

文章编号:0253-4339(2025)03-0048-10  
doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.03.048

面向零碳能源消纳的储冷储热技术

## 基于蓄能的户用光伏智能用电系统研究

刘俊红<sup>1</sup> 孙楠<sup>2</sup> 陈斯<sup>3</sup> 吴建恒<sup>1</sup> 崔萍<sup>1</sup>

(1 山东建筑大学热能工程学院 济南 250101; 2 济南热力集团有限公司 济南 250014;  
3 山东省建筑设计研究院有限公司 济南 250001)

**摘要** 为增加户用光伏就地消纳能力,满足人们对生活居住环境舒适便捷的需求,提出一种能够满足家庭用电、冬季供暖、夏季制冷、全年生活热水供应需求的户用光伏智能用电系统,其中供暖制冷采用空气源热泵+地暖+风机盘管+蓄能水箱(冬蓄热水、夏蓄冷水)的方式。以山东省某民宅为研究对象,建立了该系统的 TRNSYS 仿真模型,根据模拟结果和当地当时电价对蓄能运行方案进行优化,并分析了系统的经济性。结果表明:该系统在满足建筑全年用电和保证冬夏季室内温度的同时,还可获得光伏上网收益,全生命周期内收益最高。空气源热泵最优运行方案为冬季 09:00—16:00、22:00—05:00 工作,夏季 07:00—18:00、22:00—05:00 工作;可控型电器在 10:00—16:00 使用,有储能性电器在 11:00—14:00 使用,可进一步消储光伏电。蓄能水箱比无水箱时减少 46% 耗标煤量,节能效果显著。

**关键词** 光伏;空气源热泵;消纳;蓄能

**中图分类号**:TB657.5;TU831.4

**文献标识码**:A

## Household Photovoltaic Intelligent Power System Based on Energy Storage

Liu Junhong<sup>1</sup> Sun Nan<sup>2</sup> Chen Si<sup>3</sup> Wu Jianheng<sup>1</sup> Cui Ping<sup>1</sup>

(1. School of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, 250101, China; 2. Jinan Heating Group Co., Ltd., Jinan, 250014, China; 3. Shandong Provincial Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Jinan, 250001, China)

**Abstract** A household photovoltaic intelligent power supply system was proposed to increase the on-site consumption capacity of household photovoltaics and fulfill the requirements for a comfortable and convenient living environment. The system can fulfill the requirements of household electricity, space heating, space cooling, and hot water supply throughout the year. Heating and cooling were realized using air source heat pumps (ASHP), underfloor heating, fan coil units, and energy storage water tanks, which store hot water in winter and cold water in summer. A TRNSYS simulation model of the system was created based on residential buildings in Shandong, China. Based on the simulation results and local electricity prices, the energy storage operation plan was optimized, and the economic efficiency of the system was analyzed. The results indicate that the system can meet the building's year-round electricity consumption, maintain indoor temperatures in winter and summer, and generate revenue from photovoltaic power, yielding the maximum return on investment throughout the entire life cycle. The optimal operating schedule for the ASHP is from 09:00 to 16:00 and 22:00 to 05:00 in winter and from 07:00 to 18:00 and 22:00 to 05:00 in summer. Controllable electrical appliances were used from 10:00 to 16:00. In contrast, appliances with energy storage were used from 11:00 to 14:00 to consume and store the photovoltaic electricity. The energy-storage water tank reduces standard coal consumption by 46% compared to the case without a water tank, demonstrating a substantial energy-saving effect.

**Keywords** household photovoltaic; air-source heat pump; on-site consumption; energy storage

可持续发展理念下,太阳能、空气能等可再生清洁能源的转化利用有助于“双碳”目标早日实现。2021年国家能源局批准通过676个整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点<sup>[1]</sup>,同年《加快农村能源转型

发展助力乡村振兴的实施意见》<sup>[2]</sup>指出,推动构建清洁低碳、多能融合的现代农村能源体系,推动千村万户电力自发自用。《2023年能源工作指导意见》<sup>[3]</sup>提出实施光伏“千家万户沐光行动”。国家发展改革委

基金项目:国家自然科学基金(52278115)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52278115).)

收稿日期:2024-12-20;修回日期:2025-01-31;录用日期:2025-02-10

等六部门在 2024 年 10 月底发布的《关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见》<sup>[4]</sup>提出全面支持农业农村用能清洁化现代化,积极发展分布式光伏发电。我国分布式光伏已成为光伏发电的重要发展方向,发展势头猛后劲足<sup>[5]</sup>。

户用光伏利用农房屋顶建设分布式光伏发电系统,即民居光伏发电。现代农村能源体系中提出户用光伏配置一定比例储能,自发自用,就地消纳,余电上网。然而目前国内户用光伏基本采用“租赁屋顶、全额上网”的模式<sup>[6]</sup>,提供屋顶的农户对光伏电没有就地消纳能力,反而因电网配电侧可接入容量有限导致部分地区电网承载能力达到饱和<sup>[7]</sup>。同时各地的电网峰谷平时段发生了较大变化,光伏电集中于谷时段,降低了户用光伏的经济性。需提高光伏系统的自发自用率,并与蓄能结合才能增加家庭收益。

根据在山东农村的既有建筑节能改造调研可知<sup>[8]</sup>,随着家庭年收入的增加,更多农户愿意为居住环境更加舒适增加支出。最希望节能改造的项目是供暖方式,且选择地暖方式最多,其次是墙体保温和降温方式。相比使用电风扇或扇扇子的降温方式,更多农户选择采用空凋制冷<sup>[9]</sup>。随着分布式光伏的推广,更多农户希望对屋顶进行光伏发电改造<sup>[9-10]</sup>。因此在调研过程中提出了一种能够满足家庭用电、夏季制冷、冬季供暖、全年生活用热水供应等需求的农村户用屋顶分布式太阳能光伏智能用电系统(简称:户用光伏智能用电系统)。该系统有助于光伏电能就地消纳最大化,削峰填谷,提高清洁能源使用率,改善农村人居环境,增加家庭收益。

