在我国应用与发展的潜力。人们充分认识到:热泵技术是科学使用能源和科学配置能源的典型有效技术,它为解决暖通空调的能源与环境问题提供了技术支持,也为实现暖通空调事业可持续发展指明了有效途径。因此,在我国热泵技术新的发展起点上,重新编写一本“热泵”教材是十分必要而有益的事。同时,考虑到目前热泵在暖通空调领域中广泛应用与发展,为此,我们编写出《暖通空调热泵技术》一书,作为“建筑环境与设备工程”专业“热泵”课程的教材或研究生相关课程的参考书。希望本教材的出版能为热泵课程建设贡献微薄力量。

本书分四部分,1~3 章阐述了热泵技术的基础知识与原理;4~8 章阐述了在暖通空调领域中应用广泛、技术成熟的蒸汽压缩式热泵技术与系统;9 章阐述了吸收式热泵技术;10 章对典型热泵工程进行了案例分析。

本书由马最良、姚杨、姜益强编著,姚杨担任主编。具体分工为:第 1、5、8 章和 3.1 节、3.3 节、3.5~3.8 节、4.5 节由马最良编著;第 2、7、9 章和 3.2、3.4、4.1、4.2、4.3 节由姚杨编著;第 6、10 章和 4.4 节由姜益强编著。全书由姚杨统稿。在编著工作中,研究生倪龙、叶凌、李翔、牛福新、李宁、赵志丹、林艳艳等为本书成稿做了很多辅助性工作,对此谨致谢意。本书的出版凝聚了编辑的辛勤工作,在此表示敬意和感谢。

为方便任课教师制作电子课件,我们制作了包括本书中公式、图表等内容的素材库,可发送邮件至 jiangongshe@163.com 免费索取。

由于编著者的水平所限,本书难免存在缺点和不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 导论与基础	1
1.1 能源与环境	1
1.2 高位能与低位能	3
1.3 热泵的定义	6
1.3.1 热泵的定义	6
1.3.2 热泵机组与热泵系统	7
1.3.3 热泵空调系统	9
1.4 热泵的种类	9
1.5 热泵空调系统的分类	12
1.6 热泵工质及其替代问题	13
1.6.1 蒸气压缩式热泵对工质的要求	13
1.6.2 热泵工质的种类	15
1.6.3 热泵工质的替代	16
1.6.4 CO_2 和 NH_3	21
1.7 热泵在我国应用与发展的回顾	22
1.7.1 早期热泵的应用与发展阶段 (1949~1966)	22
1.7.2 热泵应用与发展的断裂期 (1966~1977)	22
1.7.3 热泵应用与发展的全面复苏期 (1978~1988)	23
1.7.4 热泵应用与发展的兴旺期 (1989~1999)	25
1.7.5 进入 21 世纪后热泵发展进入快速发展时期	27
1.8 热泵的历史	29
参考文献	36
第 2 章 热泵的理论循环	39
2.1 逆卡诺循环 (Reverse Carnot Cycle)	39
2.2 劳仑兹循环 (Lorenz Cycle)	42
2.3 蒸气压缩式热泵的理论循环	43
2.4 布雷顿循环 (Brayton Cycle)	44
2.5 斯特林循环 (Stirling Cycle)	46
2.6 吸收式热泵理论循环	47
2.7 温差电热泵	51
2.8 CO_2 跨临界热泵循环	53
2.8.1 CO_2 作为制冷剂的发展历史	53
2.8.2 CO_2 跨临界循环及其特点	54
2.8.3 CO_2 跨临界循环的热力计算	55

