**《建筑一体化的太阳能光热/光伏高效利用关键技术》项目总结报告**

**一、项目概况**

**项目名称：**建筑一体化的太阳能光热/光伏高效利用关键技术

**立项时间：**2015年

**项目编号：**BY2015070-14

**项目负责人：**李舒宏

**合作企业：**江苏省产品质量监督检验研究院

**经费情况：** 经费单位：万元

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目来源 | 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 | | | | |
| 项目编号 | BY2015070-14 | | | | |
| 项目名称 | 建筑一体化的太阳能光热/光伏高效利用关键技术 | | | | |
| 经费投入 | | | 经费支出 | | |
| 来源 | | 投入数 | 科目 | 支出数 | 其中：省拨款  支出数 |
| 投入合计 | | 35.15295 | 支出合计 | 29.735451 | 24.582501 |
| 1、省拨款 | | 30 | （一）直接费用 | 27.23545 | 22.0825 |
| 2、部门、地方配套 | |  | 1、设备费 | 14.7110 | 14.7110 |
| 3、承担单位自筹 | | 5.15295 | （1）设备购置费 | 3.3800 | 3.3800 |
| 4、其他来源 | |  | （2）设备试制费 | 11.3310 | 11.3310 |
|  | |  | （3）设备改造与租赁费 |  |  |
|  | |  | 2、材料费 | 11.1510 | 6.6860 |
|  | |  | 3、测试化验加工费 |  |  |
|  | |  | 4、燃料动力费 |  |  |
|  | |  | 5、差旅费 | 1.06345 | 0.3755 |
|  | |  | 6、会议费 |  |  |
|  | |  | 7、国际合作与交流费 |  |  |
|  | |  | 8、出版/文献/信息传播/知识产权事务费 | 0.3100 | 0.3100 |
|  | |  | 9、劳务费 |  |  |
|  | |  | 10、专家咨询费 |  |  |
|  | |  | 11、其他支出 |  |  |
|  | |  | （二）间接费用 | 2.500001 | 2.500001 |
|  | |  | 其中：绩效支出 |  |  |
| 经费结余 | | | 5.417499 | | |

**主要研究内容：**

项目主要研究内容以开发一种满足多类城镇建筑形式及现代健康生活需求的新型建筑一体化太阳能光伏/光热系统为目的，在实现光伏发电供应建筑照明需求的同时，采用制冷剂流体收集光伏组件产生的热量，用于生活热水供应、冬季采暖或太阳能制冷空调；构建有较高转化效率的建筑一体化太阳能发电系统，开展光伏/集热构件、PV/T-热泵-环形热管复合系统及其运行控制策略的关键技术突破，促使太阳能从原来的光电、光热利用向新的光热光电建筑一体化领域拓展，实现对建筑的高效热电联供。具体研究内容如下：

（1）太阳能光伏/光热热泵热水系统与建筑一体化技术研究

研究开发高效率且运行可靠的平板型建筑一体化光伏/光热热泵热水系统和平板型建筑一体化光伏/光热环形热管热水系统；对PV/T-热泵系统在全年长期不同天气工况下进行性能测试，研究全年不同季节变工况条件下热泵系统运行性能，分析各个部件设计与匹配关系以实现全生命周期能源利用率最优目标；对比研究PV/T-HP系统、PV/T-环形热管系统的热电联供模式和单一光伏输出模式下的性能，研究PV/T-环形热管与热泵复合系统在变工况特性下的最佳充注量及合理切换原则；探讨环境参数、电池组件工作温度等对系统光电、光热综合输出特性的影响规律，深入研究PV/T-HP系统热力特性与PV电池工作特性的耦合分析，确保光伏组件的最大功率点电压接近控制输出电压，实现效率最大化。

（2）高效太阳能光伏/集热装置的研制

太阳能PV/T-HP系统的核心部件是PV/T构件，设计改进PV/T构件内部材料和结构以强化构件的传热特性，开发出具有优越传热性能、运行可靠、低成本、且易于典型建筑结合的平板型太阳能光伏/集热装置；结合目前商用光伏组件层压加工工艺，选择采用传热热阻低的金属或合金材料代替传统的PV电池组件背板TPT材料，并在企业配合下开展电绝缘、粘接方面工艺环节技术攻关；研究光伏电池模块与集热板一体化结合，结合管板式吸热板承压性能好和扁盒式吸热板传热性能好的优点，对本课题组设计的多孔铝扁平蒸发盘管的流程布置进行研究设计，进一步测试其光电性能和光热性能并提出优化方案；研究新型结构光伏/集热蒸发装置的强化传热输电技术，为后续产业化提供技术支撑。

（3）建筑一体化的太阳能光热/光伏-环形热管复合系统的关键技术研究

对比研究PV/T-HP系统、PV/T-环形热管系统的热电联供模式和单一光伏输出模式下的性能，研究PV/T-环形热管与热泵复合系统在变工况特性下的最佳充注量及合理切换原则；

