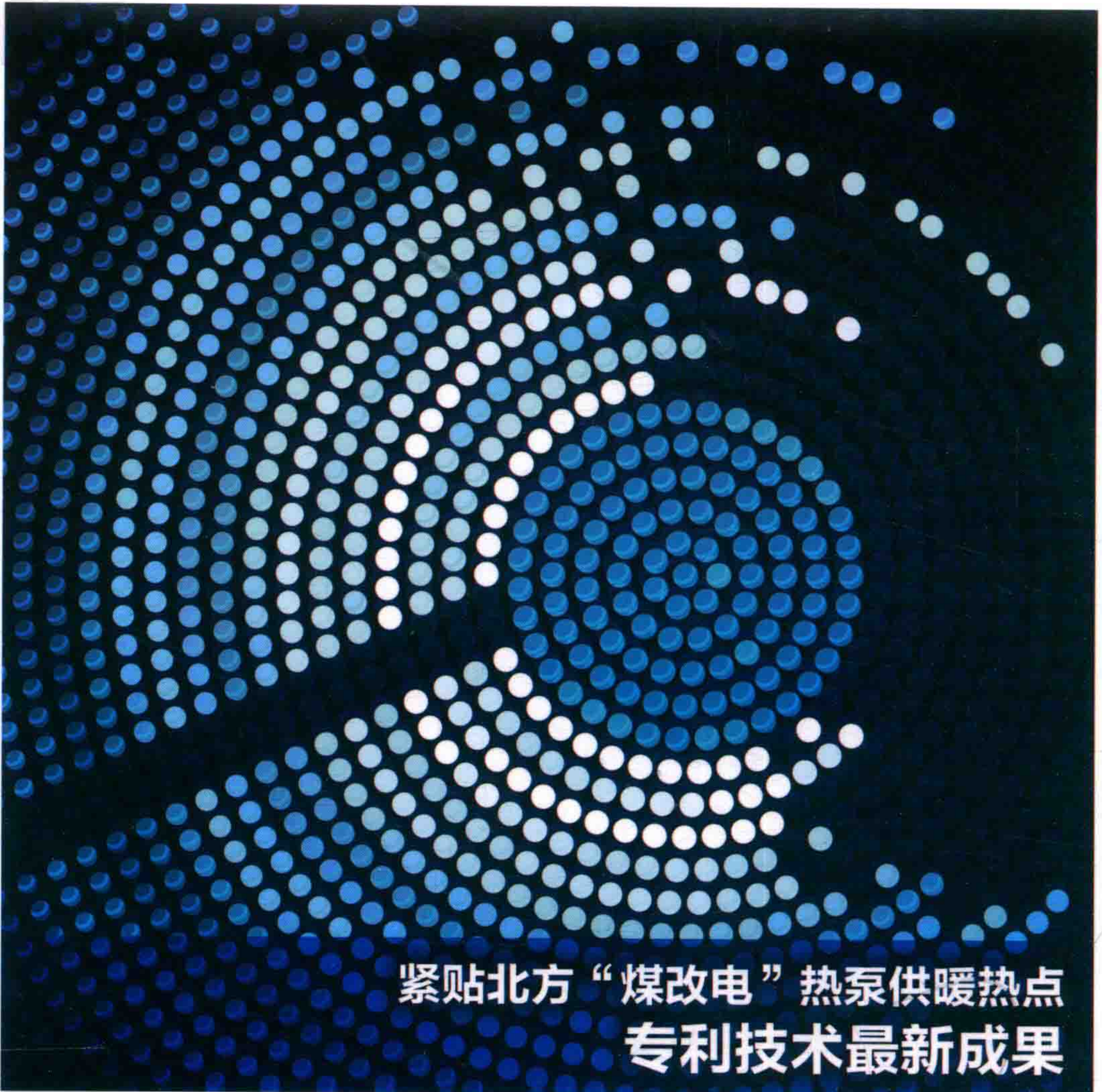




紧贴北方“煤改电”热泵供暖热点
专利技术最新成果

原理剖析·设计实现·经典案例

双级压缩变容积比 空气源热泵

技术与应用

黄辉◎等著



双级压缩变容积比 空气源热泵技术与应用

黄 辉 等著



机械工业出版社

空气源热泵主要用于建筑采暖,具有环保、节能和舒适等优势,但传统的单级压缩空气源热泵因环境温度适应性差而难以向寒冷及严寒建筑气候区推广使用。双级压缩变容积比空气源热泵突破了传统空气源热泵的技术障碍,环境温度适应性得到显著提高,非常适用于寒冷及严寒地区分散式清洁供暖。本书是双级压缩变容积比空气源热泵技术研究和应用成果的总结,采用理论与实践相结合的方式,系统地介绍了双级压缩变容积比空气源热泵技术的基本原理、三缸双级压缩变容积比滚动转子式制冷压缩机的工作原理和设计方法、热泵系统运行控制策略,以及多种类型低温空气源热泵产品的系统实现方法和变工况性能比较等方面的内容。

本书可供从事空气源热泵技术研究和产品开发与推广应用的科研人员、工程技术人员、能源管理与政策研究人员使用,也可供高等院校能源动力相关专业的本科生、研究生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

双级压缩变容积比空气源热泵技术与应用/黄辉等著. —北京:机械工业出版社, 2018. 5

ISBN 978-7-111-59713-1

I. ①双… II. ①黄… III. ①热泵—研究 IV. ①TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 077828 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: 江婧婧 责任编辑: 江婧婧

责任校对: 樊钟英 封面设计: 鞠 杨

责任印制: 孙 炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 15.5 印张 · 310 千字

0 001—2 600 册

标准书号: ISBN 978-7-111-59713-1

定价: 79.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com



黄辉，1963生，教授级高级工程师。现任珠海格力电器股份有限公司执行总裁，华中科技大学兼职教授及博士后合作导师，中国制冷学会副理事长，广东省制冷学会副理事长，广东省轻工业协会副理事长，国际制冷学会B2委员会委员等。

入选“国家百千万人才工程”、“广东特支计划杰出人才（南粤百杰）”，并被授予“国家有突出贡献中青年专家”称号，享受国务院政府特殊津贴。先后荣获“广东省五一劳动奖章”、“全国五一劳动奖章”等荣誉。

