热管式太阳能PV/T系统性能研究与优化

陈红兵　张磊　邵宗义　著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

热管式太阳能 PV/T 系统性能研究与优化

陈红兵　张　磊　邵宗义　著

机 械 工 业 出 版 社

本书以热管式太阳能 PV/T 热泵系统为研究对象，从实验和模拟两个方面对该系统的性能进行了研究。书中详细介绍了热管式太阳能 PV/T 热泵系统的实验装置，提出了系统的性能评价指标；对该系统在供热和集热两种运行模式，晴天和阴天两种运行工况下进行了实验测试；详细介绍了热管式太阳能 PV/T 热泵系统的数学模型，并用实验数据对模型进行了验证，基于验证过的数学模型分析了太阳辐照强度、室外空气温度和冷凝器入口水温对系统性能的影响，并对系统进行了优化设计和分析；最后，对热管式太阳能 PV/T 热泵系统在北京地区典型建筑中的应用进行了研究，提出了三种可能的运行方案，并通过经济效益和环境效益分析选出了最优方案。

本书介绍的 PV/T 技术实现了太阳能光电光热的综合利用，有效提高了太阳能的综合利用率，为热管式太阳能 PV/T 热泵系统的优化设计提供了重要的参考依据。其研究内容应用于建筑领域，为改善能源短缺的现状，提高人们的生活舒适度和居住条件提供了帮助。

本书可供太阳能利用、建筑节能等相关领域科研工作者和工程技术人员参考，也可作为相关管理人员了解相关知识的参考文献，并可作为培训教材使用。

图书在版编目（CIP）数据

热管式太阳能 PV/T 系统性能研究与优化 / 陈红兵，张磊，邵宗义著 .
—北京：机械工业出版社，2017. 5
ISBN 978-7-111-56749-3

Ⅰ. ①热…　Ⅱ. ①陈…②张…③邵…　Ⅲ. ①太阳能聚热器—研究
Ⅳ. ①TK513. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 084470 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：刘　涛　责任编辑：刘　涛　林　辉
责任校对：刘志文　封面设计：路恩中
责任印制：李　飞
北京天时彩色印刷有限公司印刷
2017 年 5 月第 1 版第 1 次印刷
169mm × 239mm · 8 印张 · 148 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-56749-3
定价：35.00 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

前　言

太阳能光伏发电技术是可再生能源利用技术的重要组成部分，光伏发电效率低的问题一直制约着光伏发电技术的发展。研究表明，光伏板的温度会影响其发电效率，光伏电池内阻随光伏板温度的升高而增大，其发电效率就会降低。因此，可以通过降低光伏板的温度来提高光伏发电的效率，同时将热量加以利用。为此本书介绍了一种热管式太阳能 PV/T 热泵系统，把热管式太阳能光伏板（PV 板）用作热泵系统的蒸发器，在降低光伏板温度、提高光伏板发电效率的同时，将 PV 板中的热量加以利用。

本书以热管式太阳能 PV/T 热泵系统为研究对象，从实验和模拟两方面对该系统的性能进行了研究。首先，本书对热管式太阳能 PV/T 热泵系统的实验装置进行了详细介绍，并提出了系统的性能评价指标；其次，对该热泵系统在供热和集热两种运行模式、晴天和阴天两种运行工况下进行了实验测试；然后，详细介绍了热管式太阳能 PV/T 热泵系统的数学模型，并用实验数据对模型进行了验证，基于验证过的数学模型分析了太阳辐射强度、室外空气温度和冷凝器入口水温对系统性能的影响，并对系统进行了优化设计分析；最后，对热管式太阳能 PV/T 热泵系统在北京地区典型建筑中的应用进行了研究，提出了三种可能的运行方案，并通过经济效益和环境效益分析选出了最优方案。

本书介绍的热管式太阳能 PV/T 系统实现了太阳能光电光热的综合利用，有效地提高了太阳能的综合利用率，为热管式太阳能 PV/T 热泵系统的优化设计提供了重要的参考依据。其研究内容应用于建筑领域，为改善能源短缺的现状、提高人们的生活舒适度和居住条件提供了帮助。本书可作为从事相关技术研究的专业技术人员的技术资料，也可作为广大管理人员和科技工作者了解相关知识和提高技术水平的重要参考资料，还可作为相关企业的培训教材使用。

