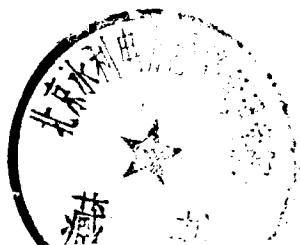


08375

T1138
4080

热 泵

[英]R. D. 希普 编
张在明 译
陈庆实 贾崇珍 校



京电力大 00164260

化学工业出版社

内 容 提 要

当前,整个社会对能源的开发和利用都十分重视,因此热泵做为一种新型节能装置,为人们所瞩目。本书系英国电气委员会R. D. 希普编著,作者在实践经验的基础上,广泛地收集了有关热泵的技术资料和参考文献,对热泵技术的应用、研究和发展动向结合实例,作了系统全面的介绍。本书主要内容包括:热泵的历史、开发和研究;热泵的原理与分类;蒸汽压缩式热泵的冷冻介质及选择、压缩机驱动装置、功率调节及设计依据、风扇和泵、储热器和热交换器、除霜及控制、热泵的可靠性和各类标准与规范;系统设计原理、废热回收、热量储存、环流供暖系统、噪音、辅助加热;家庭热泵应用、商业及工业应用;经济分析法等。

本书可供从事能源研究、化工工艺及设备、采暖通风及建筑工程等工作的科研、设计和工程技术人员阅读。

R. D. Heap

Heat Pumps

London E & F. N. Spon Ltd. 1979, 1st edn

热 泵

张在明 译

陈庆实 贾崇珍 校

责任编辑:刘欢

封面设计:许立

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₃₂印张6³/₈字数143千字印数1—9,600

1984年6月北京第1版1984年6月北京第1次印刷

统一书号15063·3614定价0.68元

前 言

能源是一个工业化社会的基本需要，然而很多常规能源总是要枯竭的。人们正以极大的努力开发新的能源，并力争使现有的能源获得较好的利用。

同太阳能收集器和风车一样，热泵有时候也被看成是一种能源，然而即或热泵通常较其取代的设备耗费较少的能量，但还是要使用能量的。因此，人们对热泵产生了极大的兴趣。当前虽然仅有少数热泵在经济上是值得利用的，但热泵的很多应用在技术上是可行的。随着能源费用的增加和成本比例的变化，很多热泵的潜在应用，应当经常予以重新评价。编写本书的目的，在于帮助那些可能成为热泵设计、选用、供应、安装和使用的人们进行这样的重新评价。

我主要是为热泵的选用者，如建筑师、维修工程师、或未来的热泵购买者等编写此书。而且我设想读者熟悉温度、热量、能量的基本概念（若有疑问，可查阅参考书目中的某一本热力学教科书）。尽管我力争写得十分详尽，以使热泵选用者能够了解可以考虑的各种各样的选择方案，及其与采用系统之间的关系。然而由于我既不是一个热力学专家，也不是一个制冷工程师，因此对于基本理论和装置设计涉及过深既不恰当，也是不明智的。若装置设计者发现查阅本书是有益的，那就更好了。

研究热泵在商业建筑物和工业上的应用之前，首先研究了热泵在家庭中的应用。这是因为热泵的家庭应用通常更简单

些，而且在某种程度上，其基本原则在所有这三种应用领域中都是适用的。选择这样一种编排顺序是为了使必须重复的一般性资料量减至最少。虽然这或许反映出基于我个人经验的倾向性，但这并不意味着我在建议各种热泵应用的重要性的和意义的先后顺序。

前面两章包括概要，历史的及理论的基础知识，第三章比较详细地研究了蒸汽压缩设备。第四章研究了系统设计的一般概念，特别在使用热泵的环流供暖系统的设计方面进行了研究。第五至七章分别介绍热泵在家庭、商业和工业上的应用。第八章研究在选择热泵系统时，所采用的某些经济分析方法的关系。贯穿全书的“经济的”(economic) (同其他的投资方案相比较表明是有利可图的) 及“值得的”(worthwhile) (一种更主观的价值判断) 这两个术语的使用不太严密，因为严格的评价不仅取决于其应用，同样也可能取决于做出评价的人。