长期从事制冷和热泵、压缩机、电机等领域的研究工作，主持、参与了国家科技支撑计划、国家火炬计划等9项国家级课题。曾获国家科学技术进步二等奖、广东省科学技术特等奖、广东省科学技术一等奖、中国制冷学会技术发明特等奖、中国专利优秀奖、广东省专利金奖等奖项。

前 言

空气源热泵主要用于建筑采暖，具有环保、节能和舒适等优势，但传统的单级压缩空气源热泵因环境温度适应性差而难以向寒冷及严寒建筑气候区推广使用。

十多年来，著者所领导的团队致力于双级压缩空气源热泵技术的研究和应用。先后完成了中间补气双缸双级压缩、三缸双级压缩和单/双级压缩切换滚动转子式制冷压缩机等多项技术的研究工作，并将这些技术应用于低温空气源热泵系统中，在 -20°C 的低温环境下，热泵制热量与单级压缩空气源热泵相比可提高40%左右，开发的低温空气源热泵产品在寒冷地区得到了广泛应用，并参与中国北方多地的煤改电采暖改造工程，获得了良好的社会效益和经济效益。

在上述研究成果的基础上，著者于2013年提出了在单个压缩机上实现三缸双级压缩变容积比空气源热泵技术方案，经过几年的研究和产品开发，已经形成了系列化产品。这一技术方案与双级压缩空气源热泵技术相比，具有更高的低温热泵制热量和制热性能系数，适用于寒冷及严寒地区。目前，采用三缸双级压缩变容积比空气源热泵技术的产品已经在中国北方、北美以及蒙古乌兰巴托等严寒地区投入实际使用，并经过了 -40°C 的低环境温度考验，其热泵制热量完全满足了用户的热量需求。

实际结果表明，三缸双级压缩变容积比空气源热泵技术突破了传统空气源热泵技术障碍，环境温度适应性得到显著提高。基于三缸双级压缩变容积比滚动转子式制冷压缩机的空气源热泵是一种应用于寒冷及严寒地区分散式清洁供暖极具优势的技术。

本书是双级压缩变容积比空气源热泵技术研究和应用成果的总结，采用理论与实践相结合的方式，系统地介绍双级压缩变容积比空气源热泵技术的基本原理、三缸双级压缩变容积比滚动转子式制冷压缩机的工作原理和 design 方法、热泵系统运行控制策略，以及多种类型低温空气源热泵产品的实现方法和性能比较等方面的内容。

本书可供从事空气源热泵技术研究、产品开发与推广应用的科研人员、工程技术人员、能源管理与政策研究人员使用，也可供高等学校能源动力相关专业本科生、研究生参考使用。

全书共分为7章，第1章由黄辉、梁祥飞、郑波写作，第2章由梁祥飞、黄辉写作，第3章由黄辉写作，第4章由赵桓、黄辉、张有林写作，第5章由梁祥飞、黄辉写作，第6章由黄辉、赵桓写作，第7章由黄辉、林海佳写作。全书由黄辉统

稿修订。

感谢吴健、谭锋、胡强、尚瑞、刘彩赢、庄嵘、沈军、胡余生、魏会军、杨欧翔、史正良、徐嘉、罗惠芳、林金煌等同事在写作、校对和实验数据提供方面给予的帮助。感谢所有参与本技术的研究人员和产品开发人员，是他们的努力使这项技术能够迅速地由设想变成产品投放市场。

同时，感谢清华大学江亿院士、杨旭东教授及其领导的团队，他们对用户使用情况进行了长期的跟踪测试，并多次在国际、国内学术会议上介绍和推广这一技术。感谢美国科学院院士、加州大学伯克利分校全球环境与健康学院 Kirk Smith 教授，是他促成了双级压缩变容积比空气源热泵技术在蒙古乌兰巴托的应用，以解决当地燃煤采暖带来的空气质量问题。

书中引用了国内外热泵和压缩机等方面的文献资料，在此向相关作者表示感谢。

由于水平有限，书中的不妥之处，欢迎批评指正。

黄辉

2018 年 5 月

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

策划编辑◎江婧婧 / 封面设计◎鞠杨

目 录

前言

第1章 概论	1
1.1 空气源热泵的组成及类型	2
1.1.1 空气源热泵的组成	2
1.1.2 空气源热泵的类型	2
1.2 空气源热泵存在的问题与现状	4
1.2.1 空气源热泵存在的问题	4
1.2.2 空气源热泵制热量衰减分析	5
1.2.3 低温空气源热泵技术方案	6
1.2.4 制热除霜方法	11
1.3 双级压缩变容积比空气源热泵技术	14
1.3.1 现有空气源热泵技术的局限	14
1.3.2 双级压缩变容积比空气源热泵技术	15
参考文献	17
第2章 双级压缩变容积比热泵循环的理论及计算分析	18
2.1 蒸汽压缩式热泵循环基础知识	18
2.1.1 逆卡诺循环	18
2.1.2 蒸汽压缩热泵循环	19
2.2 双级压缩热泵循环方式及基本原理	25
2.2.1 双级压缩中间补气热泵循环的实现方式	25
2.2.2 双级压缩二级节流中间不完全冷却循环的基本原理	28
2.3 双级压缩热泵循环的热力特性分析	29
2.3.1 双级压缩循环的理论模型及计算方法	29
2.3.2 最优容积比的计算及分析	33
2.3.3 双级压缩循环热力参数影响分析	37
2.3.4 容积比对双级压缩循环影响分析	43
2.3.5 双级压缩循环制冷剂物性影响分析	45
2.3.6 双级压缩循环中间补气带液影响分析	48
2.3.7 双级压缩循环最优中间压力和温度	48
2.4 双级压缩变容积比压缩机的容积比确定	51