研究热管系统中换热管强化传热技术，优化内外传热结构，提升传热性能。

（4）太阳能光热/光电一体化系统优化控制研究及评价指标

在PV/T-HP系统构件中，太阳光伏/集热蒸发器、压缩机容量、冷凝盘管及蓄热水箱的结构参数为影响系统性能的主要参数，以理论分析、系统仿真相结合的方法，开展针对不同地区气象参数的PV/T-HP系统各构件的容量匹配研究；开发太阳能光伏/光热一体化热泵系统的控制技术：研究PV/T-HP系统中变频压缩机和电子膨胀阀的PID控制策略及仿真算法，完成对PID控制参数的整定，变频技术进行制冷剂流量调节，电子膨胀阀控制光伏/集热板过热度控制在合理、安全范围内，研究两者结合的自动运行控制策略，从而实现与光伏/集热蒸发器之间容量的“动态匹配”提高系统在各种工况下的运行经济性；研究光电输出控制方式对系统光电、光热综合输出特性的影响规律，根据恒电压跟踪控制、最大功率点跟踪控制等多种不同光电输出控制方式提出光电输出优化方案；结合系统整体能源效率和火用效率等评价方面，研究系统综合性能评价指标的测试方法，进行系统热力特性、电池组件工作特性以及建筑节能等测试与耦合评估分析。

（5）热泵/水冷/热管型三种PV/T热水系统对比研究

1）分别建立水冷型、热管型、热泵型PV/T热水系统的数学仿真模型，利用MATLAB程序以及REFPROP物性计算软件模拟计算不同环境工况下三种PV/T热水系统制热性能、光电输出性能。

2） 搭建水冷型、热管型PV/T热水系统实验装置，利用该实验装置以及本课题组已有的热泵型PV/T热水系统实验装置，对三种PV/T热水系统在南京地区气象条件下进行性能测试。同时，通过测试的数据与模拟值对比，证实模型的正确性，为进一步研究提供参考依据。

3）研究三种PV/T热水统在南京地区的经济性和社会效益，对比分析三种PV/T热水系统在寿命周期内总节省费用、投资回收期以及对环境造成的影响，给实际工程中选择应用PV/T系统型式提供参考价值。

（6）太阳能双效吸收式地源热泵的性能与应用研究

对抛物槽型聚光太阳能集热器驱动双效溴化锂吸收式地源热泵系统进行理论分析与实验研究，并利用TRNSYS建立系统模型进行能耗模拟，主要内容如下：

1）建立太阳能双效吸收式地源热泵系统的TRNSYS模型，详细分析各部分模块的数学模型，并给出模拟计算步骤。

2）详细介绍槽式太阳能集热器原理与结构，再此基础上建立集热效率计算模型，之后进行了集热器导热油出口温度及集热效率随太阳辐照度变化的实验和基于集热器采光面积和导热油进口温度的瞬时效率实验，测试槽式集热器的效率随导热油运行温度与太阳能辐射强度两个因素的变化，为太阳能集热器的仿真模型提供数据参考。

3）进行太阳能双效溴化锂吸收式系统制冷工况下的实验，实验测试机组在制冷工况下制冷量与制冷系数随冷媒水进口温度和导热油进口温度变化的情况，为太阳能双效溴化锂吸收式系统模型提供实验数据参考。同时根据实验结果对照实验工况进行模拟，并比较模拟与实验结果，验证模型的准确性。

4）针对太阳能集热器和双效吸收式系统进行综合性能的最优模拟计算，并提出太阳能双效溴化锂吸收式与压缩式联合制冷系统的运行模式，其中太阳能吸收式空调系统承担夏季的尖峰负荷，在实验的基础上，建立联合运行系统模型进行夏季制冷月份的能耗模拟，计算联合运行系统相对于独立压缩式系统的节能量，并分析联合运行系统的经济性。

（7）基于膜分离的NH3-H2O-LiBr吸收式制冷系统的研究

提出了一种新型氨-水-溴化锂吸收式制冷循环，该循环使用电渗析装置将溴化锂从进入吸收器的溶液中分离出来，从而将其尽可能多的保留在发生器中。新型氨-水-溴化锂吸收式制冷循环运用Aspen Plus过程模拟器建立模型并计算其性能。

**二、项目实施情况**

**1.校企联合研发团队的组织**

研发团队依托校企产学研合作机制，不断吸引领域顶尖人才加入，采用有效的激励机制保留和发展人才，加强研发团队的学习和培养，增强团队的核心竞争力。

研发团队人员拥有博士（含教授）5名，硕士9名，得到东南大学及江苏省产品质量监督检验研究院的支持，通过沟通与协调，建立了互信共赢的合作机制，集中力量解决重大难题。

**2.实施计划的制订与落实**

研究工作的具体计划和完成情况如下表所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 时间 | 研究进度 | 完成情况 |
| 2015年06月至2015年11月 | 进行文献调查研究，建立太阳能光伏/光热一体化利用系统的关键部件的数学模型，预测不同结构参数和外部环境工况变化对系统性能的影响；对系统在压缩机和节流机构联合控制下的性能进行优化； | 已完成 |
| 2015年12月至2016年06月 | 完成光伏/集热蒸发器的结构设计和改进，根据实际加工工艺完成光伏/集热蒸发器装置的制作；完成系统所需其他设备的设计和选型；结合环形热管技术，搭建具有光伏太阳能热泵运行与光伏太阳能环形热管运行双模式的太阳能光热/光电利用的PV/T-HP热泵热水实验样机系统； | 已完成 |
| 2016年07月至2016年12月 | 对PV/T-HP样机在全年不同运行工况下的运行性能进行测试分析，验证模型的精确性及其对各类运行工况的适应性；确定变频压缩机、电子膨胀阀的流量调节与太阳集热板之间容量 “动态匹配”的在线调控方案，对光伏太阳能热泵运行模式与光伏太阳能环形热管运行模式之间的匹配与优化进行研究。 | 已完成 |
| 2017年01月至2017年04月 | 分析PV/T-HP样机的整体性能，结合系统整体能源效率和火用效率等评价方面，研究系统综合性能评价指标的测试方法，进行系统热力特性、电池组件工作特性以及建筑节能等测试与耦合评估分析。 | 已完成 |
| 2017年05月至2017年06月 | 完成项目研究结题报告，并在产学研合作企业进行成果转化。 | 已完成 |