参考文献	56
第3章 热泵的低位热源和驱动能源	57
3.1 概述	57
3.2 空气	58
3.3 水	61
3.3.1 地下水	61
3.3.2 地表水	63
3.3.3 生活废水与工业废水	67
3.4 土壤	68
3.4.1 土壤热物性	68
3.4.2 土壤温度的状况分析及变化规律	70
3.5 太阳能	73
3.6 驱动能源和驱动装置	78
3.6.1 热泵的驱动能源和能源利用系数	78
3.6.2 电动机驱动	79
3.6.3 燃料发动机驱动	80
3.6.4 蒸汽透平(蒸汽轮机)驱动	82
3.7 热泵系统中的蓄能	84
3.7.1 蓄能的意义	84
3.7.2 蓄热材料	84
3.7.3 蓄热器	85
3.7.4 热泵蓄热系统	87
3.8 热泵的经济性评价	88
3.8.1 额外投资回收年限法	88
3.8.2 能耗费用	89
参考文献	91
第4章 空气源热泵空调系统	93
4.1 空气源热泵机组	93
4.1.1 空气/空气热泵机组	93
4.1.2 空气/水热泵机组	97
4.2 空气源热泵机组的运行特性	101
4.3 空气源热泵的结霜与融霜	104
4.3.1 结霜的原因与危害	104
4.3.2 结霜的规律	105
4.3.3 延缓结霜的技术	109
4.3.4 除霜的方法与控制方式	109
4.3.5 结霜与除霜损失系数	113
4.4 空气源热泵机组的最佳平衡点	115
4.4.1 平衡点与平衡点温度	115
4.4.2 空气源热泵机组供热最佳平衡点的确定	116

4.4.3	辅助加热与能量调节	118
4.5	空气源热泵的低温适应性	119
4.5.1	空气源热泵在寒冷地区应用存在的问题	119
4.5.2	改善空气源热泵低温运行特性的技术措施	120
	参考文献	124
第5章	水源热泵空调系统	126
5.1	水源热泵机组	126
5.1.1	水源热泵机组的分类	126
5.1.2	水/空气热泵机组	127
5.1.3	水/水热泵机组	128
5.1.4	水源热泵机组的运行特性	129
5.2	地下水源热泵空调系统	130
5.2.1	地下水源热泵空调系统的组成与工作原理	130
5.2.2	地下水源热泵空调系统的设计要点	131
5.2.3	地下水回灌技术	134
5.3	地表水源热泵空调系统	137
5.3.1	地表水换热系统的形式	137
5.3.2	地表水的特点对热泵空调系统的影响	138
5.3.3	地表水换热系统勘察	139
5.3.4	松散捆卷盘管的设计要点	140
5.4	海水源热泵空调系统	141
5.4.1	大型海水源热泵站	141
5.4.2	海水源热泵空调系统的特殊技术措施	142
5.5	污水源热泵空调系统	143
5.5.1	污水的特殊性及对污水源热泵的影响	143
5.5.2	污水源热泵站	144
5.5.3	城市原生污水源热泵设计中应注意的问题	144
5.5.4	污水源热泵形式	146
5.5.5	防堵塞与防腐蚀的技术措施	146
	参考文献	148
第6章	土壤耦合热泵空调系统	150
6.1	土壤耦合热泵空调系统简介	150
6.1.1	土壤耦合热泵空调系统的组成	150
6.1.2	土壤耦合热泵空调系统的分类	151
6.2	现场调查与工程勘察	152
6.2.1	现场勘察	152
6.2.2	水文地质调查	153
6.2.3	设置测试孔与监测孔	153
6.2.4	土壤热响应实验	154
6.3	地埋管换热器的管材与传热介质	156

6.3.1	地埋管管材	156
6.3.2	管材规格和压力级别	156
6.3.3	传热介质	156
6.4	地埋管换热器的布置形式	159
6.4.1	埋管方式	159
6.4.2	连接方式	161
6.4.3	水平连接集管	161
6.5	地埋管换热器的传热计算	162
6.5.1	地埋管换热器传热分析	162
6.5.2	竖直地埋管换热器的长度	163
6.6	地埋管换热器系统的水力计算	165
6.6.1	压力损失计算	165
6.6.2	循环泵的选择	167
6.7	地埋管换热器的安装	168
6.7.1	施工前的准备	168
6.7.2	水平式地埋管换热器	168
6.7.3	竖直式 U 形埋管换热器	169
6.7.4	地埋管换热系统的检验与水压试验	173
6.8	直接膨胀式土壤源热泵系统	174
	参考文献	175
第 7 章 水环热泵空调系统		177
7.1	概述	177
7.2	水环热泵空调系统的组成与运行	177
7.2.1	水环热泵空调系统的组成	177
7.2.2	水环热泵空调系统的运行特点	179
7.3	水环热泵空调系统的特点	179
7.4	水环热泵空调系统的设计要点	181
7.4.1	建筑物供暖和供冷负荷	181
7.4.2	水/空气热泵机组的选择	182
7.4.3	机组风道的设计	183
7.4.4	加热设备	183
7.4.5	排热设备	184
7.4.6	蓄热水箱	184
7.5	水环热泵空调系统的问题与对策	185
7.5.1	合理选择应用场所, 充分体现节能和环保效益	185
7.5.2	向系统引入外部低温热源, 拓宽水环热泵空调系统的应用范围	186
7.5.3	采用混合系统, 进一步提高水环热泵空调系统的节能效果和环保效益	190
	参考文献	191
第 8 章 变制冷剂流量热泵式多联机空调系统		192
8.1	概述	192

