

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-10

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260819001

光伏场弃电多模式电热转换埋地水体蓄热供暖性能

贾尚东^{1,2} 王登甲^{1,2} 陈耀文^{1,2} 张睿超^{1,2} 默哲龙^{1,2} 高萌^{1,2} 袁喜鹏³ 帅海乐⁴

(1 绿色建筑全国重点实验室 西安 710055; 2 西安建筑科技大学建筑设备科学与工程学院 西安 710055;

3 西藏自治区能源研究示范中心 拉萨 850015; 4 贵州中建建筑科研设计院有限公司 贵阳 550006)

摘要 基于埋地水体储热的光伏弃电热转换蓄热供暖技术是促进新能源消纳与清洁供暖协同发展的潜在路径。本文基于 TRNSYS-MATLAB联合仿真平台,构建电极锅炉(S1)、空气源热泵(S2)及联合系统(S3)3种光伏弃电热转换PTES供暖系统,分析系统能流、蓄放热边界、水体热分层、热损失及蓄热效率。结果表明:3种系统供暖贡献差异主要体现在PTES放热及辅助热源补热环节,弃电供热保证率分别为82.9%、80.7%和84.2%;定温变流量控制下,弃电波动主要引起循环流量变化,多模式设备切换还会造成蓄热温度波动;供暖期平均MIX数分别为0.276、0.273和0.298,水体保持较明显的热分层;运行初期侧壁热损失占比较高,随土壤热积累逐步转为顶部散热主导;第1运行年蓄热效率分别为91.49%、88.11%和88.97%。研究表明,PTES能够适应光伏弃电热转换形成的动态运行边界,并有效参与弃电消纳与建筑供暖,但容量设计仍需进一步考虑逐时弃电一负荷匹配及实际运行约束。

关键词 光伏弃电;埋地水体蓄热;热分层;热损失;蓄热效率

中图分类号: TK513.5; TU832

文献标识码: A

Heating Performance of Pit Thermal Energy Storage with Multimode Power-to-Heat Conversion Using Curtailed PV Power

Jia Shangdong^{1,2} Wang Dengjia^{1,2} Chen Yaowen^{1,2} Zhang Ruichao^{1,2} Mo Zhelong^{1,2}
Gao Meng^{1,2} Yuan Xipeng³ Haile Shuai⁴

(1. State Key Laboratory of Green Building, Xi'an 710055, China; 2. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Xizang Autonomous Region Energy Research Demonstration Center, Lhasa 850015, China; 4. Guizhou Construction Science Research and Design Institute Co., Ltd. of CSCEC, Guiyang 550006, China)

Abstract

Objective Power-to-heat conversion coupled with pit thermal energy storage (PTES) is a potential pathway toward utilizing curtailed photovoltaic (PV) electricity for clean heating. This study evaluated the performance of a PTES system under different power-to-heat configurations driven by curtailed PV power.

Methods A TRNSYS-MATLAB coupled model was developed for three systems: an electrode boiler system (S1), an air-source heat pump system (S2), and a combined system (S3). Two consecutive years of operation were simulated under variable-flow control, while maintaining a constant temperature. The system energy flows, charging/discharging boundaries, water thermal stratification, heat losses, and thermal storage efficiency were analyzed.

Results and Discussion The differences in heating contribution among the three systems mainly stemmed from the PTES discharge and auxiliary heat supply, with the curtailed-PV heating guarantee fractions reaching 82.9%, 80.7%, and 84.2% in S1, S2, and S3, respectively. Fluctuations in the curtailed PV power were mainly reflected by circulation-flow variations, whereas equipment switching in

收稿日期:2026-08-19;修回日期:2026-09-02;录用日期:2026-09-07 责任编辑:王亚薇

基金项目:国家自然科学基金(52525801, U24A20161)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52525801 & No. U24A20161).)



移动阅读

S3 also caused fluctuations in the charging temperature. The mean MIX numbers during the heating period were 0.276, 0.273, and 0.298 for S1, S2, and S3, respectively, revealing pronounced thermal stratification under the investigated conditions. The sidewall heat loss accounted for a relatively large proportion during the initial operating period, and the top-cover heat loss gradually became dominant as heat accumulated in the surrounding soil. The first-year thermal storage efficiencies were 91.49%, 88.11%, and 88.97% for S1, S2, and S3, respectively.

Conclusions PTES can accommodate the dynamic charging boundaries associated with curtailed-PV power-to-heat conversion and thus effectively contribute to both PV-curtailed utilization and building heating. However, the discrepancy between the steady-state capacity design and the dynamic operating performance indicates that future system sizing should account for hourly curtailed-PV - load matching and practical operating constraints.

Keywords curtailed photovoltaic electricity; pit thermal energy storage; thermal stratification; heat loss; thermal storage efficiency

青藏高原太阳能资源丰富,是我国大型光伏基地建设的重要区域。随着光伏装机规模快速增长,新能源出力与区域负荷、外送能力及电力系统调节能力之间的矛盾日益突出。据电力行业规划研究与监测预警中心统计,2025年全国光伏发电利用率为94.8%,青海和西藏分别降至83.4%和64.9%,明显低于全国平均水平,表明高原地区光伏消纳矛盾进一步加剧^[1]。电网扩容和跨区输电工程建设周期较长,现阶段仍需发展可调节负荷,促进新能源就近消纳。《关于有序推动绿电直连发展有关事项的通知》等国家政策出台,进一步为新能源与终端负荷直接耦合提供了政策依据^[2]。同时,青藏高原冬季寒冷、供暖期长,建筑清洁供暖需求突出^[3-4]。因此,将潜在的弃光转换为热量用于城镇供暖,有望协同解决光伏消纳和清洁供暖问题。

考虑到光伏弃电与冬季供暖需求通常存在明显的时序错配问题,需要采用蓄热装置实现弃电出力与末端负荷解耦。埋地水体蓄热技术(pit thermal energy storage, PTES)具有储热介质廉价、充放热功率大、运行温度范围宽和规模效应显著等特点,是大规模显热储存的重要形式^[5-6]。德国、丹麦及中国的大型太阳能区域供热工程验证了PTES的工程可行性^[7-9]。

当前针对PTES的研究主要集中于太阳能集中供热系统,太阳能集热驱动下PTES的动态蓄热响应、热分层演化及热损失特性已开展了较为系统的研究^[10-16]。然而,光伏弃电电热转换蓄热系统与传统太阳能集热蓄热系统在热源特性和蓄热边界方面存在明显差异。光伏弃电同时受到光伏出力波动和电网消纳约束影响,具有更强的随机性、间歇性和波动性,使电热转换设备输入PTES的热流边界呈现更显著的动态变化。此外,不同电热转换方式将形成不同温度等级和流量响应特征,可能进一步影响水体热分层、热损失及蓄热效率。因此,传统太阳能PTES