**3.企业研发人员的培养培训**

在项目实施阶段，企业研发团队负责项目相关业务的支持，并积极参与相关技术的研究，通过深入地学习与研究，已具备独立研究的扎实素质，通过本项目的进行为企业培养了多名优秀的技术骨干，形成一支优秀的企业研究团队。

**4.项目完成情况评价**

项目通过两年的研究与实践，研究了高效率太阳能光热/光伏一体化系统并对关键技术进行研究，研究了不同季节变工况下热泵系统全生命周期能源利用率最优目标；结合新型材料和改进换热盘管流道形式，研发了高传热效率和高光电转换效率的集热/蒸发装置；研究了建筑一体化的太阳能光热/光伏-环形热管复合系统的关键技术；开发了太阳能光热/光伏一体化热泵系统控制技术，实现各部件与系统动态匹配，改进了光热、光电转换性能的综合评价方法；研究了热泵/水冷/热管型三种PV/T热水系统对比性能，分析其在不同地区的性能和经济性；研究了太阳能双效吸收式地源热泵的性能与应用，采用太阳能光伏光热系统，有效提高系统运行性能；研究了基于膜分离的NH3-H2O-LiBr吸收式制冷系统。项目合同的各项指标均已完成，项目共开发了变频光伏太阳能热泵热水系统、光伏太阳能热泵/环形热管复合系统实验样机、水冷/热管型薄膜电池光伏/光热联供系统各一套，项目共申请发明专利6项（已授权2项），项目共发表论文12篇，其中被SCI收录4篇。

**5.预算执行情况**

到目前为止，项目经费计划中省拨款、单位自筹资金已按计划到位，项目组所有单位对科技拨款严格按照科技经费开支的有关规定，专款专用，有力的支持了项目的实验，保障了项目的顺利完成。

项目经费预算投入35万，其中省拨款30万，承担单位自筹5万。截止2018年6月总共投入项目经费35.15295万（其中省拨款30万元），项目实际进行过程中合计支出经费29.735451万元（省拨款占24.582501万元），结余经费5.417199万元（省拨款占5.417499万元）。支出经费中直接费用27.23545万元（省拨款占22.0825万元）：设备费14.7110万元（省拨款占14.7110万元），材料费11.1510万元（省拨款占6.6860万元），差旅费1.06345万元（省拨款占0.3755万元），出版/文献/信息传播/知识/知识产权事务费0.3100万元（省拨款占0.3100万元）；支出经费中间接费用2.500001万元（省拨款占2.500001万元）。

**三、项目技术情况**

**1.项目的研究方法及技术路线**

（1）建立了PVT热泵/热管系统的仿真数学模型，利用模拟计算方法深入分析系统的环境参数、运行参数与总体性能之间的相互关系，为变容量PVT热泵系统的运行策略和PVT热泵/热管复合模式的切换策略的制定提供理论依据。

（2）针对可变容量PVT热泵热水系统在南京地区室外多个典型工况下的运行性能进行了实验研究。对比研究不同压缩机运行频率下系统的制热性能和光电输出性能。结合数值模拟，进一步探讨太阳辐射强度、环境温度及压缩机频率变化对系统总体性能的影响规律。依据南京全年气象参数计算了PVT热泵系统的运行性能并制定了变容量运行的调节策略。

（3）建立管板式光伏一体化的太阳能集热蒸发器传热数学模型，模拟分析管板式光伏集热蒸发器的主要结构参数对集热蒸发器的性能影响，提出管板式光伏集热蒸发器优化的设计思路。

（4）针对PVT热管系统的室外性能进行实验测试，分析该模式下系统的热水温升变化、光热效率及光电效率等性能。结合数值模拟，在PVT热泵/热管复合模式下，基于不同的切换时刻对系统运行性能方面进行研究。根据全年气象条件，得出复合模式运行特性以及制定相应的切换运行方案。

（5）建立光伏一体化的太阳能热泵热水器系统的整体运行数学模型，结合定频运行试验和空载试验验证和修正模型，为控制策略的制定提供准确的数值分析工具。

（6）开发基于PLC、变频器、变频压缩机和电子膨胀阀的热泵变容量运行控制系统，实现光伏一体化的太阳能热泵热水器随环境工况变化的实时变容量控制。

（7）基于模拟产生的系统性能数据库，制定满足实际用户需求且能耗低的系统实时变容量控制策略，制定合理节能的开机启动和开机时间策略，结合实际环境工况对比研究综合实时控制策略和已有控制策略的效果。

（8）搭建了水冷型、热管型PV/T热水系统实验测试平台，利用该测试平台以及本课题组已有的热泵型PV/T热水系统实验测试平台，分别测试了三种系统在南京地不同气象条件下的运行特性。同时，建立三种PV/T热水系统的数学模型，并进行数值模拟计算。对比理论模拟结果与实验结果，发现两者具有较好吻合性，即表明所建的系统数学模型可以从一定程度上模拟真实系统。利用已验证的数学模型，并结合南京典型气象年的气象数据，对三种PV/T热水系统进行全年逐日模拟计算。借用光热效率、光电效率等传统的PV/T系统评价标准以及借鉴《房间空气调节器》中的能源消耗效率APF概念，提出PV/T热水系统制热能源消耗率、制电能源消耗率、总能源消耗率评价标准。

