

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-957-06

# 建筑工地内直膨式 太阳能热泵热水器运行方法研究

袁春保 刘创业 杨腾飞 史山山

(中国建筑第七工程局有限公司 郑州 450048)

**【摘要】** 随着我国基建行业的发展, 施工人员对建筑工地生活环境的要求也逐渐升高。针对建筑工地上直膨式太阳能热泵热水器运行稳定性与太阳能热泵利用效率不足的问题, 提出了改进的热水器电子膨胀阀控制算法和压缩机转速调节算法, 并以某建筑施工工地为例, 对改进后的直膨式太阳能热泵热水器系统性能进行测试。实验结果显示, 在建筑工地环境中, 该热水器加热时间误差小于4.5%, 在夏季、冬季工况中的日均耗电量分别为1.12kWh/天、2.36kWh/天, 较改进前的热水器均有显著减少。实验结果表明, 本研究设计的改进直膨式太阳能热泵热水器较改进前, 能适应具有高热水控温精度要求的建筑工地的使用环境, 而传统的直膨式太阳能热泵热水器很难适应这种应用环境。

**【关键词】** 建筑工地; 直膨式太阳能热泵热水器; 稳定性; 电子膨胀阀; 压缩机

中图分类号 TQ051 文献标识码 A

## Research on Operation and Energy Consumption Management Method of Direct Expansion Solar Heat Pump Water Heater in Construction Site

Yuan Chunbao Liu Chuangye Yang Tengfei Shi Shanshan

(China Construction Seventh Engineering Bureau Co., Zhengzhou, 450048)

**【Abstract】** With the development of China's infrastructure industry, the requirements of construction workers on the living environment of construction sites are also gradually increasing. Aiming at the problems of the operating stability of the direct expansion solar heat pump water heater and the insufficient utilization efficiency of the solar heat pump on the construction site, this study puts forward the improved control algorithm of the electronic expansion valve of the water heater and the compressor speed adjustment algorithm, and takes a construction site as an example to test the performance of the improved direct expansion solar heat pump water heater system. The experimental results show that in the construction site environment, the heating time error of the water heater is less than 4.5%, and the daily average power consumption in summer and winter is 1.12kWh/day and 2.36kWh/day respectively, which is significantly reduced compared with the water heater before the improvement. The experimental results show that the improved direct expansion solar heat pump water heater designed in this study can better adapt to the use environment of construction sites than before.

**【Keywords】** Construction site; direct-expansion solar heat pump water heater; stability; electronic expansion valve; compressor

## 0 引言

直膨式太阳能热泵热水器由于在压缩机容量控制、制冷剂节流控制、运行时间控制、热泵控制

方面较传统太阳能热泵热水器有明显优势, 越来越被市场所接受<sup>[1]</sup>。但直膨式太阳能热泵热水器仍然在过热度控制、能耗等方面存在不足, 一些热水器

设计专家针对这些问题进行过相关研究。孔祥强等人<sup>[2]</sup>针对直膨式太阳能热泵系统的运行控制问题,提出一种基于电子膨胀阀开度的过热度控制策略,主要包括电子膨胀阀初始开度算法和过热度控制算法,并搭建以制冷剂 R134a 为工质的直膨式太阳能热泵热水器试验平台,对提出的过热度控制策略进行了全工况测试。试验结果表明:在系统开机后的 25min 内,过热度有效控制在目标范围 5~10℃ 内;在系统正常运行阶段,过热度控制平稳,最大超调量小于 4℃,测试结果表明,所提出的全工况过热度控制策略有助于系统稳定高效运行。姚剑等人<sup>[3]</sup>为提高直膨式太阳能热泵热水器的加热效率,将光伏/光热逐渐结合到热水器系统中,并开展仿真分析,结果表明,加入该组件后,热水器的集热与总效率较未改造前均有显著提升。但是一方面从能够直接影响热水器过热控制与能耗的电子膨胀阀运行与压缩机转速控制方法角度进行优化的研究还很少,而从理论上讲这种思路具有较大的优化热水器性能潜力,另一方面,建筑工地由于热水需求量大,环境温差变化更为剧烈,需要加热性能更为迅速且稳定的太阳能热泵热水器,所以有必要开展本研究。