的运行规律是否适用于光伏弃电驱动蓄热供暖系统,仍需进一步研究。

基于此,本文采用数值模拟方法,构建光伏弃电驱动PTES蓄热供暖系统模型,针对电极锅炉、空气源热泵及联合电热转换方式,分析不同蓄热边界下PTES的温度演化、热分层、热损失及蓄热效率特性,评价PTES技术在光伏弃电蓄热供暖系统中的适用性,为高比例新能源消纳与清洁供暖系统设计提供理论依据。

1 研究方法

1.1 系统组成及运行原理

光伏弃电蓄热供暖系统的能流路径如图1所示。光伏发电优先并网消纳,受电网负荷、电源调节能力及输电能力限制所产生的弃电输入电热转换设备,并转化为热能。电热转换产生的热量根据供需关系分配至直接供热和蓄热水体:非供暖期主要用于水体储热,供暖期优先满足建筑热负荷,剩余热量储存于水体;当电热转换能力不足时,由蓄热水体释放热量补充供热。通过电热转换与蓄热调节,系统实现光伏弃电与建筑供暖需求之间的时序匹配。

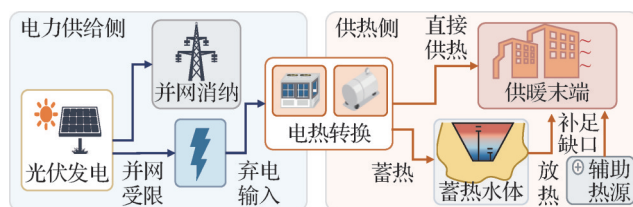


图1 光伏弃电电热转换蓄热供暖系统能流

Fig.1 Energy flow of the curtailed photovoltaic power-to-heat system with thermal storage

基于上述系统能流路径,建立光伏弃电电热转换埋地水体蓄热供暖系统,如图2所示。系统由电热转换单元、换热装置、埋地蓄热水体、供暖末端及辅助热源组成。其中电热转换单元本文采用单独电极锅

炉、单独空气源热泵及“电极锅炉+空气源热泵”组合式机组3种电热转换形式以形成不同特征的蓄热边界。

系统运行控制流程如图3所示,系统根据弃电功率、供暖负荷及蓄热水体温度进行动态调节。非供暖期优先利用弃电蓄热,联合系统根据水体温度在空气源热泵与电极锅炉间切换,并依据蓄热温度选择中部或高位布水器。供暖期优先由电热转换设备供热,余热蓄入PTES,供热不足时由PTES及辅助热源补充。系统采用定温变流量控制,蓄热流量由瞬时蓄热功率和进出口温差确定;当蓄热功率快速变

化或温差骤减时,循环流量可能出现较大波动。末端设计供回水温度为55/40℃。

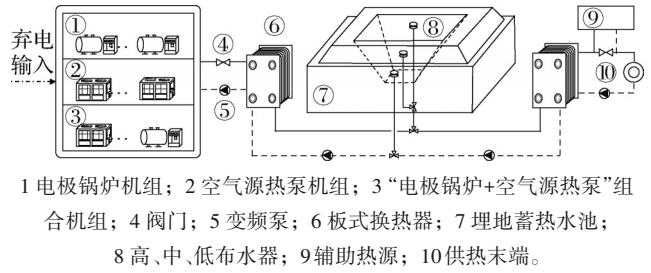


图2 光伏弃电电热转换PTES供暖系统原理

Fig.2 Principle of the curtailed photovoltaic power-to-heat PTES heating system

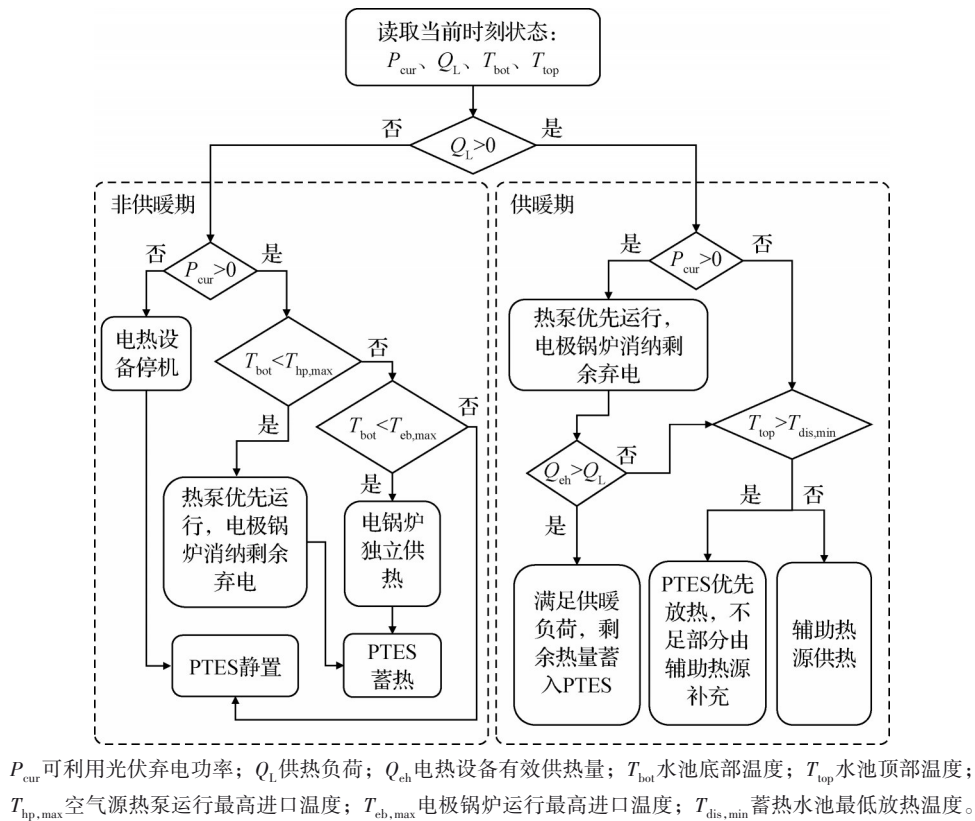


图3 系统运行控制流程

Fig.3 System operation control flowchart

1.2 数值模型

本文基于TRNSYS平台建立系统瞬态仿真模型。如图4所示,模型主要由数据输入、电热转换、埋地水体蓄热、水力输配、末端供热及运行控制等单元组成。其中,气象数据读取、负荷输入、板式换热器、分流与合流装置、辅助热源及结果输出采用TRNSYS标准组件。电热转换组件、PTES组件及运行控制模型采用MATLAB建模,并通过Type 155嵌入TRNSYS,实现2个平台间的数据交互^[17-18]。模拟时间步长为5 min。