当用在大多数热泵上时，蒸汽压缩机是复杂的，而各部件的相互配合尤其复杂。所幸的是制冷工业的蒸汽压缩机已得到了高度的发展。第三章中有关这一设备的说明，制冷工程师是会很熟悉的，然而它是为很多其他的读者所写的，这些读者将希望更全面地了解这种设备是怎样工作的。

有关制冷技术各方面的详细的材料是很容易找到的，最全面和最详尽的资料来源是由美国采暖、制冷和空调工程师协会 (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers) (ASHRAE) 出版并定期修订的一系列手册。“空调”(air-conditioning) 这一术语严格的意思是同时控制供气的温度、湿度和清洁度，但也经常不太严密地用来表示“空冷”(air-cooling)。在本书中，当涉及到那些既

能用于空冷又能用于空调的设备时，这个词实际并没有保持其严格的定义。

全书采用了国际单位制 (Système Internationale d'Unites) (SI)，只是在作者认为凡是使用千瓦-小时 (KWH) 更易于被理解的地方，都采用了这一复合单位制，而不使用若干焦尔来表示。

在引证已发表的著作时，本书列举了有关参考文献，这些参考文献将使学员和研究人员找到更多的有关专题资料。这些参考文献编号列于每章的末尾。在本书结尾分别列出了有关的教科书、设备标准、文献综述的概略目录。必须指出：本书中任何计划所包含的发明内容并不意味着它不受专利保护，或可随意使用。

我愿感谢我的雇主们——电气委员会 (the Electricity Council) 对我的帮助和鼓励，并对研究中心 (Research Centre) 主席 A. T. 丘奇曼 (A. T. Churchman) 先生，对卡彭胡斯特 (Capenhurst) 和伦敦的我的全体同事致以谢意，他们提出过宝贵的意见和有益的批评。本书所表述的见解是属于我个人的，它们并不一定代表我的雇主们的观点或政策。一本这类性质的书可能是不完善的，若本书有某些错误抑或推导出错误的结论，敬请读者赐教。

我感谢那些友好地提供了图表素材的制造厂家和其他的人们，他们的名字在图表的题注中予以公布。我感谢约翰·休斯 (Joan Hughes)，他为我整理了草稿；对我的妻子温迪 (Wendy) 表示特殊的谢意，她不仅给我以支持和帮助，而且为我逐个校订了草图，并准备了参考文献。

R. D. 希普

一九七八年六月于埃尔斯米尔港

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 定义	1
1.2 经济性	2
1.3 历史	3
1.4 研究和开发	9
参考文献	12
第二章 原理	15
2.1 空气循环机	15
2.2 蒸汽压缩循环	17
2.3 吸收循环	22
2.4 热电式热泵	24
2.5 其他类型的热泵	26
参考文献	27
第三章 蒸汽压缩式热泵	29
3.1 冷冻介质	31
3.1.1 冷冻介质的选择	32
3.2 压缩机驱动装置	37
3.3 压缩机	41
3.3.1 功率调节	46
3.4 热交换器	46
3.4.1 设计依据	50
3.5 风扇和泵	52
3.6 管件	55

3.7 冷冻介质流量调节	58
3.8 储液罐和中间热交换器	61
3.9 除霜	62
3.9.1 除霜控制	65
3.10 其他控制机构	67
3.11 整体设计最佳化	70
3.12 可靠性	72
3.13 标准和规范	76
3.13.1 美国标准和规范	76
3.13.2 欧洲标准和规范	77
参考文献	78
第四章 系统设计原理	84
4.1 一般原则	84
4.1.1 热源	84
(a) 室外空气	85
(b) 水	85
(c) 地热能	86
(d) 土壤	86
(e) 废热回收	88
4.1.2 热量储存	89
4.1.3 供电	92
4.2 环流供暖系统	93
4.2.1 热量分配	94
4.2.2 气候对供暖系统设计的影响	96
4.2.3 “游离”热	97
4.2.4 舒适性考虑	100
4.2.5 噪音	100
4.2.6 辅助加热	104
参考文献	110

