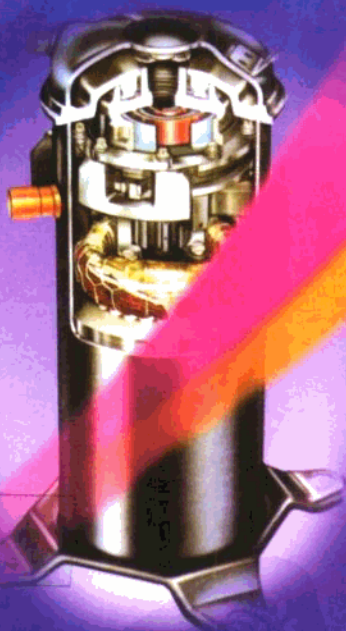


热泵技术 在空调中的应用

郑祖义 著



机械工业出版社



热泵技术在空调中的应用

郑祖义 著



机械工业出版社

热泵技术在空调中的节能具有很强的商业性，因此，必然会受到市场经济的制约，而人的社会价值取向因素对市场经济发展的影响也就不可忽略。作者引入“多元价值取向”模型，将人的社会价值取向引入到热泵空调“节能商品”发展的决策系统之中，统一处理了这一复杂现象，并定量分析了其中的主次矛盾和机理。同时，讨论了带经济器螺杆机的热力学特性，具体研究了一种风冷热泵过程的热优化设计，并进行了新型热泵系统的开发研究。

本书可作为工程热物理、制冷技术、暖通空调及压缩机电技术等专业的工程技术人员及高校师生的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

热泵技术在空调中的应用/郑祖义著. —北京: 机械工业出版社, 1998. 7

ISBN 7-111-06090-3

I. 热… II. 郑… III. 热泵-应用-空气调节器 IV. TB657. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 01023 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 吴曾评 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 方芬 责任印制: 王国光

北京第二外国语学院印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/32·4.5 印张·94 千字

0 001—3 000 册

定价: 8.50 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

作者简介

郑祖义 1955年11月生于武汉市、1993年获华中理工大学工学博士学位、1994年3月至1996年5月、在清华大学热能工程学完成博士后研究、现为珠海格力电器股份有限公司总经理高级技术顾问并兼任公司研究所所长及技术开发部部长、高级工程师。

1983年7月自华中理工大学制冷及低温技术专业毕业以来、一直从事热泵空调、制冷除湿技术的研究工作、曾先后获各项发明专利成果十余项、国家及省市发明奖、科技成果奖多项、并在国内外期刊杂志及学术会议上发表论文近50余篇。1991年元月被国务院授予国家级有突出贡献的“80年代优秀大学毕业生”称号。近期主要研究方向为热泵空调系统及其热过程。

前 言

近年来，随着国民经济的发展，空调热泵机组已开始成为我国制冷行业开发的新产品。它不仅提供夏季制冷，而且可提供冬天采暖；可省去锅炉系统，大大减少了工程投资；它以电作为动力，采用热泵原理吸收室外空气中的热量，可节省数倍于输入电能的热量；与传统的锅炉供热系统相比，不仅节省能源，还能提高能源利用率，而且不会污染环境，是一种高效节能型产品。

空调风冷热泵机组可安置在室外，采用空气冷却与换热，免除了冷却水泵及冷却水塔，安装迅速、方便，减少土建工程的投资，尤其适用于缺水地区。因此，它是一种具有节水、减少对大气层的污染、保护环境的新产品，特别是在环境要求高，不能建锅炉房的地区，更需采用热泵型空调设备。为此，对空调热泵技术进行深入广泛的研究，对推动热泵节能技术的发展有着重要的意义。同时，对制冷空调技术的发展也有着重要的理论价值。

本书的创新之处和主要特色是：

(1) 对新型风冷热泵空调机组的开发设计研究指出：必需从整体出发，要有人-物-环境的整体观念，做到把一个系统转变为一个均衡的整体，并通过建立“多元价值取向模型”使热泵空调机组成为现代社会、现代环境中的有机构成因素，为综合开发设计提供了理论依据。

