

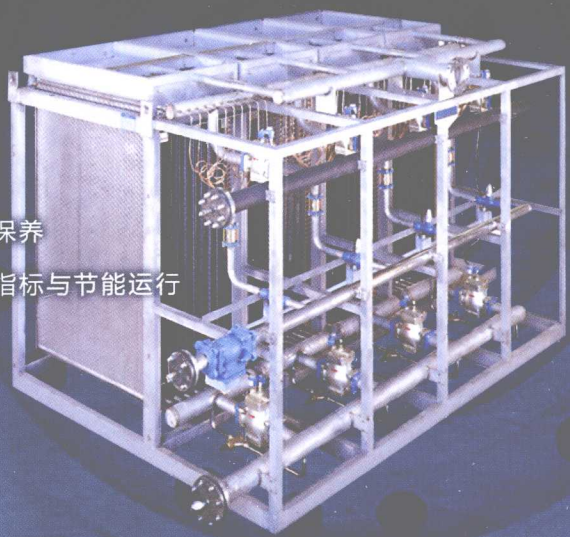
工业设备

节能技术丛书

热泵与中央空调 节能技术

陈万仁 王保东 等编著

热泵与制冷基础理论
蒸气压缩式热泵与制冷循环形式
热泵与制冷装置仿真优化设计
热泵空调系统中主机设备节能技术
蓄能空调节能技术
太阳能制冷与热泵空调节能技术
水源热泵节能技术
空气源热泵节能技术
热泵中央空调系统的节能运行与保养
热泵中央空调系统技术经济评价指标与节能运行



化学工业出版社

工业设备

节能技术丛书

TH38
C585

300

热泵与中央空调 节能技术

陈万仁 王保东 等编著

TH38
C585



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是“工业设备节能技术丛书”的一个分册，全书共分10章，包括热泵与制冷基础理论、主机优化技术、工程实施技术、节能管理与评价四个部分，在对常规技术介绍的同时，重点对热泵和中央空调领域的实用新技术进行了讲解，并特别介绍了自复叠压缩、三维设计在主机设计中的应用、数码涡旋、复合蓄能技术、蓄能除湿技术等新技术。本书内容“系统、实用”，适应工程技术人员和管理人员的需求。

本书可供热泵和中央空调产品开发、工程设计和工程管理人员使用，也可供从事节能工作的相关人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热泵与中央空调节能技术/陈万仁、王保东等编著. —北京:
化学工业出版社, 2010.4
(工业设备节能技术丛书)
ISBN 978-7-122-07784-4

I. 热… II. ①陈…②王… III. ①热泵-空气调节器-节能
②集中空气调节系统-节能 IV. ①TU831.3②TB657.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 027750 号

责任编辑: 戴燕红
责任校对: 顾淑云

文字编辑: 丁建华
装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京市彩桥印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 15½ 字数 457 千字 2010 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究



能源是国民经济发展的动力，是发展生产力和提高人民生活水平的物质基础。“能源开发与节约并重，把节能放在优先地位”是我国基本的能源政策，“节约优先，效率为本”是解决我国能源问题的根本途径。从常规能源的总量来看，我国是世界上拥有丰富能源资源的国家之一，位居世界第三。但我国人口众多，按人均计算的可开采储量低于世界平均水平，仅相当于世界平均数的 1/2，美国的 1/10。可见，我国的能源资源并不丰富。

我国既是能源生产大国，也是能源消费大国。当前，在我国工业生产过程中，许多企业节能技术落后，设备能率较低，工艺流程不尽合理，节能管理不够完善，从而造成工业生产能源消耗巨大、能源利用率较低，由此而引起的环境污染和生态破坏问题比较严重。国家在“十一五”规划中明确提出，“十一五”期间要比“十五”期末单位 GDP 能耗降低 20%。为了实现“十一五”的节能目标，必须大力推广节能技术，提高能源的利用率，从而降低生产成本，也相应地减少能源利用过程中对环境造成的破坏。

结合我国工业生产系统的主要耗能环节和设备，郑州大学节能技术研究中心组织编写了这套《工业设备节能技术丛书》。丛书计划出版以下 6 个分册：(1) 工业及电厂锅炉节能技术；(2) 工业窑炉节能技术；(3) 高效换热器及其节能应用；(4) 泵与风机节能技术；(5) 热泵与中央空调节能技术；(6) 照明设备节能技术。本套丛书在全面总结国内大量现有节能技术经验和消化吸收国外先进的能源利用技术的基础上，阐述了工业生产中主要耗能设备的结构、原理、特点及其节能技术，并给出了工程实际应用的实例，可以指导工程技术人员掌握常用的节能技术和提高用能效率，以此来促进节能技术的发展和普及应用，希望为我国“节能减排”工作作出贡献。

本套丛书主要面向能源、动力、电力、制冷、冶金、化工、轻工、纺织、建材、机电等广大工业部门，可为从事热能工程规划、热电、锅炉房、换热、动力、制冷空调、燃烧、照明等各级能源管理机构的管理人员、工业企业的节能管理人员和工程技术人员开展节能降耗技术管理和实施工作提供技术支撑，也可作为热能与动力工程类及相关专业学生的专业选修课或专业课，同时也可作为工科其他专业学生普及节能技术的相关知识，并可供动力工程及工程热物理学科的教师参考。特别是该套丛书从工程的角度来讲解节能问题，对当前全社会促进节能减排工作具有十分重要的意义。