第五章 家庭热泵的应用	114
5.1 环流供暖	115
5.2 简单热泵装置操作性能示例	118
5.3 热泵和太阳能供暖	122
5.4 大型住宅群的环流供暖	128
5.5 水加热	130
5.6 去湿和干燥	132
5.7 食品储藏	134
5.8 家庭游泳池	135
5.9 家庭应用小结	136
参考文献	137
第六章 在商业和公共建筑物上的应用	141
6.1 大型建筑物	143
6.1.1 集中管理系统	143
6.1.2 局部一体化系统	148
6.1.3 分散的闭路系统	148
6.1.4 标准型外部热源热泵	150
6.2 商店和俱乐部	152
6.3 娱乐活动中心	155
6.3.1 室内游泳池	156
6.3.2 室外游泳池	158
6.3.3 溜冰场	160
6.4 其他商业应用	161
参考文献	163
第七章 工业应用	166
7.1 回收热量供环流供暖和水加热	167
7.2 回收热量供工艺加热	168
7.3 回收潜热用于溶液的浓缩和蒸馏	171
7.4 干燥	173

参考文献	177
第八章 经济分析法	180
8.1 考虑因素	180
8.2 传统的成本-效果分析	182
8.3 能量分析	186
8.4 序列法	188
参考文献	190
参考书目	191

第一章 绪 论

1.1 定 义

热泵 (heat pump) 是一种从低温热源汲取热量, 使其在较高的温度下作为可以利用的有用热能的装置。这意味着需要有计划地使用温度较高的热能, 而这样就可将热泵同其他类似制冷和空调的设备区别开来了。在类似制冷与空调的设备中, 温度较高的热能常被当作废热排放了。热量回收、热能抽送和空气调节之间的界限常常是不十分明确的。只有那些在回收热量时温度有所提高的情况, 才能看成是热泵的应用。空调装置只有当其提供了能有效利用的热源时, 才与热能抽送有关。由冷却水泵热 (pumping heat) 以进行工厂的环流供暖, 以及由室外空气泵热, 给房屋和小型车间供暖就是热泵应用的两个简单的例子。热泵的这种应用是很好的, 因为热泵运转所需要的能量, 只是它可能提供的全部加热能量的一部份。

热交换器是构成热泵的主要部件, 通过热交换器取得热能, 并加以利用 (图1-1)。第二章中讨论了各种在热交换器之间泵热方法, 包括由电动机驱动的蒸汽压缩、化学吸收、气体压缩和热电方法等。所有这些方法都需要输入能量 (机械能、电能或热能) 来操作这些设备。

可利用的能量 (E) 与输入的操作能量 (Q) 的比值是衡量热泵效率的基准。这一比值有各种不同的名称, 例如: 特性系数 (coefficient of performance)、供热系数 (coefficient

of heating)、热互换效率 (reciprocal thermal efficiency)、操作比 (performance ratio) 或操作能量量比 (performance energy ratio) 等等。使用最广泛的是特性系数 (coefficient of performance), 通常缩写为 “c. o. p”。“c. o. p” 往往与下标 “h” (表示供热) 一起使用, 以便使其与冷却设备所定义的 c. o. p 相区别, 在冷却设备中 c. o. p 表示冷却效果 (cooling effect) (Q) 与输入能量 (q) 的比值 (即 Q/q)。

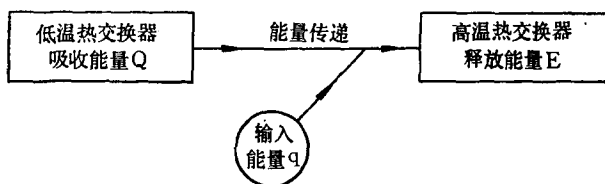


图 1-1 热泵基本原理

一般说来, 在本书中 “c. o. p” 将用来表示 E/q , 即可利用的热能与输入的全部操作能量的比值。一台有效的热泵, 其 c. o. p 必须超过 1。c. o. p 值越大, 热泵效率越高。对于通过小温差泵热的大型热泵, 适宜的 c. o. p 值是 5~6。而对于使用室外空气为热源的小型热泵, c. o. p 值可以是 2~3。