(2) 对风冷热泵空调机组的气流流场均匀性研究发现：相

变叉流换热器单相侧来流速度分布不均匀时，热泵循环制热性能将被削弱。

(3)对传统直列管套管式换热器故障分析研究中发现：套管式换热器在弯制成型时，弯曲管处将发生严重的拉伸变形，并且，使套管内的薄壁换热管在发生塑性拉伸变形的同时，由于弯矩的作用，而产生严重的单边挤压现象，使得薄壁换热管的管壁强度和传热特性受到削弱。

(4)开发设计的新型螺旋管套管式换热器，消除了传统直列管套管式换热器在弯制成型中发生的塑性拉伸变形。将传统直列管管束在套管中放置的自由状态，改变为特定的空间刚体结构状态，从而消除了传统直列管管束的单边挤压现象，保证了管束分布的相对均匀性。

(5)创新设计的交叉逆向螺旋管管束结构，构成了具有特色的空间螺旋槽通道，两侧的流型同时出现二次回流，从而使两侧流体的传热机理得到热优化，换热器的传热特性得到了强化（该技术已申请发明专利）。

(6)二次进气螺杆机的设计，最优化原则不是在补气口位置点的选择，而是中压补气过程的可逆性设计（该技术已获国家专利）。

(7)三次进气螺杆机作为二次进气的拓广（该技术已获国家发明专利权），可用于热泵制热和低温制冷，是一种新型螺杆机机种，具有一定的应用开发价值。

(8)开发设计的新颖复合热源热泵循环，通过理论和实验两个方面的论证表明：新型热泵循环的制热性能，比带经济器热泵循环和常规标准热泵循环均有较大增长（该技术已获国家专利）。

本书的第1章介绍了热泵的现状及面临的任务。第2章

简述了热泵的基本原理及一般过程。第3、4章引入“多元价值取向”模型，将人的社会属性引入到热泵空调“节能商品”开发的决策系统之中，统一处理了这一复杂现象，并定量分析了其中的主次矛盾和机理。可以说，这是作者对热泵空调开发设计进行综合决策评价所做的一种尝试。

一旦对新系统的开发设计作出综合决策之后，紧接其后，一种自然的想法就是考虑对热泵系统及其过程的热优化分析。因此，本书的第5章讨论了ESR热泵系统内压缩过程的热力学实质。而对现行20RT风冷模块热泵空调机组的热优化，构成了本书的第6章。第7章讨论了螺杆机热泵新循环系统实验研究的进展。

热泵技术的研究是门富有活力的学科，它必将进一步发展。本书的研究若能如一朵小葩为科学添彩，若能做一颗碎石为他人铺路，将是作者平生最大的意愿和努力不懈的目标。

本书能得以出版，首先应感谢恩师钱壬章教授和金六一教授多年教诲和培育，他们对本书的第5章、第7章的主要章节都给予了仔细的审阅并提出了许多宝贵的意见；感谢恩师彦启森教授对本书第4、6章所给予的指导和帮助。感谢朱明善教授对全文的审阅。

感谢清华大学热能工程系史斌华硕士、董静硕士、蒋文忠硕士，在完成第6章的试验工作中所给予的协作和支持；感谢武汉冷冻机厂高工祝金安，在完成第7章的试验工作中所给予的协作和支持；感谢徐寅生博士在第6章的热分析方面所给予的支持和帮助。

感谢国家自然科学基金、中国博士后基金、清华大学热能工程系空调教研室研究基金的资助。

1987

因作者水平有限，时间又较匆促，书中难免存在不少缺
点和错误，恳请读者批评指正。

作 者

1997年11月于清华园

目 录

前言

第 1 章 综述	1
1 引言	1
2 问题的提出	4
3 主要研究成果	5
参考文献	6
第 2 章 热泵的一般原理及其基本组成	7
1 热泵的基本工作原理	7
2 热泵的分类	11
3 热泵技术在空调中的应用	12
参考文献	13
第 3 章 风冷热泵空调系统 (ACHP) 多元价值取向模 型的分析	15
1 引言	15
2 多元价值取向 (MV) 模型在方法论上的特点	16
3 ACHP·MV 的建模过程	17
4 ACHP·MV 模型的因素指标集 V_0	20
参考文献	21
第 4 章 MV 模型在 Bitzer 螺杆机 ACHP 设计决策中 的应用	22
1 引言	22
2 ACHP 系统决策论域 U 与常值目标函数集 V_0	23
3 Bitzer 螺杆机 ACHP 因素指标矩阵 F 与模糊矩阵 R	24

