



世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材

热泵技术与应用

张昌 主编
史琳 主审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材

热泵技术与应用

主 编 张 昌

副主编 胡平放

参 编 陈焰华 刘秋新 於仲义 魏文平

主 审 史 琳



机械工业出版社

本书主要阐述热泵的基本原理和主要设备,以及热泵空调系统的设计方法和技术措施。内容包括热泵机组的工作原理、空气源热泵系统设计、水源热泵系统设计、土壤源热泵系统设计,并介绍了大型公共建筑热泵空调工程的成功应用实例。本书注重知识的系统性,内容全面详实,反映了热泵领域最新的科学研究成果和工程应用进展。

本书可作为高等学校建筑环境与设备工程专业的本科生及研究生教学用书,也可供工程技术人员在设计、安装、使用热泵空调系统时参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热泵技术与应用/张昌主编. —北京:机械工业出版社, 2008. 8

(21世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材)

ISBN 978-7-111-24399-1

I. 热... II. 张... III. 热泵—高等学校—教材 IV. TH38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 092918 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘涛 责任编辑: 刘涛 李建秀 版式设计: 张世琴

封面设计: 陈延翔 封面设计: 王伟光 责任印制: 洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市明辉装订厂装订)

2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·20.5 印张·1 插页·397 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-24399-1

定价: 32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379720

封面无防伪标均为盗版

序

建筑环境与设备工程专业是 1998 年教育部新颁布的全国普通高等学校本科专业目录，将原“供热通风与空调工程”专业和“城市燃气供应”专业进行调整、拓宽而组建的新专业。专业的调整不是简单的名称的变化，而是学科科研与技术发展，以及随着经济的发展和人民生活水平的提高，赋予了这个专业新的内涵和新的元素，创造健康、舒适、安全、方便的人居环境是 21 世纪本专业的一个重要任务。同时，节约能源、保护环境是这个专业及相关产业可持续发展的基本条件，因而它们和建筑环境与设备工程专业的学科科研与技术发展总是密切相关，不可忽视。

作为一个新专业的组建及其内涵的定位，它首先是由社会需求所决定的，也是和社会经济状况及科学技术的发展水平相关的。我国的经济持续高速发展和大规模建设需要大批高素质的本专业人才，专业的发展和重新定位必然导致培养目标的调整和整个课程体系的改革。培养“厚基础、宽口径、富有创新能力”，符合注册公用设备工程师执业资格，并能与国际接轨的多规格的专业人才以满足需要，是本专业教学改革的目的。

机械工业出版社本着为教学服务，为国家建设事业培养专业技术人才，特别是为培养工程应用型和技术管理型人才做贡献的愿望，积极探索本专业调整和过渡期的教材建设，组织有关院校具有丰富教学经验的教授、副教授主编了这套建筑环境与设备工程专业系列教材。

这套系列教材的编写以“概念准确、基础扎实、突出应用、淡化过程”为基本原则，突出特点是既照顾学科体系的完整，保证学生有坚实的数理科学基础，又重视工程教育，加强工程实践的训练环节，培养学生正确判断和解决工程实际问题的能力，同时注重加强学生综合能力和素质的培养，以满足 21 世纪我国建设事业对专业人才的要求。

我深信，这套系列教材的出版，将对我国建筑环境与设备工程专业人才的培养产生积极的作用，会为我国建设事业做出一定的贡献。

陈在康

前 言

在人居环境中,许多场合需要温度不是很高的热源。为此,人们非常重视利用低位能量的热泵技术。热泵技术是从热力学第二定律出发,利用一部分高位能源(煤、石油、电能等)来提升另一部分低位能源(空气、水、土壤、太阳能、工业废热等),以达到节约高位能源的目的。这是一种既可节约一次能源,又可减少环境污染的有效节能技术,得到了建筑环境与设备工程师的高度青睐。热泵空调系统的应用研究正在逐步向大、中型和多样化方向发展,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,并且还在一些工业生产的工艺过程中得到应用。

本书主要阐述了热泵的基本原理和主要设备,以及热泵空调系统的设计方法和技术措施,并介绍了大型公共建筑热泵空调工程的成功应用实例。因此,本书不仅可作为高等学校建筑环境与设备工程专业的本科生及研究生的教学用书,还可供工程技术人员在设计、安装、使用热泵空调系统时参考。

本书共分8章,由武汉科技学院张昌教授拟定提纲并编写第1章、第2章、第4章,武汉市建筑设计院陈焰华教授级高级工程师编写第7章,华中科技大学胡平放副教授和於仲义博士编写第8章、第6章,武汉科技大学刘秋新教授编写第5章,武汉科技学院魏文平副教授编写第3章。全书由张昌统稿。

