

结合太阳能利用的热水系统设计比较 —以长沙某院校学生公寓为例

熊海涛

湖南省建筑科学研究院有限责任公司，湖南 长沙 410022

DOI: 10.61369/SSSD.2026050023

摘 要： 本文以长沙某院校学生公寓为实证研究对象，系统分析了传统太阳能热水系统与光伏热泵热水系统在技术特征、综合能效、空间适应性及气候适应性等方面的差异。通过构建光-电-热协同机制模型，结合智能控制策略优化算法，并基于长沙地区实测数据，验证了两类系统在南方湿热气候条件下的节能效益与经济性。研究表明，光伏热泵系统综合能效提升40%以上，空间利用率提高35%，年市政电量消耗减少35.4%，为校园宿舍类建筑热水系统的绿色设计提供了理论依据与实践范例。

关 键 词： 光伏热泵；综合能效；空间适应性；气候适应性

Comparison of Hot Water System Designs Incorporating Solar Energy Utilization—A Case Study of Student Dormitories in a Changsha Institution

Xiong Haitao

Hunan Provincial Academy of Building Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410022

Abstract： Taking the student dormitories of a certain institution in Changsha as the empirical research object, this paper systematically analyzes the differences between traditional solar hot water systems and photovoltaic heat pump hot water systems in terms of technical characteristics, comprehensive energy efficiency, space adaptability and climate adaptability. By constructing a photo-electro-thermal synergistic mechanism model, integrating the optimization algorithm of intelligent control strategies, and based on the measured data in Changsha area, the energy-saving benefits and economy of the two types of systems under the hot and humid climate conditions in South China are verified. The research shows that the comprehensive energy efficiency of the photovoltaic heat pump system is increased by more than 40%, the space utilization rate is improved by 35%, and the annual municipal electricity consumption is reduced by 35.4%. This study provides a theoretical basis and practical example for the green design of hot water systems in campus dormitory buildings.

Keywords： photovoltaic heat pump; comprehensive energy efficiency; space adaptability; climate adaptability

引言

长沙作为夏热冬冷气候典型城市，太阳能资源丰富但冬季湿冷、夏季湿热的气候特征对热水系统的设计提出挑战。某院校学生公寓采用智能热水模块与光伏发电系统集成，通过光-电-热智能协同机制，在确保热水供水可靠性的前提下，实现了能源梯级利用与动态优化。为南方类似气候地区建筑热水系统的降碳减排提供了探索方向和实践范例。

一、工程概况

某院校学生公寓地上五层，建筑高度20.70m，建筑面积约10284m²，容纳1544名学生。依据《建筑给水排水设计标准》（GB50015-2019）6.2.1条，每间学生公寓均设置智能水表计量热水用量，其最高日用定额取30（L/人·d），平均日用定额取25（L/人·d）；整栋学生公寓最高日热水用水量为46.32m³/d，平均日热水用水量为38.60m³/d。集中热水供应系统设计热水温度60℃，冷水温度5℃。设计小时耗热量为440.54Kw，设计小

时热水量为6.37m³/h。

二、供热方案原理比选

（一）传统太阳能热水系统原理

利用太阳能集热器吸收太阳辐射能，将集热器内的水加热后，通过水泵循环将热量传递至集热水箱^[1]。同时集热水箱作为热水系统的贮热水箱的水源对贮热水箱进行补充和换热；贮热水箱连接辅助热源空气源热泵来保障贮热水箱的加热和保温（原理如

图1所示)。水加热设备出水温度设定最高为65℃,系统采用紫外线消毒器作为灭菌措施。

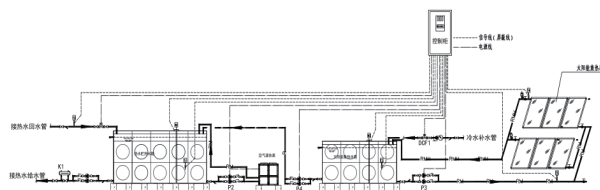


图1 传统太阳能热水系统原理图

(二) 光伏热泵热水系统原理

通过光伏板将太阳能转化为电能,驱动热泵从环境中吸收低位热能,并将其提升为高温热能用于加热水^[2]。系统主要由光伏组件、热泵机组和储热水箱等部分组成(智能热水模块加热系统原理如图2-1所示,智能热水模块图2-2所示)。光伏板产生的直流电直接供给热泵主机,热泵通过蒸发器吸收空气中的热量,经压缩机压缩后,在冷凝器中将热量传递给水^[3]。与普通电加热相比,热泵能效比可达3~5,即消耗1度电可产生3~5度电等效的热量,能效显著提升^[4]。