在本书编写过程中，王起、褚赛、栾丹明、李强、牛浩宇和闫晓丽

（排名不分先后）等同志也参加了部分内容的资料收集、整理、组织、编写和审阅工作，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有错漏之处，恳请读者批评指正。

作　者

目　录

前　言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　研究目的 …… 1

1.2　研究背景 …… 2

1.3　研究意义 …… 3

1.4　PV/T 技术的国内外研究现状 …… 4

1.5　主要研究内容 …… 10

第 2 章　热管式太阳能 PV/T 热水系统的性能测试 …… 12

2.1　实验装置 …… 12

2.2　测量仪器及设备 …… 15

2.3　实验测试及系统性能计算方法 …… 19

2.3.1　实验测试 …… 19

2.3.2　系统性能计算方法 …… 20

2.4　实验结果及分析 …… 22

2.4.1　热管式太阳能 PV/T 热水系统瞬时性能分析 …… 22

2.4.2　系统性能的影响因素分析 …… 26

2.5　本章小结 …… 33

第 3 章　热管式太阳能 PV/T 热泵系统的性能测试 …… 35

3.1　实验装置 …… 35

3.2　测试仪器及系统性能计算方法 …… 37

3.3　实验结果及分析 …… 38

3.3.1　系统供热模式 …… 38

3.3.2　系统集热模式 …… 45

3.4　本章小结 …… 53

第 4 章　热管式太阳能 PV/T 热泵系统的数值模拟 …… 54

4.1　热管式太阳能 PV/T 热水系统模型的建立 …… 54

4.1.1 玻璃板的数学模型 …… 54
4.1.2 光伏板的数学模型 …… 56
4.1.3 铝片的数学模型 …… 58
4.1.4 热管的数学模型 …… 58
4.1.5 联箱的数学模型 …… 61
4.1.6 水箱的数学模型 …… 61
4.1.7 数学模型的离散 …… 61
4.2 热泵系统模型的建立 …… 63
4.2.1 制冷工质状态参数及物性计算 …… 63
4.2.2 冷凝器的数学模型 …… 65
4.2.3 蒸发器的数学模型 …… 70
4.2.4 压缩机的数学模型 …… 70
4.2.5 毛细管的数学模型 …… 72
4.2.6 系统性能的评价 …… 73
4.2.7 数学模型的求解 …… 74
4.3 模拟值与实验值的对比 …… 76
4.4 结果及分析 …… 79
4.4.1 太阳辐射照度对系统性能的影响 …… 80
4.4.2 室外空气温度对系统性能的影响 …… 82
4.4.3 冷凝器入口水温对系统性能的影响 …… 83
4.5 热管式太阳能 PV/T 热泵系统的优化设计 …… 85
4.5.1 压缩机的选取 …… 85
4.5.2 多台集热器的连接 …… 85
4.5.3 光伏电池覆盖率对系统性能的影响 …… 87
4.5.4 背板吸收率对系统性能的影响 …… 88
4.5.5 热管间距对系统性能的影响 …… 90
4.6 本章小结 …… 91
第 5 章 新型热泵系统应用案例分析 …… 93
5.1 北京地区气候特点及太阳能资源情况 …… 93
5.2 典型建筑概况 …… 94
5.2.1 农村典型住宅建筑 …… 94
5.2.2 建筑热负荷需求分析 …… 96

5.2.3　建筑电负荷需求分析 …… 97
5.3　全年工况分析 …… 98
5.3.1　太阳辐射量计算 …… 98
5.3.2　系统运行方案设计 …… 103
5.3.3　热电性能分析 …… 104
5.3.4　经济和环境效益分析 …… 110
5.4　本章小结 …… 113
第6章　结论与建议 …… 114
6.1　结论 …… 114
6.2　系统运行策略 …… 116
6.3　不足与展望 …… 116
参考文献 …… 117

CHAPTER 1

第1章 绪 论

1.1 研究目的

目前，家用太阳能利用技术主要包括太阳能光伏发电技术和太阳能热水技术。太阳能热水技术主要用于家用生活热水，用于建筑热水供暖时，存在出水温度不高、热效率低和稳定性差等问题。太阳能光伏板是太阳能发电的主要装置，它不但可以发电供给建筑用电，而且可以用作建筑的外饰面，与建筑本身形成一体，既实用又美观。但目前太阳能光伏板价格较高，且光电转换效率低。近几年，一些学者提出了光伏/光热（Photovoltaic/Thermal，PV/T）技术，利用空气或水等介质对太阳能光伏板（PV 板）进行冷却，降低光伏板的内阻，以提高发电效率。