本书由张昌任主编,胡平放任副主编。清华大学博士生导师史琳教授主审。

本书引用了许多参考文献和工程案例,谨向有关文献的作者和工程案例的设计者表示衷心感谢。由于编者的水平有限,书中缺点和不妥之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

编 者

目 录

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 热泵的节能与环境效益	1
1.1.1 热泵定义	1
1.1.2 热泵的节能效益	2
1.1.3 热泵的环境效益	2
1.2 热泵循环的热力学原理	3
1.2.1 逆卡诺 (Carnot) 循环	3
1.2.2 洛伦兹 (Lorenz) 循环	4
1.2.3 热泵的热力经济性指标	4
1.3 热泵的低位热源	6
1.3.1 空气	6
1.3.2 水	7
1.3.3 土壤	9
1.3.4 太阳能	10
1.4 热泵的驱动能源和驱动装置	11
1.4.1 热泵的驱动能源和能源利用系数	11
1.4.2 热泵的驱动装置	12
1.5 热泵的分类	13
1.5.1 热泵的分类方法	13
1.5.2 按热泵机组换热器所接触的载热介质分类	14
1.5.3 按低位热源分类	16
1.6 热泵发展的历史与现状	19
第 2 章 蒸气压缩式热泵的工作原理	23
2.1 蒸气压缩式热泵循环	23
2.1.1 单级蒸气压缩式热泵的工作过程	23
2.1.2 单级蒸气压缩式热泵循环在 $\lg p-h$ 图上的表示	24
2.1.3 单级蒸气压缩式热泵的实际循环	25
2.2 蒸气压缩式热泵的工质	31
2.2.1 热泵工质的发展历程	31
2.2.2 热泵工质与环境保护	33

2.2.3 对热泵工质的要求	35
2.2.4 常用的热泵工质	38
2.3 蒸气压缩式热泵的压缩机	40
2.3.1 热泵用压缩机的特点和要求	40
2.3.2 活塞式压缩机	41
2.3.3 涡旋式压缩机	45
2.3.4 螺杆式压缩机	47
2.3.5 离心式压缩机	52
2.4 蒸气压缩式热泵机组	56
2.4.1 空气/空气热泵机组	56
2.4.2 空气/水热泵机组	58
2.4.3 水/水热泵机组	60
2.4.4 水/空气热泵机组	61
2.5 蒸气压缩式热泵的故障分析与处理	62
2.5.1 无制热或制冷效果	62
2.5.2 热量或冷量不足	64
2.5.3 压缩机的吸气温度不正常	65
2.5.4 压缩机的排气压力和温度不正常	66
第3章 吸收式热泵的工作原理	68
3.1 吸收式热泵概述	68
3.1.1 吸收式热泵的工作过程	68
3.1.2 吸收式热泵的分类	69
3.1.3 吸收式热泵的热力系数	71
3.2 吸收式热泵的工质对	72
3.2.1 工质对的选择	72
3.2.2 溴化锂水溶液的性质	74
3.3 吸收式热泵的循环及其计算	81
3.3.1 吸收式热泵循环	81
3.3.2 单效溴化锂吸收式热泵的循环及其计算	81
3.3.3 双效溴化锂吸收式热泵的循环及其计算	85
3.4 溴化锂吸收式热泵机组	89
3.4.1 单效溴化锂吸收式热泵机组的结构	89
3.4.2 双效溴化锂吸收式热泵机组的结构	92
3.5 溴化锂吸收式热泵的安装调试与维护	95
3.5.1 溴化锂吸收式热泵的安装	95
3.5.2 溴化锂吸收式热泵的调试	96
3.5.3 溴化锂吸收式热泵的维护	99
第4章 空气源热泵系统设计	102