浙江大学能源清洁利用国家重点实验室

2009 年 6 月 15 日

前言

随着我国国民经济的持续快速发展,能源的供需矛盾日益尖锐,利用可再生能源及提高能源利用率具有重要的意义。地热能、太阳能、风(热)能这些低品位能源的温度与人类生存需求的舒适性环境温度比较接近,采用热泵技术很容易将其转化为居住环境直接利用的能量,并在运行中提高转换效率。在供热、供冷同时又供应生活热水的应用过程中,高效、合理、稳定地利用这些容易再生的低品位能源,对节约能源、提高能源综合利用率都是一种科学的能源利用观念。提高热泵与中央空调系统的能源综合利用率,科学、客观、方便地对初步设计方案和运行结果进行相应的科学评估与评价是产品开发、工程设计、过程管理人员一直努力追求的目标。近几年,热泵技术在中央空调领域得到了空前的发展和运用,涌现出了许多运行稳定可靠、节能效果明显的实用技术。结合近几年我们的科研成果和工程实践经验,并积极了解和总结热泵与中央空调领域的新技术和研究成果,从产品开发、生产、工程实践服务出发编写此书,力求所述技术实用、解决实际问题、拓宽管理与工程技术人员的知识面,有助于从事热泵产品开发、工程设计和工程管理人员,从事节能工作的人员等积极运用节能技术、热泵技术及中央空调领域的综合新技术。我们衷心希望本书能对读者在热泵及中央空调领域的学习和工作有所启迪和促进。

《热泵与中央空气节能技术》是“工业设备节能技术丛书”的一个分册,全书共分10章,包括基础理论、主机优化技术、工程实施技术、节能管理与评价四个部分,基本涵盖热泵与中央空调技术的各个方面,是热泵与中央空调主机设计、系统设计、主机制造、工程管理、运行管理人员必须具有的系统知识。本书在对常规技术介绍的同时,重点对近几年热泵和中央空调领域的实用新技术进行了讲解,并特别介绍了自复叠压缩、三维设计在主机设计中的应用,以及数码涡旋、复合蓄能技术、蓄能除湿技术等新技术。本书首次公开介绍了作者近几年的研究成果:大地耦合独立循环水环式水源热泵系统、地板辐射采暖VRV热泵中央空调系统、以CAPC为主要评估指标的中央空调能源消耗评估体系等,首次提出了形式节能、优化节能、管理节能等概念,以及三个方面同时实现的系统才是一个节能系统的“系统节能”概念。书中明确阐述了蒸汽压缩式热泵系统整体节能优化方向:提高蒸发温度、降低冷凝温度、尽量减少系统辅机输入功率、力求实现系统的总输入功率能够根据系统冷热负荷的变化呈直线比例变化等。上述新技术、新方法、新思想对丰富热泵与中央空调的技术体系,实现热泵与中央空调系统的节能具有一定的现实意义。全书的特点是:“系统、实用”,适应工程技术人员和管理人员的需求。

郑州大学综合设计研究院陈万仁、郑州大学化工与能源学院王保东负责本书的主要编著和统稿工作。具体编写分工为:郑州大学王保东负责编写第1、2、3章,郑州牧业工程高等专科学校杜娟丽负责编写第4章和第10章的10.5节,河南科技大学梁坤峰负责编写第5、6章,郑州大学综合设计研究院陈万仁负责编写第7、8、9章及第10章的其余小节。另外,郑州瑞邦数码地暖科技有限公司的赵新杰、董俊杰、何欣等参加了部分章节的资料整理和编写工作。郑州大学节能技术研究中心吴金星教授对全书进行了认真细致的审阅,并提出了具体的修改意见和建议。在编写过程中,郑州大学魏新利教授、王定标教授提出了很好的修改意见,在此一并表示感谢。在编写过程中参阅了大量的国内外专著、教材和期刊论文,在此谨向这些文献的著者和相关单位表示诚挚的谢意。本书的出版得到郑州大学化工与能源学院及河南瑞邦能源科技开发有限公司的支持。

本书的编写内容涉及面广,加上编者水平所限,不当之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编著者
2010年1月

目 录

1 热泵与制冷基础理论	1
1.1 热泵与制冷的历史	1
1.1.1 制冷技术的历史	1
1.1.2 热泵技术的历史	1
1.1.3 土壤源热泵技术的历史	2
1.1.4 水源热泵技术的历史	2
1.1.5 空气源热泵和空调冷凝热回收	3
1.2 热泵与制冷理论循环	3
1.2.1 液体汽化热泵与制冷	4
1.2.2 气体膨胀制冷	6
1.2.3 涡流管制冷	7
1.2.4 热电制冷	7
1.2.5 其他制冷技术	8
1.2.6 制冷方法的选择	8
1.3 压缩式热泵与制冷循环的设计参数	10
1.3.1 冷凝温度的确定	10
1.3.2 蒸发温度的确定	11
1.3.3 压缩机吸气温度的确定	12
1.3.4 节流前液态工质过冷温度的确定	13
参考文献	13
2 蒸气压缩式热泵与制冷循环形式	15
2.1 单级蒸气压缩式热泵与制冷的循环形式	15
2.1.1 过冷循环	15
2.1.2 过热循环	16
2.1.3 回热循环	17
2.2 双级压缩热泵和制冷循环	18
2.2.1 采用双级压缩热泵和制冷循环的目的	18
2.2.2 双级压缩热泵和制冷循环	19
2.2.3 双级压缩热泵和制冷循环中间压力的确定	19
2.3 复叠式压缩热泵和制冷循环	21
2.3.1 复叠式压缩热泵和制冷循环系统的组成	21
2.3.2 复叠式压缩制冷循环参数和工质的确定	21
2.3.3 自复叠式压缩制冷循环的热力计算	22
2.4 压缩式热泵与制冷循环中工质的选择	23
2.4.1 工质选择的原则	23
2.4.2 工质对热泵和制冷系统的经济性影响	26
2.4.3 非共沸混合工质对热泵和制冷系统的经济性影响	26
参考文献	27