8.2	变制冷剂流量热泵式多联机组	193
8.2.1	变制冷剂流量热泵式多联机组的组成与工作原理	193
8.2.2	机组中的部分辅助部件与设备	194
8.3	变制冷剂流量热泵式多联空调系统类型	197
8.3.1	风冷交流变频变容热泵多联机系统	197
8.3.2	水冷变频变容热泵多联空调系统	198
8.3.3	风冷定频变容系统	200
8.4	变制冷剂流量热泵式多联空调系统中的几个关注问题	202
8.4.1	系统的地域适应性	202
8.4.2	制冷剂管路的配管长度对其系统性能的影响	203
8.4.3	室内外机高差对系统性能的影响	204
8.4.4	室内机高度差对系统性能的影响	205
8.4.5	系统的回油问题	206
	参考文献	207
第9章	吸收式热泵	209
9.1	概述	209
9.2	第一种吸收式热泵	210
9.3	第二种吸收式热泵	212
9.4	单效吸收式热泵循环	213
9.4.1	单效第一种吸收式热泵	213
9.4.2	单效第二种吸收式热泵	214
9.5	双效吸收式热泵循环	215
9.5.1	双效第一种吸收式热泵	215
9.5.2	双效二级吸收第一种吸收式热泵	216
9.5.3	双效第二种吸收式热泵	217
9.6	联合型吸收式热泵及再吸收式热泵	218
9.6.1	第一种和第二种联合型吸收式热泵	218
9.6.2	再吸收式热泵	219
	参考文献	220
第10章	热泵工程典型案例分析	221
10.1	概述	221
10.2	异井回灌地下水热泵工程案例	221
10.2.1	工程案例介绍	221
10.2.2	场地水文地质条件和主要含水层水文地质参数	221
10.2.3	抽水井和回灌井设计	223
10.2.4	水源冷热水机组及深井泵的选用	223
10.2.5	案例分析与评价	224
10.3	同井回灌地下水热泵工程案例	226
10.3.1	工程案例介绍	226
10.3.2	地质概况	226

10.3.3	抽灌同井装置	227
10.3.4	系统测试与结果分析	228
10.3.5	案例分析与评价	233
10.4	空气源热泵空调系统案例分析	235
10.4.1	工程案例介绍	235
10.4.2	冷热源系统	235
10.4.3	案例分析与评价	237
10.5	空气源双级耦合热泵空调系统案例分析	240
10.5.1	工程案例介绍	240
10.5.2	双级耦合热泵机房平面布置	241
10.5.3	工程测试与分析	242
10.5.4	双级耦合热泵系统的经济性评价	248
10.5.5	案例分析与评价	249
10.6	地热尾水水源热泵案例分析	250
10.6.1	工程案例介绍	250
10.6.2	水系统原理及运行效果测试	251
10.6.3	案例分析与评价	252
10.7	水环热泵空调系统案例分析	253
10.7.1	工程案例介绍	253
10.7.2	空调系统	253
10.7.3	公寓部分空调设备费概算及系统运行情况	255
10.7.4	案例分析与评价	256
10.8	土壤耦合热泵空调系统案例分析	256
10.8.1	工程案例介绍	256
10.8.2	混合埋管系统的设计概况	257
10.8.3	单一埋管和混合埋管系统的经济性分析	258
10.8.4	案例分析与评价	259
10.9	基于热泵的能量综合利用系统案例分析	260
10.9.1	工程案例介绍	260
10.9.2	泳池能量回收系统设计	261
10.9.3	案例分析与评价	263
参考文献	264