4.1	空气源热泵机组技术参数	102
4.1.1	空气源热泵机组的特点	102
4.1.2	空气源热泵机组的参数及相关标准	103
4.2	空气源热泵机组变工况特性	106
4.2.1	热源温度变化对机组供热能力的影响	106
4.2.2	热源温度变化对机组制冷能力的影响	107
4.3	空气源热泵空调机组冬季除霜控制	109
4.3.1	结霜过程及其影响因素	109
4.3.2	除霜过程及其控制方法	111
4.3.3	空气源热泵除霜的研究方向	112
4.4	空气源热泵系统的平衡点	114
4.4.1	热泵供热量与建筑物耗热量的供需矛盾	114
4.4.2	最佳平衡点温度	115
4.4.3	辅助加热	116
4.4.4	空气源热泵机组的能量调节	117
4.5	空气源热泵系统设计要点	118
4.5.1	空调负荷的计算	118
4.5.2	空气源热泵系统方案选择	119
4.5.3	设备容量确定	122
4.5.4	水系统设计	123
4.5.5	新风处理	124
4.5.6	设备的布置设计	125
第5章	水源热泵系统设计	127
5.1	水源热泵空调系统的特点和分类	127
5.1.1	水源热泵系统的特点	127
5.1.2	水源热泵机组的种类	128
5.1.3	水源热泵系统的分类	128
5.2	水源热泵空调系统的运行性能	134
5.2.1	水源热泵机组的变工况性能	134
5.2.2	影响水源热泵系统运行性能的因素	136
5.3	热源(热汇)水的处理方法与措施	139
5.3.1	热源(热汇)循环水系统的水处理方法	139
5.3.2	热源(热汇)循环水系统的水处理措施	140
5.4	水源热泵空调系统设计要点	143
5.4.1	水文地质工程勘察	143
5.4.2	地下水回灌设计	144
5.4.3	地表水取水设计	145
5.4.4	与热源(热汇)交换的热量计算	145

5.4.5	水源热泵机组的选择	146
5.4.6	海水源热泵系统的特殊问题	147
5.4.7	污水源热泵系统的特殊问题	148
5.5	地下水源热泵系统设计	148
5.5.1	开式环路地下水系统设计	148
5.5.2	闭式环路地下水系统设计	152
5.5.3	热源井的结构与设计要点	160
5.6	地表水源热泵系统设计	165
5.6.1	闭式环路地表水热泵系统的设计	165
5.6.2	塑料盘管换热器设计	167
5.6.3	地表水取水口设计	174
第6章 土壤源热泵系统设计		181
6.1	土壤源热泵系统的特点、形式和结构	181
6.1.1	土壤源热泵系统的特点	181
6.1.2	土壤源热泵系统的形式与结构	182
6.2	土壤换热器的传热分析	185
6.2.1	土壤换热器传热分析模型	185
6.2.2	土壤换热器传热过程分析	186
6.2.3	土壤换热器传热计算方法	187
6.2.4	土壤换热器传热的主要影响因素	190
6.3	土壤换热器设计计算	195
6.3.1	土壤换热器的计算特点	195
6.3.2	土壤换热器的设计步骤	196
6.3.3	土壤换热器的换热负荷计算	197
6.3.4	土壤换热器的容量计算	198
6.3.5	土壤换热器系统的水力计算	199
6.4	土壤换热器管材与循环介质	202
6.4.1	土壤换热器管材	202
6.4.2	管材规格和压力级别	202
6.4.3	土壤换热器循环介质	204
6.5	土壤换热器的施工	205
6.5.1	施工前准备工作	205
6.5.2	土壤换热器管道连接	208
6.5.3	水平埋管土壤换热器埋管安装	209
6.5.4	垂直式U形土壤换热器施工	209
6.5.5	土壤换热器系统的检验与水压试验	211
第7章 热泵空调系统工程实例		212
7.1	空气源热泵系统的工程实例	212

7.1.1	武汉图书馆空气源热泵空调系统设计	212
7.1.2	武汉正信大厦空气源热泵空调系统设计	217
7.1.3	武汉楚源大厦空气源热泵空调系统设计	222
7.1.4	武汉怡景花园空气源热泵空调系统设计	227
7.2	水源热泵系统的工程实例	233
7.2.1	武汉香榭里花园水源热泵空调系统设计	233
7.2.2	武汉塔子湖全民健身大楼水源热泵空调系统设计	240
7.2.3	湖北大学图书馆水源热泵空调系统设计	246
7.2.4	南京青龙山生态园湖水源热泵空调系统设计	250
7.3	土壤源热泵系统的工程实例	254
7.3.1	宁波鄞州区国税局办公大楼土壤源热泵空调系统设计	254
7.3.2	武汉中华奇石馆土壤源热泵空调系统设计	262
7.3.3	神农架党委政府接待中心土壤源热泵空调系统设计	268
7.3.4	武汉清江花园土壤源热泵空调系统设计	273
第8章	热泵在其他领域的应用	279
8.1	热泵在物料干燥中的应用	279
8.1.1	热泵干燥原理	279
8.1.2	热泵干燥的应用举例	280
8.2	热泵在工业和民用项目中的应用	285
8.2.1	热泵在工业余热回收中的应用意义	285
8.2.2	热泵在冶金企业中的应用实例	286
8.2.3	热泵在民用项目中的应用实例	287
8.3	热泵在制药及化工中的应用	288
8.3.1	热泵技术在蒸发浓缩和蒸馏中的应用	288
8.3.2	热泵蒸发浓缩和蒸馏的工程实例	289
附录		291
附录 A	制冷空调工程常用单位换算	291
附录 B	湿空气主要热物理参数	292
附录 C	制冷剂的热力学性质表和压焓图	294
参考文献		312