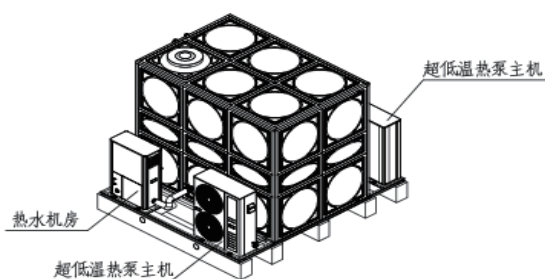
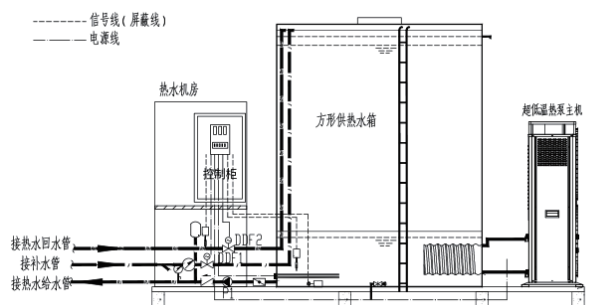


图2-1 智能热水模块加热系统原理图 图2-2 智能热水模块轴侧图

三、年消耗市政电量对比

(一) 传统太阳能热水系统年消耗市政电量

1. 平均日耗热量

$$Q_{md} = q_{mr} \cdot m \cdot b_1 \cdot C \cdot \rho_r \cdot (t_r - t_L^m)$$

式中: Q_{md} ——平均日耗热量 (kJ/d);

q_{mr} ——平均日热水用水定额 [L/(人·d)], 取25 (L/人·d);

m ——用水计算单位数(人数或床位数), 取1544人;

b_1 ——同日使用率的平均值, 取1;

C ——水的比热 [kJ/(kg·℃)], $C = 4.187$ kJ/(kg·℃);

t_r ——热水温度 (℃), 取 $t_r = 60$ ℃;

ρ_r ——热水密度 (kg/L), 取 $\rho_r = 0.983$ kg/L;

t_L^m ——年平均冷水温度 (℃), 取15℃;

经计算, $Q_{md} = 7149181.08$ kJ/d。

2. 传统太阳能热水系统太阳能集热器所需总面积

采用直接太阳能热水系统, 所需设置集热器面积:

$$A_{jc} = \frac{Q_{md} \cdot f}{b_j \cdot J_t \cdot \eta_j (1 - \eta_1)}$$

式中: A_{jc} ——直接太阳能热水系统集热器总面积 (m²);

f ——太阳能保证率, 取 $f = 0.40$;

b_j ——集热器面积补偿系数, 取 $b_j = 1.0$;

J_t ——集热器总面积的平均日太阳辐照量 [kJ/(m²·d)], 取

$J_t = 4400$ MJ/(m²·a) = 12054.80 kJ/(m²·d);

η_j ——集热器总面积的年平均集热效率, 取 $\eta_j = 45\%$;

η_1 ——集热系统的热损失, 取 $\eta_1 = 20\%$ 。

经计算, $A_{jc} = 658.95$ m²

3. 传统太阳能热水系统实际布置太阳能集热器面积

根据当地绿建方面政策要求, 学生公寓屋顶还需设置种植屋面。屋顶实际可布置290 m²的太阳能集热器, 屋顶太阳能集热板布置如图3所示。



图3 屋顶太阳能集热板布置示意图

因实际最多能布置的太阳能集热器面积290 m² < 所需集热器面积658.95 m², 所以传统太阳能热水系统按实际最多能布置的太阳能集热器面积设置集热器^[5]。