空气源热泵采用基于机组性能数据表的准稳态

模型,性能数据覆盖室外空气温度-25~20℃和水侧入口温度10~55℃,制热量及输入功率修正系数采用二维线性插值获得;电极锅炉采用准稳态能量平衡模型,电热转换效率取0.98。PTES采用经验证的带围堰半埋式截棱锥传热模型^[19],水体和土壤初始温度分别设为40℃和10℃,相关模型物性参数与该文献一致。

1.3 主要评价指标

1.3.1 混合数(MIX)

MIX数用于定量表征水体内部热分层程度,其计

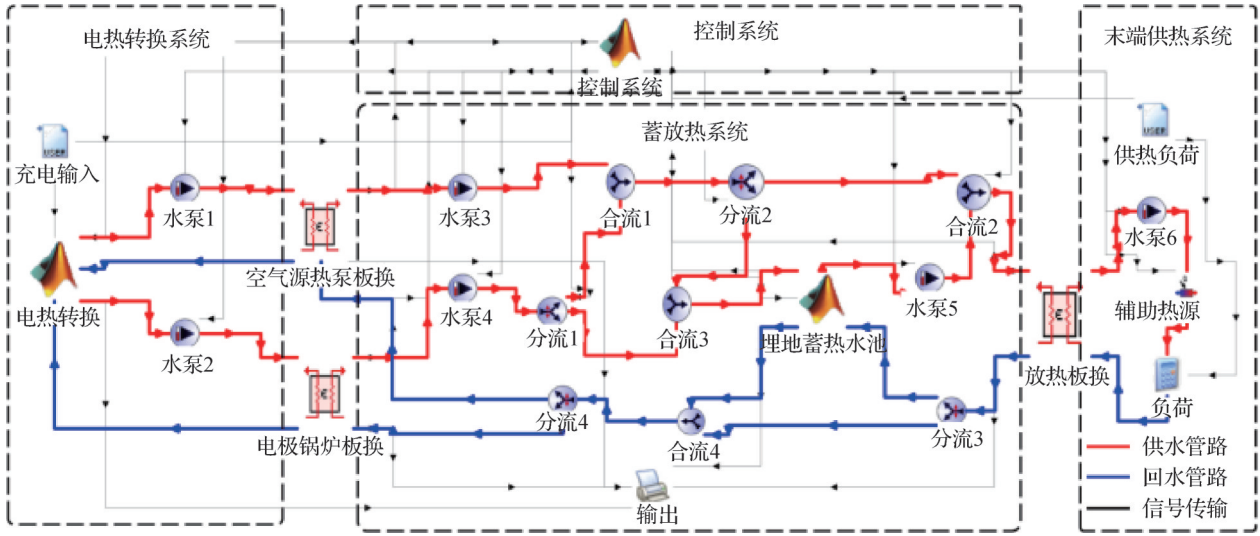


图4 TRNSYS系统仿真模型

Fig.4 TRNSYS simulation model of the system

算以水体垂向能量分布的一阶矩为基础。实际水体温度分布对应的能量矩按式(1)计算^[20]。

$$M(t) = \sum_{i=1}^N z_i \rho_i c_{p,i} V_i T_i(t) \quad (1)$$

式中: M 为水体的能量矩, $\text{J} \cdot \text{m}$; z_i 为第 i 个水体节点中心距水池底部的高度, m ; ρ_i 为第 i 个水体节点密度, kg/m^3 ; $c_{p,i}$ 为第 i 个水体节点比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; V_i 为第 i 个水体节点的体积, m^3 ; T_i 为第 i 个水体节点温度, $^\circ\text{C}$ 。

在水体总能量相同的条件下, 分别构造完全分层状态和完全混合状态。水体完全分层下的能量矩记为 M_{str} , 水体完全混合下的能量矩记为 M_{mix} , 实际水体热分层状态下的能量矩记为 M_{act} 。MIX 数按式(2)计算。

$$\text{MIX}(t) = \frac{M_{\text{str}}(t) - M_{\text{act}}(t)}{M_{\text{str}}(t) - M_{\text{mix}}(t)} \quad (2)$$

MIX 数的取值范围为 0~1, 其中 0 表示完全分层, 1 表示完全混合。MIX 数越小, 水体热分层程度越高。

1.3.2 蓄热效率

蓄热效率反映蓄热水体在统计周期内对输入热量的有效保存能力, 计算如式(3)所示^[12]。

$$\eta_{\text{st}} = \frac{E_{\text{dis}} + \Delta U}{E_{\text{cha}}} \quad (3)$$

ΔU 可通过式(4)计算。

$$\Delta U = E_{\text{cha}} - E_{\text{dis}} - E_{\text{loss}} \quad (4)$$

因此, 式(3)可表示为式(5)形式。

$$\eta_{\text{st}} = 1 - \frac{E_{\text{loss}}}{E_{\text{cha}}} \quad (5)$$

式中: η_{st} 为蓄热效率; E_{dis} 为统计期内水体累计放热量, J ; E_{cha} 为统计期内水体累计蓄热量, J ; ΔU 为统计期蓄热水体净储能变化, J ; E_{loss} 为蓄热水体热损失, J 。

1.3.3 弃电供热保证率

本文定义弃电供热保证率用于表征光伏弃电经电热转换后对建筑供暖负荷的实际保障程度, 计算方法如式(6)所示^[12]。

$$R_{\text{cur}} = \frac{E_{\text{dir}} + E_{\text{dis}}}{E_{\text{load}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: R_{cur} 为弃电供热保证率, %; E_{dir} 为供暖期弃电经电热转换后直接用于供暖的累计热量, J ; E_{load} 为供暖期总供热负荷, J 。