热泵是一种以消耗部分能量作为补偿条件使热量从低温物体转移到高温物体的能量利用装置。热泵能够把空气、土壤、水中所含的不能直接利用的热能、太阳能、工业废热等转换为可以利用的热能。在暖通空调工程中可以用热泵作为空调系统的热源来提供 100℃ 以下的低温用能。

1

第 1 章

概 论

1.1 热泵的节能与环境效益

1.1.1 热泵定义

热泵是一种以消耗部分能量作为补偿条件使热量从低温物体转移到高温物体的能量利用装置。热泵能够把空气、土壤、水中所含的不能直接利用的热能、太阳能、工业废热等转换为可以利用的热能。在暖通空调工程中可以用热泵作为空调系统的热源来提供 100℃ 以下的低温用能。

根据热力学第二定律，热量是不会自动从低温区向高温区传递的，必须向热泵输入一部分驱动能量才能实现这种热量的传递。热泵虽然需要消耗一定量的驱动能，但根据热力学第一定律，所供给用户的热量却是消耗的驱动能与吸取的低位热能的总和。用户通过热泵获得的热量永远大于所消耗的驱动能，所以说热泵是一种节能装置。热泵的制热量与热泵的驱动能量之比称为热泵的制热系数，常用来分析热泵的经济性。

热泵与制冷机从热力学原理上说是相同的，都是按热机的逆循环工作的。两者所不同的是使用的目的不同。制冷机利用吸取热量而使对象变冷，达到制冷的目的；而热泵则是利用排放热量向对象供热，达到供热目的。另外，两者的工作温度范围也不同，如图 1-1 所示。

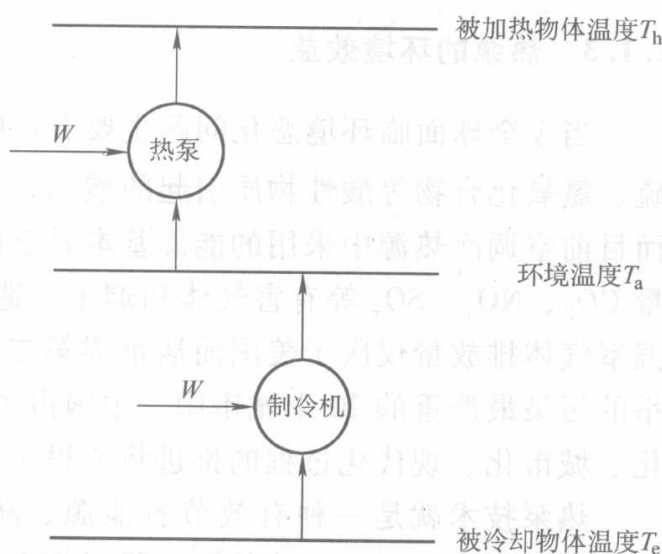


图 1-1 制冷机和热泵的工作温度范围

制冷机在环境温度 T_a 和被冷却物温度 T_c 之间工作, 从作为低温热源的被冷却物中吸热, 向作为高温热源的环境介质排热, 以维持被冷却物温度低于环境温度。热泵在被加热物体温度 T_h 和环境温度 T_a 之间工作, 从作为低温热源的环境介质中吸热, 向作为高温热源的被加热物体供热, 以维持被加热物体温度高于环境温度。

1.1.2 热泵的节能效益

随着中国人居环境的改善和人民生活质量的提高, 公共建筑和住宅的供热和空调已成为普遍的需求, 造成建筑能耗占全社会总能耗的比例很大且持续增长。据统计, 2001 年中国建筑能耗已达到 3.76 亿吨标准煤, 占总能耗的 27.6%, 年增长比例是 50%。在发达国家中, 供热和空调的能耗可占到社会总能耗的 30%。有国外资料统计, 办公楼中仅空调系统耗能量就占总耗电量的 35% 左右, 商住楼中仅空调系统耗能量就占总耗电量的 25% 左右。所以空调系统节能始终是建筑环境与设备领域中的重要研究课题之一。

根据热泵定义的阐述, 热泵空调技术是一种有效的节能手段, 可以大大降低一次能源的消耗。有研究表明, 电动热泵的制热系数只要大于 3, 则从能源利用观点看热泵就会比热效率为 80% 的区域锅炉房用能节省。目前, 家用热泵空调器随着热泵技术的进步, 制热性能系数已经达到或超过 3。各种大型热泵机组的制热能效比 (EER) 绝大部分大于 3。VRV 热泵机组的制热性能系数在 4.2 左右。由此可见, 热泵作为空调系统的热源要优于目前传统的供热方式, 是一种有效的节能手段。这就是为什么目前在大城市的重要建筑物中广泛采用热泵技术的重要原因。从综合的经济效益与社会效益看, 热泵在中国的发展具有广阔的空间。

