

附件 5

湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划 项 目 申 报 表

项目名称: 无水箱太阳能热水器的优化设计与制作				
学校名称	长沙理工大学			
学生姓名	学 号	专 业	性 别	入 学 年 份
覃世球	201549060132	新能源科学与工程	男	2015 年
刘 枫	201549060119	新能源科学与工程	男	2015 年
张 利	201649060320	新能源科学与工程	男	2016 年
李童庆	201749060232	新能源科学与工程	男	2017 年
张 伟	201749060227	新能源科学与工程	男	2017 年
指导教师	李传常	职 称	讲师	
项目所属一级学科	动力工程及工程热物理	项目科类(理科/文科)	理科	
学生曾经参与科研的情况				
<p>覃世球，新能源 1501 班学生，大一进实验室参与创新性实验训练项目，获第九届节能减排社会实践与科技竞赛全国三等奖(证书编号：2016A-C-169 排名 4/5)，获 2017 年“数创杯”大学生数学建模挑战赛本科组全国二等奖(证书编号：SCC201702840，排名 1/3)，校第一届节能减排实践调研活动二等奖，三等奖学金一次、学科竞赛单项奖学金一次。</p> <p>刘枫，新能源 1501 班学生，参与本项目前期实验室试验，湖南省书法联合会会员，参与节能减排的科技活动，有多次在企业进行实践和交流的经历。</p> <p>张利，新能源 1603 班学生，参与本项目前期实验室试验，参与过“大学生创</p>				

新性实验计划项目”以及节能减排社会实践活动，中国乒乓球二级裁判员。

李童庆，新能源 1702 班学生，参与本项目前期实验室试验，大一上学期过英语四级，并在班内成绩排名第一，高中获市物理竞赛三等奖。

张伟，新能源 1702 班学生，参与本项目前期实验室试验，大一上学期过英语四级，并在班内成绩排名第三，高中获得全国语文能力竞赛湖南赛区三等奖；全国高中物理竞赛中，荣获长沙赛区三等奖，长沙市高中生物学奥林匹克竞赛荣获二等奖。

指导教师承担科研课题情况

李传常博士，主要从事新能源发电及储能技术的科研与教学工作，目前主持国家自然科学基金青年基金 1 项(51504041)、湖南省自然科学基金青年基金 1 项(2016JJ3009)、湖南省高校创新平台开放基金项目 1 项(15K007)、湖南省发展和改革委员会重点课题 1 项、省部级重点实验室开发基金 4 项、湖南省煤业集团科技项目 1 项，指导完成国家级大学生创新训练项目 1 项（结题优秀），指导学生获全国节能减排社会实践与科技竞赛全国三等奖并公开发表 CSCD 论文 1 篇。在 *Nature* 旗下刊物 *Scientific Reports*、*J. Am. Ceram. Soc.* 等国际主流刊物上发表 SCI 论文 10 余篇，拥有 6 项国家授权发明专利，获中国有色金属工业科学技术奖(省部级)技术发明一等奖。

项目研究和实验的目的、内容和要解决的主要问题

【研究目的】

在课题小组已制备的高性能相变储热材料、以及初步制作的试验无水箱太阳能热水器样机的基础上，通过现场试验数据采集分析、相变材料与集热管道匹配优化设计、集热管及连接管道匹配优化设计等手段，制作一台出水温度稳定、热水供量充足等性能优良且安装方便无水箱太阳能热水器。

【研究内容】

本项目针对现有太阳能热水器的缺陷，开发利用新型的储热材料替代传统热水器保温水箱的储热技术，并对无水箱太阳能热水器进行整体优化设计，制作无

水箱热水器。项目研究的主要内容如下：

(1) 高效太阳能储热材料与集热管的匹配优化设计。通过在储热装置中添加自制高性能相变储热材料、肋片、翅片等措施，对相变储热装置进行强化传热，并反复试验与测量，优化设计适用于客户需求的“集热-储热”一体化相变集热管；