2 仿真案例

2.1 光伏弃电与供热负荷情况

选取我国西部高原地区某 30 MW_p 光伏电站为研究对象, 通过调研获取其典型年光伏出力、弃电及周边城镇供暖负荷数据。连续 2 年模拟均采用相同的典型年弃电、气象及供暖负荷时序边界, 以突出 PTES 及周围土壤热状态的跨年累积效应。如图 5 所示, 案例电站年理论发电量为 60 768 MW·h, 年弃电量为 12 472 MW·h, 弃电率为 20.5%; 供暖期为 10 月 15 日至次年 4 月 15 日, 年供暖耗热量为 8 431 MW·h, 平均热负荷约为 1.92 MW。

2.2 设备容量计算

系统设备容量计算主要针对电热转换设备额定功率和埋地蓄热水池蓄热容积。电热转换设备机组额定总电功率按最大可利用弃电功率确定。蓄热水体容积计算关键在于确定水体容积蓄热量。如图 6 所示, 根据供暖期系统理论产热能力, 水体容积蓄热量确定可按短期储热和跨季节储热 2 种方法确定。供暖期系统理论产热量按照式(7)计算。

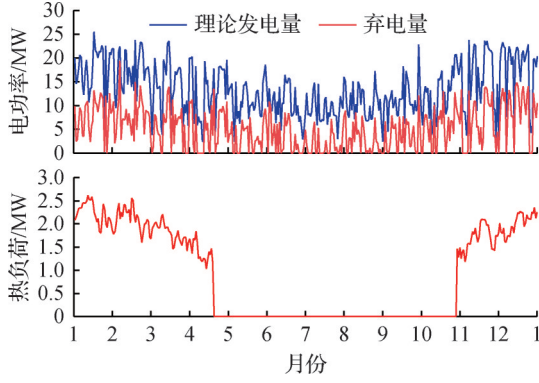


图5 光伏理论出力、弃电功率与供暖负荷时序

Fig.5 Time series of theoretical PV output, curtailed PV power, and heating load

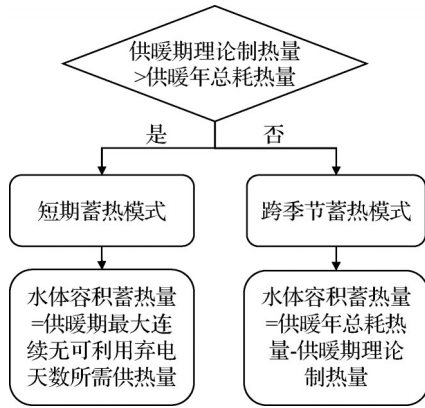


图6 蓄热模式及储热容量判定流程

Fig.6 Flowchart for determining thermal storage mode and capacity

$$E_{\text{heat}} = \sum_{t=1}^n \text{COP}_{\text{eq}} P_{\text{curt}}(t) \Delta t, t \in t_{\text{heat}} \quad (7)$$

式中: E_{heat} 为供暖期光伏弃电理论制热量, J; COP_{eq} 为电热转换单元的等效性能系数; P_{curt} 为供暖期可利用弃电出力, W; t_{heat} 表示供暖期时段。

COP_{eq} 按照式(8)估算。

$$\text{COP}_{\text{eq}} = \frac{P_{\text{eb}} \eta_{\text{eb}} + P_{\text{hp}} \text{COP}_{\text{hp}}}{P_{\text{eb}} + P_{\text{hp}}} \quad (8)$$

式中: P_{eb} 和 P_{hp} 分别为电极锅炉和空气源热泵的装机容量, W; η_{eb} 为电极锅炉电热转换效率; COP_{hp} 为空气源热泵性能系数。

短期蓄热模式和跨季节储热模式下的水体容积蓄热量分别按照式(9)和式(10)计算。

$$E_{\text{st}} = \bar{q}_{\text{load}} N_{\text{day}} \times 24 \times 3600 \quad (9)$$

$$E_{\text{st}} = \min(E_{\text{load}} - E_{\text{heat}}, E_{\text{sur}}) \quad (10)$$

式中: E_{st} 为水体容积蓄热量, J; $\bar{q}_{\text{load}}$ 为供暖期平均热负荷, W; N_{day} 为供暖期最大连续无可利用弃电天数。 E_{sur} 为非供暖期光伏弃电理论制热量, J。

E_{sur} 按照式(11)估算。

$$E_{\text{sur}} = \sum_{t=1}^n \text{COP}_{\text{eq}} P_{\text{curt}}(t) \Delta t, t \notin t_{\text{heat}} \quad (11)$$

蓄热水池有效容积按照式(12)计算。

$$V = \frac{E_{\text{st}}}{\rho c_p (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \eta_s} \quad (12)$$

式中: V 为蓄热水池有效容积, m^3 ; ρ 为水密度, kg/m^3 ; c_p 为水比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T_{max} 和 T_{min} 分别为蓄热水池设计最高和最低蓄热温度, $^\circ\text{C}$; η_s 为蓄热效率。

基于上述方法, 本文以弃电供热保证率 100% 为容量设计目标, 计算得到 3 种电热转换方式下的系统容量配置及水体结构尺寸, 如表 1 和表 2 所示。

表 1 3 种电热转换方式下的系统容量配置

Tab.1 System capacity configurations under three power-to-heat modes

系统类型	电极锅炉 电功率/MW	空气源热泵 电功率/MW	蓄热容积/ m^3	储热类型
S1	20	0	7 300	短期蓄热
S2	0	20	21 800	短期蓄热
S3	10	10	10 900	短期蓄热

表 2 3 种系统 PTES 结构尺寸

Tab.2 Structural dimensions of PTES in the three systems

类型	蓄热容积/ m^3	顶部边长/m	底部边长/m	水池高度/m
S1	7 300	45.8	12.8	8
S2	21 800	68.4	35.4	8
S3	10 900	52.7	19.7	8

3 结果

3.1 系统能流过程及光伏弃电供暖能效分析

图 7 所示为 3 种系统主要能流及关键节点累计能量及光伏弃电供热保证率。3 种系统直供量为 1.67~1.71 $\text{GW} \cdot \text{h}$, 差异较小, 供暖贡献差异主要来自 PTES 放热及辅助热源补热环节。S2 产热量和 PTES 蓄热量最高, 分别为 8.74 $\text{GW} \cdot \text{h}$ 和 7.00 $\text{GW} \cdot \text{h}$; 但其低温蓄热对应的水池规模较大, 累计热损失达到 0.83 $\text{GW} \cdot \text{h}$, 且受最低放热温度限制, 放热过程中水体顶部温度更易降至有效放热下限, 部分储热难以继续有效释放。因此, S2 累计放热量最低, 仅为 5.13 $\text{GW} \cdot \text{h}$, 辅助热源供热量最高, 达到 1.63 $\text{GW} \cdot \text{h}$, 弃电供热保证率为 80.7%。S1 采用高温蓄热, 有效储热温差较大, 累计放热量为 5.29 $\text{GW} \cdot \text{h}$, 辅助热源供热量为 1.45 $\text{GW} \cdot \text{h}$, 弃电供热保证率为 82.9%。S3 通过热泵与电极锅炉协同运行, 兼顾高效产热与高温蓄热, 其 PTES 累计放热量最高, 为 5.39 $\text{GW} \cdot \text{h}$, 辅