可同时满足夏季制冷、冬季供暖的空气源热泵与光伏结合存在巨大潜力。目前研究集中在户用光伏与空气源热泵联合供热<sup>[11-12]</sup>,在夏季制冷、全年生活热水以及全年家庭用电联合的方面还存在空缺。户用光伏配置蓄能显著提高了电力自平衡能力<sup>[13]</sup>。光伏+空气源热泵系统的蓄能装置有蓄电池<sup>[14]</sup>、蓄热水箱<sup>[15]</sup>、蓄电池+蓄热水箱<sup>[16]</sup>、蓄电池+相变蓄能<sup>[17]</sup>、冰蓄冷<sup>[18]</sup>等。相比蓄电方式,采用蓄热水箱所需的蓄能设备容量较小,太阳能保证率较高<sup>[19]</sup>,且蓄热设备投资远低于蓄电设备。相变蓄能和冰蓄冷方式对于农户而言价格昂贵,而价格低廉的蓄热水箱方式既可以在冬天作为承压式缓冲水箱,在夏天还可以蓄存冷水,作为蓄能水箱,全年使用。

综上所述,户用光伏智能用电系统的供热供冷方式为空气源热泵+地暖(冬)+风机盘管(夏)+蓄能水箱(冬蓄热水、夏蓄冷水)。本文将对该系统展开研究,以山东省已安装光伏系统的某农宅为研究

对象进行系统模拟,探讨蓄能运行方案和系统的经济性。

## 1 户用光伏智能用电系统

### 1.1 系统组成

户用光伏智能用电系统主要由户用光伏发电系统、家用电器、空气源热泵系统、太阳能生活热水系统和控制系统等组成,如图 1 所示。

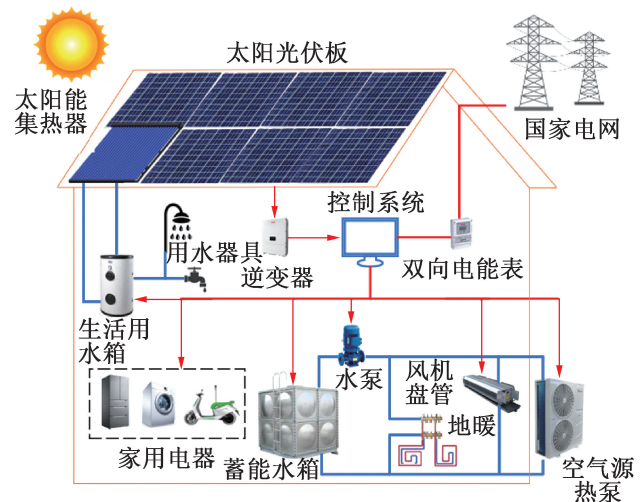


图 1 户用光伏智能用电系统

Fig.1 Household photovoltaic intelligent power system

户用光伏发电系统由光伏电池板、逆变器、充放电控制系统、双向电表等组成,采用“自发自用,余电上网”模式。家用电器包括灯具、电视机、电冰箱、洗衣机、电饭煲、抽油烟机、手机、电动自行车、电动汽车等所有耗电设备。空气源热泵系统由空气源热泵、风机盘管(夏季供冷)、集水器、分水器、地暖(冬季供暖)、蓄能水箱(含电加热)、水泵和管道等组成。蓄能水箱取代空气源热泵供热系统中的缓冲水箱,容量根据家庭的用热量用冷量综合考虑后确定。太阳能生活热水系统由太阳能集热器、生活用水箱、用水器具等组成。控制系统由温度传感器、控制器、阀门等组成。

### 1.2 蓄能运行策略

白天产生的光伏电除了给家用电器供电,还驱动空气源热泵加热(冬季)或冷却(夏季)蓄能水箱中的水,从而以热能(冷能)方式蓄存,剩余电量接入电网获取收益。当光伏电不足以满足自用,从电网取电补充所需电量。

全年运行工况主要为 3 种:冬季制热、夏季制冷和过渡季供能。

#### 1.2.1 冬季制热工况

1) 空气源热泵+蓄能水箱:冬季天气晴朗且室外

温度高于空气源热泵设定低温时,开启空气源热泵为室内地暖供热;当室内温度达到供暖范围上限时,转换阀门停止地暖供热而加热蓄热水箱中的水。当室内温度达到供暖范围下限时,转换阀门为地暖供热而停止蓄热;

2) 蓄热水箱单独运行模式:空气源热泵停止运行,地暖所需热量全部来自蓄热水箱;

3) 蓄能水箱+电加热运行模式:在阴雨雪天室外气温低于空气源热泵设定低温时,空气源热泵停止运行,采用电加热为蓄能水箱加热,满足用户供暖需求;太阳能集热器无法满足生活热水需求时也开启电加热来满足日常热水需求。

### 1.2.2 夏季制冷工况

1) 空气源热泵+蓄能水箱运行模式:开启空气源热泵为室内供冷,当室内供冷温度达到供冷范围下限时,转换阀门冷却蓄能水箱中的水;当室内供冷温度达到供冷范围上限时,转换阀门冷却室内风机盘管。

2) 蓄冷水箱单独运行模式:空气源热泵停止运行,风机盘管所需冷量来自蓄能水箱。

### 1.2.3 过渡季供能工况

因无需供暖和制冷,空气源热泵系统不运行,仅家用电器耗电。

## 2 系统模拟与分析

### 2.1 建筑模型

选取山东省枣庄市幸福楼村一户屋顶已安装光伏系统的农宅作为建筑模型<sup>[20]</sup>。该建筑面积为109.6 m<sup>2</sup>,高为3 m。建筑内包含3个卧室、1个客厅、1个厨房、1个储藏间,模型如图2所示。室外气象参数和室内设计参数如表1所示,建筑围护结构参数如表2所示。

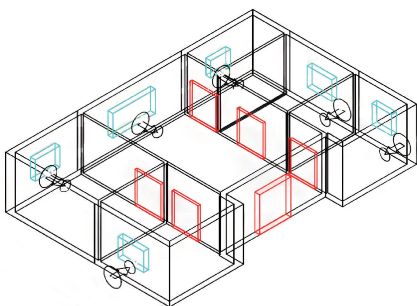


图2 建筑的三维模型

Fig.2 3D model of the building

### 2.2 设备选择

该建筑实际安装单晶单面440 W<sub>p</sub>(GCL-M8/72H)组件63块,光伏组件采用固定式支架南向10°倾角布置,安装容量为27.2 kW<sub>p</sub>。根据PV<sub>system</sub>软件