4. 传统太阳能热水系统太阳能平均日供热量

$$Q_{gd} = A \cdot b_j \cdot J_t \cdot \eta_j (1 - \eta_1)$$

式中: Q_{gd} ——平均日供热量 (kJ/d)

A ——实际布置太阳能集热器面积 (m²);

经计算, $Q_{gd} = 1258520.55$ kJ/d

5. 传统太阳能热水系统实际年利用太阳能供热量

在校园每年一个月的寒假、两个月暑假期间, 学生公寓内均无热水需求; 即每年仅有9个月可利用太阳能资源制热。根据长沙地区全年各月份太阳能资源分布情况, 暑假所处七、八月份为太阳能资源最丰富的月份^[6]; 再加上冬季个别月份气温持续低于0℃时, 太阳能集热器制热量很低, 为防止集热器和管道冻坏, 须放空集热器管路内的水而停止使用集热器制热。实际太阳能年供热量为理论太阳能年供热量的60%, 约合电能76560 kWh^[7]。

6. 传统太阳能热水系统年耗电量

按学生公寓每年9个月有学生居住计算，热水系统所需年制热量

$$Q_{md} = 270Q_{md} = 270d \times 7149181.08 \text{ kJ/d} = 536188.53 \text{ kWh}.$$

传统太阳能热水系统的供热量除太阳能集热器供热外，其余均由空气源热泵供应，则空气源热泵机组的全年供热量为459628.58kWh。取空气源热泵机组全年平均能效比4.0，则空气源热泵机组的年制热耗电量为114907.15kWh，即传统太阳能热水系统年消耗市政电量114907.15kWh^[8]。

（二）光伏热泵热水系统年消耗市政电量

1. 光伏热泵热水系统实际年利用太阳能利用量

采用平面尺寸为2382*1134的光伏板，则学生公寓屋顶最多可布置117块光伏板，屋顶光伏板布置如图4所示。

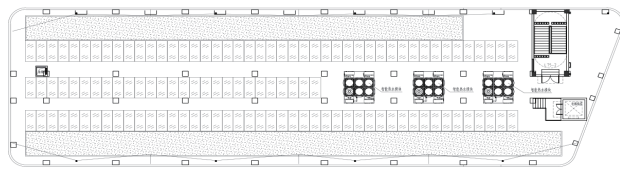


图4 屋顶光伏板布置示意图

光伏组件单晶630Wp，则光伏板系统装机容量P为73.71kWp。

则光伏板系统年发电量

$$E = P \times H \times K$$

H——峰值小时数（h），长沙地区取1000h；

P——组件装机容量（kWp）；

E——发电量（度）；

K——综合效率（考虑光照效率，逆变器效率等，一般取值为0.75~0.85）本栋学生公寓取0.812。

经计算， $E = 73.71 \times 1000 \times 0.812 = 59852.52 \text{ kWh}$

2. 光伏热泵热水系统年消耗市政电量

光伏热泵热水系统热量全部由空气源热泵制热供应，则空气源热泵机组（同传统太阳能热水系统，全年平均能效比4.0）的年制热耗电量为134047.15kWh。

因光伏板系统发出的电优先供应空气源热泵机组制热，在太阳能资源丰富季节光伏板日发电量大于空气源热泵机组制热耗电量时，多余的发电量可以补充学生公寓的照明、动力等的用电；所以光伏板系统发出的电量可以完全得到利用。

光伏热泵热水系统年制热耗电量减去由光伏板系统供应的电量后，消耗市政电量74194.63kWh，即光伏热泵热水系统年消耗市政电量74194.63kWh^[9]。

3. 年消耗市政电量对比

传统太阳能热水系统年消耗市政供电电量114907.15kWh远大于光伏热泵热水系统年消耗市政电量74194.63kWh。对比传统太阳能热水系统，光伏热泵热水系统年市政电量消耗减少35.4%，在综合能源利用上统效率提高显著。

四、空间适应性对比

（一）传统太阳能热水系统安装位置与朝向要求

传统太阳能热水系统集热器方位角需严格对准正南方向，允许最大偏差 $\pm 15^\circ$ ，超出此范围将显著降低冬季太阳辐射接收量，尤其在长沙等纬度地区，太阳高度角偏低，朝向偏差会导致日均得热量下降20%以上。