(2) 相变集热管及连接管道匹配优化设计。通过考察相变集热管及连接管材质、尺寸、密封措施等因素，优化设计热损失少、输送安全等性能匹配的管道系统；

(3) 现场试验数据采集，反馈再优化系统。在屋顶、阳台、窗台等地方，现场测试试验数据，并根据数据反馈再优化整个系统；

(4) 无水箱热水器试验机的整体制作与节能效益评价。根据优化后的数据，制作一台完成的无水箱太阳能热水器并测试其性能，提交太阳能热质量检测部门检测获得质量认证，并评价其节能效益。

【要解决的主要问题】

相变集热管（相变集热系统）是无水箱太阳能热水器的核心部件，本项目利用已开发的新型相变材料设计高效率的相变无水箱太阳能热水器，拟解决以下主要问题：

(1) 相变储热材料与集热管性能匹配问题。相变储热材料、集热管两种材料的导热系数参数的选择决定热量传递的效能，因此必须需解决相变储热材料与集热管性能匹配问题；

(2) 各部件协同性与整体性能的表达问题。选择了各个部件后，部件间的协同性以及整体性能的影响是太阳能热水器最终效果表达的关键，因此必须解决部件间的协同问题。

国内外研究现状和发展动态

【项目背景及意义】

随着全球能源需求的增长，环境污染日益加剧，人类社会的可持续发展面临着严峻的能源危机考验。世界各国均在谋求转型，开发利用新能源、节约能源与提高能源利用效率已成为社会关注的焦点。太阳能作为最清洁的可再生能源，在

所有的可再生能源中，分布最广且易得，受到全世界的广泛关注，并大力发展太阳能光热产业。中国是太阳能资源丰富的国家。我国陆地面积年接收太阳能辐射能约为 50×10^{15} MJ，全国各地太阳能年辐射总量为 $3350 \sim 8370$ MJ/m²，有三分之二以上的国土面积年日照时数大于 2000 h/a，辐射总量高于 5016 MJ/m²。因此，在全国范围内发展光热、光电、光化学等太阳能产业具有良好的基础。

太阳能是太阳连续不断向宇宙空间发射的电磁辐射能，目前我国太阳能利用比较成熟的技术有太阳能热水器和太阳能光伏发电。经过多年的发展，我国太阳能热水器产业已经形成较为完整的工业体系，成为太阳能热水器生产和使用大国。每平方米平板太阳能集热器平均每个正常日照日，可产生相当于 2.5 度电的热量，每年可节约标准煤 170~180 Kg，可实现 CO₂ 的排放量减少 700 Kg。根据中国太阳能热利用产业联盟的统计，2017 年全年我国太阳能集热器及系统销售量达 3723 万 m²(26061 MWth)，同比下降 5.7%，保有量达到 4.78 亿 m²(334460 MWth)；虽然传统产品的销售降幅收窄，但是保有量增幅趋缓^[1]。近年来太阳能热水器市场开始下滑，主要原因是传统太阳能产品技术门槛低、技术缺乏创新，无法进入城市扩大市场。

太阳能热水器一般是由集热器、保温水箱、连接管路、阀门、辅助加热器以及控制单元等主要部件组成。保温水箱是用于存储白天集热装置加热的水，以满足客户在需要的时候使用。传统太阳能热水器的使用寿命极大的受到单根真空管影响；热水器在工作时，水箱里面的水与所有的真空集热管联通，只要其中任一根真空管破裂，那么整个热水器将无法使用，而且水箱中的水会完全漏出。传统太阳能热水器无法与现代城市建筑结合，实现热水器与建筑一体化；保温水箱是太阳能热水器的重要组成部分，由于水箱的存在，热水系统的安装极大的受到周围环境限制，故无法实现太阳能热水器与建筑的完美结合。传统太阳能热水器无法与现代城市建筑协调统一也是造成太阳能热水器一直未能在城市中广泛使用的主要原因。传统太阳能热水器管内存水过多，管内水温上升缓慢；由于真空管内部空间比较大，系统中水流的循环流动完全是靠各部位温度不同而形成的自然循环，所以一般的热热水装置管中热水无法完全取出，致使系统热水利用效率低。此外，传统的太阳能热水器还存在支架承压大、管子易炸裂、在严寒地区使用易结冻等缺点。