表1 室内外参数

Tab.1 Parameters of indoor and outdoor

季节	室外气象参数				室内设计参数	
	大气压力/Pa	干球温度/℃	湿球温度/℃	相对湿度/%	温度/℃	相对湿度/%
夏	99 790	34.7	26.8	61	26	55
冬	101 910	-5.3	-7.7	53	18	50

表2 建筑围护结构参数

Tab.2 Parameters of the building envelope

围护结构名称	构成	传热系数/[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
外墙	20 mm 水泥砂浆+40 mm 聚苯浆料+20 mm 水泥砂浆+200 mm 钢筋混凝土	0.738
内墙	混凝土多孔板	1.860
窗户	普通单框双玻璃	4.000
屋面	钢筋砼板	0.490
外门	木框双层玻璃门	2.500
内门	金属框单层实木门	6.500

模拟计算得到年均发电量为31 591.4 kW·h,国网查询到的2022年实际发电量为38 912 kW·h。模拟与实际逐月发电量变化如图3所示。

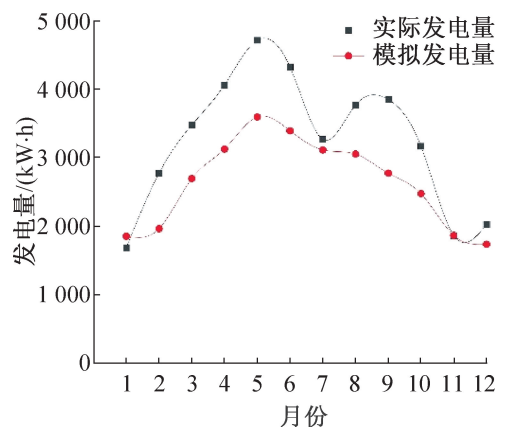


图3 逐月发电量变化

Fig.3 Variation of monthly power generation

由图3可知,模拟发电量与实际发电量变化趋势相近,均为先增后降,5月份达到最高值。除1月份因出现2次雨雪天气导致实际发电量少于模拟发电量外,2—12月光伏实际发电量均高于模拟发电量,误差区间为0.11%~29.07%。表明除极端天气外实际项目运行效率更高,运行可靠。为便于实时模拟,采用软件模拟光伏发电量。

根据建筑模型(图 2),用 DeST-h 软件模拟该建筑物全年逐时冷热负荷。由模拟结果可知,热负荷最大值出现在 1 月 18 日(取为典型日,将 1 月作为典型月);冷负荷最大值出现在 7 月 29 日(取为典型日,将 7 月作为典型月)。假设 2 个小卧室均为 1 人,大卧室为 2 人,客厅为 4 人,照明为 20 W/m<sup>2</sup>,利用天正暖通进行计算,得到热负荷为 7 676.62 W,冷负荷为 7 390.64 W。

项目所在地最冷月平均温度为-0.3℃,由于低温环境下热泵机组制热量存在衰减现象,因此根据冷负荷选择变频低温热泵冷暖机 LPR-15ID/BP,外形尺寸为 1 226 mm×500 mm×841 mm(长×宽×高),总质量为 105 kg。其它参数如表 3 所示,制冷量和低温制热量均满足要求。制热和制冷时的进/出水温分别为 40℃/45℃,12℃/7℃。

表 3 空气源热泵空调机组参数

Tab.3 Parameters of the air-source heat pump

项目	参数	项目	参数
机组型号	LPR-15ID/BP	名义制热量/kW	10
电源类型	220 V/50 Hz	低温制热量/kW	8.5
最大输入功率/kW	4.80	名义制冷量/kW	8
最大输入电流/A	22.5	循环水流量/(m <sup>3</sup> /h)	1.49
适用温度范围/℃	-30~43	制冷剂	R410A
最高出水温度/℃	60	制冷剂充注量/kg	3.3

地理管选用 DN20×2.0 mm PE-XC,管间距为 20 cm。风机盘管选择卧式暗装式,布置在房间上部。太阳能集热器选用 24 管的 220 L 真空管,尺寸为长 2 m、宽 1 m,布置于屋顶南向,设计倾角为 30°。按照热负荷最大日计算蓄热水箱容积为 4.6 m<sup>3</sup>,而按照冷负荷最大日作为蓄能水箱典型日计算的蓄冷水箱容积为 7.6 m<sup>3</sup>。根据设定建筑物所处地的天气状况,以及空气源热泵夏天夜间工作效率更高,选择冬季的水箱体积 4.6 m<sup>3</sup> 作为蓄能水箱的容积。

### 2.3 系统模拟仿真

山东省供暖时间为 11 月 15 日至次年 3 月 15 日,夏季按照《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》<sup>[21]</sup>的 5 日滑动平均法,以 26℃为夏季空调供冷的室外临界温度,确定供冷日为 5 月 18 日至 8 月 20 日。在 TRNSYS 软件中搭建模型,根据控制逻辑对模型进行调试,仿真模型如图 4 所示。

#### 2.3.1 供暖季工况分析

初设空气源热泵的运行时间为 05:00—17:00,蓄能水箱在 17:00—05:00 供热。为满足室内供暖最低温度的标准<sup>[22]</sup>,设定用户供水温度为 30℃,以时间步长为 1 h 模拟整个供暖季,模拟结果如图 5 所示。

由图 5 可知,供暖季前期和后期供回水温差相对较小,中期供回水温差随室外气象参数变化存在 2 次较为显著的波动。供暖后期室外温度高,部分时段不存在供暖需求,无需开启热泵。