4 因素指标重要程度模糊子集 A	27
5 方案的决策与分析	30
参考文献	31
第 5 章 带经济器螺杆制冷机 (ESR) 热泵	
系统的研究	32
1 引言	32
2 螺杆制冷机的工作原理	34
3 ESR 热泵内压缩过程分析	36
4 ESR 中压进气口位置非线性影响的讨论	38
5 ESR 内压缩过程的数学模拟	51
6 ESR 内压缩过程效率的极大值预测估计	68
7 ESR 中压补气损失因素的灰关联分析	75
8 三次进气螺杆机热泵系统	78
参考文献	82
第 6 章 ACMHP 循环制热性能的实验研究分析	84
1 引言	84
2 问题的背景	84
3 相变叉流换热器单相侧来流速度分布的非均匀性分析	86
4 新型螺旋管套管式换热器结构的稳定性和传热特性	91
5 创新之处和主要特色	98
6 热优化后的实验结果	99
参考文献	101
第 7 章 新型螺杆机热泵循环的开发研究	103
1 引言	103
2 复合热源热泵 (MSHP) 循环原理与技术特征	104
3 MSHP 的对比试验与理论分析的一致性	113
4 MSHP 制热特性的灰色模型分析	124
参考文献	133

第1章 综 述

1 引言

热泵机组是一种新型节能的空调制冷设备。

热泵是利用那些因温度太低而不可能被别的设备加以利用的热量的唯一系统，可把无价值的大气及土壤中的太阳潜能以及地下水、地表水的低位热能或工业污水废热去替代商品能源，实现舒适性空调的供暖与供冷。热泵空调的魅力还不仅在于节能，更为重要的是消除锅炉供暖中烟气对环境的污染，保护和净化人类赖以生存的自然环境。

推进热泵技术的发展是能源工程综合利用的需要，能源危机和矿物能燃烧过程对生态环境的污染均是对现代人类生存的严重挑战。热泵技术正是开发和强化高品质能源利用率的重要手段，是获取可再生能源及维护生态平衡的有效途径之一。

近年来，随着国民经济的发展，空调热泵机组成为我国制冷行业开始重视开发的新产品，它不仅提供夏季制冷，而且可提供冬天采暖，可省去锅炉系统，大大减少了工程投资。它以电作为动力，采用热泵原理吸收室外空气中的热量，它可节省数倍于输入电能的热量。与传统的锅炉供热系统相比，它不仅节省能源，还能提高能源利用率，而且不会污染环境，是一种高效节能型产品。

空调风冷热泵机组可安置在室外，采用空气冷却与换热，免除了冷却水泵及冷却水塔，安装迅速、方便，减少土建工

程的投资,尤其适用于缺水地方。因此,它是一个具有节水、减少对大气层的污染、保护环境的新产品,特别是在环境要求高,不能建锅炉房的地区,更需采用热泵型空调设备。为此,深入对空调热泵技术进行广泛的研究,对推动热泵节能技术的发展有着重要的意义。同时,对制冷空调技术自身的发展也有着重要的理论价值。

目前,我国能源构成中煤占70%以上,石油及天然气占25%,能源利用率都在50%以下,加上我国城市居民用炉灶烟囱低矮,燃烧效率只有百分之十几,采暖锅炉吨位小、效率低、燃烧点严重分散等,更加重了大气污染,例如北京采暖季节排入大气的二氧化碳比东京、纽约70年代中期还高,飘尘比东京、伦敦60年代还高,人们对未来环境的危机感日益加深^[1]。

因此,借助热泵装置,人们能把自然界中的太阳潜能或废弃的工业低温余热变为较高温度的有用热能,供应生产和生活的需要。这样就给人们提出了一条既能节约矿物燃料、合理利用能源,又能减轻环境污染的途径。

综观国内外对热泵的应用,主要集中在民用空调领域,这是因为建筑采暖占据着能源消耗大户的地位。对发达国家所消耗的一次能源统计表明,在所消耗的能量中,40%用于建筑采暖,30%用于工业生产,其余用于交通、照明等用途^[2]。

房间采暖热量一般只需较低的温度,这种热量可以借助热泵来供暖。此时只要消耗少量的商品能量,便可得到足以满足房间采暖需求的温度。因此,在满足房间采暖耗热方面,热泵可以做出重要的贡献。