第 1 章 导论与基础

1.1 能源与环境

能源与环境问题是当今世界各国面临的重大社会问题之一。能源是人类生存和社会发展的物质基础。在过去二百多年的能源发展史中,人类依靠化石能源取得了辉煌的经济发展和科技文化的进步。但发展到今天,人们对能源的需求日益增长,这些能源所具有的资源有限性和对生态环境的危害性愈来愈突出,已成为人类面临的巨大威胁和挑战。

先看一些简单的数据^[1,2]:

① 1770~1900年,全球工业化初期,世界人口增长2倍,能源消费总量增加6倍;1900~1992年,全球工业成熟阶段,世界人口增长3倍,能源消费总量却增长75倍。

② 全球能源消费总量:1970年为83亿t标准煤,2006年为164亿t标准煤,估计2020年将为200亿t标准煤。

③ 世界人均能耗:1950年为1t标准煤,2000年超过了2.1t标准煤,50年翻了一番,预计2050年将达到2.8t标准煤。

④ 发达国家人均能耗一直居高不下。2000年美国人均能耗为11.7t标准煤,经济合作与发展组织为6.7t标准煤,日本为5.9t标准煤,都远远超过世界平均水平。

⑤ 我国的能源需求也在日益增长。1949年新中国成立,能源消费总量为2000多t标准煤;1958年建国初期处于经济恢复期,能源消费总量为5400万t标准煤;1980年改革开放,发展经济初期,能源消费总量为6.03亿t标准煤;1996年为13.97亿t标准煤,约占全球能源生产总量的11%;2003年增长到16.78亿t标准煤,是1980年的2.78倍。

目前中国人均GDP已经达到1000美元的小康目标,按照预定的经济发展目标,2020年将全面实现小康,达到中等发达国家的水平,人均GDP将达到10000美元。从其他发达国家的发展历程来看,GDP达到10000美元的能源消耗是人均标准煤5.6t/年。这样,到2020年我国人口达到15亿,将需要84亿t标准煤。这是世界目前能源生产能力的60%。

⑥ 建筑能耗是能源消费构成的重要部分,占相当大的比重,在发达国家已占到能源消费总量的35%~40%。例如,美国占31.9%,英国占34.3%,瑞典占33.9%,丹麦占42.4%,荷兰占33.9%,加拿大占31.8%,比利时占31.8%。在我国也占到能源消费总量的25%以上。

上述数字,明确地告诉我们:随着人类文明的进步和社会的发展,人类对能源的需求在急速增长,能源的消耗将会越来越多;能源资源的消耗速度远远超过资源的可再生能力。有限的储量和无限的需求使发生全球性或地区性能源危机的可能性依然存在。目前,石油、天然气、煤炭等化石能源占世界能源消耗的90%。这些亿万生成的地下资源储

量有限，与消费速度相比是不可再生的，资源耗尽只是迟早的事。根据 2000 年末的测算，世界煤炭可采期限是 204 年，石油是 41 年，天然气是 61 年。我国的能源资源储量更是不容乐观。根据最新资料显示^[3]，现有探明技术可开发能源资源总量超过 8230 亿 t 标准煤，探明经济可开发剩余可采总储量为 1392 亿 t 标准煤，约占世界总量的 10.1%。我国能源经济可开发剩余可采储量的资源保证度仅为 129.17 年，其中原煤仅为 114.5 年，原油仅为 20.1 年，天然气仅为 49.3 年。显然，未来能源的发展将面临重大的挑战，需要调整能源结构，发展多元化的能源结构；需要发展节能新技术，提高能源效率；需要发展清洁能源技术，开发利用再生能源技术，改进能源环境状态。这种挑战也为推动热泵技术的发展，提供一个很好的机遇。从译著中可以看出^[4]，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”。这给我们一个重要启示：能源问题是今后长期存在的问题，节能工作及热泵技术的应用与研究将会是暖通空调制冷领域中永恒的研究课题。

能源环境问题主要是指能源开发利用过程中的污染物的排放及其对生态环境的影响。目前，我们最关注的两个全球性的环境问题是全球气候的变化和臭氧层破坏。蒙特利尔议定书以及议定书各方的合作已经成功地减少了对臭氧层破坏的威胁。