1.1.3 热泵的环境效益

当今全球面临环境恶化问题主要有: CO_2 、甲烷等产生的温室效应; 二氧化硫、氮氧化物等酸性物质引起的酸雨; 氯氟烃类化合物引起的臭氧层破坏等。而目前空调冷热源中采用的能源基本属于矿物能源。矿物燃料燃烧过程会产生大量 CO_2 、 NO_x 、 SO_x 等有害气体和烟尘, 造成环境污染和地球温度上升。我国的温室气体排放量仅次于美国而居世界第二位。在 2001 年世界银行发展报告中列举的污染最严重的 20 个城市中, 中国占了 16 个。中国环境保护问题伴随着工业化、城市化、现代化过程的推进将变得十分突出。

热泵技术就是一种有效节省能源、减少 CO_2 排放和大气污染的环保技术。把热泵作为空调系统的冷热源, 可以把自然界中的低温废热转变为暖通空调系统可利用的再生热能, 这就为人们提出了一条节约矿物燃料进而减少温室气体排

放、提高能源利用率进而减轻环境污染的新途径。例如，在向暖通空调用户提供相同热量的情况下，电动热泵比燃油锅炉节约 40% 左右的一次能源， CO_2 排放量可减少 68%， SO_2 排放量可减少 93%， NO_2 排放量约可减少 73%。所以，许多国家把热泵技术作为减少 CO_2 、 NO_x 、 SO_x 等有害气体和烟尘排放量的有效方法。1996 年一些国家的热泵供热量占总供热量的份额已经大幅增加，如日本占 28%，美国占 8.6%，瑞典占 8.3%，西班牙占 7.6%，挪威占 4.5%。现在全世界约有 1.3 亿台热泵在运行，总供热量约为每年 $4.7 \times 10^9 \text{GJ}$ ，每年减少 CO_2 排放量约为 1.3 亿吨。随着热泵技术的进一步提高，采用热泵技术供热可以使全世界 CO_2 排放量减少 16%。热泵的广泛应用可以带来良好的环境效益。

综上所述，热泵的发展不仅与国民经济总体发展及热泵本身技术进展有关，还与能源的结构与供应、环境保护与可持续发展密切相关。为此暖通空调工作者应加强有关热泵空调方面的研究工作，积极推广、使用热泵空调技术。

1.2 热泵循环的热力学原理

1.2.1 逆卡诺 (Carnot) 循环

理想的热泵循环是在恒温热源间工作的逆卡诺循环，图 1-2 所示是逆卡诺循环的温熵图。工质在理想热泵中作等温膨胀自状态 4 变化到状态 1，同时在 T_L 温度下从低温热源中吸取热量；接着工质被等熵压缩至状态 2，其温度由 T_L 升高至 T_H ；随后工质被等温压缩至状态 3，同时在

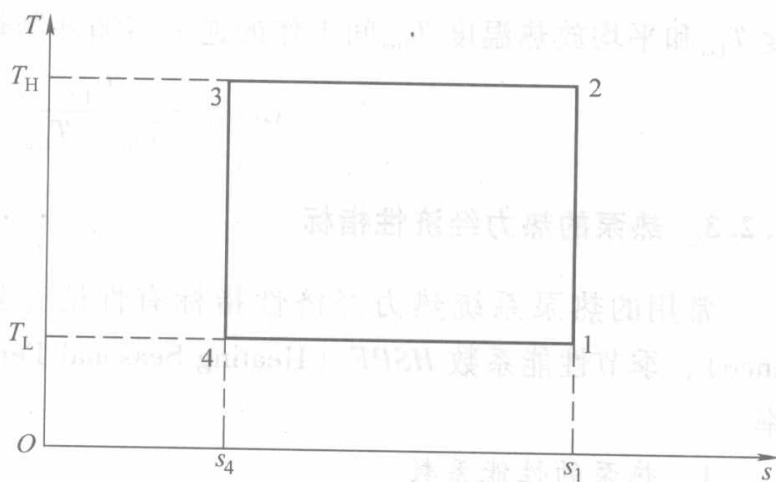


图 1-2 逆卡诺循环

T_H 温度下向高温热源放出热量；最后工质再经等熵膨胀回复到状态 4，其温度也由 T_H 降至 T_L ，从而完成整个循环。

由热力学可以证明，按逆卡诺循环工作的热泵的制热系数为

$$COP_h = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (1-1)$$

而且，在同样热源条件下理想的热泵循环具有最大的制热系数，因此它是同样热源条件下的实际循环的比较标准。

1.2.2 洛伦兹 (Lorenz) 循环

在实际情况下，随着热源与工质之间热交换过程的进行，热源的温度将会发生变化。对于工作在两个变温热源之间的理想热泵循环，可以用洛伦兹循环来描述。如图 1-3 所示，洛伦兹循环是由两个等熵过程和两个工质与热源之间无温差的传热过程所组成。1—2 表示等熵压缩过程；2—3 表示工质的可逆放热过程，其