本项研究拟在太阳能光伏板的背面安装热管，通过热管把光伏板中的热量输送到联箱的水中，使光伏板冷却以提高发电效率，同时加热循环水。热管式太阳能 PV/T 热水系统与热泵系统相连，可通过热泵将热量提高至较高品位。在非供暖季，当太阳辐射照度足够高时热管式太阳能 PV/T 热水系统能满足生活热水需求，无须运行热泵系统，由热管式太阳能 PV/T 热水系统直接供给热水；当太阳辐射照度偏低时，热管式太阳能 PV/T 热水系统不能满足生活热水的需求，或者在供暖季，热负荷需求较大时，启动热泵系统用于供暖和生活热水。该系统把太阳能发电和热利用集于一体，不仅可

以提供系统和建筑用电，而且可以为建筑供暖和生活热水提供热量，同时可以节省建筑物屋顶的面积。此装置适用于多层建筑或平房，在农村地区具有非常广阔的应用前景，对于一些地处山区、交通不便的村镇，更能体现出光伏光热综合利用的优势。

1.2 研究背景

1. 世界能源危机

美国莱斯大学的 Richard E. Smalley 教授说过，在全球 10 大挑战（能源、纯净水、食物、环境、贫穷、人口膨胀、疾病、教育、恐怖主义和战争）中，能源无疑列在首位。没有足够的能源，人类的一切生产活动都将无法进行。能源是世界各国经济发展、人类生存的重中之重。然而从图 1-1[1] 中可以看出，石油、天然气和煤仍然是当今世界的主要能源消耗，很多学者认为石油、天然气资源将在 2050 年左右消耗用尽[2,3]。

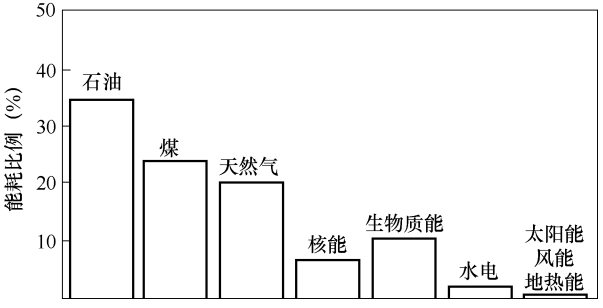


图 1-1 世界能源消耗结构

在我国，经济的快速发展对能源的需求量越来越大，从长久来看能源问题是我国综合国力发展所面临的巨大问题。2011 年的统计表明，我国煤炭、天然气剩余开采时间大约为 30 年，石油的剩余开采时间约为 10 年。开发新能源是我国乃至全世界亟待解决的重大问题。

2. 现有能源的利用造成诸多环境问题

大气污染是我国面临的另一大问题。我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，煤炭约占商品能源消费结构的 76%，大气污染主要是由燃煤造

成的。大气污染程度随着能源消耗的增加而不断加重。每年燃煤造成的 SO_2 和烟尘排放量约占废气排放总量的 70% ~80%，目前已有 62.3% 的城市空气中二氧化硫年平均浓度超过国家环境空气质量二级标准（保障人群在环境中长期暴露不受危害的基本要求），日平均浓度超过三级标准（人群在环境中短期暴露不受急性健康损害的最低要求）。太阳能作为一种清洁、可再生能源，开发利用前景广阔。

3. 太阳能利用率较低

太阳能资源取之不尽、用之不竭，是最为常见的可再生能源。在新能源中太阳能是最具有开发潜力的一种能源，太阳能的主要优点有：储量丰富、处处可见，如果太阳能成为主要的利用能源将有利于缓解运输压力和能源供需矛盾；无污染性，太阳能可以直接转化为电能或者热能，不会产生任何有害的气体或者污染物；廉价，如果将太阳能利用率提至较高的水平，其将成为最廉价清洁的能源[4,5]。

尽管太阳能具有诸多优点，但是到目前为止，太阳能并未能发挥其在能源利用方面的优势。其缺点主要有太阳的辐射能密度很低、受天气条件的影响较大和受季节影响较大等。但目前最主要的劣势在于太阳能利用率较低。太阳能光伏利用可以直接将太阳能转化为电能，是最为直接有效的太阳能利用方式。太阳辐射照射到光伏板上只有一小部分被光伏板吸收并转化为电能，大部分其余的太阳能转化为热能，使光伏板的温度升高，从而导致光伏电池的内阻增大，使发电效率降低。