但是，全球气候变化对人类生存的威胁越来越大。观测资料表明，在过去的 100 年中，全球平均气温上升了 0.3~0.6℃，全球海平面平均上升了 10~25cm。如果不对温室气体采取减排措施，在未来的几十年内，全球平均气温每 10 年将可升高 0.2℃，到 2100 年全球平均气温将升高 1~3.5℃。大气是人类生存的基本生态环境，全球平均气温上升，将引起诸如厄尔尼诺现象等的异常天气变化，从而对整个地球生态系统的稳定造成威胁。

全球气候变暖主要是发达国家在其工业化过程中燃烧大量化石燃料产生 CO₂ 等温室气体的排放所造成的。1990 年全世界一次能源消费量为 114.76 亿 t 标准煤，其中煤炭、

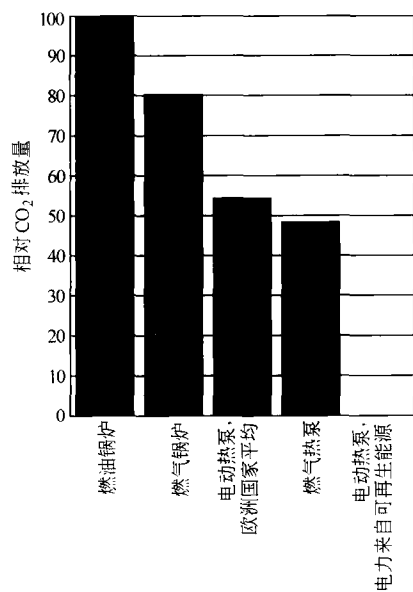


图 1-1 供热装置的相对 CO₂ 排放量

(注：图中欧洲发电的 CO₂ 排放量，平均为 0.55kg CO₂/kWh)

石油、天然气分别占到 27.3%、38.6% 和 27.7%。据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第一工作组 1992 年度工作报告报道，1990 年全球化石燃料向大气排放了大约 60 亿~65 亿 t 碳。

我国是世界上少数几个能源结构以煤炭为主的国家，也是世界上最大的煤炭消费国。2000 年中国能源生产总量为 12.8 亿 t 标准煤，其中煤炭占 67%；1999 年我国排放 6.69 亿 t 碳，居世界第二位。

因此，限制和减少化石燃料燃烧产生的 CO₂ 等温室气体的排放，已成为国际社会减缓全球气候变暖的重要组成部分。许多国家都提倡采用热泵技术，把热泵技术作为减少 CO₂ 排放量的一种有效技术。国际能源机构 (IEA) 热泵中心评估了热泵的全球环境效益。如图 1-1 所示。由图 1-1 可见，电动热泵和燃气热泵的 CO₂ 排放量均小于燃油锅炉和燃气锅炉。电动热泵运行所使用的电力，来自可再生能（如风力等）时，根本不排放任何 CO₂。可

见，通过热泵来减少 CO₂ 排放的潜力极大。2002 年，全世界约有 1.3 亿台热泵在运行，总供热量约为每年 4.7×10^{15} kJ，每年减少 CO₂ 排放量约为 1.3 亿 t。如果在建筑供暖中热泵所占比例能增加到 30%，在采用现有先进技术的条件下，可以使全世界每年 CO₂ 的排放量减少 13.2 亿 t，占全世界 CO₂ 排放量的 6%。随着热泵技术的进一步改进和发电效率的进一步提高，采用热泵供暖，使全世界 CO₂ 排放量减少 16% 是有可能的^[5]。正是因为环境原因，进入 21 世纪后，热泵又迎来一个新的发展起点。通过热泵的应用与研究，来推动暖通空调的可持续发展，实现暖通空调的生态化和绿色化。

综上所述，未来能源与环境问题将是人类面临的重大挑战，也是促进科学技术发展的良好机遇。正因为这样，热泵技术将会在能源与环境问题的推动下，获得进步与发展。

1.2 高位能与低位能

通常，以做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，都可以互相转变，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。能量由某一种状态转化或传递到另一状态时，因能源状态不同，其转化效果亦不同，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 1-2）。

