

王洪利 田景瑞 张磊 等著



太阳能压缩式热泵 经济性评价

TAIYANGNENG YASUOSHI REBENG
JINGJIXING PINGJIA



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

太阳能压缩式热泵经济性评价

王洪利 田景瑞 张磊 等著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 提 要

本书以太阳能压缩式热泵系统为研究对象,采用理论分析和模糊评判方法,分别对太阳能压缩式热泵系统和几种用能系统进行了研究,旨在寻求最优用能方案。基于给定的用能面积,分别进行了冷热负荷计算,确定了太阳能压缩式热泵系统组成;选取了几种传统的用能方案,进行了系统设计和设备选型;利用模糊数学理论,分别对太阳能压缩式热泵系统安全运行和经济性进行了模糊评判,得到了影响热泵安全因素和经济性的权重因子;对于给定的用能面积,分别从设备初投资、年运行费用、年维护费用和投资回收期等方面,对太阳能压缩式热泵系统和其他几种用能方案进行了对比分析。

本书可供从事制冷和热泵产品设计、生产及运行的工程技术人员使用,也可供高等工科院校制冷、低温等专业本科生和研究生教学使用,同时还可供相关专业高校教师和从事能源与节能工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能压缩式热泵经济性评价/王洪利等著. —北京:
冶金工业出版社, 2016. 4

ISBN 978-7-5024-7182-8

I. ①太… II. ①王… III. ①太阳能—热泵—经济
评价 IV. ①TK515

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 048039 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 禹蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7182-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2016 年 4 月第 1 版, 2016 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 10.75 印张; 210 千字; 162 页

38.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号 (100010) 电话 (010)65289081 (兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

目前，能源短缺和环境污染已经成为制约人类社会高速发展的主要问题。酸雨、植被破坏、温室效应、臭氧层空洞、海洋污染等诸多生态环境问题已经成为全球关注的焦点。“我们不要过分陶醉于我们对自然界的胜利。对于每一次这样的胜利，自然界都报复了我们”。“我们不只是继承了父辈的地球，而是借用了子孙的地球”。为推动经济、社会 and 环境的友好发展，节能和环保已经成为 21 世纪全球共同关注的首要问题。

随着人民生活水平的不断提高，人们已经由过去满足温饱问题转变为对生活舒适度的追求。传统的北方冬季供暖，南方夏季制冷，到现在北方冬季不仅供暖，夏季还要制冷，南方夏季不仅制冷，冬季还要供暖。在社会总能耗中建筑能耗所占的比重正在逐年增加。建筑能耗主要包括家用电器、建筑的制冷与供暖等，所占比重已经达到社会总能耗的三分之一，所以对降低建筑能耗问题的研究潜力巨大。传统小容量锅炉供暖形式以及现在的集中供热形式普遍存在热效率低、污染严重等问题，只是集中供热形式的弊端往往被人们忽视。未来用能形式究竟采用哪种方案更加科学、合理，这也是广大能源工作者一直研究和探讨的问题。

太阳能属于一种可再生的清洁能源，分布广、储量大，同时具有很强的季节性和地域性。太阳能直接加热热水用于生活所用或冬季供暖，产生的热水波动很大，遇到极冷低温或阴雨天气甚至不能利用。热泵属于一种逆向循环，其效率较高，尤其在小温差下的效率更高。但极端天气对热泵影响很大。其中，空气源热泵在冬季极低温度时制热效果很差甚至不能工作。综合太阳能和热泵特点，可以将热泵和太阳能热水系统联合应用，将太阳能储热水箱中回收的热量经热泵加热用于冬季供暖，进而提高联合系统的效率。