倾角需匹配纬度：长沙地区地理纬度约 28° ，集热器最佳倾角应设定在 $25^\circ - 30^\circ$ 区间，以最大化全年太阳辐射捕获效率。倾角过小（ $< 20^\circ$ ）易积尘且冬季效率骤降，倾角过大（ $> 35^\circ$ ）则夏季过热、春秋季收益下降^[10]。

（二）光伏热泵热水系统空间适应性

光伏热泵系统采用模块化设计，可灵活适应不同建筑形态。光伏板与储热水箱直接由传输线连接，安装简单方便；储热水箱可安装于阳台、屋顶、地面等位置，不受距离限制。光伏板重量 $\leq 15 \text{ kg/m}^2$ ，比太阳能热水集热器轻得多，光伏板可与建筑立面一体化，光伏板可替代传统遮阳板。

五、气候适应性对比

（一）传统太阳能热水系统气候适应性

限于技术原理，对长沙冬季湿冷气候适应性最差，集热器表面易结霜结冻，热损失增加30%以上；气温持续低于 0°C 时，为防止集热器和管道冻坏，须放空集热器管路内的水而停止使用集热器制热。

（二）光伏热泵热水系统气候适应性

长沙地区“夏季高温高湿、冬季湿冷寡照、春秋季短且多阴雨”的独特气候条件，对太阳能热水系统的环境适应性提出严峻挑战。

光伏热泵系统通过多重定制设计实现了对长沙气候的深度适配：采用双面发电光伏板（正面吸收直射光，背面吸收地面反射光），在夏季高辐照度条件下发电量提升15%；配置智能除湿模块，当环境湿度超过85%时自动启动，防止设备内部结露腐蚀，延长使用寿命；开发基于长沙逐时气象数据的优化控制算法，实现系统运行参数的动态调整。

六、环保与可持续性优势

光伏热泵系统减少对化石燃料依赖，碳排放量显著低于传统系统，符合“双碳”目标要求。传统系统在阴雨天依赖电辅热，间接增加碳排放；而光伏热泵通过能源梯级利用和废热回收，实现清洁生产，全生命周期环境效益更优。

七、结束语

传统太阳能热水系统虽技术成熟、结构简单，但能效水平低、运行成本高；光伏热泵系统则通过多能互补、废热回收和智

能控制，实现了从单一能源转换到综合能源优化的技术跨越，在综合能效、环境适应性、经济性、智能化及环保性方面均显著优于传统太阳能热水系统，综合优势突出，代表了校园太阳能热水系统的主流发展方向。

参考文献

[1] 王庆强. 民用建筑太阳能热水系统设计及常见问题分析 [J]. 中国高科技, 2024, (24): 77-78+90.

[2] 李伏亮. 太阳能热水系统设计研究 [J]. 中国设备工程, 2024, (22): 45-47.

[3] 龙云秋. 低温空气源热泵与太阳能生活热水系统在医院的设计实践 [J]. 山西建筑, 2024, 50 (18): 104-108+135.

[4] 闫秀英, 夏宇. 太阳能-空气源热泵热水系统新型组合优化设计 [J]. 分布式能源, 2024, 9 (04): 33-42.

[5] 李伟, 邢滕, 章朋友, 等. 改造项目屋面太阳能热水系统热源优化设计 [J]. 给水排水, 2024, 60 (08): 109-111.

[6] 王辉, 马兵善, 王刚. 纳米颗粒粒径对太阳能热水系统热性能的影响研究 [J]. 能源与环保, 2023, 45(11): 217-224.

[7] 范翀. 浅析建筑给排水工程中太阳能热水系统设计要点 [J]. 江西建材, 2023, (09): 77-78.

[8] 吴莉萱. 太阳能热水系统在建筑给排水设计中的应用和思考 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023, (26): 77-79.

[9] 郭杰, 赵强. 基于正交试验的间接式太阳能热水系统运行参数优化分析 [J]. 能源研究与利用, 2023, (03): 21-24.

[10] 李涛, 王志帆, 毛前军, 等. 基于层次分析理论的太阳能热水系统防冻措施对比研究 [J]. 可再生能源, 2023, 41(05): 597-603.