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 $\eta = 1$ ）和管路的阻力损失时，则水坝直接供水的方案，不需要外界做功，而水由 100m 高处流下的势能将损失掉，其量为 $100 \times 10 \times 1000 \times 9.81 = 9.81 \times 10^6$ 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 $9.09 \times 1000 \times 10 \times 9.81 = 8.92 \times 10^5$ 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（ $0.91 \times 1000 \times 100 \times 9.81 = 8.92 \times 10^5$ 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，坝中的水有做功的能力，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做功，方能取得。外界做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 水坝中的高价值的水，而且利用了 9.09t/s 低价值的湖水。水位不同，其做功的能力不同。热能也一样，不仅有其数量，而且也有其质量问题。现以室

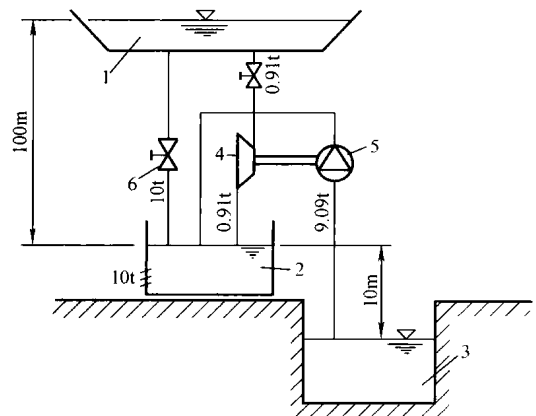


图 1-2 某城镇供水方案

1—水坝中的水；2—供水池；3—湖水中的水；

4—水轮机；5—水泵；6—调节阀

内采暖为例说明之。

若向室内供热 10kW，现有两种用电能的供暖方案（图 1-3）。

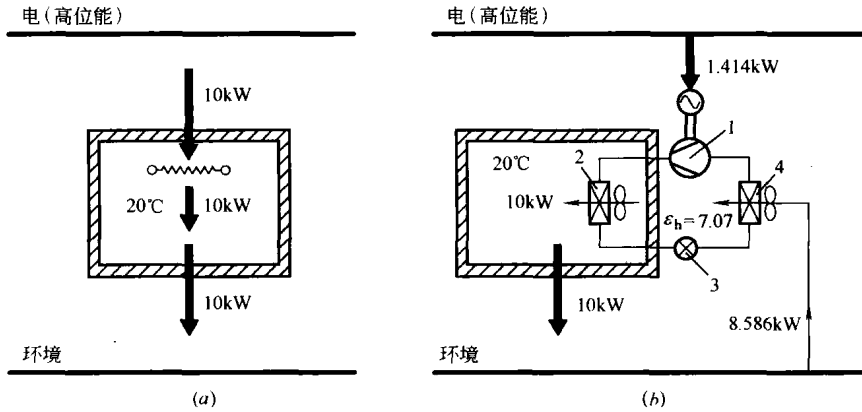


图 1-3 供暖方案

(a) 电供暖；(b) 空气源热泵供暖

1—压缩机；2—室内换热器；3—节流阀；4—室外换热器

第一方案，采用电阻式加热器，直接加热室内空气，则需要供给电能 10kW。

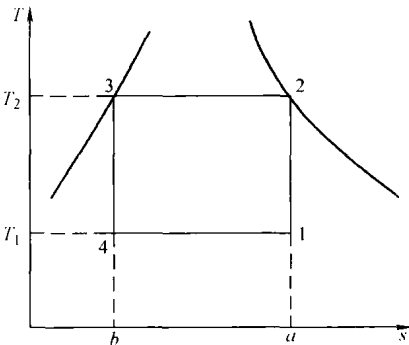


图 1-4 逆卡诺循环的 T-s 图

第二方案，采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 所示理想循环——逆卡诺循环（参见 2.1 节），则理想循环热泵的制热性能系数：

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

如向室内供热 10kW，驱动热泵所消耗的电能为：

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

用第二方案供热仅消耗 1.414kW 的电能，约为第一种方案的 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，由于此方案中的 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，室温下的 4.1868kJ 热量与 100°C 下的 4.1868kJ 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，则温度为室温下的 4.1868kJ 热量不能自动传递到室内，而温度为 100°C 的 4.1868kJ 热量可自动传递到室内。那么，品质如何衡量呢？一般来说，品质的高低完全取决于它做功的本领，温度为室温下的热量毫无做功能力，温度为 100°C 的热量具有做功的能力。