本书以太阳能压缩式热泵系统为研究对象,采用理论分析和模糊评判方法,分别对太阳能压缩式热泵系统和几种用能系统进行了研究,旨在寻求最优用能方案。基于给定的用能面积,分别进行了冷热负荷计算,确定了太阳能压缩式热泵系统组成;选取了几种传统的用能方案,进行了系统设计和设备选型;利用模糊数学理论,分别对太阳能压缩式热泵系统的安全运行和经济性进行了模糊评判,得到了影响热泵安全因素和经济性的权重因子;对于给定的用能面积,分别从设备初投资、年运行费用、年维护费用和投资回收期等方面,对太阳能压缩式热泵系统和其他几种用能方案进行了对比分析。

本书由路聪莎、杜远航负责撰写第1章,贾宁、唐琦龙负责撰写第2、3章,田景瑞负责撰写第4章,张磊负责撰写第5章,王洪利负责撰写第6、7章。刘馨、张率华负责资料整理工作。王洪利负责全书统稿工作。

本书的出版得到了华北理工大学现代冶金技术省重点实验室和河北省自然科学基金项目(E2015209239)的资助。感谢所有为本书研究提供文献的国内外作者。

信息时代数据更新很快,如煤炭价格、电价和人工费用等因素波动较快,维修费用也会因使用情况有所不同,书中用能方案对比分析结果可能会与实际存在偏差。但本书介绍的计算方法以及从几种用能方案对比分析中获得的规律,可用于指导生产。

由于作者水平所限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2015 年秋于华北理工大学

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 环境保护和可持续发展	2
1.1.2 臭氧层破坏和温室效应	2
1.1.3 制冷剂替代及 CO ₂ 自然工质重新启用	2
1.1.4 太阳能热泵联合应用技术	4
1.2 太阳能的特点及利用技术	4
1.2.1 太阳能的特点	4
1.2.2 太阳能利用技术	5
1.3 太阳能热利用的形式	6
1.4 太阳能的分布	7
1.4.1 我国太阳能的分布	7
1.4.2 世界太阳能的分布	9
1.5 CO ₂ 跨临界热泵系统组成及研究现状	10
1.5.1 压缩机	11
1.5.2 膨胀装置及膨胀机	14
1.5.3 换热器	14
1.5.4 CO ₂ 跨临界循环	16
1.6 R134a 和 R1234yf 热泵技术研究现状	21
1.7 太阳能热泵系统组成及研究现状	23
1.7.1 国内研究现状	25
1.7.2 国外研究现状	38
1.8 太阳能热泵系统经济性分析	44
1.9 小结	47
参考文献	47
2 太阳能压缩式热泵负荷计算	58
2.1 气象条件	58
2.2 需求预测	58

2.3 冷、热负荷计算	59
2.3.1 热负荷计算	59
2.3.2 冷负荷计算	67
2.4 小结	71
参考文献	71
3 太阳能压缩式热泵系统组成	72
3.1 运行模式	72
3.1.1 串联式太阳能压缩式热泵系统	72
3.1.2 并联式太阳能压缩式热泵系统	73
3.2 系统组成	74
3.2.1 太阳能集热器	74
3.2.2 太阳能储热水箱	74
3.2.3 压缩机	75
3.2.4 换热器	75
3.2.5 节流装置	80
3.3 小结	80
参考文献	81
4 太阳能压缩式热泵及用能方案	83
4.1 应用概述	83
4.2 燃料情况	84
4.2.1 煤	84
4.2.2 柴油	85
4.2.3 天然气	85
4.3 用能方案	85
4.3.1 锅炉供暖	85
4.3.2 分体式空调	94
4.3.3 空调系统节能技术	99
4.3.4 多联式空调(热泵)机组	101
4.3.5 太阳能压缩式热泵系统	104
4.4 小结	108
参考文献	108