### 1 建筑工地内直膨式太阳能热泵热水器改进运行控制方法设计

#### 1.1 直膨式太阳能热泵热水器硬件系统

建筑工地,特别是桥梁等需要施工浇筑大量高性能混凝土的建筑工地上,出于养护混凝土等目的,对特定温度的热水有更大的使用量需求和更高的水温控制精度需求,例如冬季施工中,为防止桥梁立柱混凝土在浇筑完成后因环境散热收缩开裂而影响结构稳定性与受力能力,需要在养护期(一般是浇筑后的 24 小时内)内定期向混凝土表面上浇洒 20±3℃ 的水,浇洒量以使得浇筑混凝土全部表面在养护期内一直处于润湿状态为标准确定。因此需要设计更能适应建筑工地使用环境的直膨式太阳能热泵热水器。在设计建筑工地内使用的直膨式太阳能热泵热水器(Direct-expansion solar-assisted heat pump, 下文简称 DSHP)运行控制方法之前,需要先构建运行控制方法的 DSHP 硬件系统<sup>[4-6]</sup>。DSHP 硬件系统主要的组成部件有压缩机、集热器、微通道冷凝器、水箱、电子膨胀阀,下面

根据建筑工地的使用环境,依次设计每种主要硬件<sup>[7,8]</sup>。核心硬件的参数展示如表 1 所示。其中,微通道冷凝器有 15 根由纯铝材制造的微通道扁管组,每根管道内均含 18 个流道,且均采用“5-4-3-3”结构(制冷剂进入冷凝器后,依次并列流入 5 根、4 根、3 根、3 根微通道扁管)布置,如图 1 所示。水箱外壁与冷凝器之间设置温度传感器且使用聚氨酯发泡技术保温。完成主要部件设计与筛选后,再构建实验用的 DSHP 硬件系统的整体结构,整体结构示意图如图 2 所示。

表 1 设计的 DSHP 核心硬件参数  
Table 1 Designed DSHP core hardware parameters

编号	名称	型号	参数
#1	压缩机	WHP01 900BR KQA6J T6	名义制热量 1940W, 输入功率 420W, 电压 220V, 频率 50Hz, 排气量 10.2ml·rev <sup>-1</sup> , 制冷剂 R134a, 转速范围 1000~7200rpm
#2	集热器	/	表面有黑色涂层, 以 45° 倾角朝正南方固定, 流道为 TP2 牌号铜管构成, 单侧面积 3.1m <sup>2</sup>
#3	微通道冷凝器	/	1450mm×25mm×2mm, 有效面积为 0.538m <sup>2</sup>
#4	水箱	自制	直径 0.5m、高度 1m、壁厚 2mm
#5	电子膨胀阀	DPF-T	开度调节范围 0~500, 驱动电压 12VDC

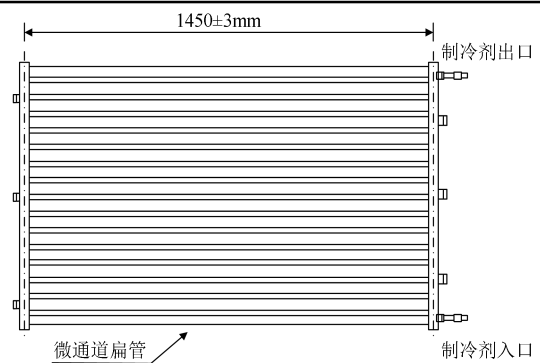


图 1 冷凝器微通道扁管结构

Fig.1 Condenser microchannel flat tube structure

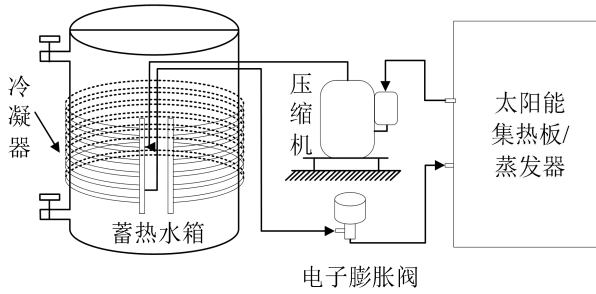


图2 DSHP 硬件系统的整体结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the overall structure of the DSHP hardware system

图2中硬件系统各部件通过铜管连接,且为降低硬件系统中制冷剂在管路上的降温效应,连接铜管需要通过保温管进行保温处理。另外整机搭建完成后需要对其采用真空检测法进行密封性检验。至此,DSHP硬件系统构建完毕。