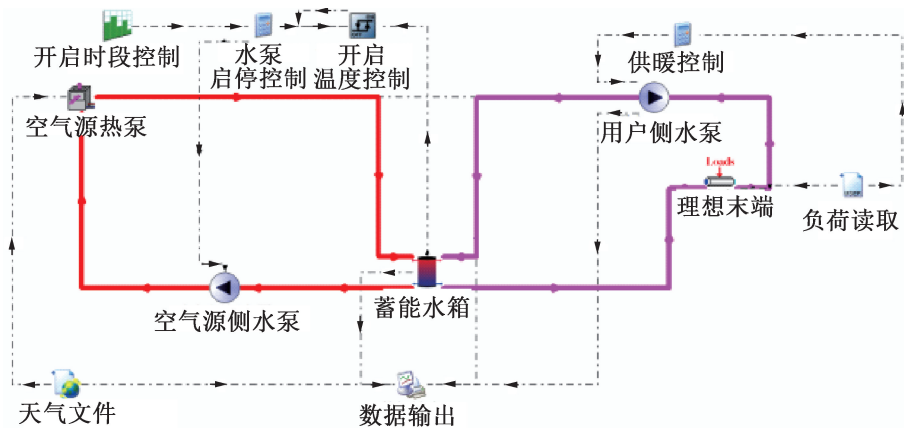


图 4 空气源热泵蓄能系统仿真模型

Fig.4 Simulation model of ASHP energy storage system

有 95.3%的时间用户供水温度超过 30℃,4.7%的时间供水温度低于 30℃,供水温度低多发生于 02:00—07:00。该时段人员多处于休息睡眠状态,对室内温度变化不敏感。综上,所设定的空气源热泵和蓄能水箱的运行时间基本满足供暖季室内人员舒适度需求。

为便于运行方案的优化,根据 PVsyst 模拟光伏系统发电量、TRNSYS 模拟热泵耗电量结果,对典型月平均逐时耗电和典型日逐时耗电进行分析,如图 6 和图 7 所示。由图 6、图 7 可知,月平均逐时电量和典型日的逐时电量的变化趋势相似。典型月和典型日的光伏发电总量均大于空气源热泵耗电量,但光伏

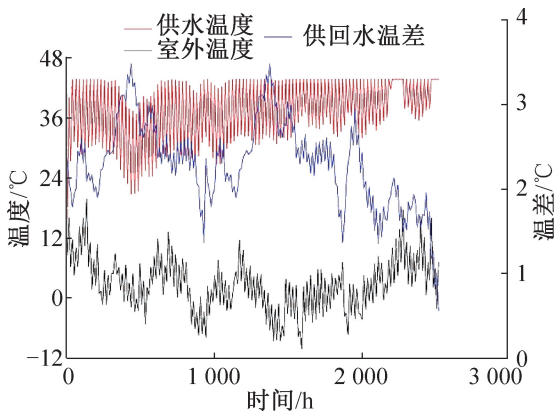


图5 整个供暖季模拟结果

Fig.5 Simulation results of the entire heating season

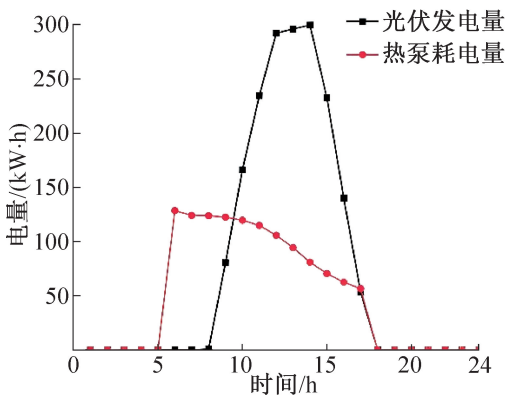


图6 供暖季典型月平均逐时耗电

Fig.6 Average hourly power consumption in typical month of heating season

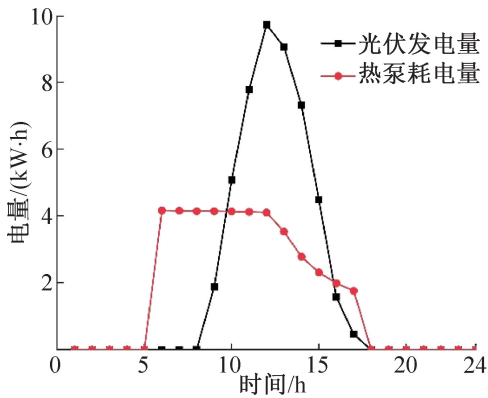


图7 供暖季典型日逐时耗电

Fig.7 Hourly power consumption on typical day of heating season

系统出力时间与设定的空气源热泵工作时间不匹配,需改变热泵工作时间。

### 2.3.2 供冷季工况分析

同样取空气源热泵的运行时间为 05:00—17:00,蓄能水箱在 17:00—05:00 供冷。将用户侧供水温度为 16 °C 作为评价系统供冷达到的最低标

准<sup>[23]</sup>,以时间步长为 1 h 模拟整个供冷季,模拟结果如图 8 所示。

由图 8 可知,供冷季供回水温差随室外温度变化显著,供冷初期室外温度低,供水温度高,但供回水温差大;供冷后期部分时刻无需供冷即可满足室温要求。用户侧供水温度低于 16 °C 共 1 657 h,占整个供冷季的 72.7%,有 623 h (27.3%) 的供冷时间供水温度高于 16 °C,不满足供冷需求,需要延长空气源热泵工作时间。