（9）建立了太阳能双效吸收式地源热泵系统的TRNSYS模型，并对各部分模块的数学模型进行了介绍与分析，阐述了其独特的模块特性及典型年气象参数对于太阳能双效吸收式地源热泵系统长时间能耗模拟的优势，并给出了模拟计算步骤。在槽式太阳能集热器原理与结构的基础上建立了集热效率计算模型，之后进行了集热器导热油出口温度及集热效率随太阳辐照度变化的实验和基于集热器采光面积和导热油进口温度的瞬时效率实验，测试了槽式集热器的效率随导热油运行温度与太阳能辐射强度两个因素的变化。

（10）在氨-水-溴化锂吸收式制冷系统中加入电渗析装置可以将进入发生器的溴化锂分离出来，从而显著改善三元吸收式制冷系统的性能，并且通过Aspen软件模拟和实现相结合的技术方法探究加入电渗析装置系统性能的影响。

**2.项目解决的关键技术**

（1）实现结合环形热管技术的新型建筑一体化光伏/光热热泵复合系统，以变工况特性研究为基础，获取压缩机和节流机构变容量调节使光伏/光热一体化系统高效运行的方案。

（2）结合新型材料改进光伏/集热蒸发器内部流道的结构设计以及新型光伏电池板和换热管道之间的加工工艺。

（3）实现全年季节工况下，变频压缩机、电子膨胀阀的流量调节与太阳能集热板之间容量动态匹配的在线调控方案，形成光伏太阳能热泵运行模式与光伏太阳能环形热管运行模式之间的匹配与优化。

（4）对于热泵/水冷/热管型三种PV/T热水系统在不同地区使用的全年运行性能和使用的综合收益的研究。

（5）对抛物槽型聚光太阳能集热器驱动双效溴化锂吸收式地源热泵系统进行理论分析与实验研究，并利用TRNSYS建立系统模型进行能耗模拟。

（6）研究太阳能双效溴化锂吸收式地源热泵和压缩式联合运行系统方案，对太阳能双效溴化锂吸收式地源热泵系统进行性能研究，通过在氨-水-溴化锂三元吸收式制冷系统的吸收器和发生器之间设置电渗析装置，将溴化锂限制在发生器侧，从而有效改善系统的性能

**3.取得的突破性进展及创新点**

（1）在太阳能光电技术基础上，实现建筑一体化太阳能光伏/光热系统的高效利用，以变工况为基础，获取压缩机和节流机构变容量调节使光电/光热一体化系统高效运行的方案；同时优化了热泵热水系统中热水箱进出水结构，强化冷凝侧放热效率，实现太阳能热水系统的整体优化；通过强化冷凝侧传热和调节控制方式提高光伏/光热一体化系统的整体运行性能。

（2）针对太阳能与建筑一体化需求，研发高效低成本的太阳能光伏/集热蒸发装置，采用新型光伏电池背板材料和改进换热管道内部流动方式，强化传热效果和光电转换效率，并将换热通道与光伏电池组件层压结合，兼顾了光伏/集热蒸发器的性能和外观效果。

（3）将热泵技术及环形热管技术与太阳能光伏作用结合，构成无需耗电的光伏太阳能环形热管运行辅助光伏太阳能热泵运行模式，实现太阳能光电/光热高效利用。

（4）针对全年多工况的运行条件，提出变频压缩机、电子膨胀阀的流量调节与太阳集热板之间容量动态匹配的在线调控方案，提高了系统的整体效率。

（5）分别建立水冷型、热管型、热泵型PV/T热水系统的数学仿真模型，利用MATLAB程序以及REFPROP物性计算软件模拟计算不同环境工况下三种PV/T热水系统制热性能、光电输出性能。搭建水冷型、热管型PV/T热水系统实验装置，热泵型PV/T热水系统实验装置，对三种PV/T热水系统在南京地区气象条件下进行性能测试。研究三种PV/T热水统在南京地区的经济性和社会效益，对比分析三种PV/T热水系统在寿命周期内总节省费用、投资回收期以及对环境造成的影响，给实际工程中选择应用PV/T系统型式提供参考价值。

（6）建立了太阳能双效吸收式地源热泵系统的TRNSYS模型，并进行了双效溴化锂吸收式系统制冷工况下的实验，基于充分利用太阳能热源的原则采用了太阳能光伏光热系统，较于一般的吸收式地源热泵系统具有更高的能源利用效率。在为该系统装置提供电能的同时，集热装置产生的热能也为发生器提供热源，有效的利用了太阳能光伏光热系统，达到了降低系统能耗、提高系统效率的最终目的。

（7）在氨-水-溴化锂吸收式制冷系统中加入电渗析装置可以将进入发生器的溴化锂分离出来，从而显著改善三元吸收式制冷系统的性能。并且通过太阳能光伏光热系统中的发电装置为电渗析装置提供电能，太阳能光伏光热系统中的集热装置为发生器提供热能，太阳能集热器作为第二集热装置为系统提供持续稳定的驱动热源，起到了节能减排的效果。