1.3 研究意义

建立了一种新型的热管式太阳能 PV/T 系统，对这种新型的 PV/T 系统的性能进行研究，分析各种影响因素对系统性能的影响，对优化系统结构、提高系统的性能具有一定的学术研究价值。

本项研究的最终目的是提高 PV/T 系统的太阳能光伏光热利用率。在利用光伏板发电的同时获取较高的热量，并且利用热泵将这部分热量提升至较高的品位，从而加以充分的利用。本研究可以提高太阳能的利用率，从而减少化石能源的利用，缓解能源短缺问题，减少温室气体和污染物的排

放，使能源的消费结构得以优化。

此外，人们对生活舒适度的追求越来越高，用户对建筑服务水平提出了更高要求。尤其是偏远的农村地区，能源短缺比较严重，人们的要求更加迫切。将本书介绍的系统应用于建筑领域，不仅可以提供建筑用电，而且可以提供供暖和生活热水用热，有效地改善了能源短缺的现状，提高人们的生活舒适度，改善居住条件及周边环境。

1.4 PV/T 技术的国内外研究现状

目前，提高光伏板发电效率的方法主要有以下几种：被动冷却型光伏板、水冷型 PV/T 系统、热管式 PV/T 系统、直膨式 PV/T 系统、热管式 PV/T 与热泵混合系统。

1. 被动冷却型光伏板

被动冷却型光伏板是指在光伏板的背面安装散热肋片或者其他散热结构，利用自然通风使光伏板冷却，降低光伏板的温度以提高光伏板的发电效率，参考文献［6-10］对这种结构进行了研究。

孙健、施明恒[6]建立了带有散热翅片的聚光太阳能 PV/T 热电联产系统内部传热过程的一维准稳态数学模型，对传热过程进行了数值模拟，分析了空气质量流速、入射光强度、聚光比、环境温度、上部通道高度及翅片参数对系统的空气温度、电池板温度及系统热、电效率的影响。结果表明：随着入射光强、聚光比的增加，空气出口温度和电池板温度都会增加，系统热电总效率增加；通过增加空气流量可以有效降低电池温度，提高电池的光电转换效率和系统的总能量利用效率；吸热板背面的翅片可以强化通道内空气的传热过程，降低电池板的温度，系统效率可增加约 2%；在相同的光照条件下，入口空气温度越低，上部通道越窄，系统热效率越高。研究结果为聚光太阳能 PV/T 热电联产系统的设计和运行提供了理论依据。

李思琢[10]对自然冷却下光伏板的性能进行了研究。该研究首先搭建了光伏板有肋片和无肋片的对比实验台，并建立一维准稳态数学模型。通过数学模型，该学者分析研究了光伏板倾斜角、周围环境的风速和周围环境的温度对系统电性能的影响规律；然后对系统在一天不同时刻的电性能的

动态特性进行分析，并分析原因；最后分析研究了肋片高度和肋片间距对系统电性能的影响。

2. 水冷型 PV/T 系统

水冷型 PV/T 系统是指在光伏板的背面安装蛇形水流通道或者其他的水流通道，利用水流降低光伏板的温度，并将热量加以利用，参考文献［11-26］对这种结构进行了研究，其中：

荆树春、朱群志等[11]建立了一种铝方管结构的 PV/T 一体化系统，搭建了该系统的实验装置并建立了数学模型。通过实验测试和仿真模拟研究了太阳辐射照度、铝方管结构中的水流量和环境温度对该系统的影响。该系统热效率可以达到 50%，热水的温度可以达到 39℃；对光伏板的热量加以利用的同时，降低了光伏板的温度，提高其发电的效率，并且大幅度降低了 PV/T 系统的自重。

穆志君、关欣等[12]搭建了 PV/T 系统电热性能实验台。该实验是一个对比实验，实验装置是在光伏板的背面加装了流道集热器；对比装置则未在光伏板的背面加装集热器。该实验研究了 PV/T 系统的电效率和系统循环水温度的关系。实验结果表明加装流道集热装置的 PV/T 系统的电效率相比未加装集热装置的系统可以提高 7% 左右。同时该研究还提出了在下午太阳辐射照度减弱，但是光伏板温度却升高的时候，如何保证 PV/T 系统的电效率保持在较高水平的方法。