中国科学院(88)能字004号关于印发“热泵在我国开发与应用的可行性论证”的通知中指出,热泵技术是节能手

段之一，对低位热能的开发和利用具有重要意义。我国要在本世纪末实现工农业总产值翻两番的奋斗目标，但能源供应只能翻一番。在能源如此短缺的情况下，节能问题显得更为突出。因此，加快实现热泵机组产业化的举措，在我国能源工业发展中占有举足轻重的地位^[3,4]。

日本是热泵技术和市场发展最快的国家之一。原因除了它的国民经济和工业技术高速发展外，还有一些特定的优越条件。日本政府面临能源稳定供应和高效利用的重大任务。在1973至1982年10年间，总能耗对国民生产总值的比值降低了30%。这个成绩的取得，热泵技术的发展也起了重要的作用。日本政府执行了补贴、优惠税率和其他财政措施来推动热泵节能技术。热泵投产后，投资30%可以从减税中得到补偿^[5]。

日本热泵年销售量已超过200万台，其中大部分家用和商用（商场、学校、办公楼、仓库等公共建筑的供冷和供暖）空调热泵，从1975年的35万台增至1986年的210万台，而单冷空调机则从1975年的165万台降至1986年的140万台。

西欧，1973年油价暴涨带来了热泵发展的新时期，欧共体确认热泵技术是寻求替代能源的重要手段。1980年国际能源机构（IEA）发表了节能“战略研究”结果，其中热泵是节油技术的重要方面，据预测到2020年在IEA成员国中热泵将占采暖设备的75%。IEA各成员国用于采暖的液体燃料耗量将逐渐减少，燃油采暖将逐渐减少，燃油采暖将逐渐被热泵所代替。欧共体预计到2020年将有1000万台热泵投入使用。

美国，1983年热泵市场进入持续发展时期，到1985年，年销售量达到100万台，热泵使用领域主要是：家用和办公

用空调及热水器，其他领域如小型区域供暖，美国是热泵使用最多的国家之一。

我国热泵的应用，在近几年具有很好的应用地理环境条件。随着国民经济的发展，人民生活水平的不断提高，社会对热泵的需求还会日益增长。

2 问题的提出

当我们开始着手考虑这个问题时，首先面临的就是新型空调热泵机组的开发设计，热泵空调是以工业产品的型式出现，具有很强的商业性。因此，空调热泵技术的开发设计，必须应满足工业产品的商业性特征。现代工业产品的概念是，用适宜的物质材料，经加工制成的具有一定功能效用和审美价值的与现代环境、现代观念吻合的物质实体。而任何产品都是现代社会、现代环境中的构成因素，所以，设计时必须从整体出发，要有人-物-环境的整体观念，做到把一个系统转变为一个均衡的整体。

因此，在这本书的第3、4章，引入“多元价值取向”模型，将人的社会属性引入到热泵空调“节能商品”开发的决策系统之中，统一处理了这一复杂现象，并定量分析了其中的主次矛盾和机理。可以说，这是作者对热泵空调开发设计进行综合决策评价所作的一种尝试。

一旦对新系统的开发设计作出综合决策之后，紧接其后，一种自然的想法，就是考虑对热泵系统及其过程的热优化分析。因此，本书的第5章讨论了ESR热泵系统内压缩过程的热力学实质。对现行20RT风冷模块热泵空调机组的热优化，构成了本书的第6章。第7章，这两章讨论了螺杆机热泵新循环系统实验研究的进展。

3 主要研究成果

(1) 对新型风冷热泵空调机组的开发设计研究指出:必需从整体出发,要有人-物-环境的整体观念,做到把一个系统转变为一个均衡的整体。并通过建立“多元价值取向模型”,使得热泵空调机组成为现代社会、现代环境中的构成因素,统一处理了这一复杂现象,并定量分析了其中的主次矛盾和机理,为综合开发设计提供了理论依据^[6]。

(2) 对风冷热泵空调机组的气流流场均匀性研究,发现相变交叉流换热器单相侧来流速度分布不均匀时,热泵循环制热性能将被削弱。

(3) 对传统直列管套管式换热器故障分析研究中发现,套管式换热器在弯制成型时,弯曲管处将发生严重的拉伸变形,并且使套管内的薄壁换热管在发生塑性拉伸变形的同时,由于弯矩的作用而产生严重的单边挤压现象,使得薄壁换热管的管壁强度和传热特性受到削弱。