助热源供热量最低,为 1.34 GW·h,弃电供热保证率 达到 84.2%,表现出较好的供热性能。

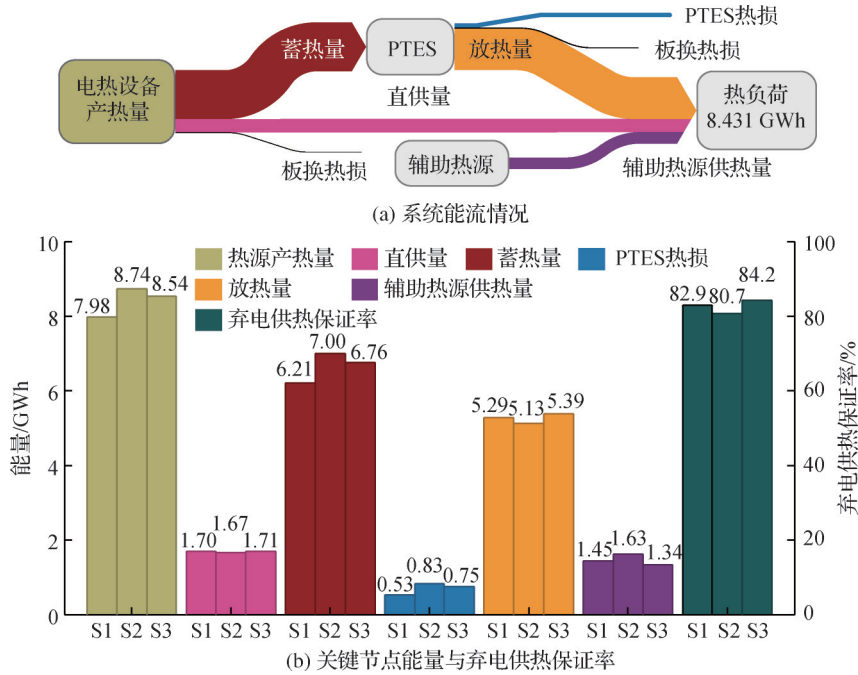


图 7 3 种系统首年能流及弃电供热保证率

Fig.7 First-year main energy flows and curtailed-PV heating guarantee rates of the three systems

3.2 蓄放热温度与流量边界特征

3 种系统蓄放热温度边界如图 8 所示,不同电热转换方式形成了显著差异的蓄热温度边界。统计期内, S1、S2、S3 蓄热供水日均温度分别为 86.35、54.47、71.98 °C,变化范围分别为 85.03~87.83、53.81~54.86、54.20~87.60 °C。其中, S1 和 S2 分别形成较稳定的高温和低温蓄热边界,温度波幅仅为 2.80 °C 和 1.05 °C; S3 受 2 类设备切换影响,温度波幅达到 33.40 °C,呈现明显的变温蓄热特征。典型日内, S3 蓄热供水温度在 11~12 h 由 57.26 °C 迅速升至 86.14 °C,进一步体现了联合系统蓄热边界的突变性。

3 种系统蓄放热流量边界如图 9 所示,蓄热流量均随弃电出现呈间歇性启停和脉冲式变化。S1、S2、S3 运行时段平均蓄热流量分别为 354、850、371 m³/h, S2 低温蓄热所需循环流量明显较大;典型日最大蓄热流量分别达到 352、1 221、1 782 m³/h,其中 S3 短时流量峰值最高,表明联合系统设备切换可产生较强的瞬态流量扰动。相比之下,放热过程主要受供暖负荷驱动,3 种系统运行时段平均放热流量分别为 47、128、54 m³/h,变化规律较为一致。

3.3 水体热分层演化特征

图 10(a)所示为 3 种系统连续 2 年水体竖向温度演化。S1 采用高温蓄热,顶部长期维持较高温度;S2

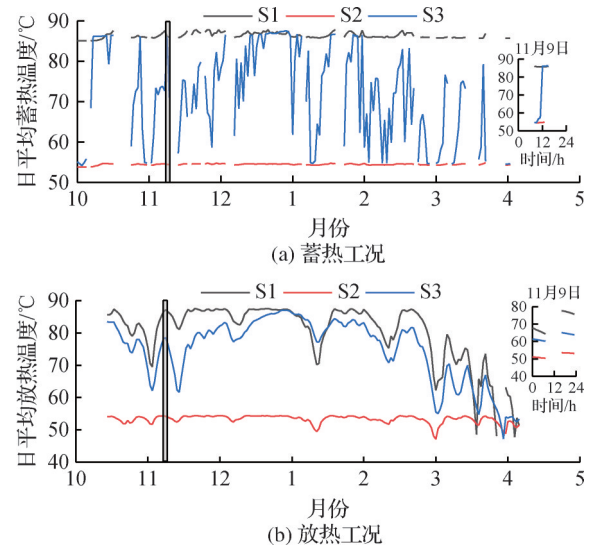


图 8 3 种系统蓄放热温度边界

Fig.8 Charging and discharging temperature boundaries of the three systems

蓄热温度较低,水体温升有限;S3 整体介于两者之间。

图 10(b)显示,放热阶段低温回水由底部进入,底部温度下降而顶部保持较高温度,热分层逐渐增强;蓄热阶段 3 种系统水温均上升。S1 和 S2 因蓄热温度较稳定,低温区域升温较快,垂向温度梯度有所减弱;S3 则随蓄热温度升高由中部布水切换至高位布水,各高度水体呈较同步升温特征。