**四、合同任务指标完成情况**

**1.实际完成的研究内容**

（1）太阳能光伏/光热一体化热泵热水系统与建筑一体化技术研究

在太阳能光电技术基础上，实现建筑一体化太阳能光伏/光热系统的高效利用，以变工况特性研究为基础，获取压缩机和节流机构变容量调节使光电/光热一体化系统高效运行的方案；同时优化热泵热水系统中的热水箱进出水口结构，强化冷凝侧放热效率，实现太阳能热水系统的整体优化；通过强化冷凝侧传热和调节控制方式提高光伏/光热一体化系统的整体运行性能；采用制冷剂作为循环工质，在吸热基板背面的集热管内吸收太阳能热量而蒸发，可有效降低光伏电池的工作温度从而稳定高效地输出电能，同时制冷剂收集到的热能可以通过热泵循环或者热管循环将热能传递给水箱以提供生活热水，实现太阳能的光电光热高效综合利用，此外在系统综合成本及减少安装面积方面具有明显优势。本文围绕复合系统的光热光电性能、PVT热泵系统的变容量运行策略以及热管-热泵复合模式等关键问题开展理论和实验研究。主要进展如下：

1）作为PVT热泵系统的核心部件，太阳能光伏/集热器是影响系统整体性能的重要因素之一。结合太阳能集热器和商用光伏电池组件的加工工艺，制作了单晶硅太阳能光伏/集热器。针对满足全年供应生活热水需求的设计指标进行了系统部件的选型计算，并搭建了以R22为工质的太阳能光伏光热一体化热泵/热管热水实验系统。其中在PVT热泵系统中采用变频压缩机和电子膨胀阀，根据环境参数变化调节系统制冷剂循环量，保证光伏/集热器与热泵系统的容量匹配，实现系统高效稳定地运行。

2）为了进一步探究PVT热泵/热管热水系统的运行规律，以及其在不同工况下的总体性能。针对该复合系统的各个部件建立了相关数学模型，采用Visual C++编写了太阳能光伏/光热一体化热泵系统和太阳能光伏光热一体化热管系统的模拟程序，模拟数值经实验结果的对比验证具有较好的吻合性，证明了可以为PVT热泵系统的变容量运行控制以及热管-热泵复合模式的研究提供一定的指导作用。

3）在南京地区室外环境下，对可变容量的太阳能光伏光热一体化热泵（PVT热泵）热水系统的实际运行性能进行了实验研究。选取两个相近的环境工况，分别测试了不同压缩机运行频率下系统的热泵制热性能和光电输出性能。利用模型进一步分析了系统变容量的运行规律以及制定了调节方案，最后得出变容量PVT热泵系统的全年逐月的具体调节策略和运行特性。全年逐月的变容量PVT热泵热水系统的性能研究结果表明，通过合理的变频运行控制方式，PVT热泵系统可以维持热泵性能系数在4.0以上的全年高效运行，相比定容量系统，能够有效节约电能，尤其是在冬季工况，最多可节约30.8%的电能。

（2）高效太阳能光伏/集热装置的研制

结合新型材料改进光伏/集热蒸发器内部流道的结构设计以及新型光伏电池板和换热管道之间的加工工艺；针对太阳能与建筑一体化需求，研发高效低成本的太阳能光伏/集热蒸发装置，采用新型光伏电池背板材料和改进换热管道内部流动方式，强化换热效果和光电转换效率，并将换热通道与光伏电池组件层压结合，兼顾了光伏/集热蒸发器的性能和外观效果；采用一次能源节约效率评价光伏集热蒸发板的综合性能，以CIGS光伏管板式蒸发器为例，使用Visual Basic 6.0编写程序模拟分析管板式集热器的主要结构因素：蒸发管管内径、单管长和管间距对光伏集热器性能的影响。通过分析，减小蒸发管内径、减小管间距和增大管长均有利于提高CIGS光伏管板式集热器的热、电和一次能源节约效率。同时，减小蒸发管内径和增大管长时，流经集热板的制冷剂压降增大，设计时应控制其他局部阻力来保证性能。因此，光伏管板式集热器的性能优化应从减小蒸发管内径、减小管间距和增大管长入手，同时注意控制压降和吸热管板成本，以达到最优设计的目的。

（3）建筑一体化的太阳能光热/光伏-环形热管复合系统的关键技术研究

研究了一种将热管技术与光伏太阳能热泵有机结合的太阳能光伏光热一体化热泵/热管系统。实现结合环形热管技术的新型建筑一体化光伏/光热热泵复合系统，以变工况特性研究为基础，获取光伏/光热一体化系统高效运行的方案。

针对太阳能光伏光热一体化热管系统在室外环境条件下进行了实验测试，并分析了该模式下系统的运行性能。进一步利用模型分析了热管-热泵复合模式，即首先运行热管模式，将冷凝水箱中热水加热到一定温度时，再切换到热泵模式从而最终达到目标水温。一方面热管可减少热泵运行的能源消耗，另一方面热泵加热可使水温升高到目标温度且减少运行时间。综合考虑能耗和加热时间两个方面制定了合理的切换策略，最后对系统复合模式下全年的运行特性进行了分析。结果表明，在春秋季典型晴天工况下，热管-热泵切换模式的总耗电为0.853kW•h，比热泵独立模式节约了40.6%的电能。在有较充裕的太阳辐射量可以利用的春秋季，应优先采用热管-热泵复合模式。冬季太阳辐射少且环境温度低，PVT热管模式难以持续运行，可仅采用PVT热泵模式独立运行。