太阳热水器与现代建筑结合是太阳能热水器发展的必由之路。作为新一代太阳能热水器，无水箱太阳能热水器是为克服传统太阳能热水器的缺点而开发的新型太阳能热水器，采用相变材料储热的热水器能有效解决传统热水器水箱过大等问题^[2]，它的主要特点是没有水箱，热量全部储存在真空管的内部，是一种集成“集热-储热-加热”功能于一体的太阳能热水器，能够实现热水系统与建筑的完美结合。它无水箱，不占空间，安装方便，承压可直接走水，得热量比传统的太阳能热水器要高。它以高(得热效率高)、低(热损失低)、新(热水新鲜)、省(省空间、省电、省水)、方便(安装方便、使用方便)的特点越来越受行业内人士的关注。

储热材料是相变无水箱太阳能热水器的主要部分，相变材料具有优越的潜热性能，但绝大部分热导系数较小，故需采取必要的相变储热措施。有研究者提出利用非金属矿物的矿物特性，将非金属矿物与相变材料复合，依靠导热性能较好的多孔矿物介质骨架增强相变材料导热传热能力，制备基于多孔矿物介质的复合相变储热材料^[3]。国内外学者已对石墨、珍珠岩、硅藻土、埃洛石、高岭土等^[4]非金属矿物展开了大量的研究，利用这些矿物的天然特性，装载石蜡、硬脂酸、熔融盐、形变低共熔物等相变材料制备复合相变储热材料，复合材料具有很好热稳定性和化学稳定性，与传统方法相比，采用矿物具有导热强化效果均匀、制备简便、成本低等优点^[5]。**课题组已经成功开发了以蛭石、椰壳炭、二氧化硅、石墨烯、膨胀石墨等为载体的高效太阳能储热材料，储热容量高达 $130 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，导热系数可达 $1.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 以上。**

综上所述，在国内开发高效无水箱热水器新技术是面对能源转型，解决常规热水器高能耗问题以及节约能源的有效途径之一，因此，无水箱太阳能热水器的研发具有非常重要的意义。本项目拟根据我国太阳能资源特点以及居民用水特征，开发基于高效相变储热材料的无水箱太阳能热水器整体优化技术，并开展工程现场实践应用。

【国内外研究现状和发展动态】

太阳能热水器的发展始于 18 世纪 60 年代瑞士，1891 年，第一台有实用价值的热水器在美国问世。国内相关研究起步于 1958 年，国内学者一直从事于太阳能吸收利用以及热水器的整体设计，到 1987 年国内已形成全玻璃真空集热管和热管

真空管集热工业，我国太阳能热水器产业达到新高度。因此，国内真空集热管占据太阳能热水器 95% 以上的市场，而国外太阳能市场却基本为平板太阳能热水器。太阳能热水器按照集热器类型（图 1）可以分为平板式、真空管式、热管真空管式太阳能热水器，其中真空管式太阳能热水器在农村地区占有广阔市场。但传统太阳能热水器在与建筑结合方面未能有重大突破，限制了太阳能热水器的发展，现阶段普遍解决方案为分体安装。