2.4.1	双容积比的确定	52
2.4.2	双级压缩变容积比压缩机气缸工作容积的确定	62
2.5	双级压缩循环中间压力的理论分析	62
2.5.1	无中间补气时的中间压力	63
2.5.2	补气对中间压力的影响	66
2.5.3	中间压力与补气参数的关系分析	68
	参考文献	70
第3章	三缸双级压缩变容积比滚动转子式制冷压缩机	71
3.1	滚动转子式制冷压缩机的工作原理及特点	71
3.1.1	压缩机构	72
3.1.2	工作过程	73
3.1.3	特点	75
3.2	双级压缩变容积比压缩机的工作原理及结构	76
3.2.1	工作原理及容积比切换的方法	76
3.2.2	双级压缩变容积比压缩机的结构	79
3.3	热力性能计算	83
3.3.1	气缸工作腔容积与工作压力	83
3.3.2	气缸容积效率及其影响因素	86
3.3.3	压缩机的容积效率	90
3.3.4	压缩机的输气量	91
3.3.5	指示功和功率	92
3.4	运动机构的动力学分析	96
3.4.1	气缸运动机构的运动及受力分析	96
3.4.2	偏心轮轴的受力分析	107
3.4.3	总阻力矩	110
3.4.4	转子的动平衡	112
3.5	主要结构参数	117
3.5.1	气缸的结构参数	117
3.5.2	结构尺寸	118
3.6	润滑及影响因素	120
3.6.1	润滑油的作用和要求以及选择方法	120
3.6.2	排油及控制方法	125
3.6.3	回油及控制方法	128
3.6.4	回液的危害及控制措施	130
	参考文献	137

第4章 系统控制的基本原理	139
4.1 节流模块控制方法	140
4.1.1 双级压缩一级节流中间不完全冷却热泵系统的节流控制方法	141
4.1.2 双级压缩二级节流中间不完全冷却热泵系统的节流控制方法	145
4.2 压缩机模块的控制	158
4.2.1 起动阶段的控制策略	158
4.2.2 运行阶段的控制策略	162
4.2.3 除霜运行控制策略	167
4.2.4 回油运行控制策略	169
第5章 低温空气源热泵系统优化分析	171
5.1 电子膨胀阀的优化分析	171
5.1.1 电子膨胀阀通用流量关系式	171
5.1.2 双级压缩二级节流用一、二级电子膨胀阀优化	172
5.1.3 双级压缩一级节流用主、支路电子膨胀阀优化	175
5.2 换热器的优化分析	177
5.2.1 制冷剂物性分析	177
5.2.2 翅片管换热器的仿真分析	178
5.3 吸气管的优化分析	181
参考文献	185
第6章 低温空气源热泵空调	186
6.1 分体式热泵型房间空调器	186
6.1.1 系统方案	186
6.1.2 循环系统控制策略	187
6.1.3 性能对比分析	192
6.2 侧出风低温空气源多联式热泵机组	199
6.2.1 系统方案	200
6.2.2 循环系统控制策略	201
6.2.3 性能对比分析	202
6.3 上出风低温空气源多联式热泵机组	206
6.3.1 系统方案	206
6.3.2 系统配置	207
6.3.3 循环系统控制策略	207
6.3.4 性能对比分析	213
6.4 模块化低温空气源多联式热泵机组	216
6.4.1 系统方案	216

6.4.2	容量控制策略	216
6.4.3	均油控制策略	217
6.4.4	高落差控制策略	218
6.4.5	除霜控制策略	221
	参考文献.....	222
第7章 低温空气源热泵（冷水）机组		223
7.1	供热（水）系统组成及末端	223
7.1.1	空气源热泵供热（水）系统的组成	223
7.1.2	末端	224
7.2	机组循环系统方案	227
7.2.1	机组循环系统方案	227
7.2.2	供水温度设计	229
7.3	低温空气源热泵（冷水）机组的控制策略	229
7.3.1	系统配置	229
7.3.2	最优中间压力控制策略	230
7.3.3	开/关中间补气对性能的影响分析.....	231
7.3.4	两缸/三缸工作模式选择分析.....	234
7.4	不同系统配置性能对比分析	235
7.4.1	系统配置	235
7.4.2	性能对比	236
	参考文献.....	239

第 1 章 概 论

1

人工制冷技术从 1755 年苏格兰的威廉·卡伦 (William Cullen) 发表《液体蒸发制冷》并发明减压水蒸发制冷机开始起步, 1824 年法国的卡诺 (S. Carnot) 提出的卡诺循环, 使人工制冷技术获得了理论上的突破。与此同时, 人们对于能否将热量用“泵”从低温区输送至高温区产生了兴趣, 英国的汤姆逊 (W. Thomson, 即 Lord Kelvin) 教授于 1852 年指出制冷机也可以用于供热, 成为提出热泵系统设想的第一人。

热泵是将热量从低温热源向高温热源输送的装置。热泵循环与制冷循环的热力学原理相同, 但产生的结果不同。例如, 利用热泵循环从室外环境 (低温热源) 吸收热量并向室内环境 (高温热源) 释放热量, 其结果是室内环境温度升高并维持高于室外环境温度; 利用制冷循环从室内环境 (低温热源) 吸收热量并向室外环境 (高温热源) 释放热量, 其结果是室内环境温度下降并维持低于室外环境温度。

人工制冷技术自诞生以来迅速发展, 在工农业生产、科研及改善人类生活环境等方面得到了广泛应用。虽然热泵技术的工作原理与制冷技术的工作原理相同, 但由于存在诸多方法简单、使用便捷和成本低廉的供热方式, 使得热泵技术在较长的一段时间内未能得到发展。直到 1927 年, 霍尔丹 (Haldane) 在苏格兰安装试验了第一台用氨作制冷剂的闭式热泵循环系统后, 热泵技术才算真正意义上的起步, 但直到 1973 年能源危机后热泵技术才得到真正的发展。

热泵技术的种类按照工作原理可以分为蒸汽压缩式热泵 (也称机械压缩式热泵)、吸收式热泵、化学热泵、蒸汽喷射式热泵等; 按照驱动能源可以分为电动热泵、燃气/油热泵、蒸汽或热水热泵等; 按照低温-高温载热介质可以分为空气-空气热泵、空气-水热泵、水-水热泵、水-空气热泵; 按照低温热源可以分为空气源热泵、水/地源热泵等。

蒸汽压缩式热泵是应用最为广泛的热泵形式, 目前大量使用的热泵型空调器、热泵机组等都是蒸汽压缩式热泵。

本书所讨论的主要内容为适用于低温环境、以电能驱动的蒸汽压缩式双级压缩变容积比空气源热泵技术及其在分散式空气源热泵中的应用。双级压缩变容积比空气源热泵适用于家庭、办公、小型商用等建筑的供热。