3 热泵与制冷装置仿真优化设计	28
3.1 最优化方法简介	28
3.1.1 最优化问题的数学模型	28
3.1.2 最优化问题的求解方法	30
3.1.3 多目标优化设计方法	33
3.1.4 现代优化计算方法	36
3.2 热泵和制冷装置建模仿真	36
3.2.1 压缩机模型优化	37
3.2.2 毛细管	38
3.2.3 冷凝器模型	38
3.2.4 蒸发器模型	39
3.2.5 围护结构动态热负荷模型	39
3.2.6 工质物性计算	40
3.2.7 单级蒸气压缩制冷系统的仿真算法	45
3.3 热泵和制冷装置仿真优化设计的实例	47
3.3.1 三维设计软件的应用	47
3.3.2 仿真优化软件的应用实例	53
参考文献	54
4 热泵空调系统中主机设备节能技术	55
4.1 制冷压缩机的型式及选型	55
4.1.1 制冷压缩机的型式	55
4.1.2 压缩机的选型	61
4.2 制冷压缩机的能量调节	61
4.2.1 活塞式制冷压缩机的能量调节	61
4.2.2 滚动转子式制冷压缩机的能量调节	63
4.2.3 涡旋式制冷压缩机的调节方式	63
4.2.4 螺杆式制冷压缩机的能量调节	65
4.2.5 离心式制冷压缩机的能量调节	66
4.3 制冷压缩机的节能	66
4.4 冷凝器的选择与节能	68
4.4.1 冷凝器的类型	68
4.4.2 冷凝器的节能	70
4.5 蒸发器的选择与节能	71
4.5.1 蒸发器的类型	71
4.5.2 蒸发器的节能	72
4.6 节流装置的选择与节能	73
4.7 整机设备的节能优化与选择	75
4.7.1 各种类型的冷水机组	75
4.7.2 冷水机组的选择	77
参考文献	77
5 蓄能空调节能技术	78
5.1 蓄能空调技术概述	78
5.2 水蓄冷空调系统	79
5.3 冰蓄冷空调系统	82
5.3.1 冰蓄冷设备	82

5.3.2	冰蓄冷空调系统概述	88
5.3.3	复合冰蓄冷空调系统	91
5.4	其他蓄能空调系统	98
5.4.1	共晶盐蓄能空调系统	98
5.4.2	蓄能除湿空调系统	99
	参考文献	100
6	太阳能制冷与热泵空调节能技术	103
6.1	太阳能概述	103
6.2	太阳能制冷空调技术	103
6.2.1	太阳能光热转换制冷空调	104
6.2.2	太阳能光电转化制冷空调	113
6.2.3	太阳能光化转换制冷空调	113
6.3	太阳能热泵空调技术	114
6.3.1	太阳能热泵热水系统	114
6.3.2	太阳能热泵辐射供暖系统	119
6.3.3	太阳能-空气双热源式热泵及热水系统	121
6.4	工程实例	122
	参考文献	124
7	水源热泵节能技术	126
7.1	水源热泵的工作原理与组成	126
7.2	水源热泵的热源及热源形式选择	128
7.2.1	水源热泵的热源形式	128
7.2.2	水源热泵的常用型式	128
7.2.3	热源及热泵形式选择	130
7.3	水井式采热装置	132
7.3.1	概述	132
7.3.2	水资源管理部门的许可	132
7.3.3	水井装置的技术要点	133
7.3.4	水井的老化及其防止措施	135
7.3.5	回灌水井的清洗措施	137
7.3.6	井水需求量的计算与水井开凿数量的计算	137
7.4	地表水式采热装置	138
7.5	地埋管式采热装置	138
7.5.1	土壤的供热能力	138
7.5.2	土壤的换热过程	139
7.5.3	土壤热交换器型式	139
7.5.4	布管强度计算方法	141
7.5.5	布管管径与管内流速的选择	141
7.5.6	不同埋管形式的适用范围	142
7.5.7	高效节能的独立循环大地耦合水环式水源热泵系统及其工程实例分析	143
7.6	水源热泵系统综合优化技术	146
7.7	水源热泵系统存在问题与对策	147
7.7.1	水源热泵大规模应用可能引发的生态问题	147
7.7.2	环保制冷剂的研究与使用	148
7.7.3	海水热泵需要解决的技术问题	148

7.7.4	对水源热泵系统的研究型设计	148
7.7.5	新型高效热泵技术开发	148
7.7.6	水源热泵技术发展建议	148
7.8	水源热泵的节能工程应用实例	149
7.8.1	工程实例 1	149
7.8.2	工程实例 2	151
7.8.3	工程实例 3	152
7.8.4	工程实例 4	153
	参考文献	154
8	空气源热泵节能技术	156
8.1	空气源热泵的工作原理与组成	156
8.2	空气源热泵的热源及其相关问题探讨	157
8.2.1	空气源热交换器	157
8.2.2	空气源热泵热源	158
8.2.3	空气源热泵的型式	159
8.2.4	空气源热泵中央空调系统的特点	160
8.2.5	空气源热泵中央空调主机系统的节能方向	161
8.2.6	空气源热泵中央空调主机系统的其他问题	162
8.3	VRV 多联式空气源热泵中央空调系统	163
8.3.1	多联式空气源热泵中央空调系统的特点	163
8.3.2	VRV 多联式空气源热泵空调系统的类型	164
8.3.3	多联式热泵空调系统的控制系统	166
8.3.4	多联式热泵空调系统的最大管长与最大高差	166
8.3.5	VRV 空气源热泵中央空调系统技术及其发展	167
8.3.6	VRV 热泵中央空调系统的几个关键技术	167
8.4	采用地板辐射采暖的 VRV 空气源热泵中央空调系统	168
8.4.1	地板辐射采暖 VRV 热泵系统的组成	168
8.4.2	地板辐射采暖 VRV 热泵系统的特点	169
8.4.3	地板辐射采暖 VRV 热泵系统的类型	169
8.4.4	节能环保舒适的地板辐射采暖 VRV 热泵中央空调系统	170
8.4.5	地板辐射采暖 VRV 热泵中央空调系统的优势	172
8.4.6	地板辐射采暖 VRV 热泵中央空调系统的选用及安装方法	173
8.5	空气源热泵冷热水中央空调系统	173
8.5.1	系统特点	173
8.5.2	空气源热泵冷热水机组组成及主要部件型式	174
8.5.3	空气源冷热水机组选用要点	174
8.5.4	空气源热泵冷热水机组的末端系统	174
8.5.5	空气源热泵冷热水机组制冷运行的热回收技术	175
8.6	空气源-水环热泵空调系统	175
8.6.1	空气源-水环热泵空调系统的工作原理	175
8.6.2	空气源-水环热泵空调系统运行的适用性	176
8.6.3	空气源-水环热泵空调系统运行的经济性评价	176
8.6.4	空气源-水环热泵空调系统运行的特点	177
8.7	空气源热泵热水器	177
8.7.1	空气源热泵热水器的特点	177
8.7.2	空气源热泵热水器的应用展望	178