1.2 经济性

就能量的利用而言, 热泵是有效的, 但它们没有得到广泛的应用。其主要原因是, 同既有的方法相比, 热泵的投资费用高。对于热泵的评价, 必须同其它方法相比较, 在某种用途上, 看它能否获得经济效益。而这种评价, 必须考虑到由于使用不同燃料而产生的不同的效率, 以及包括投资和维修费用在内的全部费用。

通常情况，一个装置要取代其他装置，它必须是为人们所了解的，并且价格低廉。因此，热泵的较高投资和不固定的维修费用，必须在节约能源上得到补偿。传统的分析表明：热泵的某些应用显然是经济的。然而在很多情况下，将会有一些不确定的因素需要综合判断。读者将会在第八章中找到一些关于各种节能方案经济分析的意见，在那一章中作者提出了一个对各种不同的节能方案进行评价的简易方法。

每当有关能源供应的经济因素发生急剧变化时，就必须对热泵的适用范围进行重新评价。而且每当燃料费增加，就扩大了这一应用范围。制造厂家的预测和国民调查两者指出：八十年代热泵的销售量将急剧增加。只要能源费用的增加快于资源的增长，这将是可能的。这是否将使二十世纪最后的二十五年，成为热泵在国民能源经济中起重大作用的时期，或者热泵将由其他能减少热能需求的技术所取代，尚须进一步观察。然而不论哪种情况下，都需要不断地、现实地估价热泵技术的生命力。了解有关的历史背景，可以使人们避免两种危险的倾向，对于那些貌似新颖的东西报以过分的热情和对尚处在缓慢的开发中的有价值的应用的原理持不应有的怀疑态度。

1.3 历史

十九世纪，随着对物理过程认识的逐步深化，人们对能否将热能泵送至较高温度发生了兴趣。焦尔论证了通过改变气体的压力而使气体温度发生变化的原理。帕吉·斯密司 (Piazzi Smythe) 教授大概是建议应用这一原理制造冷机的第一个人。而汤姆森 (Thomson) 教授 (稍后是开尔文勋爵 (Lord Kelvin)) 是提出热泵设想的第一个人。

1852年汤姆森〔1〕发表了一篇论文，该论文描述了一种应

用两个联接到一起的压缩机和膨胀机的装置，将空气压入一个同时起热交换器作用的贮气筒，然后排出。这种开式装置，或是用来向建筑物供暖，或是向建筑物供冷。在这篇论文中，汤姆森预见到了闭路循环蒸汽压缩机。但是在当时，既没有冷冻介质，也没有驱动力使他能够设计出可同现代热泵相比拟的机器。

在十九世纪七十年代，开发应用这些原理的制冷设备的工作取得了迅速的进展。当时创造了一些低温空气制冷机，以满足国际冻肉市场的需要。1879年，格拉斯哥（Glasgow）的贝尔·科勒曼（Bell Coleman）在由美国和澳大利亚两处运送肉类到英国去的船上，安装了一套这样的设备^[2]。与此同时，用醚、氨或氯代甲烷作为冷冻介质的蒸汽压缩机的开发工作也在进行。低温空气制冷机为二氧化碳机所取代，而在二十世纪二十年代制成了氨压缩机。在二十世纪三十年代，小型的制冷设备使用氯代甲烷，而在二十世纪四十年代初期，出现了第一个现代卤代烷冷冻介质——R12。

在开发制冷设备这一整个历史时期内，热泵的开发工作落到了后面。制冷是满足既定的需要，而热泵的开发却要取决于能源费用和能源有效利用率，以及取决于其它可能利用的加热器。热泵本身的开发工作是同制冷设备的开发工作同时进行的，但人们对热泵开发工作的特殊兴趣在于它的应用，通过应用以取得经验。