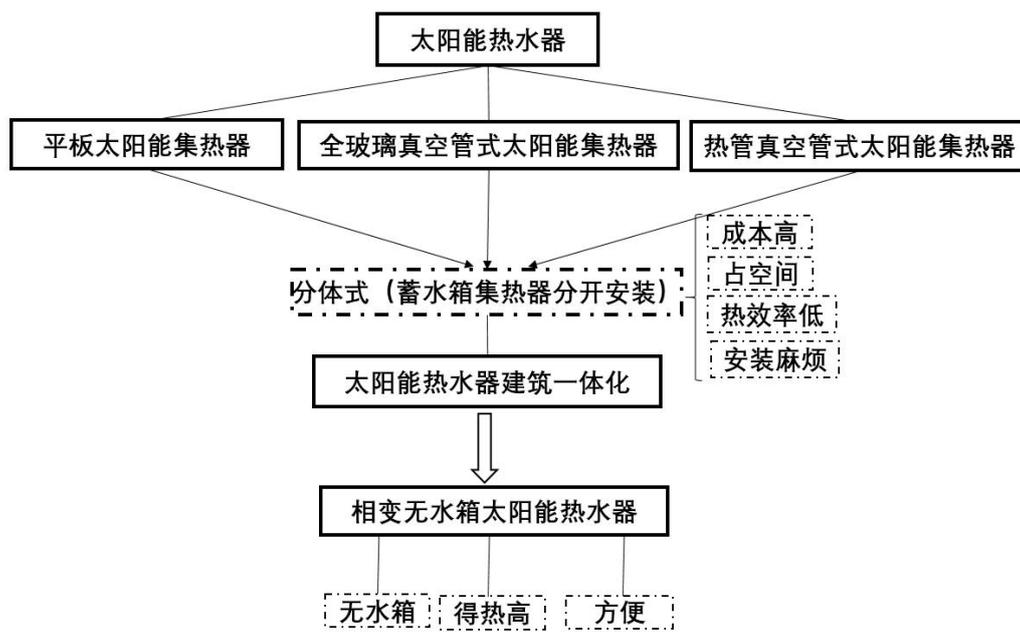


图 1 太阳能热水器分类及发展

相变无水箱太阳能热水器的研究起步较晚，是针对传统太阳能热水器缺陷而研发的一款产品，尤其是在太阳能热水器建筑一体化方面的缺陷。目前，国内外学者对相变太阳能热水器的研究主要集中在相变储热装置以及相变储热材料上。按照集热器与储热系统结构是否紧凑可以分为分体式太阳能热水器和一体化太阳能热水器。

一体化无水箱相变太阳能热水器是采用紧凑结构的设计，将集热装置、储热装置集成于一体的相变太阳能热水器。如徐柏恒^[6]发明的“一种储热式无水箱太阳能热水器(见图 2 b)”，该热水器集“集热器、储热装置”为一体，使得系统结构紧凑，减少了中间换热环节。设计者们通常把相变材料封装在真空管内，同时管路分布在相变材料中，利用真空管涂层对相变材料加热，取热时利用泵或自来水流提供

动力，管内流入冷水直接进行取热；或者采用平板集热器，通过太阳直晒相变材料捕获太阳能，同时把管路均匀填埋于相变材料中。此结构设计新颖美观，并且安装方便，安装运行维护费用低，能与现有建筑完美的结合。相变储热材料是相变无水箱太阳能热水器的关键部分，相变材料具有优越的潜热性能且温度较恒定^[7]，但多数相变材料导热系数小，影响相变太阳能热水器的换热性能，故需对储热装置采取必要的强化传热措施。可以直接在相变装置中添加翅片，肋片等强化传热结构，或者在相变材料中添加泡沫金属、金属粉末、石墨烯等热导系数大的材料增加储热装置的换热性能。此外，也可以利用膨胀石墨(EG)、蛭石(VMT)、珍珠岩等多孔矿物质吸附石蜡、硬脂酸等相变物质制成热导系数大的复合型相变材料。