综上所述，可归纳为以下几点：

(1) 评价能源的价值时，既要其数量，又要其质量。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。不能全部而只是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：取之不尽的贮存在周围空气、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；能量的密度较小的太阳能等等。

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。如果高位能变为低位能，就表示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是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所需要的低位热量，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，工作机像泵的作用一样，将低位能的位势提高。如图 1-2 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，坝中的水先做功，然后再向城市供水。又如图 1-3 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。

(3) 基于能量质量的概念，可提炼出合理利用能源的两个重要原则——能量的梯级利用和能级的提升，从而克服了传统能量利用的分产分供方式，如图 1-5 所示。

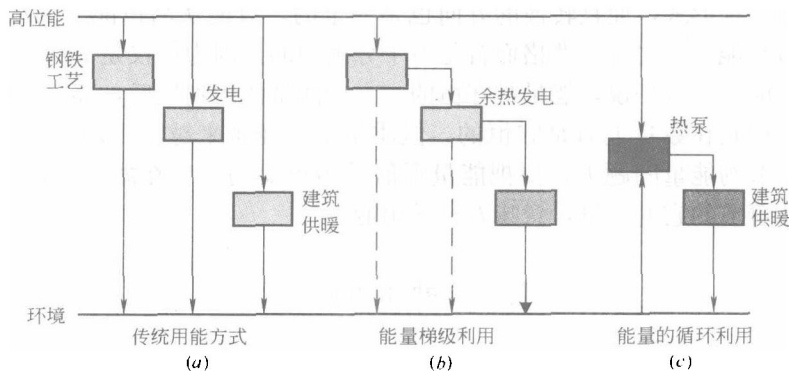


图 1-5 合理利用能源的原则

(a) 传统的分产分供；(b) 能量的梯级利用；(c) 能级的提升

由图可见，传统利用是采用分产分供的方式（图 1-5a）。从钢铁工业高温加热需求到建筑物采暖的低温需求，传统上，对于每一种加热需求都是独立供给，独立加热，这种用

能方式中忽略了在能量的转换过程中，如何防止和减少能量贬值的问题。因此，可以说这种传统用能极大地引发用能过程中的能源质量的浪费现象。为此在用能过程中，应遵守能量梯级使用原则（图 1-5b）和能级的提升原则（图 1-5c）。所谓的能量梯级使用是指将高位能先满足于高端的需求，如用作机械驱动能、电能、高温加热等，从这些用能过程中排出的废热，再满足于低端的需求。在能量利用过程中始终按着这个原则，满足不同温度所需要的能量，直至降低到环境热能为止，从而避免了热量的不必要的降级损失。例如：天然气先用于钢铁工业的加热，加热钢材排出的废热再用于发电（余热发电），由发电排出的废热最后用于建筑物的供暖。供暖后，热量排入环境中（图 1-5b）。能级提升是指，将低位能的品位提升，用于需要较高温度的场合。根据热力学第二定律，热量不会自发地从低温物体传到高温物体，因此，能级提升过程，就必须从外界输入一部分有用能量，以实现这种能量的传递。图 1-5c 正说明了能级的提升过程。图 1-2 水泵供水方案和图 1-3 中的第二方案都是能级提升的例子。

通过这些例子告诉我们很重要的一点：采用热泵技术可以实现热能的能级提升。

(4) 由上述例子可见，应用图 1-3 中的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℃，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 1-1 中。

由表 1-1 可明显地看出，供热温度越低时，第二方案消耗高位能也越少。这表明在能级提升过程中，随着温升（输出温度与热源之间的温差）的增加，热泵的驱动能亦成比例的增加。

两个方案所消耗的高位能源之比

表 1-1

供热温度(℃)	20	34	40	45	50	60	70
第一方案所消耗的高位能 第二方案所消耗的高位能	14.75	10.1	7.82	7.07	6.5	5.54	4.9

(5) 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，只能从高位能变为低位能。因此，一般所谓“节约能量”之说，严格而言是不十分确切的。因为仅仅是节约了高位能，而利用了部分低位能，也就是说，能量是守恒的，一切能量使用到最后，都成为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。在能量利用过程中节约能量，真正意味着节约它的质量，意味着科学用能。