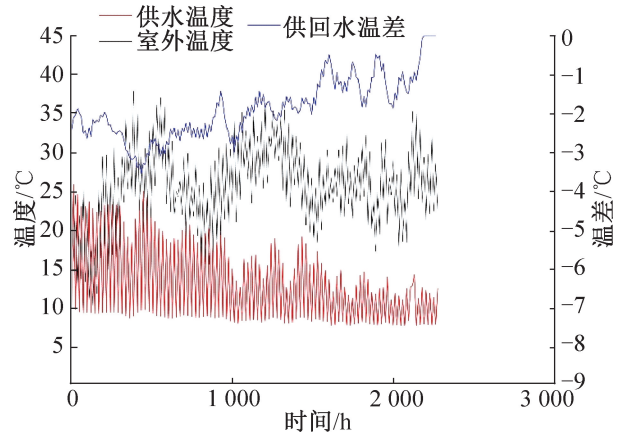


图8 整个供冷季模拟结果

Fig.8 Simulation results of the entire cooling season

典型月平均逐时电量和典型日逐时电量分别如图 9 和图 10 所示。由图 9 和图 10 可知,典型月和典型日的光伏平均逐时发电量均大于空气源热泵平均逐时耗电量。

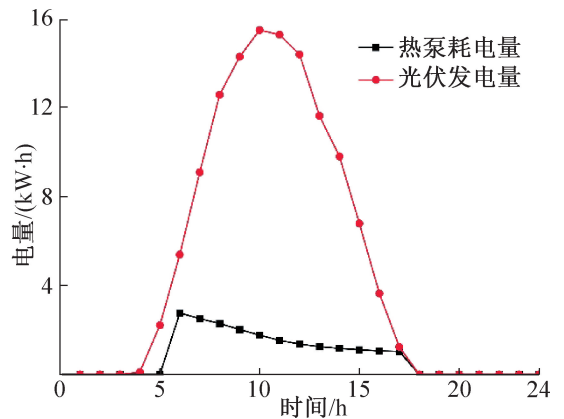


图9 供冷季典型月平均逐时耗电

Fig.9 Average hourly power consumption in typical month of cooling season

### 2.3.3 蓄能运行方案优化

根据冬夏季的模拟结果,以及当地当时的居民阶梯电价,对热泵工作时间进行优化处理。控制空气源热泵在当地光伏高效出力时段和低谷电价时段工作,配合蓄能水箱的运行,减少用户侧供水温度不满足设

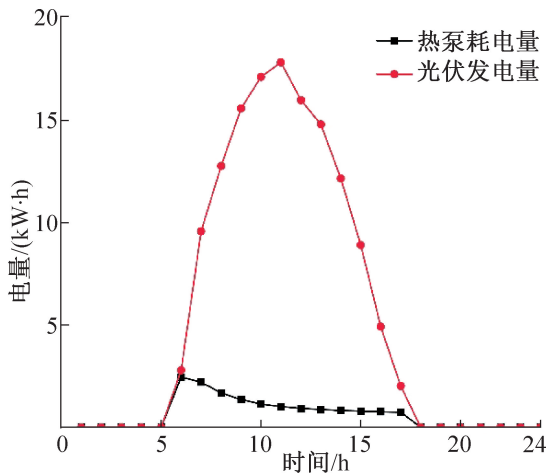


图 10 供冷季典型日逐时耗电

Fig.10 Hourly power consumption on typical day of cooling season

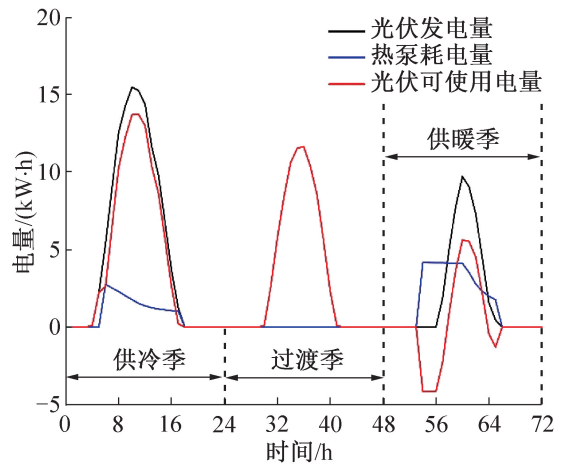


图 11 不同季节白天时设备平均电量

Fig.11 Average power during daytime in different seasons

定值的小时数,并增加对光伏电的消纳。

当居民用电电价如表 4 所示时,调整空气源热泵的工作时间分别进行冬夏季的多工况模拟。最终得到不满足小时数为 0 且系统经济性高的空气源热泵最优运行方案:冬季 09:00—16:00、22:00—05:00;夏季 07:00—18:00、22:00—05:00。

表 4 居民用电电价

Tab.4 Electricity price of residential use 元

用电分类	正常电价	峰段电价	谷段电价	峰段电价 (供暖季)	谷段电价 (供暖季)
第 1 档	0.546 9	0.576 9	0.376 9	0.576 9	0.376 9
第 2 档	0.596 9	0.626 9	0.426 9	0.626 9	0.396 9
第 3 档	0.846 9	0.876 9	0.676 9	0.876 9	0.646 9

注:非采暖季为峰时段 08:00—22:00,谷时段 22:00—次日 08:00;采暖季为峰时段 08:00—20:00,谷时段 20:00—次日 08:00。

### 2.3.4 家用电器蓄能

除了蓄能水箱可实现电能转移,调整部分家用电器中的用电习惯也可实现电能转移,增加光伏电消纳和蓄能。户用光伏发电量受季节、光照、温度影响,计算全年不同季节白天的平均光伏发电量、热泵耗电量、光伏可使用电量,结果如图 11 所示。

图 11 中 0~24 h 表示供冷季,24~48 h 表示过渡季,48~72 h 表示供暖季。光伏可使用电量表示光伏发电量在满足空气源热泵消耗后剩余的电量。由图 11 可知,供冷季平均每小时光伏可使用电量大于过渡季和供暖季,供冷季光伏发电量完全可满足空气源热泵所需,而供暖季的光伏发电量不

足。光伏可使用电量大于 0 的时间段为:供冷季 05:00—16:00,过渡季 06:00—16:00,供暖季 10:00—16:00。

综上所述,晴天时将可控型电器(如洗衣机、扫地机等)集中在 10:00—16:00 使用;具有储能性能的电器(如电动自行车、手机充电宝、电动汽车等)控制在光伏可使用电量更高的 11:00—14:00 使用。

## 3 系统经济性分析

### 3.1 系统能耗

选取济南农村地区建筑面积为 105.6 m<sup>2</sup> 的典型民宅安装该系统<sup>[24]</sup>。当家用电器为电冰箱、电视、电饭煲、抽油烟机、洗衣机、电脑、充电器和照明灯时,在设定的每日开启时间条件下全天耗电量为 5.79 kW·h,全年耗电共计 1 836.9 kW·h。

经模拟计算可知,该系统光伏发电量 8 148 kW·h,家庭总耗电量为 5 464 kW·h。其中供暖季总耗电量为 2 664.9 kW·h,制冷季总耗电量为 1 743.5 kW·h,过渡季耗电量 1 055.7 kW·h。全年需消耗 2 221 kW·h 电网波谷电,但有 4 905 kW·h 光伏电量进入国家电网。