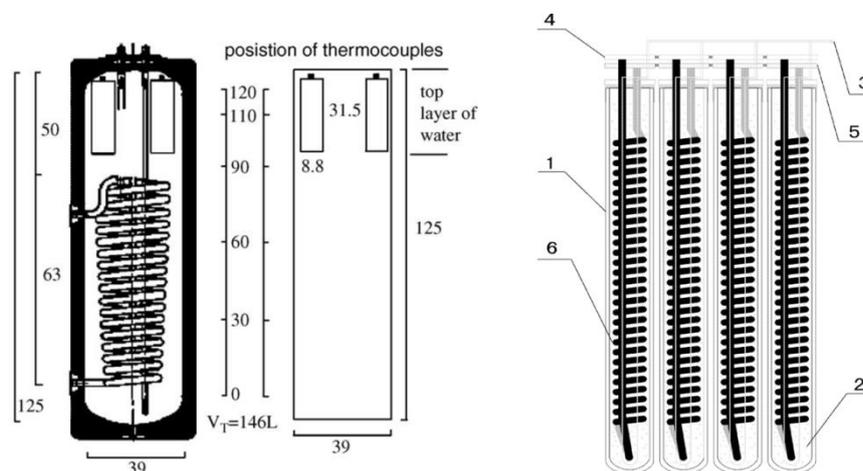


图 2 热水器换热结构(a 相变水箱盘状螺旋换热结构；b 储热式无水箱太阳能热水器结构图；注：1-太阳能真空管；2-储热材料；3-电加热器；4-进水管；5-出水管；6-换热器。)

分体式太阳能热水器是在传统太阳能热水器基础上，采用集热器、储热器分开安装，通过传热介质将太阳能集热器中吸收的热量传导到相变储热装置存储利用的一类热水器。相变储热水箱以及的设计，国内外学者提出数种不同形状的相变储热结构，比如图 2 a 中结构简单的盘状螺旋换热结构^[8]。综合目前学者工作，热水器用相变储热结构一般可分为两类：(1)系统采用具有内部换热器的集总封装方式对相变材料封装。比如，储热装置采用管簇式储热器，换热流体的管路均匀分布在相变材料中，管内流换热流体，管外为相变材料。在加热和取热时，采用强制循环，利用水泵提供动力换热流体通过金属壁面与相变材料换热。(2) 相变材

料采用分封装。通常采用填充床式储热器，包括多种的圆柱体堆积床相变储热装置、球体堆积床相变储热装置。利用泵提供动力，换热流体流入填充床式储热器，采用直接接触换热方式，对相变单元材料进行加热和取热。分体式太阳能热水器因水箱与集热器分开安装，集热装置可以去除笨重水箱，因此可以实现建筑与热水器的完美结合，但是安装运行费用高、安装麻烦、热利用效率低。

分体式太阳能热水器与一体化相变太阳能热水器均能实现与建筑的完美结合，但分体式成本较高、热利用效率较低。因此，本项目拟采用本项目组已开发的高效太阳能储热材料(专利申请号：201510996234.X，发明人：李传常，杨立新，陈荐)以及初步制作的试验无水箱太阳能热水器样机的基础上，通过现场试验数据采集分析、相变材料与集热管道匹配优化设计、集热管及连接管道匹配优化设计等手段，制作一台出水温度稳定、热水供量充足等性能优良且安装方便无水箱太阳能热水器。

【主要参考文献】

- [1] 徐亦潇. 太阳能热利用行业踏上“创新提质”新征程——记 2017 年中国太阳能热利用行年会暨高峰论坛[J]. 太阳能, 2017(12):71-72.
- [2] 邹得球, 詹建, 李乐园等. 热水器用相变储热材料的研究进展[J]. 化工进展, 2017,36(1):268-273.
- [3] 李传常, 罗杰, 江杰云, 杨逸男, 杨华明. 基于矿物特性的太阳能储热材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(9): 51-56.
- [4] C. Li, L. Fu, J. Ouyang, A. Tang, H. Yang. Kaolinite stabilized paraffin composite phase change materials for thermal energy storage[J]. Applied Clay Science, 2015, 115: 212-220.
- [5] H. Zhang, J. Baeyens, G. Cáceres, J. Degreè, Y. Lv. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, 53: 1-40.
- [6] 徐柏恒 一种储热式无水箱太阳能热水器[P]. CN 201120520054.2, 2012-11-21.
- [7] Teamah HM, Lightstone MF, Cotton JS. Potential of cascaded phase change materials in enhancing the performance of solar domestic hot water systems[J]. Solar Energy, 2018,159:519-30.
- [8] Ahmadi R, Hosseini MJ, Ranjbar AA, Bahrapoury R. Phase change in spiral coil heat storage systems[J]. Sustainable Cities and Society, 2018,38:145-57.