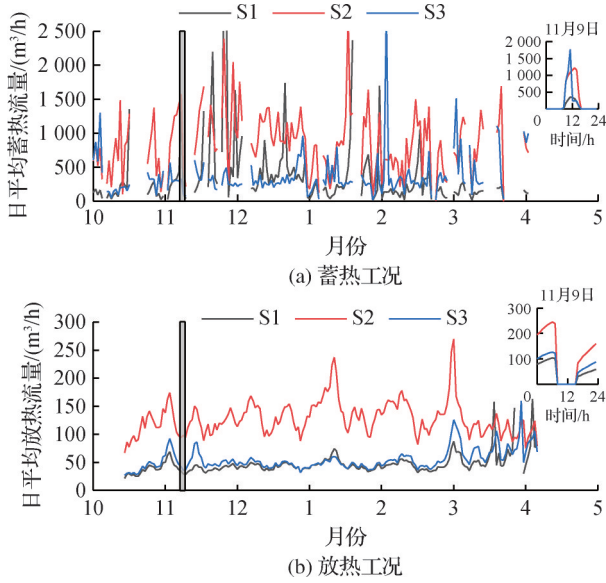


图9 3种系统蓄放热流量边界

Fig.9 Charging and discharging flow-rate boundaries of the three systems

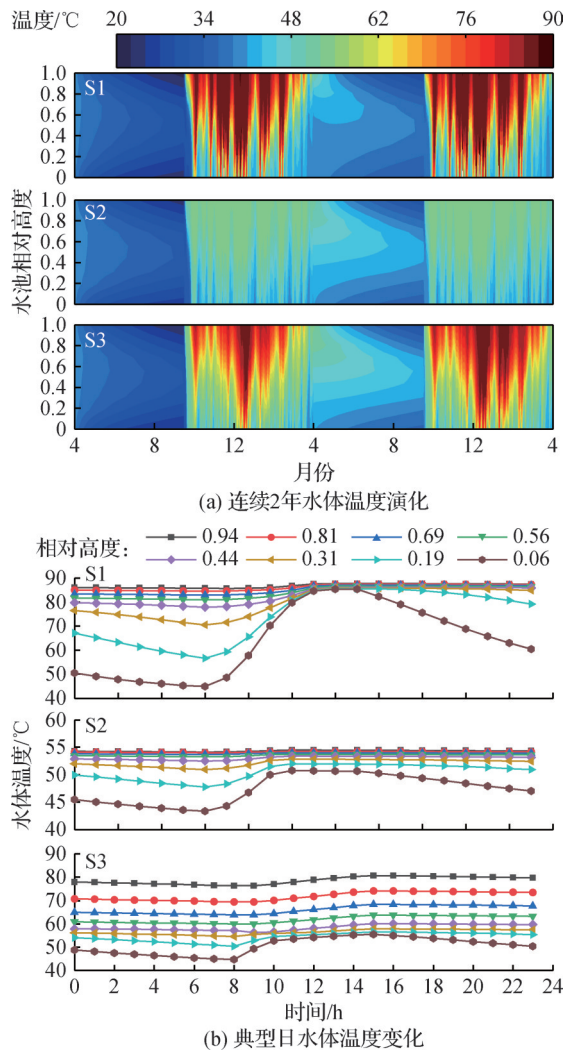


图10 3种系统水体垂向温度演化

Fig.10 Temporal evolution of vertical water temperature in the three systems

图11(a)所示为3种系统供暖期日平均MIX变化规律。供暖期内,S1、S2、S3平均MIX分别为0.276、0.273、0.298。3种系统之间差异较小,其中S1和S2略低于S3。图11(b)所示为第1运行年11月9日典型日MIX变化规律。该日S1、S2、S3平均MIX分别为0.418、0.334、0.306,变化范围分别为0.294~0.616、0.247~0.411、0.247~0.355。短期蓄热过程中,水体热分层状态呈现明显日内动态变化。蓄热阶段,S1和S2的MIX均升高,热分层程度降低,其中S1变化幅度最大。这主要由于蓄热过程中低温区域升温较快,导致水体垂向温度梯度减弱,温跃层结构受到削弱;相比之下,S3蓄热过程中MIX变化较小,热分层状态保持相对稳定。

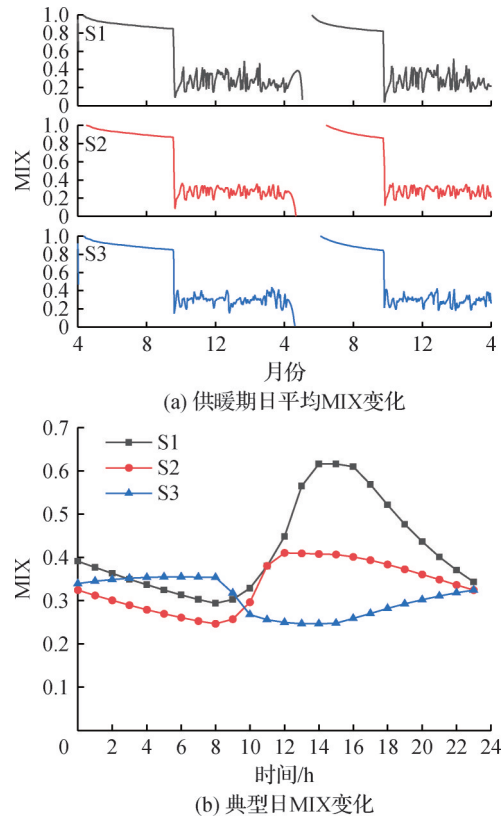


图11 3种系统水体MIX数变化

Fig.11 Variation in water MIX number of the three systems

3.4 蓄热水体热损失及蓄热效率

图12所示为3种系统单位面积热损失月变化,可知3种系统单位面积热损失均呈明显季节变化,冬季较高、夏季较低。第1运行年S1、S2、S3月单位面积总热损失峰值分别为17.83、9.75、16.24 kW·h/m²,其中S2最低,表明低温蓄热有助于减小传热温差和单位面积热损失。

图13所示为3种系统年累计单位面积热损失。S1、S2、S3第1运行年总表面单位面积热损失分别为

118.87、84.07、109.61 kW·h/m²,第2年分别降至104.80、73.60、104.02 kW·h/m²,降幅为11.8%、12.5%、5.1%。第2年顶部热损失有所增加,而侧壁和底部热损失明显降低,使总热损失整体下降,表明周围土壤热积累可减弱地下传热损失。