8.8	空气源热泵系统综合优化技术	178
8.8.1	空气源热泵系统节能关键技术	178
8.8.2	空气源热泵系统优化技术	179
8.8.3	空气源热泵系统优化发展方向	179
	参考文献	180
9	热泵中央空调系统的节能运行与保养	181
9.1	概述	181
9.2	热泵中央空调系统的维护保养事项	181
9.2.1	正式运行前的全面检查事项	181
9.2.2	运行中的定期维护	182
9.2.3	热泵中央空调系统的开停机顺序	182
9.2.4	节能措施	183
9.3	热泵中央空调系统主机的维护与保养	184
9.3.1	系统与机组运行参数的选择与确定	184
9.3.2	压缩系统的气密性试验	186
9.4	热泵机组的维修	187
9.4.1	机组类型与常见故障	187
9.4.2	机组维修事项	188
9.4.3	具体故障分析与维修方法	188
9.5	水系统的故障分析与保养	191
9.5.1	水垢的形成与去除	191
9.5.2	冷媒水系统的腐蚀与防治	191
9.5.3	井水系统泥沙的去除与防治	191
9.5.4	水流方面的故障原因与排除	191
9.5.5	水的输送设备的故障种类与排除	192
9.5.6	冷凝水系统的故障种类与排除	192
9.5.7	空气源热回收式水环热泵系统的运行与保养	192
9.5.8	中央空调系统室内空气品质与清洗消毒保养	192
9.5.9	空调维护技术人员要求	193
9.6	特殊场所热泵中央空调系统的运行与保养	193
9.6.1	医院中央空调的运行与保养	193
9.6.2	电子设备机房中央空调的运行与保养	194
9.7	热泵系统特、重大问题的预防与处理	195
9.7.1	蒸发器和冷凝器内漏	196
9.7.2	末端阀门焊缝开裂	197
9.7.3	水井塌陷	197
9.8	热泵中央空调系统稳定节能运行的有效管理	197
9.8.1	热泵中央空调系统的常见问题	197
9.8.2	建设过程与运行过程的管理	198
9.8.3	稳定节能运行的计划管理	198
	参考文献	198
10	热泵中央空调系统技术经济指标与节能运行	199
10.1	中央空调系统技术经济评价的意义和作用	199
10.2	中央空调系统技术经济评价指标综述	200
10.2.1	节能评价指数	200

10.2.2	空气调节中的能量利用评价指数	200
10.3	中央空调系统较为合理的评价指标——CAPC和CFE	203
10.4	以CAPC和CFE为主要评价指标的技术经济评价体系	206
10.4.1	评价指标	206
10.4.2	评价运用的基础数据	206
10.4.3	评价原则	212
10.4.4	评价体系	212
10.4.5	评价结果的分析与结论的获得	213
10.4.6	用CAPC和CFE对典型中央空调系统案例的评价分析	213
10.5	热泵中央空调系统节能运行	218
10.5.1	建筑物的节能	219
10.5.2	热泵中央空调系统的节能	222
10.6	节能标准化与节能运行管理的难点重点	234
10.6.1	建筑节能标准化	234
10.6.2	节能运行管理的难点重点及解决办法	235
参考文献		237

热泵与制冷基础理论

1.1 热泵与制冷的历史

热泵是用人工的方法将低温区无用的热量转移到高温区成为有用的热量，制冷采用同样的原理和设备，用人工的方法将低温区的热量转移到高温区是为了获得低于环境或满足生产上的低温需求，因此热泵与制冷有不同的使用目的，所以它们的热力参数和对应的结构强度也不一样。

制冷与热泵研究的基础是卡诺循环。从 19 世纪中期，制冷与热泵作为一门工程科学开始发展起来。

1.1.1 制冷技术的历史

人们很早已懂得了冷利用和简单的人工制冷，如用地窖作冷贮室、用泼水蒸发来降暑等有 5000 年之久的历史。

1755 年，爱丁堡的化学教授库仑（William Cullen）利用乙醚蒸发使水结冰。他的学生布莱克（Black）从本质上解释了融化和汽化现象，导出了潜热的概念，并发明了冰量热器，标志着现代制冷技术的开始。

1834 年，在伦敦工作的美国人珀金斯（Perkins）造出了第一台以乙醚为工质的蒸气压缩式热泵和制冷机，并正式申请了英国第 6662 号专利，成为后来蒸气压缩式热泵和制冷机的雏形。1844 年，美国医生高里（Gorrie）用封闭循环的空气制冷机为发烧病患者建立了一座空调站，标志着空气制冷机开始应用。