本项目学生有关的研究积累和已取得的成绩

(1) 项目组成员大一即进入指导老师实验室做实验，采用真空浸渍法（图 3），以椰壳炭、膨胀石墨等为支撑基体复合有机相变材料制备了多种复合相变储热材料，储热容量高达 $130 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，导热系数 $1.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 以上，为本项目提供了高性能储热材料(图 4)，并已申请**国家发明专利 1 项**(专利申请号：201710959059.7)。

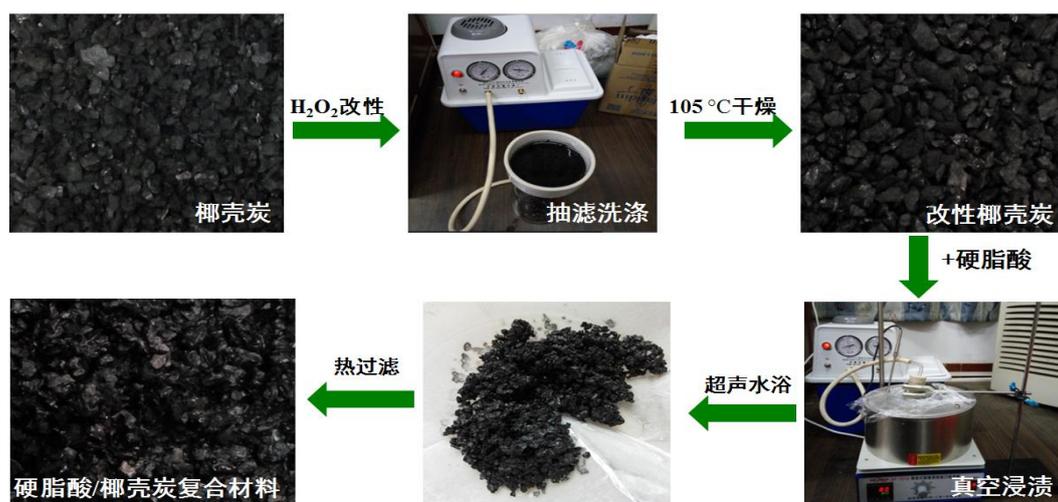


图 3 复合储热材料制备流程

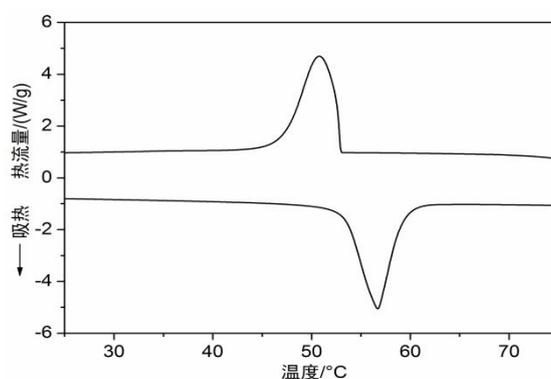


图 4 复合储热材料 DSC 曲线

(2) 在此基础上，项目组成员完成太阳能热利用作品，获第九届节能减排社会实践与科技竞赛**全国三等奖**(证书编号：2016A-C-169)，为本项目在无水箱太阳能热水器优化设计与制作提供了良好的团队协作基础；