穆丽娟、朱群志等[13]建立了非晶硅结构 PV/T 系统的实验装置，在该装置非晶硅电池的正面安装了玻璃盖板；同时，在非晶硅电池的背面安装了吸热板和水管。该研究建立了上述实验装置的数学模型。利用热力学第一定律和热力学第二定律对该数学模型进行了分析，首先他们分析了 PV/T 系统的结构对其性能的影响；然后研究了太阳辐射照度、环境风速和工质流量对系统的㶲效率和能量效率的影响。该研究结果表明，非晶硅电池板紧贴集热器结构的效果比电池板作为盖板的效果好；加装玻璃盖板可以大幅度提高系统的性能；并且太阳辐射照度、环境风速和工质流量会对系统产生较大的影响。

崔文智、于松强等[14]将太阳能集热器和光伏电池组合在一起建立了聚光 PV/T 系统，该系统是将蛇形槽道装在光伏板的背面，利用蛇形槽道中的

水流集热。该研究建立上述实验装置的三维稳态模型，然后模拟了系统的传热过程以及流体流动过程。分析了系统性能随着冷却流体质量流量、聚光比、是否加装玻璃盖板以及环境风速的变化的规律。研究表明加装玻璃盖板可以大幅度提高热效率；冷却流体的质量流量对系统的性能影响较小；聚光方法可以显著提高系统性能并降低成本。环境风速和玻璃盖板均会对系统的热效率产生较大的影响，而对电效率影响很小。

Ruobing Liang、Jili Zhang[15]等建立了一种水冷平板 PV/T 结构，他们在光伏板的背面用高导热的粘附层将盘管粘附在光伏组件的背面，盘管中流过冷却水，然后用绝热材料进行填充。该研究分析了太阳辐射照度对系统中的光伏板温度、冷却水出口水温、水箱中水的温度以及系统的热效率和电效率的影响。结果表明高导热性能的粘附层可以显著地降低光伏板的基板温度，提高系统的热效率和电效率。

T. T. Chow[16]基于控制容积有限元法建立了单层玻璃平板水冷型 PV/T 集热器的动态数学模型，他认为之前其他学者建立的准稳态的数学模型不能准确预测 PV/T 集热器工作温度的变化、系统中的热量传递过程和流体的流动特性。通过动态数学模型详细地分析了集热器中不同部件之间的能量传递过程，并得到了系统的瞬时特性。研究表明，该动态模型可以准确地预测系统的动态特性，包括瞬时热功率、瞬时电功率和不同组件的瞬时热性能。

季杰、陆剑平等[17]将单晶硅光伏电池与全铝扁盒式太阳能热水器集热板通过特殊工艺粘结起来，制成了一套自然循环式光电/光热（PV/T）一体化系统，在利用太阳能发电的同时提供热水。于 2004 年 7～10 月在合肥地区进行了室外实验，测试并讨论了该系统以不同水量和不同初始水温运行时的光电光热性能。结果表明，当 $m/A_c > 80\text{kg/m}^2$ 时，这种 PV/T 热水系统的发电效率在 10.15% 左右，热效率在 50% 左右，光电光热总效率可以达到 60% 左右，光电光热综合性能效率可以达到 70% 左右。相对于单纯的光伏系统或自然循环式太阳能热水系统，这种 PV/T 热水系统具有占地面积小、综合效率高等优点。

刘仙萍、饶政华等[18]建立了太阳能光伏/光热（PV/T）复合集热器的光电与光热耦合能量转换的数值模型，利用 TRNSYS 软件模拟 PV/T 集热器

的光电、光热转换性能，分析结构参数和运行参数对 PV/T 集热器的能量转换性能的影响。结果表明，减小集热板排管的管间距与管径的比值有利于提高光热与光电转换性能；冷却流体的入口温度对 PV/T 集热器的性能影响显著，较低的入口流体温度有利于保持更高的光热和光电转换效率。增加冷却流体的入口质量通量可提高光热和光电效率；当入口质量通量增加至 6.9g/(s·m^2) 时，PV/T 集热器的热、电效率分别为 66.2% 和 10.8%，进一步增加入口质量通量对提高光热、光电效率的作用不大。