（4）太阳能光热光电一体化系统优化控制研究及评价指标

针对全年多工况的运行条件，提出变频压缩机、电子膨胀阀的流量调节与太阳集热板之间容量 “动态匹配”的在线调控方案，提高了系统的整体效率。实现全年季节工况下，变频压缩机、电子膨胀阀的流量调节与太阳集热板之间容量 “动态匹配”的在线调控方案，形成光伏太阳能热泵运行模式与光伏太阳能环形热管运行模式之间的匹配与优化。本文的主要进展如下：

1）本文针对光伏一体化的太阳能热泵热水器的主要部件，光伏管板式集热蒸发板、变频压缩机、保温冷凝水箱、膨胀阀构建了数学模型。定义了以光伏集热蒸发板背板平均温度为基准的UL，光伏集热蒸发板模型同时适用于采用晶硅组件或玻璃基底的薄膜电池组件。使用Visual Basic 6.0编写了该系统的仿真运行程序。

2）优化设计了单晶硅型管板式集热蒸发板，在南京地区搭建了基于PLC的变频光伏太阳能热泵热水器实验台，用4.32m2集热板搭配1HP变频压缩机和150L保温水箱，可以实现系统空载、定频运行和受控变频运行，制取生活热水。根据多次定频运行试验和空载运行试验结果，检验了仿真运行程序和衍生的空载运行程序的精确性。

3）采用电子膨胀阀、变频压缩机、PLC、变频器、太阳辐射表和热电偶等开发了光伏一体化的太阳能热泵热水器的实时变容量控制系统和相应的控制程序。制定了实验台控制策略的原则：对环境工况、运行频率分档进行策略制定；按水箱初始水温确定预期制热水时长限制；按照满足实时环境工况下制热水时长要求的最低运行频率运行。通过各工况、频率的模拟运行结果和控制策略原则制定了南京地区本实验台的控制策略表。针对高太阳辐射强度和低于环境温度的水箱初温可能产生的蒸发压力和冷凝压力倒挂情况，制定了启动阶段的频率策略，定义“转换水温”为系统能以策略表制定的最低运行频率运行的最低水箱温度。分析了实际自然环境工况下，由于气温日变化和辐射日变化峰值有时间差，系统启动时间对全天净发电量的影响。根据模拟发现，启动时间若较根据预测制热水时长以正午12点为中心确定的启动时间延迟，会有利于减少系统能耗，提高全天净发电量，本文的启动时间策略选择推迟半小时启动系统。控制策略表、启动阶段的频率策略和启动时间策略构成了本文的综合控制策略。根据理论分析和模拟结果，证明当前光伏集热面积和水箱容积比的条件下，提高运行频率不利于增加全天净发电量，无法实现光伏直驱的太阳能热泵热水器。

4）根据制定的综合控制策略使用搭建的实验台进行了实时变容量运行试验，并与其他变容量运行方式的模拟结果进行了对比。实时变容量运行试验显示构建的变容量控制系统达到了预期的目的具有很强的实用价值，能迅速应对环境工况的变化进行调整。对比结果显示本文提出的综合控制策略既能在规定时间内按时完成制热水任务，又能获得优秀的节能效果，优于其他控制方式。

5）本文搭建的光伏一体化的太阳能热泵热水器综合性能良好，制取150L/50°C生活热水的性能系数根据实验在各种工况下的实测数据，在辐射一般及较好的情况下，COP在3.06~5.61。在全阴天有时有小雨的情况下，COP在3.68。

（5）热泵/水冷/热管型三种PV/T热水系统对比研究

1）搭建了水冷型、热管型PV/T热水系统实验测试平台，利用该测试平台以及本课题组已有的热泵型PV/T热水系统实验测试平台，分别测试了三种系统在南京地不同气象条件下的运行特性。同时，建立三种PV/T热水系统的数学模型，并进行数值模拟计算。对比理论模拟结果与实验结果，发现两者具有较好吻合性，即表明所建的系统数学模型可以从一定程度上模拟真实系统。利用已验证的数学模型，并结合南京典型气象年的气象数据，对三种PV/T热水系统进行全年逐日模拟计算。借用光热效率、光电效率等传统的PV/T系统评价标准以及借鉴《房间空气调节器》中的能源消耗效率APF概念，提出PV/T热水系统制热能源消耗率、制电能源消耗率、总能源消耗率评价标准。

2）对三种PV/T系统展开了经济性和环保效益对比分析。在经济性分析方面，将三种PV/T系统与电加热系统相比，分别计算它们在寿命期限内总节省费用和投资回收期。计算结果是：基于目前南京地区的电力价格和光伏组件市场的价格的前提，三种PV/T在寿命期限内总节省费用均为正值，且系统的投资回收期均小于系统的使用寿命（20年）；其中，水冷型PV/T系统的回收期最短、热泵型PV/T系统最长，三者分别为10.6年、16.9年、18.4年。在环保效益评价方面，分别计算了三种PV/T系统在寿命期限内，向外界环境排放的CO2、SO2、NOx、烟尘等污染物含量。计算结果是：三种PV/T系统在寿命期限内各污染物排放量均为负值，其中，热泵型PV/T系统减少污染排放量最多、热管型PV/T系统减少污染排放量最少，三者分别为-1347.8kg、-1048.5kg、-716.4kg。