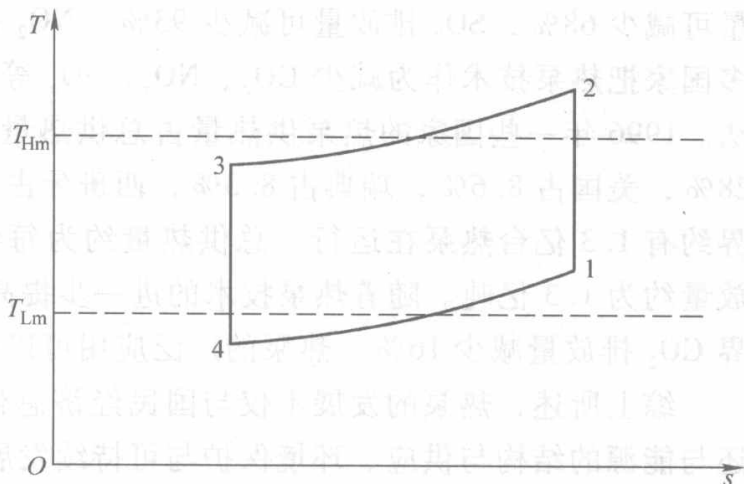


图 1-3 洛伦兹循环

温度由 T_2 降低到了 T_3 ，而高温热源的温度则由 T_3 升高至 T_2 ；3—4 表示等熵膨胀过程；4—1 表示工质的可逆吸热过程，其温度由 T_4 升高至 T_1 。在洛伦兹循环中为了使工质与热源之间实现无温差的热交换，必须采用理想的逆流式换热器。

由热力学可以证明，按洛伦兹循环工作的热泵的制热系数，与在平均吸热温度 T_{Lm} 和平均放热温度 T_{Hm} 间工作的逆卡诺循环制热系数相等，即

$$COP_h = \frac{T_{Hm}}{T_{Hm} - T_{Lm}} \quad (1-2)$$

1.2.3 热泵的热力经济性指标

常用的热泵系统热力经济性指标有性能系数 COP (Coefficient of Performance)、季节性能系数 $HSPF$ (Heating Seasonal Performance Factor) 和热泵的焓效率。

1. 热泵的性能系数

热泵制热时的性能系数称为制热系数 COP_h ，热泵制冷时的性能系数称为制冷系数 COP_c 。

对于消耗机械功的蒸气压缩式热泵，其制热系数 COP_h 即为制热量 Q_h 与输入功率 P 的比值

$$COP_h = \frac{Q_h}{P} \quad (1-3)$$

根据热力学第一定律，热泵制热量 Q_h 等于从低温热源吸热量 Q_c 与输入功率 P 之和。由于 Q_c 与输入功率 P 的比值称为制冷系数 COP_c ，所以

$$COP_h = \frac{Q_c + P}{P} = COP_c + 1 \quad (1-4)$$

对于以消耗热能为代价的吸收式热泵，其热力经济性指标可用热力系数 (Heat Ratio) ξ 来表示，即为制热量 Q_h 与输入热能 Q_g 的比值

$$\xi = \frac{Q_h}{Q_g} \quad (1-5)$$

2. 季节制热性能系数

由于热泵的经济性不仅与热泵本身的设计和制造情况有关，还与热泵运行时环境温度有关，而环境温度又是随地区及季节的不同而变化的。为了进一步评价热泵系统在整个采暖季节运行时的热力经济性，就要用到热泵的制热季节性能系数 *HSPF* (Heating Seasonal Performance Factor)。*HSPF* 可表示为

$$HSPF = \frac{\text{供热季节总的供热量}}{\text{供热季节热泵消耗的总能量} + \text{供热季节辅助加热的耗能量}} \quad (1-6)$$

美国能源部 (DOE) 制定的测定集中式空调机能耗的统一试验方法中规定，用 *HSPF* 表示热泵的经济性。美国能源部和美国空调制冷学会 (ARI) 还提出了估算 *HSPF* 值的温度频段方法。