## 1.2 热水器改进电子膨胀阀运行与压缩机转速控制方法研究

建筑施工场所内,可能需要使用固定温度范围的热水对某些建筑结构进行短期保温处理,对热水的温度更加敏感<sup>[9]</sup>。且由于施工与人员生活所需,建筑工地的热水器被使用的频率较民用情况明显更高。以上使用环境的特殊性对热水器的控温精度和能耗水平提出了更高的要求<sup>[10]</sup>。因此本研究对太阳能热泵热水器的电子膨胀阀和压缩机转速控制方法进行改进。

电子膨胀阀的初始开度对于DSHP系统的平稳运行、热水器控温精度具有重要意义,因此需要对电子膨胀阀的初始开度方法进行优化,电子膨胀阀初始开度与多项环境参数以及压缩机初始转速具有较高相关性。环境参数包括平均环境温度 $t_{a,m}$ 、平均太阳辐射强度 $I_m$ 、平均风速 $u_{a,m}$ 三种,但其中平均风速对初始开度的影响微小,不予考虑。本研究通过分析实验数据的方式来寻找初始开

$$\begin{cases} I_m < 240\text{W}\cdot\text{m}^2, K_{ini,f} = 320(1 + 0.01612(t_{a,m} - 19))(0.02392(t_{b,m} - t_{a,m}) + 0.95008) \\ I_m \geq 240\text{W}\cdot\text{m}^2, K_{ini,f} = 400(1 + 0.00675(t_{a,m} - 17))(0.006946(t_{b,m} - t_{a,m}) + 0.86591) \end{cases} \quad (5)$$

在0~400s范围内,以30s为步长设定各种过热控制周期参数,发现设为90s时控制效果最好,则该参数设为90s。制冷剂体积流量 $Q$ 按照式(6)计算。

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (6)$$

度 $K_{ini}$ 与 $t_{a,m}$ 、 $I_m$ 的数值关系。开展若干次仿真实验后发现, $K_{ini}$ 可以看作 $I_m$ 和 $t_{a,m}$ 的二元函数,且后两者对 $K_{ini}$ 的影响规则类似,则可以总结出公式(1)。

$$K_{ini,f} = K_{ini,ref}(1 + a_1(t_{a,m} - t_{a,ref}))(1 + a_2(I_m - I_{ref})) \quad (1)$$

式中, $K_{ini,f}$ 为 $K_{ini}$ 的函数形式; $K_{ini,ref}$ 为电子膨胀阀的初始值,该参数取380脉冲; $I_{ref}$ 、 $t_{a,ref}$ 分别为太阳辐射和环境温度的初始值,取值 $380\text{W}\cdot\text{m}^2$ 、 $18^\circ\text{C}$ (由拟合数据的均值确定); $a_1$ 、 $a_2$ 为回归函数中的拟合系数,各基准值由拟合数据的平均值代表。将实验数据用式(1)方程拟合并优化后,得到参数为 $a_1 = 0.00862$ 、 $a_2 = 0.000431$ ,将各参数取值代入式(1)得到式(2)。

$$K_{ini,f} = 380(1 + 0.00862(t_{a,m} - 18))(1 + 0.000431(I_m - 380)) \quad (2)$$

分析拟合误差发现,当太阳辐射强度较高与较低时,拟合误差变化较大,为进一步提高拟合效果,按照太阳辐射强度,进一步将拟合区间切分为到 $I_m < 240\text{W}\cdot\text{m}^2$ 、 $I_m \geq 240\text{W}\cdot\text{m}^2$ 两种,重新分段拟合,得到式(3)。

$$\begin{cases} I_m < 240\text{W}\cdot\text{m}^2, K_{ini,f} = 320(1 + 0.01612(t_{a,m} - 19))(1 + 0.00104(I_m - 108)) \\ I_m \geq 240\text{W}\cdot\text{m}^2, K_{ini,f} = 400(1 + 0.00675(t_{a,m} - 17))(1 + 0.000302(I_m - 504)) \end{cases} \quad (3)$$