（6）太阳能双效吸收式地源热泵的性能与应用研究

建立了太阳能双效吸收式地源热泵系统的TRNSYS模型，并对各部分模块的数学模型进行了介绍与分析，阐述了其独特的模块特性及典型年气象参数对于太阳能双效吸收式地源热泵系统长时间能耗模拟的优势，并给出了模拟计算步骤。在槽式太阳能集热器原理与结构的基础上建立了集热效率计算模型，之后进行了集热器导热油出口温度及集热效率随太阳辐照度变化的实验和基于集热器采光面积和导热油进口温度的瞬时效率实验，测试了槽式集热器的效率随导热油运行温度与太阳能辐射强度两个因素的变化。实验结果显示，集热器的集热效率和集热工质出口温度随着太阳能辐射强度的增大而增大；同时集热器的光学效率和热损失系数分别为0.5895和0.1661，为太阳能集热器的仿真模型提供数据参考。

课题还建立了双效溴化锂吸收式系统制冷工况下的实验，实验测试了机组在制冷工况下制冷量与制冷系数随冷媒水进口温度变化的情况、制冷量与制冷系数随导热油进口温度变化的情况。实验结果显示，当冷却水进/出口温度为31.55/37.91°C、导热油进/出口温度179.5/167.2°C、冷媒水进/出口温度为14.01/8.82°C时，机组制冷量为14.31kW，双效吸收式系统的制冷COP达到最高，为1.23。为太阳能双效溴化锂吸收式系统模型提供实验数据参考。同时根据实验结果对照实验工况进行模拟，比较模拟与实验结果，经比较模拟值与实验结果之间最大偏差为4.71%，验证了模型的准确性。

经模拟计算得到太阳能吸收式地源热泵系统的综合性能系数在热源温度为180°C时达到最高，最高综合性能系数为0.6625。

课题基于充分利用太阳能热源的原则采用了太阳能光伏光热系统，较于一般的吸收式地源热泵系统具有更高的能源利用效率。在为该系统装置提供电能的同时，集热装置产生的热能也为发生器提供热源，有效的利用了太阳能光伏光热系统，达到了降低系统能耗、提高系统效率的最终目的。

（7）基于膜分离的NH3-H2O-LiBr吸收式制冷系统的研究

提出了一种新型氨-水-溴化锂吸收式制冷循环，该循环使用电渗析装置将溴化锂从进入吸收器的溶液中分离出来，从而将其尽可能多的保留在发生器中。新型氨-水-溴化锂吸收式制冷循环运用Aspen Plus过程模拟器建立模型并计算其性能。通过研究得出以下结论：

1）在氨水吸收式制冷系统中加入溴化锂可以显著提高循环的性能系数。但是，溴化锂的存在会对吸收器造成不利影响，特别是在较高的溴化锂质量分数下。

2）在氨-水-溴化锂吸收式制冷系统中加入电渗析装置可以将进入发生器的溴化锂分离出来，从而显著改善三元吸收式制冷系统的性能。在不同的氨质量分数和溴化锂质量分数下，基于电渗析的氨-水-溴化锂系统和普通的三元系统相比，性能系数最多可提高18%左右，和二元氨水吸收式制冷系统相比，最多可提高30%左右。

3）对于特定的氨和溴化锂质量分数，基于电渗析的氨-水-溴化锂吸收式制冷系统的性能系数随分离效率的增大而增大。

4）对于特定的氨和溴化锂质量分数，氨-水-溴化锂吸收式制冷系统的性能系数随发生温度的增加先增大后减小。电渗析装置在较低的溴化锂质量分数下，对循环性能系数的影响较小，而在较高的溴化锂质量分数下，电渗析分离过程会减小系统的工作温度，显著提高氨-水-溴化锂三元吸收式制冷系统的性能。

5）基于光伏光热和电渗析的溴化锂-水吸收式制冷装置在提升了整个系统效率的同时，充分利用了太阳热能，相较于一般的太阳能光伏系统具有更高的发电效率，进一步减少了系统能耗。通过太阳能光伏光热系统中的发电装置为电渗析装置提供电能，太阳能光伏光热系统中的集热装置为发生器提供热能，太阳能集热器作为第二集热装置为系统提供持续稳定的驱动热源，起到了节能减排的效果。

**3.技术指标**

研究开发高效率太阳能光热/光伏一体化系统并对关键技术进行研究；研究不同季节变工况下热泵系统全生命周期能源利用率最优目标。结合新型材料和改进换热盘管流道形式，研发高传热效率和高光电转换效率的集热/蒸发装置。建筑一体化的太阳能光热/光伏-环形热管复合系统的关键技术研究。开发太阳能光伏/光热一体化热泵系统控制技术，实现各部件与系统动态匹配；改进光热、光电转换性能的综合评价方法。

**4.工作指标**

1）开发变频光伏太阳能热泵热水系统，经江苏省产品质量监督检验研究院检测，夏季制热水平均性能系数4.92，春秋季制热水平均性能系数4.63。夏季制热水平均电效率0.1172，热效率0.6129，一次能源节约效率0.9213；春秋季制热水平均电效率0.1152，热效率0.5134，一次能源节约效率0.8164。