3. 热泵的焓效率

由热力学定律可知，如果实际热泵循环越接近理想热泵循环，则实际热泵的不可逆损失越小。焓效率能够准确而又定量地反映出热泵热力过程的不可逆性，可以对各种工况下的热泵循环的热力完善性作出统一的评价。热泵的焓效率定义为

$$\eta_{ex} = \frac{\text{热泵输出的焓}}{\text{输入热泵的焓}} \quad (1-7)$$

当电驱动热泵的制热量为 Q_h 时，热泵的输出焓为 $\left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)Q_h$ ，输入功率 P 的焓还是等于 P 值。因此有

$$\eta_{ex} = \frac{\left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)Q_h}{P} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)\frac{Q_h}{P} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)COP_h \quad (1-8)$$

热泵的焓效率越高说明热泵循环过程中的焓损失越小，热力完善程度越好。用式 (1-8) 就可以说明电阻加热设备比热泵性能差的理由。电阻加热设备得到的热量就是输入的电能， $Q_h = P$ ， $\eta_{ex} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)$ ；热泵工作时， $Q_h > P$ ， $COP_h >$

1， $\eta_{ex} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)COP_h$ 。结论是电阻加热设备的焓效率比热泵的焓效率低。也就

是说电阻加热设备损耗大，电能转变为热能的过程中有一部分转变成了焓，损失了做功的能力。

1.3 热泵的低位热源

1.3.1 空气

空气是热泵空调的主要低位热源之一。而且空气源热泵装置的安装和使用也比较方便，目前的产品主要是家用热泵空调器、商用单元式热泵空调机组和风冷热泵冷热水机组。用空气作为热泵的低位热源时也可利用来自建筑物内部排出的热空气。当建筑物内某些生产、照明设备的散热量较多，具有足够的发热量需排除时，此时可将这些热量作为热泵的低位热源加以利用。这样不仅可以减少加热新风的热负荷，同时与采用室外空气作为低位热源相比还能提高制热系数。

国外常用“采暖度日”（Heating Degree Day）数来反映该地区冬季供暖的需求。采暖度日（HDD）是采暖期间室温与室外空气日平均温度之差的累计值。日本学者提出，当采暖度日数 < 3000 时用空气源热泵是可行的。我国除寒冷地带以外，很大一部分地区的大气温度是可以满足热泵制热工况的要求的。按我国《建筑气候区划标准》（GB 50178—93），全国分为7个一级区，如图1-4所示。其中Ⅱ区1月平均气温为 $-10 \sim 0^{\circ}\text{C}$ ，年平均气温低于 5°C 的日数为 $145 \sim 90\text{d}$ ；Ⅲ区1月平均气温为 $0 \sim 10^{\circ}\text{C}$ ，年平均气温低于 5°C 的日数为 $90 \sim 0\text{d}$ ；Ⅴ区1月平均气温为 $0 \sim 13^{\circ}\text{C}$ ，年平均气温低于 5°C 的日数为 $0 \sim 90\text{d}$ 。因此，在我国广大地区以室外空气作为热泵的低位热源是合理的。近年来的热泵应用情况证明，在我国长江流域中下游地区采用空气热源是成功的。

空气源热泵也有其局限性。首先是要考虑补充热源的问题。当室外温度降低时，空调热负荷会随大气温度的降低而增加，但热泵的制热系数却相反地随着大气温度的降低而下降，热泵的供热能力就愈低。为了弥补热泵的这种供需不平衡现象，需要用其他辅助热源补充加热量。其次是要解决除霜问题。冬季空气温度很低时，空气源热泵的室外换热器表面温度低于 0°C 且低于空气的露点温度时，空气中的水分就会在换热器表面凝结成霜，致使空气源热泵的制热系数和运行的可靠性降低。空气源热泵需要定期除霜，这不仅消耗大量的能量而且影响空调系统正常运行。第三是要注意噪声问题。由于空气的比热容小，为获得足够的热量，其蒸发器所需的风量较大，因而风机的容量增大，致使空气源热泵装置的噪声较大。另外，在沿海地区使用的热泵，其室外换热器的肋片选材以铜片为好，并应作专门的防蚀镀层，以减少含有腐蚀性成分的空气造成的损害。