1.1 空气源热泵的组成及类型

1.1.1 空气源热泵的组成

图 1.1 所示为空气源热泵系统原理图，它主要由压缩机、高温热源换热器（冷凝器）、节流装置和低温热源换热器（蒸发器），以及连接管路等部件组成，在系统中充注制冷剂（也称为制冷工质、冷媒），由压缩机驱动制冷剂在系统中循环流动，完成压缩、冷凝、节流和蒸发四个工作过程。

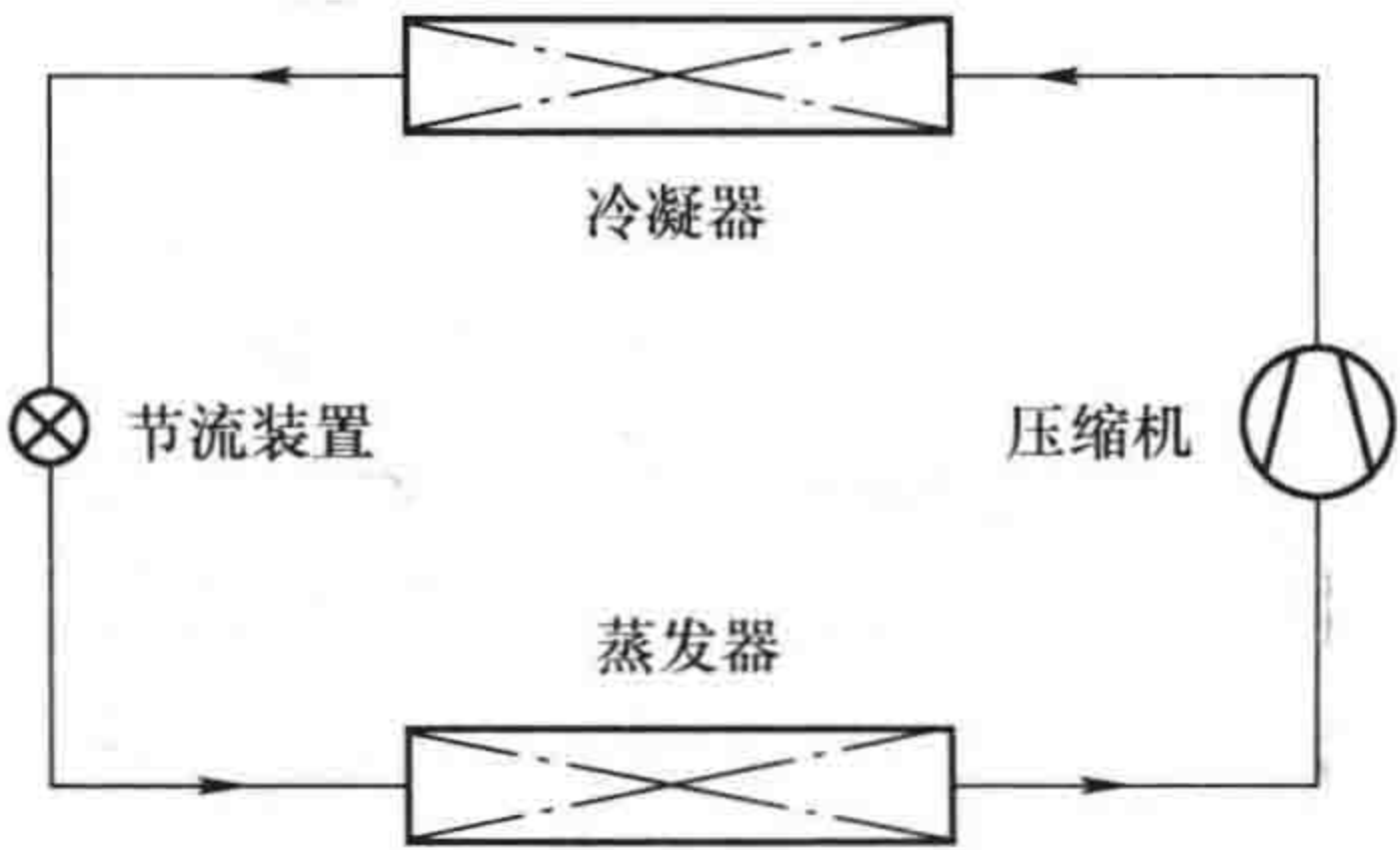


图 1.1 空气源热泵系统原理图

冷凝器是系统用来向高温热源释放热量的换热装置，高温制冷剂气体在冷凝器中被冷凝为液体，释放热量，即冷凝放热。常用的冷凝器有翅片管式换热器、套管式换热器和板式换热器等。

蒸发器是系统用来从低温热源吸收热量的换热装置，低温制冷剂液体在蒸发器中被蒸发为气体，吸收热量，即蒸发吸热。常用的蒸发器为翅片管式换热器。

节流装置是热泵系统中的重要部件，主要作用是对高压制冷剂液体进行节流降压，保证蒸发器和冷凝器间的压差；另外，还可以调节进入蒸发器的制冷剂流量，使系统高效率运行。常用的节流装置有毛细管、电子膨胀阀和热力膨胀阀等。

压缩机是空气源热泵系统中驱动制冷剂循环流动的动力源，相当于系统的“心脏”，它将从蒸发器吸入的低温低压制冷剂气体压缩成高温高压的制冷剂气体送入冷凝器。常用的压缩机有滚动转子式制冷压缩机和涡旋式制冷压缩机等。

1.1.2 空气源热泵的类型

空气源热泵的种类主要可以分为空气 - 空气热泵和空气 - 水热泵两种类型。此外，还有将空气源热泵与其他热源相结合的复合型热泵。

1. 空气 - 空气热泵

热泵型空调是空气 - 空气热泵最广泛的应用形式，它的室内和室外换热器均为制冷剂与空气进行换热。空气 - 空气热泵型空调器为冷暖型，即夏季制冷，冬季制热，它通过四通换向阀对制冷剂流向进行切换，实现制冷和制热的转换。在夏季制冷时，室外换热器为冷凝器，室内换热器为蒸发器；在冬季制热时，室外换热器为蒸发器，室内换热器为冷凝器。