(3) 项目组成员参与本项目前期实验室试验，通过在实验室训练，已掌握了本项目所需的实验方法和原理，并取得了一些本项目所需实验数据。

项目的创新点和特色

本项目采用自制的高性能复合储热材料替代传统水箱，通过系统优化设计制作无水箱太阳能热水器，其创新之处如下：

(1) 利用自制新型高效、储热密度大的复合相变储热材料替代传统的水作为储热介质，采用“集热-储热”一体化设计，真正实现太阳能热水器无水箱；

(2) 在相变储热装置中使用改型相变材料以及添加肋片结构，对储热装置进行强化传热。

其特色之处如下：

(1) 太阳能热水器无水箱化设计，热水器结构紧凑、节省空间，易于与现代建筑物结合、管理方便、运行可靠且制造简单；

(2) 相变无水箱太阳能热水器热储量大（热水供应足）、热损失效率低、安装与使用方便；

(3) 无水箱太阳能热水器承压、无需外接循环泵、直接走水工作，可提供健康、高效热水，洗浴舒畅且运行成本几乎为零。

项目的技术路线及预期成果

项目技术路线如图 5：

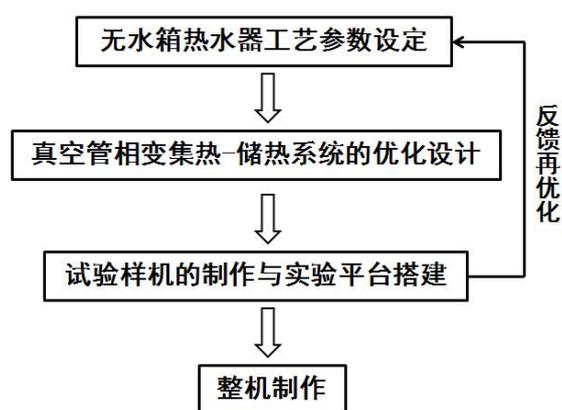


图 5 技术路线图

【技术方案】

(1) 无水箱热水器工艺参数设定

根据根据无水箱太阳能热水器新技术的特点以及长沙太阳辐射情况，从热水参数、集热面积、出水量等方面设定热水器基本工艺参数；

(2) 真空管相变集热-储热系统的优化设计

高效太阳能储热材料与集热管的匹配优化设计，通过在储热装置中添加自制高性能相变储热材料、肋片、翅片等措施，对相变储热装置进行强化传热，并反复试验与测量，优化设计适用于客户需求的“集热-储热”一体化相变集热管，并计算确定储热材料用量。**相变集热管及连接管道匹配优化设计**，通过考察相变集热管及连接管材质、尺寸、密封措施等因素，优化设计热损失少、输送安全等性能匹配的管道系统；

(3) 试验样机的制作与实验平台搭建

在集热器、储热系统以及连接管道设计完成之后，对产品的控制部件、安装方式以及外观等整体设计，并试制样机。并遴选合适的地点对实验样机进行工程实践，通过实验室的测温装置、测压设备、涡轮流量计、数据采集仪、太阳能采集仪对试验样机进行数据采集，进行搭建可以供新能源专业本科生实验的平台。在屋顶、阳台、窗台等地方，现场测试试验数据，并根据数据反馈再优化整个系统；

(4) 整机制作

根据数据分析结果反馈于设计环节，再优化设计，达到预期目标后，制作整机。提交太阳能热质量检测部门检测获得质量认证，并评价其节能效益。

【预期成果】

(1) 制作一台优化设计后的无水箱太阳能热水器，并将作品参加“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛；

(2) 申请专利 1~2 项，发表论文 1~2 篇；

(3) 搭建可供新能源专业本科生**创新训练的实验平台**。

年度目标和工作内容（分年度写）

2018 年 5 月至 2019 年 4 月

通过无水箱热水器工艺参数设定、真空管相变集热-储热系统的设计、制作试验样机并搭建实验平台，申请专利 1~2 项；

2019年5月至2020年4月

系统优化设计与整机制作。根据测试结果，优化设计各个工艺参数，并制作整体机。结合试验地区实际情况，开展节能效益分析，为新技术与新产品推广奠定基础。整理结题报告，并撰写学术论文1~2篇。

指导教师意见

该创新性实验计划涉及的无水箱太阳能热水器优化设计与制作为我国《太阳能利用“十三五”发展规划》中重点支持的方向之一，选题符合新能源科学与工程的专业本科生培养要求。开展此创新性实验计划有利于加强新能源专业学生对太阳能热利用的认识，申请人已具备较好的实验动手能力，在大学生研究性学习和创新性实验计划的支撑下可取得预期成果，增强申请人研究和自主创新能力。

签字：

日期：