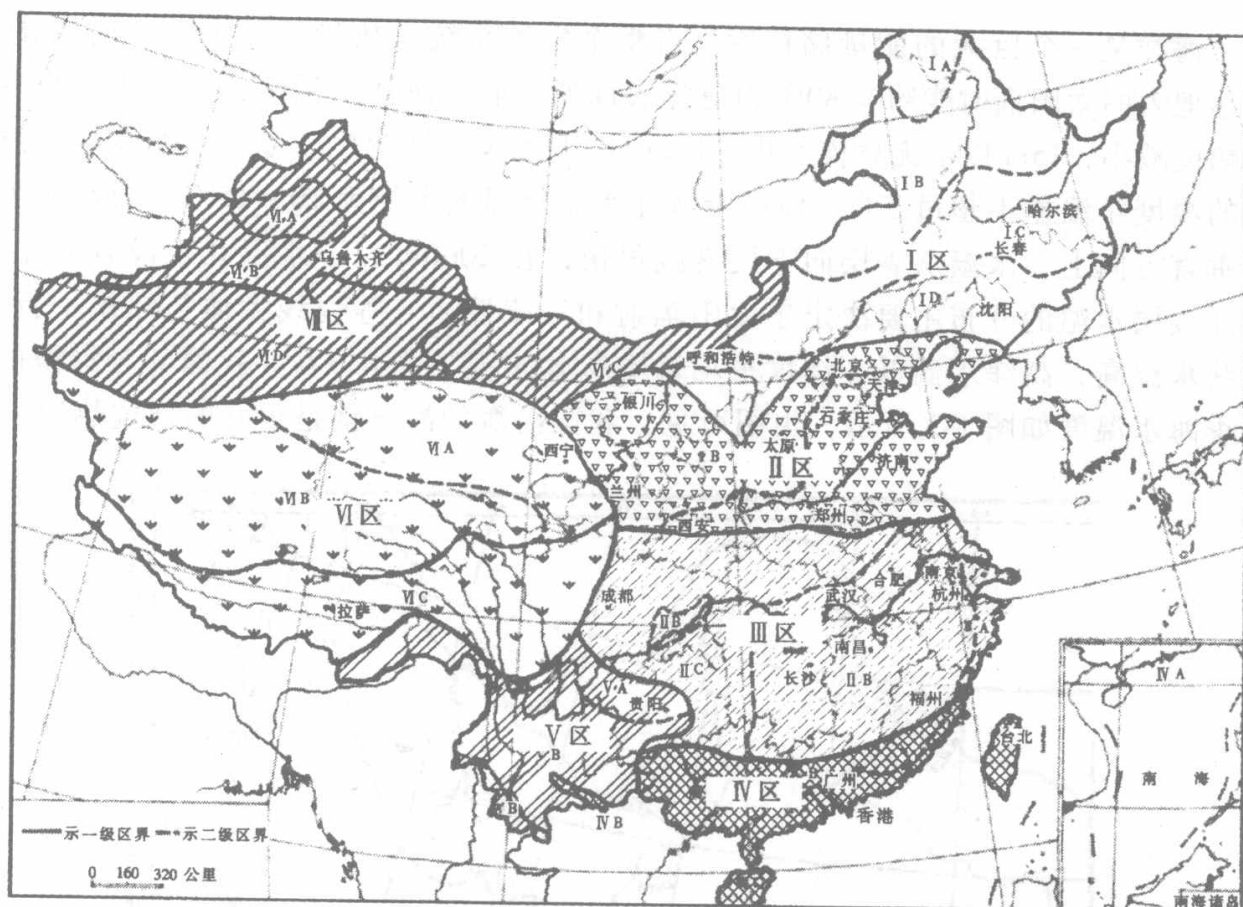


图 1-4 我国的建筑气候区划图

1.3.2 水

地表水（江河水、湖水、海水等）、地下水（深井水、泉水、地热水等）、工业和生活废水都可用作热泵的低位热源。水作为热源的优点有两个：一个是水的比热容大、传热性能好，所以换热设备体积紧凑；另一个是水温一般比较稳定，因而热泵的运行工况稳定。利用水作为热泵的低位热源时，要附设取水装置和水处理设施，而且应考虑换热设备和管路系统的腐蚀问题。

1. 地表水

用地表水作为热泵的热源有两种方式。一种方式是用泵将水抽送至热泵机组的蒸发器换热之后返回水源。另一种方式是在地表水水体中设置换热盘管，用管道与热泵机组的蒸发器连接成回路，换热盘管中的媒介水在水泵的驱动下循环经过蒸发器。在采用地表水时，应尽可能减少对河流或湖泊造成的生态影响。

我国的地表水资源丰富，如能用江、河、湖、海的水作为热泵的低位热源，经济效益是很可观的。地表水相对于室外空气可算是高质量低位热源，只要地表水冬季不结冰，均可作为低位热源使用。例如：武汉长江 1 月份的平均水温为 6.7°C ，武汉东湖 1 月份平均水温为 3.1°C ，不存在结冰问题。冬季水温比空气温度明显稳定，有利于热泵稳定运行。