从 1930 年起的一些技术创新和进步改变了人工制冷的进程，例如，米杰里（Midgley）发现氟利昂工质并应用与压缩式热泵和制冷机及混合工质的应用；全封闭压缩机的研制成功（美国通用电器公司）等。

1.1.2 热泵技术的历史

热泵的工作原理和设备组成虽然与制冷机相同，但是热泵的发展与制冷机相比非常困难，因为人工制冷只能唯一地依靠制冷机，而人工供热却有许多途径，并且它们的结构和使用往往比热泵更为简单。因此在相当长的时间内，热泵的历史几乎没有发展。

1852 年汤姆逊（W. Thomson）教授发表的论文中指出：制冷机也可用于供热。他第一个提出了一个正式的热泵系统，那时称为“热量倍增器”。

1930 年霍尔丹（Haldane）报道了他 1927 年在苏格兰安装与试验的家用热泵，其工质为氨，用空气作热源，供室内采暖及水加热之用。这一装置是现代蒸气压缩式热泵的真正原型。1938~1939 年在瑞士苏黎士议会大厦安装了欧洲第一个大型热泵采暖装置，压缩机用离心机，工质为 R12，以河水为热源，输出热量达 175kW。由此开始，压缩式热泵在欧美得到了发展。

作为热泵重要一支的吸收式热泵，首先是以吸收式制冷循环为基础的第一类吸收式热泵，自

1859年凯利发表了有关氨水吸收式制冷机专利后，便存在了应用的可能性。1920年阿尔汤克奇(E. Altenkirch)正式提出了吸收式热泵的理论。1945年美国开利公司研制成了溴化锂-水吸收式制冷机，并为第二类吸收式热泵的发展打下了基础。20世纪70年代的石油危机促使吸收式热泵的研究和应用得到了很大的发展，且重点是开发第二类吸收式热泵与寻求新工质对，以期能利用工业废热向生产过程提供热水与蒸汽。

1.1.3 土壤源热泵技术的历史

土壤源热泵的研究在国外大致可分为三个大阶段：

第一阶段，1912年，瑞士人佐伊利(H. Zoelly)提出了利用土壤作为热泵热源的专利设想，这一阶段主要是对土壤源热泵进行了一系列基础性的实验研究；

第二阶段，1973年，由于“能源危机”的出现，美国和欧洲又展开了对土壤源热泵大规模的实验与理论研究，美国从1977年开始，重新开始了对土壤源热泵的大规模研究，1978年，BNL(Brookhaven National Laboratory)制定了土壤源热泵的研究计划，调查其作为空调系统的应用情况，并发表了一些研究成果，主要有对土壤源热泵实际运行的计算机模拟等；

第三阶段，进入20世纪90年代，土壤源热泵的应用与发展进入了一个全新快速发展的时期，土壤源热泵在欧洲和北美迅速普及，在中欧和北欧地区，土壤源热泵已成为家用热泵的主要热源；在美国，土壤源热泵因其节能性、舒适性正在大力推广；在加拿大，从1990年到1996年家用的土壤源热泵以每年20%的递增销量而处于各种热泵系统的首位。

我国在开展土壤源热泵系统的研究与应用方面起步较晚，但到2000年左右，在各种因素的共同作用下，成为一个非常“热门”的研究课题，虽然这样的热门是处在一个整体水平相对低下的大环境之下。

国内最早的研究开始于1989年，当时山东青岛建筑工程学院在国内建立了第一台土壤源热泵系统的试验台，开始主要从事水平埋管的研究工作，后又完成了竖直埋管换热的研究工作。天津商学院几乎在同一时间开始了对螺旋埋管换热器的研究，但研究工作后来没有继续。华中理工大学从20世纪90年代开始，进行了水平单管的传热研究，后来又进行了地下浅层井水用于夏季供冷和冬季采暖的研究，但现在这方面的工作也已经停止。同济大学的张旭等人从1999年开始了为期多年的一项土壤-太阳负荷热源的研究，重点针对长江中下游地区含水率较高的土壤的蓄放热特性进行测试。湖南大学从1998年开始也进行了多层水平埋管的换热特性研究。1999年开始，在国家自然科学基金的资助下对浅埋竖直管换热器的采暖、供热特性进行了研究。此外，清华大学、天津大学、山东建筑工程学院及中科院广州能源研究所等高校和科研单位也对土壤源热泵进行过研究，并取得了一定的成果。

1.1.4 水源热泵技术的历史

在国外，早在1934年，美国的通用公司就在纽约州的塞勒姆市的大西洋城电力公司安装了一套地下水热泵系统。随后的几年中，在美国的路易斯安娜州的阿尔吉斯(25℃的地下水，1936年)，纽约州的皮特曼恩市(14℃的地下水，1936年)，康涅狄格州纽黑文市(13℃的地下水，1939年)等城市陆续安装了地下水热泵系统。与美国早期的迅速发展相比，在欧洲的部分国家，将地下井水作为热泵热源这一技术的应用要落后一些。比利时到1979年底，家用热泵系统安装了1000多台，其中地下水热泵系统占17%。法国于1954年在索恩河畔的沙隆安装了一台热输出量为640kW的热泵。荷兰在1974年左右，一批以发电站冷却水为热源及使用地下热源的热泵系统的研究一直在进行着，但是并没有公布相应的数据资料。德国在20世纪50年代，由埃歇尔·维斯公司在其拉文斯堡的工厂的小卖部里安装了一台输出热量为186kW的供热热泵用于空气调节，其热源为9℃的地下水，运行效果良好。20世纪90年代中期，地下水热泵系统在美国和加拿大得到了更广泛的应用。然而对于系统的运行工况设计细则、系统设计以及与传统空调采暖系统的结合等方面仍存在着相当多的问题，也缺乏较深入的研究。