5 太阳能热泵节能分析	111
5.1 冬季锅炉供暖+夏季分体式空调制冷	111
5.1.1 燃煤锅炉+分体式空调	111
5.1.2 燃油锅炉+分体式空调	113
5.1.3 燃气锅炉+分体式空调	115
5.2 城市集中供热+分体式空调	117
5.2.1 冬季城市集中供热	117
5.2.2 夏季分体式空调制冷	117
5.2.3 成本费用	118
5.2.4 全年费用	118
5.3 热泵型分体式空调	118
5.3.1 制热工况	118
5.3.2 制冷工况	119
5.3.3 成本费用	119
5.3.4 全年费用	119
5.4 中央空调系统	119
5.4.1 制热工况	120
5.4.2 制冷工况	120
5.4.3 成本费用	120
5.4.4 全年费用	120
5.5 太阳能压缩式热泵系统	121
5.5.1 制热工况	121
5.5.2 制冷工况	122
5.5.3 成本费用	124
5.5.4 全年费用	124
5.6 节能分析	125
5.6.1 设备初投资对比	125
5.6.2 运行费用对比	125
5.6.3 使用寿命对比	126
5.6.4 维护费用对比	127
5.6.5 投资回收期对比	127
5.7 讨论与建议	128
5.7.1 燃煤锅炉+分体式空调	128
5.7.2 城市集中供热+分体式空调	128

5.7.3 热泵型分体式空调	129
5.7.4 中央空调系统	130
5.7.5 太阳能压缩式热泵系统	130
5.8 小结	130
参考文献	130
6 太阳能压缩式热泵经济性模糊评判	132
6.1 模糊理论基础	132
6.1.1 基本概念	132
6.1.2 模糊综合评判基本理论	133
6.2 太阳能压缩式热泵系统模糊评判	134
6.2.1 模糊评判指标量化	134
6.2.2 权重向量的确定	134
6.2.3 隶属度及模糊评判矩阵的确定	136
6.3 太阳能压缩式热泵经济性模糊评判	138
6.3.1 评价指标体系	138
6.3.2 模糊综合评判方法	139
6.3.3 因素集和等级集的确定	140
6.3.4 因素和子因素权重系数的确定	140
6.3.5 模糊统计试验	141
6.3.6 模糊统计试验的模糊综合评判	141
6.3.7 综合评价结果	142
6.3.8 算例评判	142
6.4 太阳能压缩式热泵安全运行评价及方法	144
6.4.1 安全运行重要性	144
6.4.2 评价指标体系	146
6.4.3 模糊综合评判方法	147
6.4.4 因素集和等级集的确定	147
6.4.5 因素、子因素权重系数的确定	147
6.4.6 模糊统计试验	148
6.4.7 模糊统计试验的模糊综合评判	148
6.4.8 综合评价结果	149
6.4.9 算例评判	149
6.5 用能方案定量评价及方法	151
6.5.1 模糊综合评判方法	153

6.5.2 因素集和等级集的确定	153
6.5.3 因素、子因素权重系数的确定	154
6.5.4 模糊统计试验	154
6.5.5 模糊统计试验的模糊综合评判	154
6.5.6 综合评价结果	155
6.5.7 算例评判	155
6.6 小结	157
参考文献	158
 7 用能方案经济性对比	 159
7.1 投资分配对比	159
7.2 投资回收对比	160
7.3 小结	162

1 绪 论

1.1 研究背景

能源和环境问题是当今社会发展所面临的两大难题,酸雨、植被破坏、温室效应、臭氧层空洞、海洋污染等诸多生态环境问题已经成为全球关注的焦点。为推动经济、社会 and 环境的友好发展,节能和环保已经成为 21 世纪全球共同关注的首要问题^[1]。人们在积极开展节能降耗的同时,已把能源利用的重点转移到可再生能源的开发和利用上来。