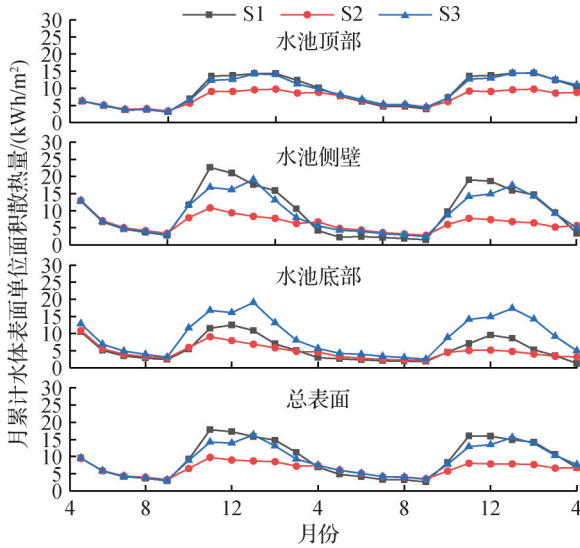


图12 3种系统单位面积热损失月变化

Fig.12 Monthly variation in heat loss per unit area of the three systems

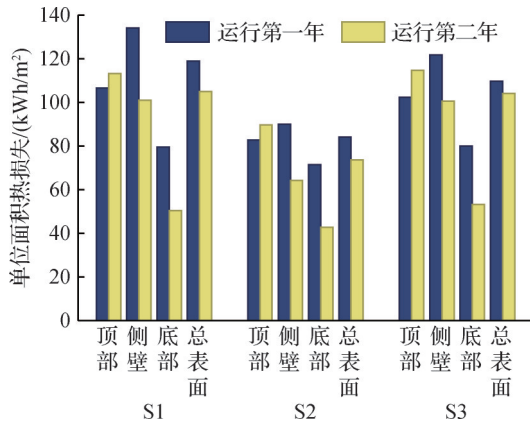


图13 3种系统年累计单位面积热损失

Fig.13 Annual heat loss per unit area of the three systems

3种系统各部位热损失占比及年蓄热效率如图14所示。第1年S1和S3以侧壁散热为主,占比分别为54.87%和50.53%,S2顶部占比最高,为47.28%;第2年3种系统均转为顶部散热占主导,占比分别提高至51.31%、58.50%和52.58%,侧壁占比相应降至46.86%、33.91%和43.93%。底部散热占比总体较低,但S2由于底部面积占总传热面积比例较大,其底部热损失占比达到11.09%和7.59%,明显高于S1和S3。

本文以每年4月16日至次年4月16日为1个统

计年度。S1、S2和S3第1运行年蓄热效率分别为91.49%、88.11%和88.97%;第2运行年随着周围土壤热积累,散热驱动力减弱,水体散热量减小,3种系统蓄热效率分别上升至92.09%、88.76%和90.53%。

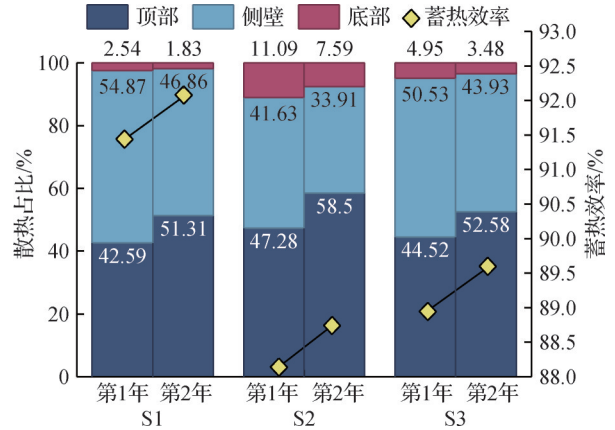


图14 3种系统各部位热损失占比及年蓄热效率

Fig.14 Heat-loss distribution by PTES surface and annual thermal storage efficiency of the three systems

4 讨论

本文系统容量虽按100%弃电供热保证率进行设计,但动态运行下S1、S2和S3实际保证率分别为82.9%、80.7%和84.2%,与设计目标存在一定偏差。其主要原因在于现有容量配置采用基于能量平衡的稳态计算,未充分考虑热泵COP、PTES蓄热效率及最低放热温度等运行参数的动态变化,导致部分理论可利用热量在实际运行中难以有效转化为供暖贡献。后续应结合逐时弃电—负荷匹配及系统动态运行约束,并兼顾经济性,建立面向弃电供热保证率的设备与PTES容量协同优化设计方法。

现有工程数据表明,太阳能PTES蓄热系统中水体平均MIX数约为0.34~0.74^[19,21],而本文3种系统供暖期平均MIX数为0.27~0.30,相较于已有传统太阳能PTES蓄热,本文工况下蓄热水体表现出相对较好的热分层保持能力。其主要原因在于电热转换设备能够形成相对稳定的蓄热温度边界,减弱蓄热入口温度波动引起的冷热掺混。

在定温变流量控制下,弃电功率变化主要转化为循环流量波动,使PTES呈现间歇启停和宽流量范围运行特征,对循环泵的动态调节能力及系统水力控制提出了较高要求。

与传统太阳能PTES长期运行以顶部散热为主不同^[22],光伏弃电驱动的动态蓄热模式下侧壁热损失占比明显提高。其主要原因在于频繁蓄放热及宽范

围流量调节使水体温度沿深度方向持续变化,高温区域向中下部扩展,增大了水体与侧壁土壤之间的有效传热面积和温差;同时,运行初期周围土壤温度较低,进一步强化了侧壁传热。较大的侧壁热损失不仅会增加系统总热损、降低蓄热效率,还可能加快中下部水体降温,对温跃层稳定性和有效储热量产生不利影响。因此,该类 PTES 设计除关注顶部保温外,还应关注地下水渗流等可能强化侧壁传热的地质因素。

此外,本文电热转换设备采用准稳态模型,主要依据稳态性能数据描述空气源热泵和电极锅炉的产热过程,尚未考虑热泵除霜、部分负荷性能变化及设备启停、爬坡延迟等动态特性。因此,当前结果主要反映给定性能范围和理想控制条件下的系统热响应,实际工程中波动弃电可能进一步影响设备运行稳定性及电热转换效率。后续需结合设备动态特性,进一步研究电热转换设备与 PTES 之间的协同调控机制。

5 结论

本文针对 3 种光伏弃电电热转换 PTES 供暖系统,分析了连续 2 年运行条件下的系统能流、蓄放热边界、水体热分层及热损失特性。得到结论如下:

1) 3 种系统直接供热量差异较小,供暖贡献差异主要体现在 PTES 放热及辅助热源补热环节, S1、S2 和 S3 弃电供热保证率分别为 82.9%、80.7% 和 84.2%,其中联合系统表现出较好的供热效果。

2) 弃电波动使 PTES 面临明显的动态蓄热边界,在定温变流量控制下主要表现为循环流量波动,多模式设备切换还会引起蓄热温度变化,但 3 种系统均能维持较稳定的水体热分层。

3) 运行初期侧壁热损失占比较高,随着周围土壤逐渐积热,热损失逐步向顶部主导转变,表明 PTES 热损失具有明显的运行阶段性。

总体而言,PTES 能够适应光伏弃电电热转换形成的动态运行工况,并有效参与弃电消纳与建筑供暖。但基于简单稳态能量平衡的容量设计与动态运行结果之间仍存在一定偏差,后续容量设计需进一步考虑逐时弃电一负荷匹配及实际运行约束。

本文受西藏自治区基地与人才项目(XZ202502JD0029)、中建四局科技研发计划(CSCEC4B-2024-KTA-9)资助。(The project was supported by the Xizang Autonomous Region Science and Technology Program (Base and Talent Program) (No. XZ202502JD0029) and the Science and Technology Research

and Development Plan of China Construction Fourth Engineering Division (No. CSCEC4B-2024-KTA-9).)