在我国，地下水热泵系统的应用工程近年来已逐渐增多，其中较有代表性的工程有：①由

清华同方人工环境有限公司承担的山东东营市某办公楼的地下水源热泵空调系统, 建筑面积 4500m², 制冷量 271kW, 制热量 290kW, 输入功率 83kW, 采用两口水井同时用作供水井和回灌井; ②由广东国得空调冷冻工业有限公司承担的河南济源政府环状形楼的地下水源热泵空调系统, 建筑面积 11800m², 制冷量 1087kW, 制热量 1333kW, 耗电量 264kW, 采用两口供水井, 四口自流回灌井; ③由清华同方人工环境有限公司承担的空军丰台办公楼、招待所采用了地下水源热泵空调系统的改造方案, 约 15000m² 建筑面积的招待所夏季空调, 约 1000m² 的家属住宅楼和办公楼的供暖, 同时供应生活热水, 冷量约 1400kW, 热量约 1500kW, 生活热水约 265kW, 该冷热量包括由于燃煤的取消, 利用原有煤厂、渣厂的位置拟建一栋 8000m² 的办公楼, 采用 3 口供水井, 2 口回灌井。

1.1.5 空气源热泵和空调冷凝热回收

早在 1965 年, Healy 和 Wetherington 就首先提出了将居住建筑空调冷凝热作为免费的热源进行热水供应的可能性, 随后用实验装置验证了他们的计算结果, 发现热回收系统平均每年可节约 70% 的热水供应量, 在 5~10 月之间可节约 90% 的热水供应量。热回收的研究过程中, 国外学者将研究的重点集中在对制冷压缩机显热回收技术上。对此研究较有代表性的是 W. M. Ying 和 K. C. Toh, 他们分别对于家用空调器冷凝热回收技术作了实验和模拟分析。结果表明: 热回收对空调的性能影响不大, 新设备的综合能源利用系数有很大提高, 回收的冷凝热量基本上可以满足家用热水供应用能需要。对于夏季用热量大的场合下, 还需要配备辅助加热设备。

韩国的 Minsung Kim 等对热泵热水器系统的瞬态热性能进行了研究, 对压缩机和水箱使用集总系统法, 对热交换器采用有限元方法。结论表明: 储存水箱越小, 达到水箱温度设定点的时间和热泵制热效率越小。水箱容量过小, 水箱内水温在热泵系统达到稳态之前很快达到设定点, 因此热泵系统效率较小, 水箱容量大, 效率和运行时间均增大。

南非 Potchestroom 大学的 P. G. Rousseau 等人对热泵机组与水箱的连接方式和控制模式进行了探讨以期提高热泵运行时的效率, 并用不同容量的水箱体积和热泵制热量进行计算机模拟, 得出水箱内部水温分布情况。Rand Afrikaans 大学的 J. P. Meyer 和 P. J. Raubenheimer 等人通过实验研究了水箱内水温分层现象。回水管位置居于水箱中部, 实验表明: 回水管最佳流速为每天水箱容积的 3 倍, 此时水箱的温度梯度分布最好。如果超过 5 倍的水箱容积, 则由于回流速度太高而导致水温梯度的不连续性。

国内学者提出了几种夏季空调通过回收空调冷凝热的设想: 而后清华大学又提出了夏季空调通过回收冷凝热来加热生活热水的系统, 但该系统附加设备较多, 系统较为复杂; 中国科技大学又提出了空调-热水器一体机的设想, 并对构建的样机进行了性能模拟和实验分析。结果表明一体机节能效果明显, 制冷、制热同时协调进行时, 其系统能效比可达 3.5; 郑州大学在现有冷暖家用空调的基础上改造成空调-热水器一体机, 已在某理发店使用三年。目前美的、格力都有相应产品上市。

与制冷机相比, 热泵的发展受制于能源价格与技术条件, 所以其发展历史较为曲折, 有高潮有低潮, 目前在全球能源危机的大形势下, 热泵发展的前景肯定是光明的。

1.2 热泵与制冷理论循环

在设计选择制冷装置时, 第一个问题就是确定热泵与制冷的方式。热泵与制冷的方式很多, 由于热泵与制冷有同样的原理, 下面主要以制冷方面来叙述, 目前人工制冷主要有四种方法, 即液体汽化制冷、气体膨胀制冷、涡流管制冷和热电制冷。每种制冷方法各有其特点。其中液体汽化制冷的应用最为广泛, 它是利用液体汽化时的吸热效应而实现制冷的。蒸气压缩式、蒸气喷射式和吸附式制冷都属于液体汽化制冷方式, 显然, 只有针对具体的制冷对象, 选择合理的制冷方

法,才能满足制冷的要求,进而实现制冷中的优化设计,降低运行成本,达到良好的经济效益。因此,应深入认识和理解各种制冷方法。

1.2.1 液体汽化热泵与制冷

在密闭容器内部时,液体会汽化形成蒸气。如果容器内除了液体及液体本身的蒸气外不存在任何其他气体,那么液体和液体本身的蒸气在某一压力下将达到平衡,这种状态称饱和状态。此时容器中的压力称为饱和压力;温度称为饱和温度,饱和压力随着温度的升高而升高。若从容器中抽出一部分饱和和蒸气,则必然要汽化一部分液体变成蒸气来维持平衡。一旦液体汽化,就需要吸收热量,则该热量称为汽化潜热。液体汽化所吸收的热量来自被冷却对象,因而使被冷却对象温度下降,或者使它维持在环境温度以下的某一低温。