热泵型空调系统原理图如图 1.2 所示。

目前，广泛使用的热泵型房间空气调节器（如窗式空调器、分体式空调器等）、多联式空调机组及单元式空调机组等均为空气 - 空气热泵。

2. 空气-水热泵

空气-水热泵，通常包括空气源热泵（冷水）机组和空气源热泵热水器等，它的室外侧载热介质为空气，室内侧载热介质为水。空气-水热泵（冷水）机组也是冷暖型，与空气-空气热泵型空调一样，也是通过四通换向阀切换实现制取冷水和热水，以实现制冷和制热的功能。空气源热泵热水器为单热型，用于制取生活热水。

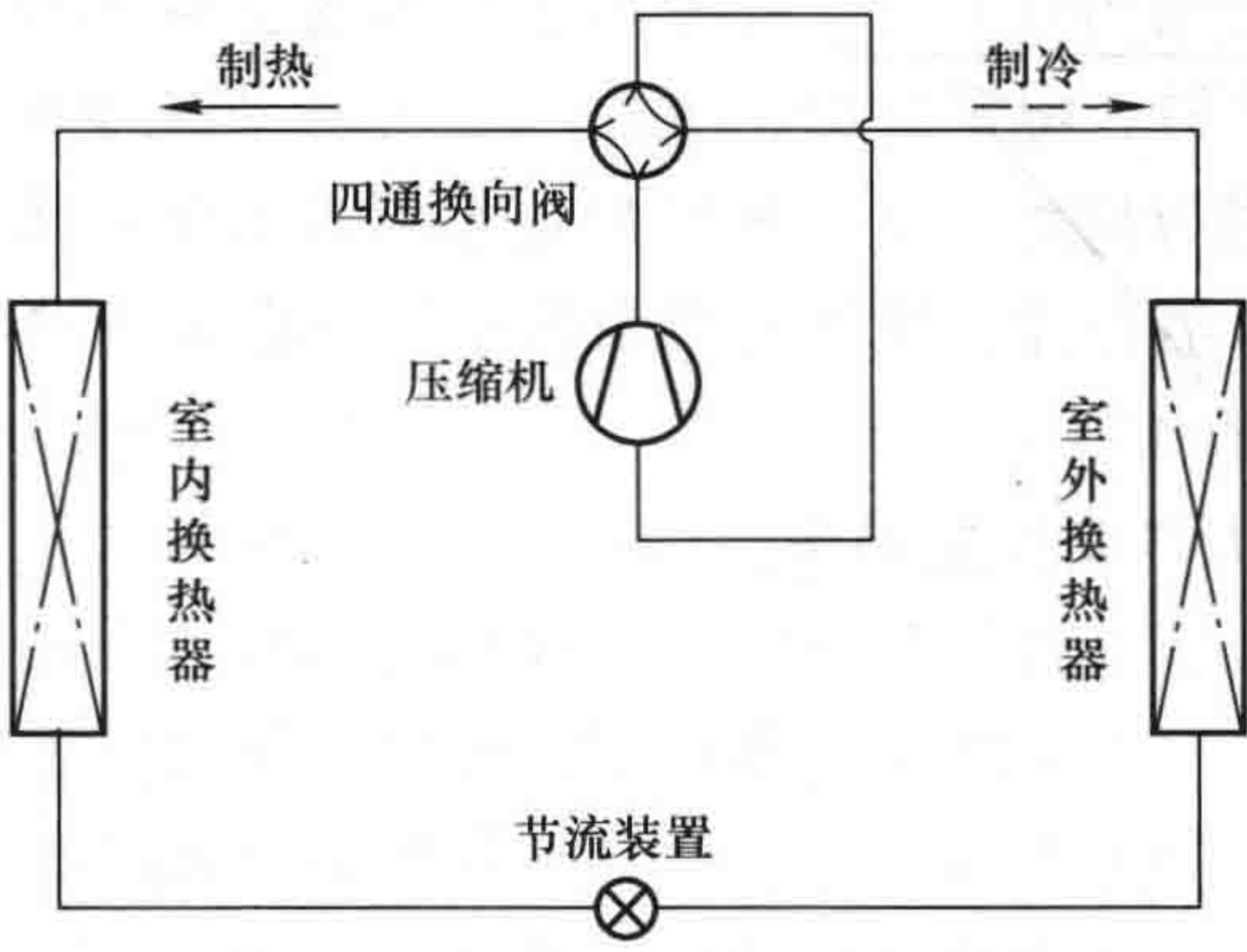
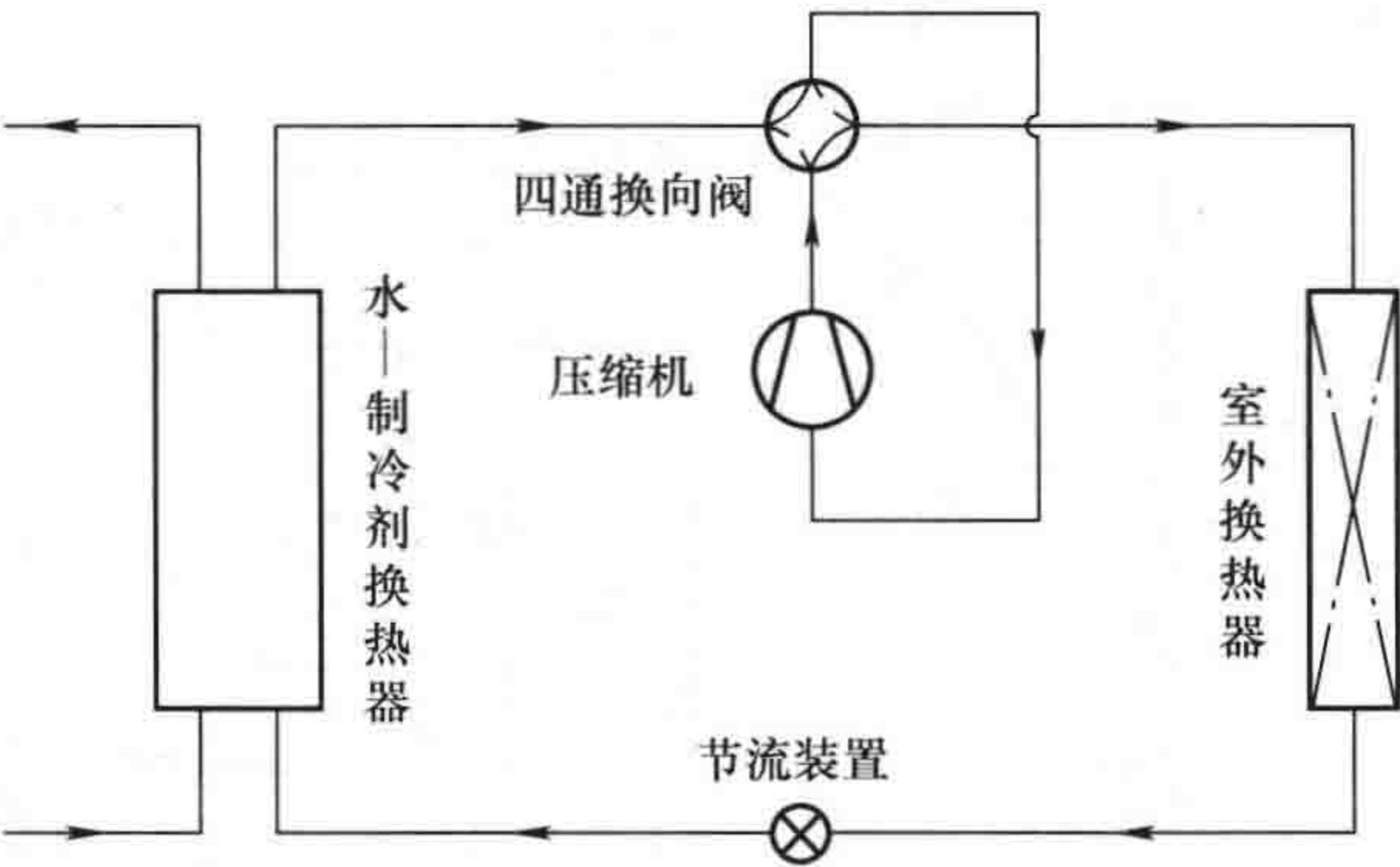