(4) 开发设计的新型螺旋管套管式换热器,消除了传统直列管套管式换热器在弯制成型中发生的塑性拉伸变形。将传统直列管管束在套管中放置的自由状态,改变为特定的空间刚体结构状态,从而消除了传统直列管管束的单边挤压现象,保证了管束分布的相对均匀性。

(5) 创新设计的交叉逆向螺旋管管束结构,构成了具有特色的空间螺旋槽通道,两侧的流型同时出现二次回流,从而使两侧流体的传热机理得到热优化,换热器的传热特性得到了强化。

(6) 风冷热泵标准模块机(舶来品)经过热优化设计后,制冷量由原机组的 32.8kW 提高至 53.51kW,增长率为

63%，其中冰水器传热系数由原机组的 $547\text{W}/\text{m}^2$ 提高至 $1572\text{W}/\text{m}^2$ ，增长率为 187%^[7]。

(7) 二次进气螺杆机的设计，最优化原则不是在补气口位置点的选择，而是中压补气过程的可逆性设计^[8]。

(8) 三次进气螺杆机作为二次进气的拓广（该技术已获国家发明专利权），可用于热泵制热和低温制冷。这是一种新型螺杆机机种，具有一定的应用开发价值。

(9) 开发设计的新颖复合热源热泵循环，通过理论和实验两个方面的论证表明：新型热泵循环的制热性能比带经济器热泵循环和常规标准热泵循环均有较大增长^[9]。

参 考 文 献

- 1 徐邦裕, 陆亚俊, 马最良. 热泵. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986
- 2 Kirn H, Hadenfeldt A, Wärmepumpen, Auflage C F. Muller Karlsruhe, 1980
- 3 中国科学院广州分院能源研究所. 热泵在我国开发与应用的可行性论证. 1987
- 4 王庆数 主编. ENERGY IN CHINA. 北京: 冶金工业出版社, 1988
- 5 1983 Energy Statistics Yearbook. New York: United Nations, 1985, pp2-3
- 6 郑祖义. 热能工程系统的多元价值取向模型分析. 应用科学与工程科学学报, 1996 (1)
- 7 郑祖义. 20RT 风冷模块热泵机组热优化的性能对比试验研究报告. 北京: 清华大学热能系, 1994
- 8 郑祖义. 一种新型喷油螺杆制冷机. 发明专利号: 87101649
- 9 Zheng Zuyi. The Study of the Multiple Source Screw Heat Pump. In: 5th International Energy Agency Conference, Ontario, Canada. Sept. 21-26, 1996

第2章 热泵的一般原理 及其基本组成

1 热泵的基本工作原理

液体的沸点不仅取决于液体的温度，而且和液体所处的压力有关，如液体工质 R22 在压力低于 0.1MPa 的条件下，可以在 -40°C 时沸腾。因此，用一台压缩机将一个容器（蒸发器）中的 R22 流体抽出，使其中的压力低于 0.1MPa，就可以使这种作为工质的液体在低温下沸腾。

为了将液体转变为相同温度的蒸气，必须消耗一定的热量，即蒸发（比）焓 h (kJ/kg)。例如，为了将 1kg、 100°C 的水，转变为 1kg、 100°C 的蒸气，需要消耗 2256kJ 的热量。为了使所蒸发的工质温度不至下降，而造成压力降低，必须将蒸发焓不断地供给沸腾的工质。

工质的温度只要不超过某一个特征点（临界点），温度即使高一些，蒸气也可液化^[1,2]。工质 R22 在压力约 1.7MPa 时，温度为 50°C 也会液化，此时，液化的蒸气将放出蒸发焓 H ，蒸发焓 H 所消耗的压缩功 W 之和为热量 Q ，借助于消耗高品位的能量，例如压缩功，可将在低温下吸取的热量，在提高温度后输出，并使之成为有用的热量。

热泵就是利用上述过程，以吸取有关热源的热量，例如地下水、土壤或外界空气的热量，并在消耗高品位能量的情况下，将上述热量提高到适宜于房间采暖的温度。

图 2-1 所示为空气-水热泵装置的构造原理。在蒸发器 2 中，工质液体（相当于制冷装置中的制冷剂）在低压下蒸发，