李光明、刘祖明等[19]为提高 PV/T 系统太阳能利用率，同时获得可利用的热水和电力，将铝合金背板型单晶硅光伏组件和自行设计制作的不锈钢扁盒式集热板相结合，用导热硅胶加以粘接制成新型光伏/光热（PV/T）一体化复合系统，该系统实现了光伏组件与集热板之间良好的粘接性、绝缘性和热传导，并在昆明地区对系统进行测试，分析了系统在不同水箱水容量及不同天气工况下运行的光电光热性能。结果表明，系统在 75kg 水箱水容量晴天工况下运行效率更高，系统的平均电效率、热效率、综合效率及综合性能效率分别在 14%、37%、51%、70.72% 左右，与系统在 50kg 水箱水容量晴天或 75kg 水箱水容量多云工况下运行相比，综合性能效率约提高了 11.86% 或 2.09%。与独立的光热或光伏系统相比，具有占地面积小、太阳能利用率高、更经济等优势。

魏潇[20]对两种不同形式蛇管型集热器进行数值模拟，得出了以下结论：①可通过多次水循环来实现在出口处得到较高水温的热水；②竖向弯管式 PV/T 电池片温度比横向弯管式低，有助于提高电池片的光伏发电效率；③在入口速度相同的情况下，竖向弯管式比横向弯管式 PV/T 系统的出口速度大，竖向弯管式 PV/T 系统的流动阻力较小；④与横向弯管式 PV/T 系统相比，选用竖向弯管式可以减小驱动水泵的功率；⑤选用竖向弯管式，可以减少铜管长度，节省原料。总体来说竖向式的蛇管型集热器设计更为科学合理。

吴婷[21]对水冷型 PV/T 系统进行了深入的研究。首先指出了水冷型 PV/T 系统存在的一些问题。然后建立了换热管内换热流体流动的数学模型，分析了影响换热管流体流量分布的主要因素，并对吸热体的最佳长度比进行了研究。最后建立了水冷型 PV/T 系统围护结构的传热模型，对围护

结构的传热过程进行了详细的分析。

3. 热管式 PV/T 系统

热管式 PV/T 系统是指在光伏板的背面安装热管，利用热管良好的导热性能带走光伏板的热量并加以利用，参考文献［27-36］在该结构方面做了较多的研究，其中：

吴双应、张巧玲等[27]针对热管的高效传热特性和良好的防冻特性，将热管与光伏组件相结合，建立了太阳能光伏电-热一体化系统。该装置在矩形的光伏组件下面布置热管的蒸发段以吸收光伏组件的热量；热管的冷凝段则插入通过冷却水的流道中。他们建立了系统的模型，并对系统的温度场进行了求解。该研究表明，电池板表面列数的增加会增大电池的温度和冷却水的出口温度，对系统的性能产生较大的影响。该种装置的系统中，电效率和热效率最高可以分别达到 7.46% 和 63.2% 。

Pei Gang、Fu Huide 等[28]将导热性能较强的热管和太阳能集热器集成于一个单元之中，将光伏板放在特制的铝板上面，然后用绝缘导热硅胶将热管粘附在铝板的背面，并填充保温绝热材料，最后在光伏板的正面安装玻璃盖板；热管的冷凝段插入有冷却水流过的联箱中，水泵提供动力使冷却水在集热器和水箱之间循环。该研究对光伏板、联箱和铝板进行单元的划分，并根据划分的单元格建立了该系统的动态数学模型，该数学模型由各部分的热平衡方程组成。通过实验及数值模拟分析了该系统光伏板温度、热管温度和水箱中水的温度以及系统的得热量、发电量的全天动态变化趋势，并解释了产生这种趋势的原因。

Meysam Moradgholi 等[29]采用热管建立了一种新型的 PV/T 系统，并分别在春季和夏季对该系统进行了实验研究。在春季，光伏板的安装倾角为 30°，平均发电效率为 5.67% ，相比传统的 PV/T 系统提高了 16.35% ；在夏季，光伏板的安装倾角为 40°，将丙酮作为工作介质，这时系统的平均电效率达到 7.7% ，平均热效率为 45.14% 。实验证明，加装热管可以使 PV/T 系统具有更高的热效率和电效率。

朱绘娟、裴刚等[30]提出一种新型的热管光伏/光热综合利用系统，该系统可同时产生电能和热能，与传统的水循环 PV/T 系统相比，热管式 PV/T 系统可避免系统在高纬度地区冬季结冻问题，拓展了 PV/T 系统的适用范