图 1.2 热泵型空调系统原理图

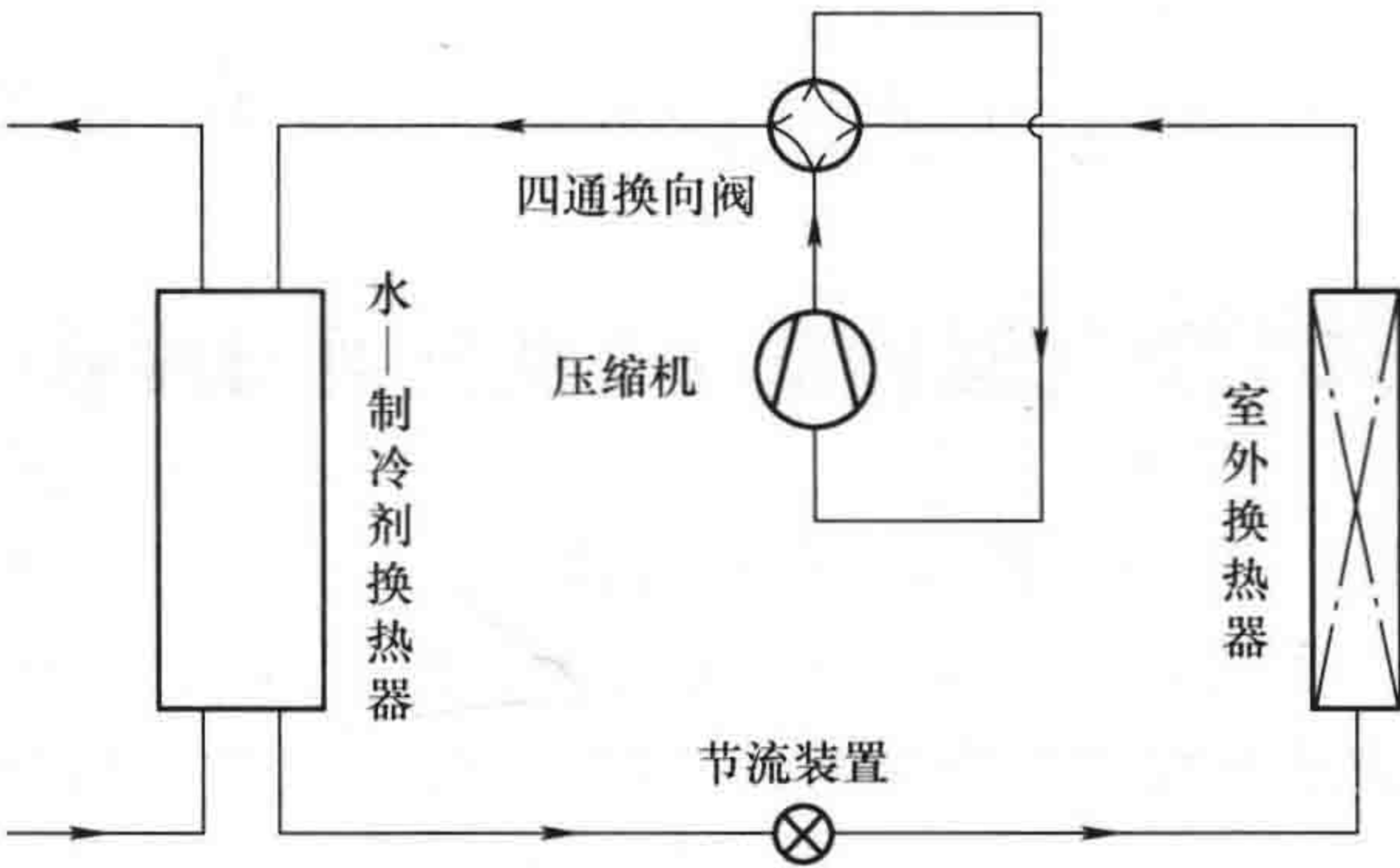
空气源热泵（冷水）机组系统循环原理如图 1.3 所示。

在图 1.3a 中，制冷模式下，四通换向阀断电，室外换热器为冷凝器，水-制冷剂换热器为蒸发器，制冷剂在蒸发器中蒸发吸热，制取冷水。



a) 制冷模式

在图 1.3b 中，制热模式下，四通换向阀通电，室外换热器为蒸发器，水-制冷剂换热器为冷凝器，制冷剂在冷凝器中冷凝放热，制取热水。



b) 制热模式

当空气源热泵（冷水）机组制取的热水用于建筑供热时，与机组水管相连接的末端可以为多种类型，如地板供热、散热器和风机盘管等。

当空气源热泵热水器制取生活热水时，大多数情况与机组水管相连接的是水箱，将制取的热水储存在水箱中，使用时从水箱中将热水放出。空气源热泵热水器具有节能、环保、经济、安全等显著优点。在相