上述过程若连续进行,就必须不间断地从容器中抽出蒸气,再不间断地将液体补充进容器里去,通过一定的方法将蒸气抽出,并使它凝结成液体后再回到容器中,就能满足这一要求。蒸气的冷凝应该是在常温下实现的,制冷工质将在低温、低压下蒸发,产生制冷效应,又在常温、高压下冷凝,向环境温度的冷却介质排放出热量。因此,液体汽化制冷循环由工质低压下汽化、蒸气升压、高压气液化和高压液体降压四个基本过程组成。

蒸气压缩式热泵和制冷、吸收式制冷、蒸气喷射式制冷和吸附式制冷都具备上述四个基本过程。

(1) 蒸气压缩式热泵与制冷

如图 1-1 所示,单级蒸气压缩式热泵和制冷系统至少需要有压缩机、冷凝器、节流阀、蒸发器

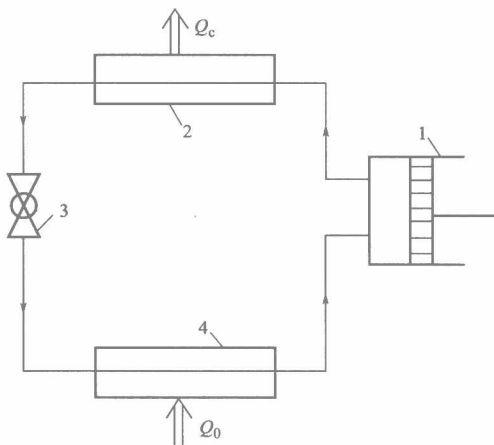


图 1-1 单级蒸气压缩式热泵和制冷系统
1—压缩机; 2—冷凝器; 3—节流阀; 4—蒸发器

四个基本部件组成。用管道把它们按顺序连接,形成一个封闭系统,工质在系统内循环流动,并且工质的状态不断地发生变化,而且与外界进行热量的交换,从而实现制冷。它的工作过程是:压缩机从蒸发器内吸入低温低压的工质蒸气,吸入的工质蒸气经过压缩,其温度、压力升高,高温高压工质蒸气排入冷凝器后,压力保持不变,被水或空气冷却,放出热量,温度降低,并凝结成常温高压工质液体,从冷凝器排出;常温高压工质液体经过节流阀时,部分工质液体汽化,吸收汽化潜热,使其本身的温度也相应降低,成为低温低压下的两相湿蒸气,进入蒸发器;在蒸发器中,低温工质液体在压力不变的情况下,吸收被冷却介质(空气、水或盐水等)的热量而汽化,形成的低压低温蒸气又被压缩机吸走,如此不断循环。

由上面的循环分析可知,工质在系统内经过压缩、冷凝、节流、蒸发四个状态变化过程。压缩机起着压缩和输送工质蒸气的作用,它是整个系统的“心脏”;节流阀对工质起节流降压作用,还同时调节进入蒸发器的工质流量;蒸发器是产生和输出冷量的换热设备,冷凝器是输出热量的换热设备,它将工质从蒸发器中吸取的热量,以及由压缩功而转换的热量一起传给冷却介质。由于压缩机消耗的功起到了补偿作用,因此才能实现由工质将低温物体的热量不断地传递给高温物体,如此周而复始,实现了热泵和制冷循环。

在实际的单级蒸气压缩式热泵和制冷装置中,除有上述四个主要设备外,还有一些干燥过滤器、汽液分离器等辅助设备。蒸气压缩式热泵和制冷机是得到最广泛应用的制冷机,因此它是节能的重点对象之一。

蒸气压缩式热泵和制冷从 19 世纪 70 年代开始发展,至今已有 100 多年的历史,蒸气压缩式热泵和制冷是目前国内外应用最广泛的制冷方式。其主要的特点如下。

① 制冷温度范围广。低至 -150°C 均可实现。可根据不同的温度要求选择不同的工质和压缩级数。表 1-1 列出不同压缩机级数和不同的工质所能达到的最低蒸发温度。

表 1-1 蒸汽压缩式热泵和制冷能达到的最低蒸发温度

单位： $^{\circ}\text{C}$

压缩级数	工质	蒸发温度			压缩级数	工质	蒸发温度		
		30	35	40			30	35	40
单级 (缩比=8)	R717	-25	-22	-20	单级复叠	R22+R13	-85~-90		
	R12	-36	-34	-31					
	R22	-36	-34	-31	单-两级复叠	R22+R13	-110		
	R502	-39	-36	-34					
两级	R717	-65			三级复叠	R22+R13+R14	-110~-140		
	R22	-75							
	R12	-68			单-两级复叠	R22+R13+R14	-110~-140		

② 单机容量范围大。单机制冷量，从最小的一百多瓦到数千千瓦，可以根据需要选择，非常方便。

③ 小容量的设备比较紧凑，应用于空气调节、冰箱、食品冷加工、冷藏、石油、化工等各领域。

④ 效率较高。在冷凝温度 40°C ，蒸发温度 5°C 时，理论制冷系数可达 4.26。

⑤ 当制冷温度低于 -70°C 时，压缩级数增加。机器变得复杂，可靠性低，维护使用麻烦，成本也大大提高。

⑥ 目前使用的工质对环境有污染，常用的氯氟烃 (CFC)、含氢氯氟烃 (HCFC) 工质，对大气臭氧层有破坏作用。但是替代工质也在积极研制中。

(2) 吸收式制冷

氨水吸收式制冷机是较为常见的吸收式制冷设备。在氨水系统中，氨比水更易蒸发，故氨作为工质，而水又具有强烈吸收氨气的的能力，所以水作为吸收剂。

氨水吸收式制冷装置的特点：

- ① 动力主要为热能，耗电量大大少于压缩式热泵和制冷装置；
- ② 可以直接利用工业生产中的废热和余热；
- ③ 负荷可在 10%~100% 范围内，容易调节制冷量；
- ④ 单级即可达到 -40°C 的低温；
- ⑤ 可以露天布置，操作方便，易于维护管理；
- ⑥ 装置中除了泵外，没有运动部件，运行噪声低；
- ⑦ 换热设备使用多，钢材消耗量大；
- ⑧ 冷却水消耗量大；
- ⑨ 一次性投资大于活塞式制冷机；
- ⑩ 效率较低。