我国拥有储量丰富的一次能源,占世界总储量的 4%。能源探明总储量的结构为:原煤 89.3%,原油 3.5%,天然气 1.3%,水能 5.9%。能源剩余储量结构为:原煤 58.8%,原油 3.4%,天然气 1.3%,水 36.5%^[2]。但是我国煤等化石燃料所占的比重很大,能源结构很不合理,虽然近年来煤炭在总能源中的比重正在逐渐下降,但由于我国对能源的需求逐年递增,煤炭消耗的总量仍会不断增加^[3]。除煤炭资源外,石油是我国另一个迫切需要解决的问题,虽然我国已经探明的石油储量居世界第十位为 38 亿吨,但是由于我国经济发展趋势的不断快速上升,现有的石油储量已经不能满足我国经济的发展需求。因此,我国石油供应的短缺量还是需要依赖进口,受国际石油市场牵制很大,可能导致能源安全问题。我国上述的能源结构已经对自然环境造成了巨大的破坏,煤炭的大量开发和利用,对环境最明显的影响就是排放大量的污染气体,如 SO_2 、 NO_x ,这是形成酸雨的主要因素;另外,向环境中排放大量的 CO_2 也是导致全球气候变暖的主要原因。

虽然我国自然资源储量丰富,但是由于我国人口基数大,人均资源占有量较世界人均水平低 50%。预计到 2030 年我国能源短缺量达到 2.5 亿吨标准煤,到 2050 年约为 4.6 亿吨标准煤,将占世界煤炭消费总量的一半以上^[4]。我国国内对石油需求的保证有 40%的缺口,按照目前的发展趋势,预计到 2020 年我国石油进口量将达到 2.5 亿吨,对进口石油的依赖程度达到 60%^[5]。太阳能作为一种绿色、可持续利用的清洁能源,其开发和利用得到了国际社会的普遍重视。

制冷空调行业因其本身耗能加之传统制冷剂对环境的破坏,促使节能和制冷剂替代问题成为该领域的前沿课题。国内外专家学者和科技人员对相关问题的关注越来越多,同时,国内外资金项目也加大了对该领域前沿性和创新性研究的资助力度。

1.1.1 环境保护和可持续发展

在人类社会高速发展的今天,全球范围内的能源和环境问题显得更加重要和迫切。人类在享受丰富物质生活的同时,也对环境造成了很大破坏。正如恩格斯在《自然辩证法》^[6]中所说:“我们不要过分陶醉于我们对自然界的胜利。对于每一次这样的胜利,自然界都报复了我们。”人类在享受生产力巨大发展所带来的丰厚回报的同时,也遭到自然界的无情报复。1962年,Rachel Carson的《寂静的春天》,揭开了人与自然共同生存问题的思考^[7];1972年3月,罗马俱乐部发表的《增长的极限》研究报告,深入分析了人与自然之间的关系,指出自然资源是有限的,人类必须自觉地抑制增长,否则将使人类社会陷入崩溃^[8]。“我们不只是继承了父辈的地球,而是借用了子孙的地球”——这句话寓意深刻,《联合国环境方案》曾用这句话来告诫世人。1972年6月,在瑞典斯德哥尔摩召开的联合国人类环境会议(United Nations Conference on the Human Environment)是世界环境保护运动史上一个重要的里程碑。它是国际社会就环境问题召开的第一次世界性会议,标志着全人类对环境问题的觉醒。1972年出版的《只有一个地球》^[9]一书为可持续发展观奠定了理论基础;1981年,美国学者布朗在《建设一个可持续发展的社会》的著作中首次使用并阐述了“可持续发展”的新观点^[10];1987年,联合国环境与发展大会(UNCED)的报告《我们共同的未来》对可持续发展进行了明确定义。

1992年联合国环境与发展大会(UNCED)通过了《21世纪议程》报告,并最终促进了1997年《京都议定书》的签订^[11]。中国政府于1994年3月通过了《中国21世纪议程》,其战略目标确定为“建立可持续发展的经济体系、社会体系和保持与之相适应的可持续利用资源和环境基础”。