图 1.3 空气源热泵（冷水）机组系统循环原理

同的制热量下，空气源热泵热水器虽然初投资较高，但其消耗的电量通常不足电热水器、电锅炉的三分之一，可有效减少高品位电能的消耗。与燃气热水器、燃气锅炉相比，空气源热泵热水器具有运行安全可靠、使用方便的特点。与太阳能热水器相比，空气源热泵热水器具有受气候环境的影响相对较小、可全天 24h 制热运行的优点。

3. 复合型热泵

空气源热泵可以与其他热源相结合，充分发挥空气源热泵的优势，如空气源热泵与太阳能热水器相结合就是一种典型的复合型热泵。

图 1.4 所示为一种空气源热泵和太阳能热水器的复合系统。在该系统中，太阳能热水系统和空气源热泵热水系统都可以独立运行。当环境温度低和太阳辐射强度不足时，太阳能热水系统制取的低温热水作为水 - 水热泵系统的低温热源，水 - 水热泵在冷凝侧制取高温热水。该复合系统在一定程度上解决了太阳能热水系统不能全天候运行以及空气源热泵结霜的问题。

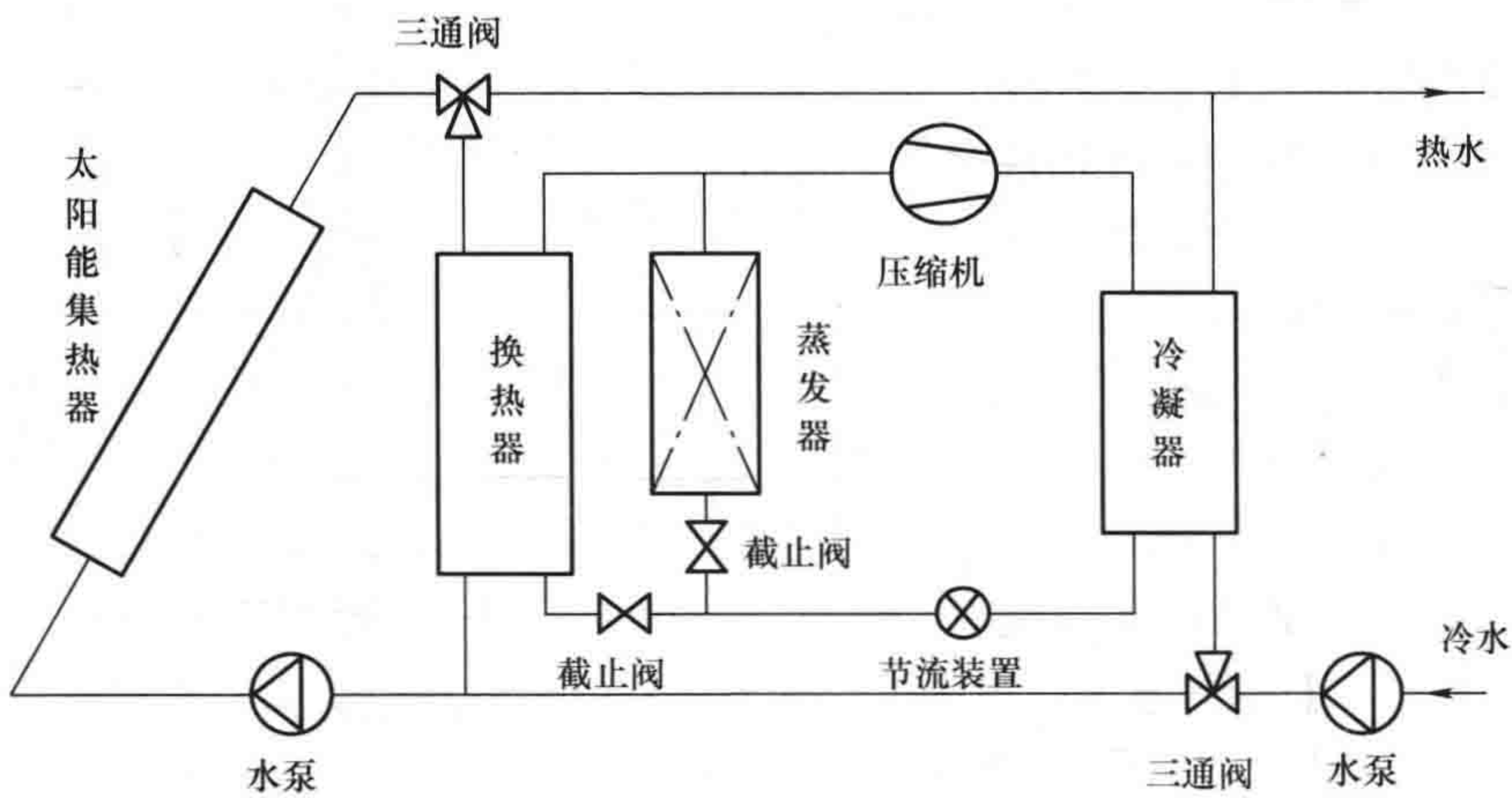


图 1.4 一种空气源热泵和太阳能热水器的复合系统

1.2 空气源热泵存在的问题与现状

1.2.1 空气源热泵存在的问题

我国地域辽阔，气候差异大，依据 GB 50178—1993 《建筑气候区划标准》，中国建筑气候区划分为严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区和温和地区。