根据以上特点，氨水吸收式制冷适用于有余热可利用或燃料低廉的场合。用蒸汽加热的氨吸收式制冷机，适用于电、热、冷相结合的企业；利用化工废热的氨水吸收式制冷机，适用于在化工过程高温放热，而在低温下又需要冷量的工艺过程；直接燃烧的氨吸收式制冷机，其制冷温度可达 $-20\sim-60^{\circ}\text{C}$ 。

除了氨水吸收式制冷机外，吸收式制冷机的另外一种常见类型是溴化锂吸收式制冷机，它以水为工质，溴化锂水溶液为吸收剂，它与氨-水系统的工作原理一样，只不过用溴化锂溶液代替了水溶液。溴化锂吸收式制冷机用于生产冷水，可供降低空气温度使用，或者提供生产工艺需要的冷却用水。

吸收式制冷机消耗热能。较早的吸收式系统直接用煤加热，后来改用蒸汽加热（见图 1-2）、水加热，也可以直接烧

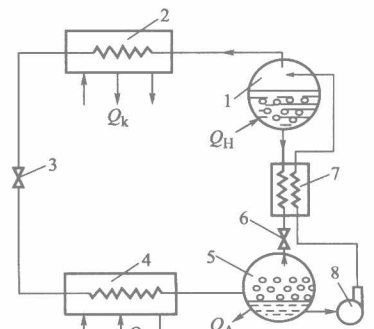


图 1-2 蒸汽吸收式制冷的基本系统

- 1—发生器；2—冷凝器；3—制冷剂节流阀；
4—蒸发器；5—吸收器；6—溶液节流阀；
7—溶液热交换器；8—溶液泵

油或烧天然气加热，还可以使用各种工业废气，甚至使用太阳能热水器加热的热水。吸收式制冷机的分类见表 1-2。

表 1-2 吸收式制冷机的分类

分类方式	机组名称	特点和应用	分类方式	机组名称	特点和应用
用途	制冷机组	供应 0℃ 以下冷量	驱动热源	蒸汽型	利用蒸汽的潜热
	冷水机组	供应冷水		直燃型	利用燃料油或燃料气的燃烧热
	冷热水机组	交替或同时供应冷水和热水			
	热泵机组	供应热水或蒸汽，或直接处理空气用于空调		余热型	利用工业或生活余热
工质对	氨/水	氨为工质，水为吸收剂		其他型	利用太阳能、地热等其他热源
	水/溴化锂	水为工质，溴化锂为吸收剂			
	其他	采用其他工质对			

(3) 蒸气喷射式制冷

在 1910 年左右，制成了第一套蒸气喷射式制冷装置。蒸气喷射式制冷机也是一种以热能为动力、以液体工质在低压下蒸发吸热来制取冷量的制冷机，这一点和蒸气压缩式及吸收式制冷完全相同，不同的是怎样从蒸发器中抽取蒸气，并将其压力提高。它采用单一物质作为循环工质，通常都是水，所以也称为蒸汽喷射式制冷。它同样具有系统真空度高、热力系数低、只能制取 0℃ 以上的低温等缺陷。

(4) 吸附制冷

如果热源温度较低、冷凝温度较高时，若采用氨水吸收式与溴化锂吸收式制冷机时，其热力系数都很低，但此时采用吸附式制冷方式，就可以获得较为满意的结果。

吸附式制冷系统的特点是：具有不耗电、无任何运动部件、系统简单、没有噪声、无污染、不需维修、寿命长、安全可靠、投资回收期短、对大气臭氧层无破坏作用等一系列优点。另外，还可利用吸附剂吸附吸附质时所放出的吸附热，提供家庭用热水和冬季采暖用热源。缺点是循环属于间歇性的，热力状态不断地发生变化，难以实现自动化运行；对能量的贮存也较困难，特别是太阳能的吸附式制冷系统，太阳能的波动会进一步影响到系统的循环特性。

1.2.2 气体膨胀制冷

(1) 空气膨胀制冷

高压气体绝热膨胀时，对膨胀机作功，同时气体的温度降低，从而获得低温，它与蒸气压缩式热泵和制冷过程基本上是相同的，但它所采用的工质主要是空气，故循环过程中工质不发生集态的改变。根据不同的使用目的，循环工质也可采用氮气、氦气等其他气体。

构成这种制冷方式的循环系统称为理想气体的逆向循环系统。其循环型式主要有：定压循环、有回热的定压循环和定容循环。

气体制冷机是利用气体吸收显热来实现制冷的。因气体比热容较小，单位制冷量很小，当冷量要求较大时，需要很大的气体流量，往复式压缩机和膨胀机很难胜任，应该采用透平式压缩机和膨胀机。由于透平机械结构上的原因，透平式压缩机的压力比低，因此在系统中增加一只回热器。利用回热器使冷室出来的低温低压气体与冷却器出来的常温高压气体进一步发生热交换，然后再分别进入压缩机和膨胀机。这就构成了有回热的定压循环。由于这种情况下透平压缩机的入口温度升高，在相同的工作条件下，有回热的定压循环可以降低压力比。

(2) 绝热放气制冷

高压气体在刚性容器中绝热放气时温度会降低，此过程又称为焦耳膨胀，利用此效应可以制冷。如果容器放气以前内部的气体压力高到一定程度，且温度又很低，那么，绝热放气时残留在