参考文献

- [1] 电力行业规划研究与监测预警中心. 2025 年各省级区域新能源并网消纳情况[EB/OL]. (2026-02-06)[2026-08-10]. <https://mp.weixin.qq.com/s/0LJUhiavT3CHAKBDYLiWg>. (Electric Power Industry Planning Research and Monitoring Early Warning Center. Renewable energy grid integration and consumption by provincial region in 2025[EB/OL]. (2026-02-06)[2026-08-10]. <https://mp.weixin.qq.com/s/0LJUhiavT3CHAKBDYLiWg>.)
- [2] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于有序推动绿电直连发展有关事项的通知[EB/OL]. (2025-05-30)[2026-08-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202505/t20250530_1398138_ext.html. (National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on matters concerning the orderly promotion of green electricity direct connection [EB/OL]. (2025-05-30)[2026-08-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202505/t20250530_1398138_ext.html.)
- [3] Li Jinwei, Ma Rongjiang, Deng Mengsi, et al. Uncertainty analysis of two-level heating demand in pastoral areas of eastern Qinghai-Tibet Plateau based on field investigation and numerical simulation[J]. Building and Environment, 2025, 276: 112818.
- [4] Shi Lijun, Liu Yanfeng, Si Pengfei, et al. Multi-mode solar photovoltaic energy utilization system for Plateau buildings in rural areas [J]. Energy Conversion and Management, 2024, 311: 118534.
- [5] Dahash A, Ochs F, Janetti M B, et al. Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: a critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems [J]. Applied Energy, 2019, 239: 296-315.
- [6] 王志峰, 杨旭东, 杨铭, 等. 太阳能跨季节储热技术发展概述[J]. 电工电能新技术, 2025, 44(10): 77-106. (Wang Zhifeng, Yang Xudong, Yang Ming, et al. Overview of development of solar seasonal thermal storage technology [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2025, 44(10): 77-106.)
- [7] Bauer D, Marx R, Nußbicker-Lux J, et al. German central solar heating plants with seasonal heat storage [J]. Solar Energy, 2010, 84(4): 612-623.
- [8] Sifnaios I, Gauthier G, Trier D, et al. Dronninglund water pit thermal energy storage dataset [J]. Solar Energy, 2023, 251: 68-76.
- [9] Tschopp D, Tian Zhiyong, Berberich M, et al. Large-scale solar thermal systems in leading countries: a review

- and comparative study of Denmark, China, Germany and Austria[J]. *Applied Energy*, 2020, 270: 114997.
- [10] Dahash A, Ochs F, Tosatto A, et al. Toward efficient numerical modeling and analysis of large-scale thermal energy storage for renewable district heating [J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115840.
- [11] Raab S, Mangold D, Müller-Steinhagen H. Validation of a computer model for solar assisted district heating systems with seasonal hot water heat store[J]. *Solar Energy*, 2005, 79(5): 531–543.
- [12] Xie Zichan, Xiang Yutong, Wang Dengjia, et al. Numerical investigations of long-term thermal performance of a large water pit heat storage [J]. *Solar Energy*, 2021, 224: 808–822.
- [13] Xiang Yutong, Gao Meng, Furbo S, et al. Heat transfer of a large-scale water pit heat storage under transient operations [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105455.
- [14] Liu Hui, Wang Dengjia, Liu Yanfeng, et al. Thermal storage and loss characteristics of underground water pits of solar district heating systems in Xizang Plateau, China [J]. *Energy*, 2024, 308: 132702.
- [15] Zeng Qinglu, Li Luyao, Chen Xie, et al. A techno-economic performance study of synergies between large-scale solar district heating systems and building renovations under Tibetan Plateau climate conditions [J]. *Energy and Buildings*, 2025, 329: 115264.
- [16] 周超辉, 刘育策, 胡跃, 等. 跨季节储热水体数值模型开发及验证[J]. *制冷学报*, 2025, 46(5): 133–141. (Zhou Chaohui, Liu Yuce, Hu Yue, et al. Development and validation of the water pit numerical model for seasonal thermal energy storage[J]. *Journal of Refrigeration*, 2025, 46(5): 133–141.)
- [17] Kummert M. TRNSYS-MATLAB link: Type 155 [R]. Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2003.
- [18] Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. TRNSYS 18: standard component library overview [M]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2017.
- [19] Jia Shangdong, Wang Dengjia, Chen Yaowen, et al. Heat transfer modeling of a pit thermal energy storage with an embankment and the effects of structural parameters on thermal storage performance [J]. *Energy Conversion and Management*, 2026, 364: 121701.
- [20] Andersen E, Furbo S, Fan Jianhua. Multilayer fabric stratification pipes for solar tanks[J]. *Solar Energy*, 2007, 81(10): 1219–1226.
- [21] Sifnaios I, Jensen A R, Furbo S, et al. Performance comparison of two water pit thermal energy storage (PTES) systems using energy, exergy, and stratification indicators [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104947.
- [22] Pan Xinyu, Xiang Yutong, Gao Meng, et al. Long-term thermal performance analysis of a large-scale water pit thermal energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 105001.

通信作者简介

王登甲,男,教授,绿色建筑全国重点实验室,西安建筑科技大学交叉创新研究院,13279455510, E-mail: wangdengjia@xauat.edu.cn。研究方向:可再生能源热利用与建筑节能。

About the corresponding author

Wang Dengjia, male, professor, State Key Laboratory of Green Building, Institute for Interdisciplinary Innovation Research, Xi'an University of Architecture and Technology, 86-13279455510, E-mail: wangdengjia@xauat.edu.cn. Research fields: renewable energy thermal utilization and building energy efficiency.