1.1.2 臭氧层破坏和温室效应

常规制冷剂对环境的影响主要表现在对臭氧层破坏和产生温室效应。臭氧层破坏和温室效应表现在臭氧含量不断减少和CO₂浓度不断增加,将会对人类居住的环境产生巨大的影响,甚至是灾难性后果^[12,13]。臭氧层破坏和温室效应已经成为全球共同关注的问题。

臭氧层破坏和温室效应已经成为国际间共同关注的问题,增强环境保护意识,走社会可持续发展的道路,已经成为必然的选择。在开展环保制冷剂的替代研究中,启用自然工质不失为一条最安全的途径。

1.1.3 制冷剂替代及CO₂自然工质重新启用

随着CFCs、HCFCs禁用的提出,人们对制冷剂替代的研究方兴未艾。近十

多年来科学家们通过不懈努力,研究出大量的过渡性或长期的 CFCs 和 HCFCs 替代物,并研究出相应的应用技术及设备,在制冷和空调行业得到广泛的应用。20 世纪 90 年代,美国杜邦、联信、英国帝国化学公司、美国环保局 (EPA) 和美国 ARI (制冷学会) 提出了自己的替代物^[14]。

目前,制冷剂替代主要有两条途径:以德国、瑞典等欧盟国家为代表的一派主张采用碳氢化合物做制冷剂,认为采用生态系统中现有的天然物质作为制冷剂,可从根本上避免环境问题,替代物为 R717、R744、R290、R600a 四种;以美国和日本为代表的另一派主张采用 HFCs 等人工合成制冷剂。图 1-1 给出了制冷剂替代示意图。

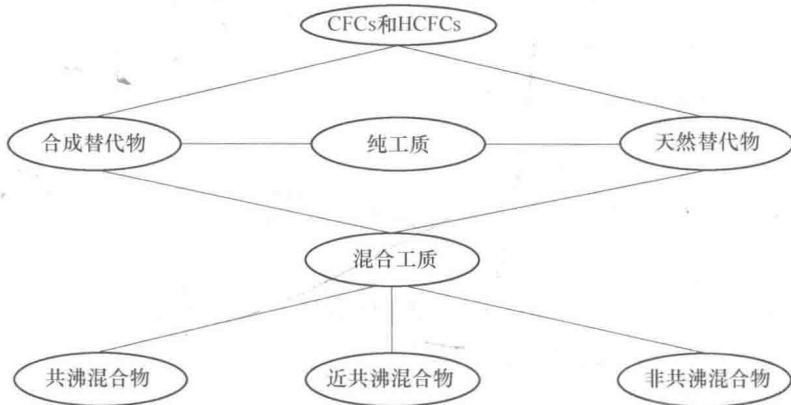


图 1-1 制冷剂替代示意图

虽然新合成的制冷工质在替代 CFCs 和 HCFCs 类制冷剂方面具有积极作用,但研究表明,这些新工质并没有达到“长期”替代物的要求,这些物质的寿命或长或短,都会增加温室效应,或分解产生其他的副作用。从环境的长期安全性出发,重新启用自然工质是一种非常安全的选择。

在制冷剂历史上,人类最初使用的是 CO_2 、 NH_3 和 SO_2 等自然工质。19 世纪后期, CO_2 作为制冷剂曾被广泛应用在船用制冷机中。随后,性能优良的合成制冷剂逐渐替代了 CO_2 制冷剂。近 20 多年,臭氧层破坏和温室效应问题日益突出,合成制冷剂的使用开始受到人们的质疑,自然工质的研究开始复苏^[15]。

作为自然工质, CO_2 具有很多优点^[16]: (1) 环境友好性 ($\text{ODP}=0$, $\text{GWP}=1$); (2) 容积制冷量大; (3) 无毒、不可燃; (4) 压比小,导热性好; (5) 与 PAG 和 POE 等合成润滑油互溶性好; (6) 价格便宜等。另外, CO_2 也具有一些不足之处,如临界温度较低 (30.98°C)、临界压力很高 (7.377MPa)、系统效率较低等。尽管 CO_2 作为制冷工质具有一些缺点,但已故前国际制冷学会主席 G. Lorentzen 仍认为 CO_2 是无可取代的制冷工质,并提出跨临界循环理论,指出