人们认为热泵最早的应用是在二十世纪二十年代，当时克劳斯^[5]（Krauss）和摩尔利^[6]在汤姆森论文的基础上进行了重新论述，并加以完善。虽然当时还没有象现在这样的热泵，但还是可能从已安装，而数量正在迅速增加的制冷设备的性能分析中，来研究热泵的可行性。哈尔登（Haldane）进行了这一

工作^[7]，他选择了一个在1891年到1926年间运行的制冷装置，对其性能进行了数据分析，并编制了对应于不同的热输出温度，所能达到的c. o. p值的图表（图1-2）。该图表明热泵的c. o. p值为逆向卡诺机理论效率的三分之二~二分之一，这些将于第2.2节予以说明。

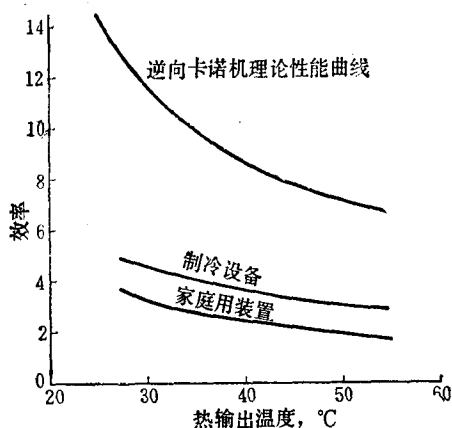


图 1-2 热泵性能参数 (按哈尔登在热源温度为 4.4°C ，蒸发温度为 -6.7°C 测定数字绘制)

根据这些结果，哈尔登建议：应考虑可逆式热泵给建筑物供冷和供暖，并说明在游泳大厅用热泵回收能量具有特殊的经济价值。虽然热泵装置已得到了改进，价格也有了变化，但这些建议今天看仍然是正确的。

哈尔登并没有满足于理论上的计算，在二十世纪二十年代中期，他安装了一台实验用热泵，对他在苏格兰 (Scotland) 的住宅进行环流供暖和水加热。他采用室外空气和总管中的水做为热源，使用了一个低温热水散热器配热系统和一个电力驱动的制冷压缩机。冷冻介质是氨。由水力发电机组供电。这个

装置即使是今天，看来还是不错的。虽然这个家庭用装置的性能还赶不上大型制冷设备的计算结果（图1-2），但是其c. o. p值还是相当高的。除了有一点噪音外，效果还是好的。

最早的大规模热泵的应用是在南加利福尼亚爱迪生公司（Southern California Edison Company）的陆斯·安格勒斯办事处（Los Angeles）。在那里，在1930~1931年间，将制冷设备用于供暖，得到1.45~1.98的c. o. p值。然而一般认为在最适宜的操作条件下，c. o. p值可能达到2.32。

二十世纪三十年代的经济困难给欧洲的热泵的发展以必要的刺激。到1943年大型热泵的数量已很可观。当时“电气服务”杂志以“能源经济和热力学热泵”为题发表了一篇专门报告⁽⁹⁾。报告列举的热泵可能的应用包括：在冷凝过程中利用蒸汽潜热的蒸发式热泵，工业废热回收，及用于环流供暖的、以空气或水为热源的热泵装置。该报告还建议利用透平机废热，以蒸汽透平驱动的热泵。在当时，在包括液体浓缩在内的工艺过程中进行泵热被认为是很经济的。但是在液体浓缩以外的其他场合，仅当被回收的热量是由冷却装置产生的时候，回收废热才被认为是值得进行的。

在该文所描述的装置有在1937~1941年期间安装起来的，在苏黎世议会办公大楼（Zurich Council Hall）、委员会办公大楼（Congress Hall）和游泳大厅（Swimming Hall）等热泵装置。也提到了安装在学校、医院、办公室和牛奶场的热泵装置。还辑录了有五十五篇参考文献的专题书目⁽¹⁰⁾，它包括了1922~1943年的整个历史时期。此外开姆勒（Kemler）和奥格勒斯拜（Oglesby）列举了1940以前在美国安装的十五台商业用热泵⁽¹¹⁾，大部分是以井水作为热源的。