2）研制光伏太阳能热泵/环形热管复合系统1套

3）水冷/热管型薄膜电池光伏/光热联供系统1套

4）申请发明专利6件，其中已授权2件

5）发表论文12篇，其中SCI4篇

6）培养博士研究生1名，硕士研究生6名。

**五、项目绩效分析**

纵观我国能源行业的发展情况，不难发现建筑用能的总量大、效率低等问题给我国能源供应和大气环境治理带来了巨大压力，针对目前市场太阳能光伏发电以及太阳能集热器难以实现建筑一体化的缺陷，项目研究开发适应建筑一体化要求，与高层建筑结合良好（如阳台式）的新一代高效太阳能光电/光热一体化热水系统和装置，促进我国太阳能企业的技术进步。城市的高速化发展使得城市实际使用面积越来越小，能耗越来越高，我国建筑用能占社会总能耗的比例约为33%。因此，建筑节能工作面临巨大的潜力和挑战。目前市场上存在单一的太阳能光伏发电产品和单一的太阳能集热产品，占地面积大且性能不稳定，因此实际应用方面受到多种条件的约束。目前在市场占主导地位的太阳能集热器工作温度一般不超过80℃，将太阳能光伏电池与集热板层压，与热泵循环系统结合用于制取生活热水、冬季采暖或夏季驱动制冷空调系统，无论在技术可行性和经济性上，还是从我国巨大的市场需求分析，都将大有可为。太阳能在建筑中的光伏和光热综合利用技术能够极大地降低采暖、空调、热水和照明等建筑能耗，减少住户对采暖、空调的初投资和使用费用，改善室内环境、提高工作效率；实现温室气体的有效减排，减轻国家能源负荷，提高国家建筑设计产品技术含量，提升科技竞争力。太阳能在建筑中的光伏光热利用技术对促进我日太阳能在建筑上的节能应用技术的发展具有重要意义，符合国家中长期的能源发展规划，必将带来积极的社会效益。

本项目考虑以结合环形热管技术的新型建筑一体化的光伏/光热热泵复合系统为研究对象，深入分析系统长期运行的变工况特性，从而获得压缩机和节流机构变容量调节使光电/光热一体化系统高效运行的方案；进一步改进光伏/集热模块材料和内部结构以实现光伏/集热构件的高效传热和光电转化；研究变频压缩机、电子膨胀阀的流量调节与太阳集热板之间容量 “动态匹配”的在线调控方案，进而实现系统的安全运行和高效节能。针对不同地区特定的气候特征，在系统匹配、部件设计、运行控制以及性能评价等方面进行深入的研究，通过自主创新掌握一整套PV/T-HP及其结合环形热管系统的优化设计方法、研制出高性能的实验样机。从而促进太阳能光热和光电作用在建筑节能领域的规模化、低成本化应用，对我国实现建筑节能减排起到重要作用。

由于我省为太阳能热水器生产大省，本项目研究目标紧密追踪巨大市场需求，研究开发新一代的太阳能光热、光电利用系统，实现与建筑物的一体化、将生活热水与光电利用相集成，是针对现有太阳能热水器的一次具有分水岭意义的技术革新，推动整个太阳能产业跃上一个新的台阶，并与国际先进水平接轨。同时我国太阳能集热器绝大部分都是用于居民家庭热水，部分太阳能并未使用而导致浪费，而太阳能热水和发电技术集成系统的研究至今尚缺乏技术体系支撑。项目的顺利实施可以有效提高企业在太阳能光伏/光热产品方面的发展速度，积极推动商业模式与科技研发的联合创新，实现产业技术改造及企业业务在我省的推广，极大促进我省产业快速、稳定、高效地发展。本项目研究开发高效太阳能利用的光热、光电集成建筑一体化技术将促进太阳能光热转换产业向更高层次、更广领域发展，大幅度提升江苏太阳能热利用产业的发展水平。

**六、存在问题、有关建议及下一步研究设想**

在项目的研究过程中，以下内容值得进一步深入研究：

在太阳能光伏/光热一体化热泵热水系统与建筑一体化的研究中，实验系统中采用的太阳能光伏/集热器，由光伏电池板和太阳能集热器粘接组成，由于制作工艺的局限性，其性能的测试结果略低于模型计算值，后续有待改进光伏/集热器的结构和粘接技术，以提高系统传热性能。在建立的PVT热泵/热管系统循环的数学模型方面，重点旨在预测系统在不同工况下的运行特性，而对制冷剂流过光伏/集热器蒸发管道的过热度动态调节等问题尚未考虑，后续需要进一步改进模型。在PVT热泵系统的变容量运行方面，只研究了调节压缩机运行频率以实现太阳能光伏/集热器和热泵的容量匹配，对电子膨胀阀在该系统中调节制冷剂循环流量方面未加以考虑，后续可进一步研究变频压缩机和电子膨胀阀的联合控制，得出最优的变容量控制策略。

同样在热管－热泵复合系统的关键技术研究中，复合系统模式运行方面，有必要更加深入地进行不同环境下实验测试，分析复合系统的全年运行经济性，为市场化提高强有力的理论支撑。

在太阳能光热光电一体化系统优化控制研究中，系统的控制策略在实时控制时，均基于从水箱水初温到水终温的仿真运行模拟数据，中途切换时没有考虑中途切换时水温已经不同于水箱水初温。虽然未考虑中途切换水箱水温的问题，但是文中制定的控制策略仍然是相对于现有控制方法较优的控制方法。现有控制策略已基于 3240 种工况组合的仿真运行模拟结果，若要考虑中途切换水温，则可能需要模拟上万种工况组合，模拟工作量将更为巨大。

此外，光伏一体化的太阳能热泵热水器在高太阳辐射和低于环境温度的水箱水初温条件下的蒸发冷凝压力倒挂问题在文中用提高压缩机运行频率解决。但是，这种情况正适宜采用制冷剂工质泵驱动形成环形热管循环，在实际变化环境工况、初始太阳辐射极好的情况下热管模式和热泵模式的切换运行策略也值得进一步研究。