作为制冷工质, CO_2 制冷循环不宜采用普通工质的亚临界循环, 而是采用跨临界循环形式, 其可望在制冷空调和热泵领域发挥重要作用。

1.1.4 太阳能热泵联合应用技术

太阳能属于一种可再生的清洁能源, 分布广、储量大, 同时具有很强的季节性和地域性。太阳能直接加热热水用于生活所用或冬季供暖, 产生的热水波动很大, 遇到极冷低温或阴雨天气甚至不能利用。热泵属于一种逆向循环, 其效率较高, 尤其在小温差下的效率更高。但极端天气对热泵影响很大, 其中, 空气源热泵在冬季极低温度时制热效果很差甚至不能工作。综合太阳能和热泵特点, 可以将热泵和太阳能热水系统联合使用, 将太阳能储热水箱中回收的热量经热泵加热用于冬季供暖, 进而提高联合系统的效率。

1.2 太阳能的特点及利用技术

太阳向宇宙空间发射的辐射功率为 $3.8 \times 10^{23} \text{ kW}$ 的辐射值, 其中 20 亿分之一到达地球大气层。到达地球大气层的太阳能, 30% 被大气层反射, 23% 被大气层吸收, 47% 到达地球表面, 其功率为 $8 \times 10^{13} \text{ kW}$, 也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于燃烧 500 万吨煤释放的热量。全球人类目前每年能源消费的总和只相当于太阳在 40min 内 照射到地球表面的能量。

太阳能是储量巨大、可再生的清洁能源, 在地球已经经历过的数十亿年中, 太阳能只向外界辐射了其自身能量的 2%。如果人类能够充分开发利用太阳能, 完全可以供给人类几十亿年使用, 而且太阳能对环境的危害几乎为零, 也不会排放任何温室气体, 是人类在以后发展中需要充分开发利用的清洁可再生能源。

太阳能在通过大气层时能量会被耗散, 受到空气问题以及气候等多种因素的影响, 要求太阳能利用设备有较大的集热器面积。为了降低太阳能供给热量的间歇性, 太阳能系统还应装备储热装置, 这些让太阳能热利用系统的初期设备投资很大。由于需要供给普通建筑供暖用水及生活热水的温度不要求很高, 采用太阳能热利用设备可以做到对热能能级的合理匹配调控。

1.2.1 太阳能的特点

太阳能作为人类最主要的可再生能源之一, 不同于化石能源和其他可再生能源, 其具有自身的特点:

(1) 数量巨大, 强度较弱。太阳辐射经过大气层到达地球表面总能量可达 $8.0 \times 10^{13} \text{ kW}$, 相当于全世界总发电量的几十万倍, 而且太阳辐射足够维持 600 亿年。

虽然地球接受的太阳能总量巨大, 但是其强度较弱, 即单位时间投射到单位面积上的太阳能量较少。已知太阳常数为 1367 W/m^2 , 而经过大气层后太阳辐射

强度衰减 50% 以上, 还不到 $700\text{W}/\text{m}^2$ 。这就意味着, 要想利用这种低密度的太阳能, 只有采用大面积的聚光装置以达到应用要求。

(2) 清洁能源。太阳能利用过程中没有废液、废气的排放, 不会对人体和环境产生危害, 是名副其实的清洁能源。常规能源利用过程中排放大量的污染物, 对生态环境和人体健康造成巨大危害; 核能虽然污染较轻, 但其放射性危害和核废料的处理也较为麻烦。此外, 化石能源的消耗产生大量的二氧化碳, 引起温室效应, 导致一系列生态和气候变化。据估算, 要消除大气中的污染物所需的费用大约是所用燃料价值的 10 倍, 而太阳能不涉及这些问题。