为了制订现场试验方法⁽¹²⁾，及为供电设备进行各种现场

试验的需要^[13]，在美国，到1948年，小型热泵的开发工作有了很大的进展，这些小热泵基本是为家庭供热或供冷用可逆空调器。对电力需求特性可能存在的问题进行了严密的检验，并且注意了空气分配管网过分损失热泵的危险。

1950年左右，在美、英两国就使用地下盘管作为热源的家庭用热泵进行了研究。巴克尔 (Baker)^[14] 设计了一个配有防冻贮槽的可逆热泵装置，据他报导，在整个1950~1951年冬季，c. o. p值平均超过了3。沙姆纳尔 (Sumner)^[15] 装置了一台以大地为热源的热泵，以向他的房间供暖。电气研究学会 (Electrical Research Association) 的格利费思^[16] (Griffith)，开始将研究工作深入到土壤的性质和土壤的导热特性方面。

沙姆纳尔设计的、向诺里奇 (Norwich) 一栋市政大楼供暖的试验机，是英国最早的大型热泵^[17]。该装置于1945年投入运行，只用了几年就被拆除了。该装置采用了二级压缩并以二氧化硫作为冷冻介质，设计输出功率约240kW，以周围的河水做为热泵热源。计算得出的c. o. p值介于3~4之间，在整个采暖季节，c. o. p的平均值接近于4。

为迎接1951年博览会，在伦敦要建造一座庆祝大厅，为此大厅设计了一个实验性热泵装置。这是一个屡遭曲解，并且值得深入探讨的有雄心的实验^[18]。该装置利用泰晤士河水 (River Thames) 作为热源，用城市煤气操作，设计输出热功率为2.3~2.6MW。该装置的高速离心压缩机是由改良的莫林 (Merlin) 飞机发动机驱动的空气增压器改制而成，该装置具有两冷冻介质循环，并将级间的蒸汽返回到二级压缩机以改善工作效率 (见21页)。冷冻介质为R12，还可组成单级冷却操作。虽然这种装置很难调节冷冻介质流量，也很难密封，但在

蒸发温度为 0°C 、装置向供暖系统提供 82°C 的热水时，仍获得了 $2.5\sim 3$ 的c. o. p值。遗憾的是，主要由于该装置的输出功率高于大厅的供热需求，因而这一庆祝大厅实验装置的用处是很有限的，而且这一实验的有利的方面，有时也因而为人们所忽视。

1954年左右，在英国研制成一种型式大不相同的热泵——佛兰蒂冷箱-加热器 (Ferranti fridge-heater)^{[19]、[20]} (图1-3)。这是一种设计用来由食品贮藏间吸收热量，并用以加热水的家庭用装置。这种装置是小型的，夏季输出热功率为 1.2kW ，冬季输出热功率为 0.7kW 。但是尽管该装置构造简单、成本低廉，却没有找到很大的市场。然而一种同样型式的商业用装置却得到了发展，并成功地应用在冰淇淋冷饮店，在该装置中，来自制冷机的热量被用来向散热器提供热水。

在二十世纪六十年代初期，家庭用可逆式气-气热泵在美国市场上取得了相当大的成功。但遗憾的是这种装置可靠性很差，这是因为，可逆式热泵仅仅比一个空调器需要多加一个可使冷冻介质逆向流动的阀门，而这一点并没有充分地被人们所认识。到1964年，热泵可靠性的问题已成了一个十分严峻的问题，以至于美国陆军当局禁止在兵营里装置热泵，这一禁令一直延续到1975年^[21]。为了解决热泵工作可靠性问题，爱迪生电气研究所 (the Edison Electric Institute) 鼓励热泵生产厂家为住宅和商业生产改进的热泵装置，并且详细监测改进装置的工作可靠性^[22]。一批经过改进的压缩机生产出来了，它克服了由于逆向循环所带来的润滑和冷却问题。并设计了一些新的操作循环。就这样，当时使得几百万台热泵装置得以售出。

由于美国人的这些开发工作，在二十世纪六十年代后期和七十年代初期，在全世界范围内扩大了热泵的应用。生产了以