1.3 热泵的定义

上述两节中已多次提到“热泵”一词，为了进一步理解它，本节将给出热泵定义及其内涵，并介绍热泵机组、热泵系统和热泵空调系统之间的联系与区别。

1.3.1 热泵的定义

热泵是一种利用高位能使热量从低位热源流向高位热源的节能装置^[6]。顾名思义，

热泵也就是像泵那样，可以把不能直接利用的低位热能（如空气、土壤、水中所含的热能、太阳能、工业废热等）转换为可以利用的高位热能，从而达到节约部分高位能（如煤、燃气、油、电能等）的目的。

由此可见，热泵的定义涵盖了以下几点：

(1) 热泵虽然需要消耗一定量的高位能，但所供给用户的热量却是消耗的高位能与吸取的低位热能的总和。也就是说，应用热泵，用户获得的热量永远大于所消耗的高位能。因此，热泵是一种节能装置。

(2) 理想的热泵可设想为图 1-6 所示的节能装置（或称节能机械），由动力机和工作机组成热泵机组。利用高位能来推动动力机（如汽轮机、燃气机、燃油机、电机等），然后再由动力机来驱动工作机（如制冷机、喷射器）运转，工作机像泵一样，把低位的热能输送至高品位，以向用户供热。

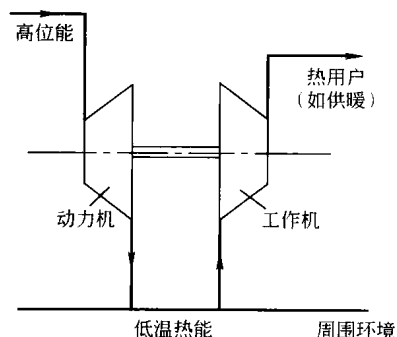


图 1-6 理想的热泵机组

(3) 热泵既遵循热力学第一定律，在热量传递与转换的工程中，遵循着守恒的数量关系；又遵循着热力学第二定律，热量不可能自发、不付出代价的、自动地从低温物体转移至高温物体。在热泵的定义中明确指出，热泵是靠高位能拖动，迫使热量由低温物体传递给高温物体。

1.3.2 热泵机组与热泵系统

图 1-7 给出热泵系统的框图。由框图可明确地看出热泵机组与热泵系统的区别。热泵机组是由动力机和工作机组成的节能机械，是热泵系统中的核心部分。而热泵系统是由热泵机组、高位能输配系统、低位能采集系统和热能分配系统四大部分组成的一种能级提

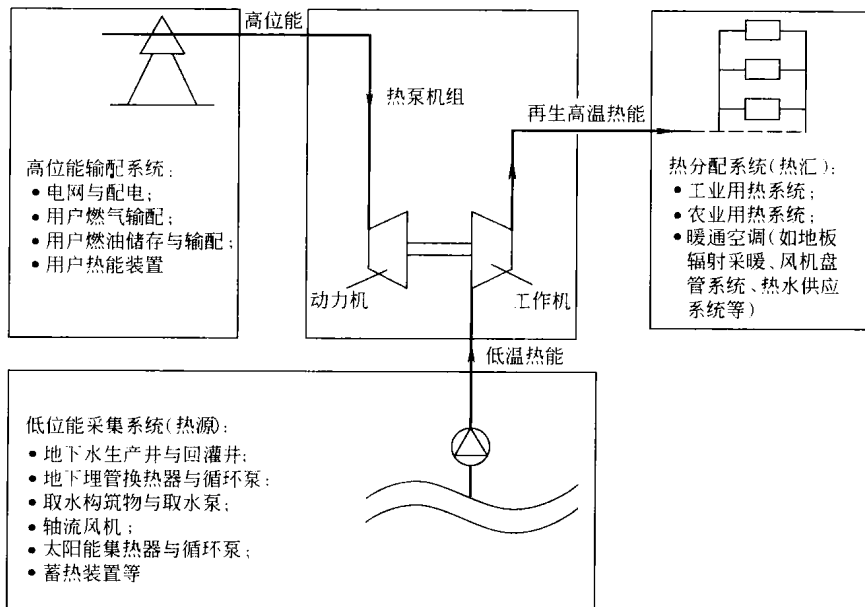


图 1-7 热泵系统框图