采用该系统全年可盈利 3 201.8 元,全年可减少 1.512 t 耗煤,减少 CO<sub>2</sub> 排放量 9.52 t。

### 3.2 系统收益

为了解该系统在全生命周期内的性能效果,将该系统与其他采暖制冷方案进行对比,如表 5 所示。根据市场调研的设备和能源价格,计算得到不同方案的初投资和运行费用,如表 6 所示。

由表 6 可知,方案 1 的初投资最低,方案 2 的运行费用最高,方案 4 和方案 5 的初投资因光伏系统的

表5 供暖供冷方案

Tab.5 Heating and cooling plans

方案	冬季供暖方式	夏季供冷方式	有无光伏系统	有无蓄能水箱
方案1	散煤+散热器供暖	空调供冷	无	无
方案2	燃气+散热器供暖	空调供冷	无	无
方案3	空气源热泵+地板辐射供暖	空气源热泵+风机盘管供冷	无	无
方案4	空气源热泵+地板辐射供暖	空气源热泵+风机盘管供冷	有	无
方案5	空气源热泵+地板辐射供暖	空气源热泵+风机盘管供冷	有	有

表6 不同方案初投资和运行费用对比

Tab.6 Comparison of initial investment and operating cost  
元/m<sup>2</sup>

供能方案	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
初投资	242.18	521.93	335.56	1 135.21	1 177.43
供暖季	27.78	52.43	33.66	22.49	11.66
供冷季	16.58	16.58	12.60	5.57	3.87
总运行费	44.36	69.01	46.26	28.06	15.53

支出,相比方案3大幅提高。方案5因增设蓄能水箱,初投资最高,但运行费用最低。

方案1虽然初投资最低,但燃煤供暖不仅碳排放高,污染严重,还存在安全隐患。随着国家“煤改气”“煤改电”环保政策的推广,农村采用燃煤供暖的比例已大幅下降<sup>[9]</sup>,部分城市已实现农村“无煤化”供暖。此外供暖运行费随散煤价格波动,有上涨的不确定风险。方案4和方案5因配备光伏系统有额外的余电并网收益,长期经济效益显著。以空气源热泵使用年限15a为生命周期,计算不同方案的系统收益,如图12所示。

图12中各方案均采用如下一次函数表示:

$$y = kx + b \quad (1)$$

式中: $k$ 为各方案年运行费用,元; $b$ 为方案中涉及的设备投资费用,元。

方案1和方案5在第8年额外增加燃煤锅炉和蓄能水箱更换费用。当 $y=0$ 时表示售电收益已与初始投资持平。由图12可知,未安装光伏系统的方案初投资和运行费均为家庭的净支出,均随着使用年限的增加而增加。其中方案3利用空气源热泵解决全年供能问题,在其全生命周期内具有显著优势。而安装光伏系统后,因为有额外的余电并网收益,折合到运行费用 $k$ 中,曲线斜率为正。随着光伏组件输出功

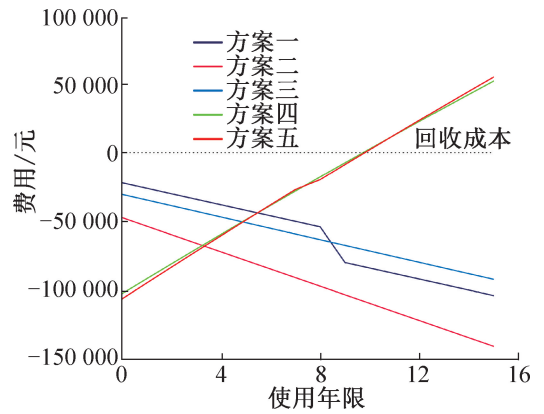


图12 不同方案的系统收益

Fig.12 System benefits for different plans

率的衰减,系统年发电量呈递减趋势。按照PV<sub>syst</sub>模拟的光伏年均发电量,计算得到方案4和方案5在系统运行9~10a开始盈利。

由图12还可知,6a后方案4和方案5的费用开始高于初投资最低的方案1,即短期(6a内)看,燃煤采暖方式总成本更低,但全生命周期内采用光伏系统的方案总成本更低,可通过售电回本乃至盈利。方案5在15a内收益最高,为52 740元,平均年收益3 516元。虽然与方案4相比添置蓄能水箱增加了初投资,但按照表4第1档电价计算供暖季电费比方案4减少974.37元,供冷季电费减少153.87元。表明蓄能水箱实现部分光伏电转移,增加家庭对光伏电的消纳从而减少对国家电网电的消耗,降低家庭支出。在系统运行的第6.92年,方案5的系统收益开始高于方案4。但在第8年因更换蓄能水箱系统收益又低于方案4,第10.73年重新升至最高。

### 3.3 耗能量对比

根据折合单位面积供能所需标煤量对比这5种方案的耗能量。已知电力的能源标准参考系数为0.122 9 kgce/(kW·h)<sup>[25]</sup>,假设电在输送过程中的损失为5%,天然气折算标煤系数为1.214 3 kgce/m<sup>3</sup>,换算成标煤的单位面积耗煤量为16.32 kgce/m<sup>2</sup>。计算整理得到不同方案的折合耗标煤量如表7所示。

表7 不同方案折合耗标煤量

Tab.7 Equivalent consumption of standard coal for different plans

	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
季节					
供暖季	16.019	16.32	7.89	5.59	3.81
供冷季	5.1	5.1	3.18	1.61	1.12
总和	21.119	21.42	11.07	7.2	4.93

由表7可知,方案2的耗标煤量最高,其次是方

案1,方案5的耗标煤量最低,且远小于其他方案。方案5耗标煤量为 $4.93\text{ kgce/m}^2$ ,与方案4相差 $2.27\text{ kgce/m}^2$ 的耗标煤量证明了蓄能水箱的节能效果(减少46%耗标煤量)。因此,采用光伏+空气源热泵+蓄能水箱供冷供暖时能源消耗量最少,能源利用效率最高,可以大幅减少生命周期内建筑碳排放和能源成本。

## 4 结论

本文以山东省某农村民宅为研究对象,针对所提出的满足家庭用电、冬季供暖、夏季制冷、全年生活用热水供应需求的户用光伏智能用电系统,对其光伏+空气源热泵+地暖+风机盘管+蓄能水箱的方案进行TRNSYS仿真模拟。结合当地当时的电价优化系统蓄能运行方案,并对系统进行全生命经济性分析和对比,得到结论如下:

1)供暖季时,系统光伏发电总量大于空气源热泵耗电量,但光伏系统出力时间与热泵工作时间不匹配。供冷季时,系统光伏平均逐时发电量大于热泵平均逐时耗电量。该户用光伏智能用电系统在保证冬夏季室内温度的同时,每年还可获得超过3 000元的光伏电上网盈利。

2)空气源热泵在05:00—17:00运行时,供暖季基本能满足室内供暖需求,而供冷季有27.3%的供冷时间不满足供冷需求。完全满足供暖供冷需求的最优运行方案为:空气源热泵在冬季09:00—16:00、22:00—05:00工作,夏季07:00—18:00、22:00—05:00工作。可控型电器在10:00—16:00使用,有储能型电器在11:00—14:00使用,可进一步消储光伏电。

3)采用光伏+空气源热泵+地暖+风机盘管+蓄能水箱的方式,在全生命周期内收益最高,耗标煤量为 $4.93\text{ kgce/m}^2$ ,与无蓄能水箱的方案相比减少46%耗标煤量,蓄能水箱的节能效果显著。

在本文模拟中,家庭冬季供暖和夏季制冷设备均设置为24 h工作,但实际生活中可能夏天夜间开窗通风即可满足室内温度要求,无需制冷。此情况可进一步降低系统能耗,提高家庭收益。随着目前新一轮峰谷分时电价政策大调整,该系统的蓄能运行需要结合当地当时的电价进行相应调整,以达到最大化消纳光伏电和使家庭经济效益最高。

### 参考文献

[1] 关于公布整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点名单的通知[EB/OL]. (2021-09-08)[2024-12-15]. [https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c\\_1310186582.htm](https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c_1310186582.htm).

htm. (Notice on publishing the pilot list of distributed photovoltaic development on roofs in entire counties (cities, districts) [EB/OL]. (2021-09-08)[2024-12-15]. [https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c\\_1310186582.htm](https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c_1310186582.htm).)

[2] 加快农村能源转型发展助力乡村振兴的实施意见[EB/OL]. (2021-12-29)[2024-12-15]. [https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/29/c\\_1310411188.htm](https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/29/c_1310411188.htm). (Implementation opinions on accelerating the transformation and development of rural energy and supporting rural revitalization [EB/OL]. (2021-12-29)[2024-12-15]. [https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/29/c\\_1310411188.htm](https://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/29/c_1310411188.htm).)

[3] 2023年能源工作指导意见[EB/OL]. (2023-04-06)[2024-12-15]. [https://zfxgk.nea.gov.cn/2023-04/06/c\\_1310710616.htm](https://zfxgk.nea.gov.cn/2023-04/06/c_1310710616.htm). (Guiding opinions on energy work in 2023 [EB/OL]. (2023-04-06)[2024-12-15]. [https://zfxgk.nea.gov.cn/2023-04/06/c\\_1310710616.htm](https://zfxgk.nea.gov.cn/2023-04/06/c_1310710616.htm).)

[4] 关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见[EB/OL]. (2024-10-30)[2024-12-15]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfl/tz/202410/t20241030\\_1394119.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfl/tz/202410/t20241030_1394119.html). (Guiding opinions on vigorously implementing renewable energy substitution action[EB/OL]. (2024-10-30)[2024-12-15]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfl/tz/202410/t20241030\\_1394119.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfl/tz/202410/t20241030_1394119.html).)

[5] 董梓童. 分布式光伏发展势头猛后劲足[N]. 中国能源报, 2024-12-23(3). (DONG Zitong. The development momentum of distributed photovoltaics is strong and promising [N]. China Energy News, 2024-12-23(3).)

[6] 钱平凡. 探索整县推进屋顶分布式光伏开发试点模式[N]. 中国经济时报, 2021-10-19(4). (QIAN Pingfan. Exploring the pilot model of promoting distributed photovoltaic development on rooftops throughout the county [N]. China Economic Times, 2021-10-19(4).)

[7] 林春挺. 国家能源局:我国户用光伏装机突破1亿千瓦[N]. 第一财经日报, 2023-11-15(A02). (LIN Chunting. National energy administration: China's household photovoltaic installed capacity exceeds 100 million kilowatts [N]. First Financial Daily, 2023-11-15(A02).)

[8] 徐振红, 李星宇, 王鸿宇, 等. 山东地区农村既有居住建筑节能改造调查研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(6): 126-131. (XU Zhenhong, LI Xingyu, WANG Hongyu, et al. Investigation and study on energy conservation retrofitting of rural existing residential buildings in Shandong [J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(6): 126-131.)