由于小型空气源热泵具有效率高、安装使用方便、成本低和对环境影响小等多种优点，近年来的应用越来越广泛。并且随着压缩机及热泵技术的发展，空气

源热泵的低温制热性能和低温可靠性得到不断提升,应用的地域已从夏热冬冷的长江流域扩展到寒冷的黄河流域,还有进一步向严寒地区拓展的趋势。

空气参数(温度、湿度)随地域、季节和昼夜的不同而变化,而空气参数对空气源热泵的制热量和制热性能系数(Coefficient of Performance, COP)影响显著。普通空气源热泵在室外环境温度相对较高时制热运行,经济性、可靠性良好;但在室外环境温度相对较低时,特别是在寒冷和严寒地区,冬季制热运行会遇到诸多问题,主要分为以下几个方面:

1) 随室外环境温度降低,热泵制热量衰减(原因见后文分析),无法满足房间热负荷增加的需求,存在热量供需矛盾问题。

例如,定频单级空气源热泵型空调器在室外环境温度为 -15°C 时的制热量仅为额定制热量的40%~50%。因此,普通空气源热泵型空调器在室外低环境温度下制热时,一般需要增加电辅热以弥补热泵制热量的不足。

2) 热泵的COP随室外环境温度降低而下降,运行经济性降低。

3) 当维持冷凝温度不变时(如在空气源热泵(冷水)机组和空气源热泵热水器中),压缩机排气温度随室外环境温度降低而升高;当冷凝温度较高时(如在空气源热泵热水器中)排气温度将超出压缩机正常工作范围,从而导致压缩机过热,系统无法正常工作,严重时还可能导致电机烧毁。

4) 蒸发器结霜导致热泵的制热量衰减和COP下降,采用逆循环除霜方法时空气源热泵在除霜期间不再向室内供热,室内温度下降。

5) 随着室外环境温度的降低,空气源热泵低压侧管路内的润滑油与制冷剂互溶性变差且润滑油粘度增大,导致回油困难,大量的润滑油积存在低压侧管路等部件内,容易造成压缩机缺油而损坏。长时间停机时,由于制冷剂迁移,大量的液态制冷剂进入压缩机,稀释润滑油,容易造成压缩机启动时润滑不良,并且启动时压缩机内部的制冷剂沸腾将润滑油带出会造成压缩机缺油。另外,在除霜过程中,液态制冷剂回到压缩机内,除霜结束恢复制热时,制冷剂沸腾也会将润滑油带出压缩机。低温环境下长时间停机后启动以及除霜结束恢复制热这两个时段容易发生压缩机损坏现象。

6) 空气源热泵系统在室外低环境温度下工作时,易发生蒸发器中制冷剂蒸发不完全,即部分液态制冷剂进入压缩机的现象,导致过度湿压缩(润滑油被严重稀释)甚至液击,加速压缩机运转零部件的磨损甚至损坏。

1.2.2 空气源热泵制热量衰减分析

空气源热泵制热量随室外环境温度下降而衰减的原因归纳如下:

1) 蒸发温度下降会导致压缩机吸气压力下降,吸气比容增加,从而导致制冷剂单位容积的制热量下降,当压缩机理论输气量(体积流量)不变时,制热量下降,这是空气源热泵制热量衰减的主要原因。

2) 吸气压力下降会导致压缩机压力比增加、润滑效果变差, 压缩机容积效率下降, 从而导致实际输气量减小, 制热量下降。

3) 吸气比容增加和压缩机容积效率下降均会导致制冷剂质量流量减小, 从而导致蒸发器和冷凝器的制冷剂侧传热系数下降, 蒸发器吸热量和冷凝器放热量(等同于制热量)减小。

4) 吸气压力下降会导致蒸发器入口干度增加、液态制冷剂动力粘度增加和低压侧气态制冷剂密度减小, 蒸发器和吸气管路中流动压降增加。如维持压缩机吸气压力不变, 则蒸发压力及其对应的饱和温度有所升高, 蒸发器有效换热温差减小, 蒸发器吸热量减小, 也将导致制热量下降。

5) 当蒸发器翅片表面温度低于湿空气露点温度且低于 0°C 时, 蒸发器表面结霜, 霜层增长速度随湿空气含湿量的增加和蒸发温度的下降而增加。霜层厚度增加将导致蒸发器热阻和风阻均增加, 制热量迅速衰减。空气源热泵必须进行周期性除霜才能正常运行, 而除霜期间制热量为零甚至为负, 从而导致平均制热量下降。

1.2.3 低温空气源热泵技术方案

针对空气源热泵制热量和 COP 随室外环境温度降低出现的衰减问题, 众多学者及工程技术人员对其进行了深入研究和实践, 取得了较大进展和技术成果, 空气源热泵的制热性能和可靠性均有较大的提升和改善, 制热运行范围得到拓宽。目前, 已应用的低温空气源热泵技术主要包括以下几个方面。

1. 变频技术

由上述空气源热泵制热量衰减原因分析可知, 制冷剂单位容积制热量下降是制热量衰减的主要原因, 因此增大压缩机的实际输气量是解决空气源热泵制热量衰减的有效措施。压缩机变频(变转速)技术能够在压缩机气缸工作容积不变的情况下, 通过提高压缩机的运行频率来达到增大压缩机实际输气量的目的, 从而有效减缓制热量衰减幅度。变频技术已成为空气源热泵制热量衰减的重要解决措施之一, 在实际应用中根据室外环境温度和室内设定温度来调节压缩机运行频率以缓解热量供需矛盾。

20 世纪 90 年代初我国开始变频技术的研究工作, 2005 年前后逐步有变频空调产品推出, 2010 年后变频技术在空调行业得到广泛应用, 取得了良好的经济效益和社会效益。据产业在线统计, 变频房间空气调节器(年度总销量)占房间空气调节器(定、变频年度总销量)国内市场份额在 2016 年达到 49.2%, 2017 年达到 55.4%。

2. 准二级压缩技术

准二级压缩技术最早应用于螺杆压缩机, 苏联学者 A. B. БЫКОВ 于 1976 年首次提出螺杆压缩机准二级压缩循环这一概念, 经分析得出经济器和中间补气过程的能量平衡方程, 并将压缩机中间补气过程假定为“先等容混合, 后绝热压缩”