(3) 不连续, 不稳定。太阳能的最大弱点就是不连续、不稳定的特性。由于地球自转造成的昼夜之分, 导致一年中有一半以上的时间未能利用太阳能。随着季节的更替, 一天中时刻的变化, 加之气象条件变化, 太阳辐射的强度也有较大的变化, 这就更加剧了太阳能利用的困难程度。所以, 为了太阳能的稳定利用, 系统需要配置辅助能源系统和蓄能装置。

(4) 区域分布。太阳能分布广阔, 易于获取, 且省去了运输环节; 但是随着地理位置和气象条件的变化, 太阳辐射强度有较大差异。因此, 太阳能开发利用过程中, 必须要因地制宜, 才能使太阳能利用最优化。

1.2.2 太阳能利用技术

太阳能利用技术可以分为太阳能光热转换技术、太阳能光伏转换技术和太阳能光化学转换技术三种。

(1) 太阳能光热转换技术。太阳能热利用的基本原理是通过聚光集热系统, 最大限度地将采集和吸收到的太阳能转化为热能, 加热水、空气和有机工质等传热介质, 继而为生产和生活过程提供所需的能量。按利用温度不同分为太阳能低温 ($<100^\circ\text{C}$) 利用、中温 ($100\sim 500^\circ\text{C}$) 利用和高温 ($>500^\circ\text{C}$) 利用。

太阳能热利用可分为太阳能热发电和建筑用能两方面, 其中太阳能热发电、太阳能热水器和太阳能制冷等发展较快。

(2) 太阳能光伏转换技术。太阳能光伏转换是利用太阳能电池的光伏效应, 将太阳能转化为电能。太阳能光伏发电系统一般包括太阳能电池组件、控制器、逆变器、蓄电池和测量设备等, 有离网型和并网型两种系统方式。

(3) 太阳能光化学转换技术。光化学转换技术主要是指光化学制氢技术, 即将太阳能转化为氢的化学自由能。当前国际上太阳能制氢的方法主要有五种: 光电化学分解水制氢、光催化分解水制氢、热化学分解水制氢、太阳能发电电解水制氢和光生物化学分解水制氢。中国的太阳能资源十分丰富, 全国有 $2/3$ 以上的地区年日照时数在 2000h 以上。良好的太阳能辐照资源条件, 以及节能、环保、经济的优点, 更加显示出了开发利用太阳能的优越性。从古至今人们根据太

阳辐射能的特点,全方位、多渠道地使用太阳能为人类造福。太阳辐射能的特点:随处可见的广泛性;无毒、无害的清洁性;不同地区的差异性;能量密度的分散性,实际使用中要得到尽可能多的太阳能辐射,就需要增加采光面积,把设备结构变得复杂,还增加了系统的占地面积、设备用料以及投资成本;太阳能随季节、昼夜、气候等自然条件的变化,不稳定及间歇性的特点。

1.3 太阳能热利用的形式

太阳能热利用形式可以概括为如下几种:

(1) 被动式太阳房。区别于主动式太阳房,被动式太阳房不需要任何机械与动力设备。被动式太阳房的设计要考虑建筑物的朝向、当地太阳高度角的大小、外围护的结构及材料、建筑内部空间及蓄热材料的选择,使建筑物本身能够高效地收集、存储和分配太阳辐射能,无需辅助热源,并且达到冬季采暖、夏季遮阳降温的作用。按不同的采集太阳能的方式,被动式太阳房大致可分为直接收益式太阳房、集热-蓄热墙式太阳房、附加阳光间式太阳房、屋顶池式太阳房以及直接收益窗和集热墙组合式太阳房。