[9] 徐振红, 刘俊红, 王好召, 等. 山东农村居住建筑现状

- 以及节能改造意愿调研[J]. 煤气与热力, 2024, 44(2): 21-25. (XU Zhenhong, LIU Junhong, WANG Haozhao, et al. Investigation on current situation of rural residential buildings and willingness of energy saving renovation in Shandong Province[J]. Gas & Heat, 2024, 44(2): 21-25.)
- [10] LI Wenjie, ZHU Jiaolan, LI Yongchang, et al. Determinants of solar photovoltaic adoption intention among households: a meta-analysis[J]. Sustainability, 2024, 16(18): 8204.
- [11] 袁静, 王选, 马骊, 等. 承德地区农宅光伏-空气源热泵联合供暖技术研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(8): 241-245. (YUAN Jing, WANG Xuan, MA Li, et al. Study on the combined heating technology using photovoltaic systems and air source heat pumps for rural houses in Chengde city[J]. Building Science, 2023, 39(8): 241-245.)
- [12] 彭胜男, 郭健翔, 马晓丰. 适用于北方农村独立民居的光伏-空气源热泵联合供热系统[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(6): 103-109. (PENG Shengnan, GUO Jianxiang, MA Xiaofeng. Combined heating system of photovoltaic-air source heat pump for independent rural houses in the north[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2019, 40(6): 103-109.)
- [13] WANG Weijun, KANG Keyi. Research on energy storage capacity optimization of rural household photovoltaic system considering energy storage sharing [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2024, 31(34): 47084-47100.
- [14] 汤梓涵, 王帅杰, 鞠振河, 等. 光伏/光热耦合空气源热泵系统性能优化[J]. 综合智慧能源, 2024, 46(4): 34-41. (TANG Zihan, WANG Shuaijie, JU Zhenhe, et al. Performance optimization of photovoltaic/thermal systems coupled with air source heat pumps[J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(4): 34-41.)
- [15] 叶爽, 张昕宇, 俞英鹤, 等. 太阳能光热光伏耦合空气源热泵系统清洁取暖应用减碳性能研究[J]. 建筑科学, 2024, 40(6): 10-16. (YE Shuang, ZHANG Xinyu, YU Yinghe, et al. Study on carbon reduction performance of solar thermal photovoltaic coupled air source heat pump system in clean heating[J]. Building Science, 2024, 40(6): 10-16.)
- [16] 梁安琪, 曾爽, 任佳航, 等. 基于博弈优化算法的综合电热协同网络中热泵系统的智能化运行动态特性研究[J]. 制冷学报, 2024, 45(2): 109-118. (LIANG Anqi, ZENG Shuang, REN Jiahang, et al. Intelligent operation dynamic characteristics of heat pump system in integrated electric-thermal cooperative grid based on game optimization algorithm[J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(2): 109-118.)
- [17] 张群力, 张金亮, 刘一墨, 等. 市电、光伏互补相变蓄能电供暖系统柔性负荷调节能力分析[J]. 可再生能源, 2024, 42(9): 1179-1188. (ZHANG Qunli, ZHANG Jinliang, LIU Yimo, et al. Analysis of flexible load regulation capability in electric heating system with phase-change for energy storage using photovoltaic and grid power [J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(9): 1179-1188.)
- [18] 孙建波, 王海鸣, 曾伟明, 等. 分布式户用光伏与冰蓄冷空调协调控制研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(4): 68-73. (SUN Jianbo, WANG Haiming, ZENG Weiming, et al. Research on cooperative control of distributed household photovoltaics and ice storage air conditioning system [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2018, 40(4): 68-73.)
- [19] 张睿超, 王登甲, 刘艳峰, 等. 青藏高原离网光伏供暖系统容量配置优化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(6): 828-834. (ZHANG Ruichao, WANG Dengjia, LIU Yanfeng, et al. The system form and case analysis of off-grid photovoltaic heating in Tibet Plateau [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(6): 828-834.)
- [20] 孙楠. 农村户用光伏系统的蓄能策略及运行方案研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023. (SUN Nan. Study on energy storage strategy and operation scheme of rural household photovoltaic system [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023.)
- [21] 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [22] 田玲玲. 低温空气源热泵蓄热供暖系统运行调控策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022. (TIAN Lingling. Study on operation control strategy of low temperature air source heat pump heat storage heating system [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022.)
- [23] 戴春祥. 空气源热泵双末端系统热环境模拟及实验研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2021. (DAI Chunxiang. Simulation and experimental study on thermal environment of double-terminal system of air source heat pump [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2021.)

(下转第83页)

- 2019, 100: 156-166.
- [10] FREDERICK H, ROHLES J R. Temperature & temperment - a psychologist looks at comfort [J]. ASHRAE Journal, 2007, 49(2):14-22.
- [11] FANGER P O. Assessment of man's thermal comfort in practice[J]. British Journal of Industrial Medicine, 1973, 30(4): 313-324.
- [12] Ergonomics of the thermal environment - analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort: ISO 7730-1994 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1994.
- [13] INGERSOLL J G, KALMAN T G, MAXWELL L M, et al. Automobile passenger compartment thermal comfort model-part II: human thermal comfort calculation [J]. SAE transactions, 1992, 101:243-253.
- [14] MOON J H, LEE J W, JEONG C H, et al. Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 107: 77-88.
- [15] KARTHICK L, SHANMUGASUNDARAM A, JAGADISH C A, et al. Numerical analysis of Modified tooth in Spur Gear for increasing the performance using fool proofing technology[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 4: 285.
- [16] BAYRAKTAR I. Computational simulation methods for vehicle thermal management [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 36: 325-329.
- [17] LU Pengyu, GAO Qing, WANG Yan. The simulation methods based on 1D/3D collaborative computing for the vehicle integrated thermal management [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 104: 42-53.
- [18] FANG Jianmin, YIN Xiang, WANG Anci, et al. Cooling performance enhancement for the automobile transcritical CO<sub>2</sub> air conditioning system with various internal heat exchanger effectiveness[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 196: 117274.
- [19] 孙一宁. 车辆HVAC热环境舒适性评价及其分析方法[D]. 长春: 吉林大学, 2012. (SUN Yining. Evaluation and analysis of thermal comfort on vehicle HVAC [D]. Changchun: Jilin University, 2012.)
- [20] ENESCU D. A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 1353-1379.
- [21] CRAWSHAW L I, NADEL E R, STOLWIJK J A, et al. Effect of local cooling on sweating rate and cold sensation [J]. Pflugers Archiv: European Journal of Physiology, 1975, 354(1): 19-27.

#### 通信作者简介

殷翔,男,副教授,西安交通大学能源与动力工程学院,15109214408,E-mail: xiangyin@mail.xjtu.edu.cn。研究方向:跨临界CO<sub>2</sub>制冷制热技术、车辆热泵空调及热管理技术。

#### About the corresponding author

Yin Xiang, male, associate professor, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 86-15109214408, E-mail: xiangyin@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: transcritical CO<sub>2</sub> refrigeration technology, vehicle heat pump air conditioning and thermal management technology.

(上接第56页)

- [24] 陈斯. 农村户用分布式太阳能光伏智能用电系统的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2021. (CHEN Si. Research on distributed solar photovoltaic intelligent electricity system for rural households [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2021).
- [25] 综合能耗计算通则: GB/T 2589-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. (General rules for calculation of the comprehensive energy consumption: GB/T 2589-2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.)

#### 通信作者简介

刘俊红,女,副教授,山东建筑大学热能工程学院,13791062800,E-mail: ljhruby@sdjzu.edu.cn。研究方向:制冷空调,建筑节能。

#### About the corresponding author

Liu Junhong, female, associate professor, School of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University, 86-13791062800,E-mail: ljhruby@sdjzu.edu.cn. Research fields: refrigeration and air conditioning, building energy-saving technology.