(2) 太阳能集热器。太阳能集热器吸收太阳辐射,将有效热能传给传热工质,并且最大限度地保证吸收的热量不再散失,传热工质多选择液态物质或空气^[17]。太阳能集热器的工作温度范围广,在生活、工业、娱乐业等场所采暖、供热水等诸多领域中已经广泛应用了太阳能集热器。从国内市场来看,一半以上的太阳能系统中应用的是真空管式集热器。平板型集热器的耐久性、适用工况、耐压上还不如真空管集热器。但是平板型太阳能集热器造价低廉、故障率低、热传递性、与传热介质的相容性较好^[18],应进一步提高平板型太阳能集热器的效率以及透明盖板、吸热板的加工工艺。

(3) 太阳能热水器。太阳能热水器是世界太阳能热利用产业中的骨干。太阳能热水器的使用能大幅缓解由于热水消耗量的增加而引起的能源供应压力和环境压力^[19]。太阳能热水器代替电热水器,每平方米采光面积节电 $300\text{kW}\cdot\text{h/年}$,削弱了城市的晚间用电高峰。但是,现有许多太阳能热水器的功能还不完善,品种、规格、尺寸等都不满足建筑的要求,承载、防风、避雷等安全措施不够健全^[20]。为了使太阳能热水系统成为民用建筑的配套设备,科研人员在最大限度地优化太阳能热水系统的产品结构功能、热水系统与建筑整合设计、太阳能与常规能源的匹配等方面进行了研究。

(4) 太阳能采暖系统就是一种主动式的太阳能热利用系统,由太阳能集热器、蓄热设备、辅助热源和循环水泵等设备组成,可以吸收、存储太阳能,达到连续采暖的效果。但是,系统的运行温度较低,因为太阳能集热器的效率随着运行温度的升高而降低。我国大部分冬季需要采暖的地区,目前大多广泛使用的是

短期蓄热的太阳能采暖系统，太阳能保证率在 20%~40%^[21]。预计到 2020 年，我国新建的节能建筑中，约 10% 的建筑中应用太阳能采暖系统，年可节约 660 万吨标准煤。

1.4 太阳能的分布

1.4.1 我国太阳能的分布

我国太阳能光照资源丰富，全国 60% 以上的地区年辐射总量大于 5020MJ/m²，年平均日照小时数大于 2000h。我国太阳能资源分布见表 1-1。

表 1-1 中国太阳能资源分布表

类型	日照 /h · a ⁻¹	年辐射量 /MJ · m ⁻²	等量热量所 需标准燃煤 /kg	主要地区	备注
一类	3200~3300	6680~8400	225~285	宁夏北部，甘肃北部，新疆南部，青海西部，西藏西部	最丰富地区
二类	3000~3200	5852~6680	200~225	河北西北部，山西北部，内蒙古南部，宁夏南部，甘肃中部，青海东部，西藏东南部，新疆南部	较丰富地区
三类	2200~3000	5016~5852	170~200	山东，河南，河北东南部，山西南部，新疆北部，吉林，辽宁，云南，陕西北部，甘肃东南部，广东南部	中等地区
四类	1400~2000	4180~5016	140~170	湖南，广西，江西，浙江，湖北，福建北部，广东北部，陕西南部，安徽南部	较差地区
五类	1000~1400	3344~4180	115~140	四川大部分地区，贵州	最差地区

我国大部分地区太阳能资源都比较丰富，尤其是在我国西北部，如青海、新疆、西藏等地区；而我国人口密度比较大的中东部，如河北、北京、山东、山西也是太阳能分布比较丰富的地区。如果太阳能利用技术能够在这些地区大规模发展利用，节约的一次能源耗费和减少的污染物排放将是十分巨大的。

由中国气象局风能太阳能资源中心数据，图 1-2 为我国年平均太阳能总辐射量月变化，图 1-3 为我国年平均太阳能直接辐射总量月变化，图 1-4 为我国年平均太阳能直射比月变化，图 1-5 为我国年平均日照时数总量月变化。