另外实际DSHP产品中并无太阳辐射照度仪,此次通过环境温度和集热器背面中心部位温度指标来推算太阳辐射强度参数值。因为实验数据表明,环境温度 $t_{a,m}$ 、集热器背面中心部位温度 $t_{b,m}$ 与太阳辐射强度 $I_m$ 之间存在着如式(4)所示的函数关系。

$$I_m = 23(t_{b,m} - t_{a,m}) + 60 \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(3)得到电子膨胀阀的最终初始开度计算方法,如公式(5)所示。

式(6)中, $C_d$ 、 $A$ 、 $\Delta P$ 、 $\rho$ 分别代表流量系数,阀孔流通面积( $\text{m}^2$ ),电子膨胀阀两端压强(MPa),阀前制冷剂密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。当开度不变时, $Q$ 与 $\Delta P$ 的平方根之间有正比例关系,结合开度阶跃变化量与过热控制性能的关系,将电子膨胀阀的过热控制过程设置如式(7)所示。

$$\begin{cases} \text{if}(t_{\text{sup}} \geq 20^{\circ}\text{C}) K = K + 10 \\ \text{if}(15^{\circ}\text{C} \leq t_{\text{sup}} < 20^{\circ}\text{C}) K = K + 5 \\ \text{if}(10^{\circ}\text{C} < t_{\text{sup}} < 15^{\circ}\text{C}) K = K + 3 \\ \text{if}(0^{\circ}\text{C} < t_{\text{sup}} < 5^{\circ}\text{C}) K = K - 5 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中,  $t_{\text{sup}}$  代表电子膨胀阀的环境温度。以上即为电子膨胀阀运行控制策略设计, 下面再设

计压缩机的运行控制策略<sup>[11]</sup>。仿真实验数据显示, 压缩机转速相同时, 加热时间越短, 系统消耗电能越少, COP 值越高将相同体积的水加热相同温度耗时越短, 但耗能越大, 而且其他环境参数一致时, 太阳辐射强度越高, 压缩机运行性能越好, 耗时越小。综上所述, 参考到热水使用需求, 尽可能缩小各季的日均加热时间, 并将其加热时间安排到每日太阳辐射整体最大时间段, 相关参数如表 2 所示。

表 2 系统加热参数设置

Table 2 Setting of the system heating parameters

编号	日期范围	季节	加热时长/h	平均环境温度	日内加热时间/h:m	COP
#1	3.1-5.31	春季	6.5	19±4℃	9:00-15:30	5.31
#2	6.1-9.30	夏季	6.0	32±6℃	9:00-15:00	6.62
#3	10.1-11.15	秋季	6.5	21±4℃	9:00-15:30	5.10
#4	11.16-2.28	冬季	7.0	8±5℃	9:00-16:00	4.09

表 2 中夏季 COP 最高, 主要原因是夏季太阳辐射整体最高, 所以热水器加热速度最快。系统中热水存在降速加热、定速加热、升速加热三种加热方式, 如图 3 所示。但实验数据显示, 三种加热方式对系统加热性能影响很小, 且影响远小于加热时间参数, 为简化系统, 选用加热过程系统调节步骤最少的定速加热模式。

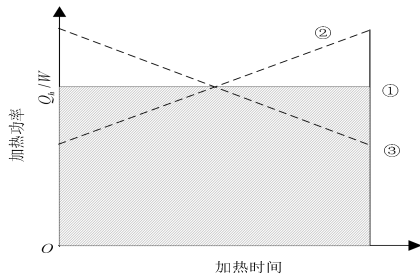


图 3 DSHP 的三种加热模式示意图

Fig.3 Schematic representation of the three heating modes of the DSHP

## 2 改进直膨式太阳能热泵热水器在建筑工地环境的运行情况分析

### 2.1 热水器性能系数分析

为研究设计出的 DSHP 热水器使用性能, 本研究按照设计方案制造出样机, 并对其开展全工况实验测试。DSHP 核心控制电路选用 STC12C5A60S2 单片机芯片, DSHP 中安装 A 级 PT100 信号温度传感器、以及 TED 型功率表用于检测水温 and 热水器功率。按照建筑工地的普通热水器使用需求, 将设置实验中 DSHP 需加热的水量设置为 200L、春夏秋冬四季的待加热温差与平均太阳辐射分别设置为 40℃、25℃、38℃、44℃与 698W·m<sup>-2</sup>、763W·m<sup>-2</sup>、552W·m<sup>-2</sup>、534W·m<sup>-2</sup>。为对比该研究设计的 DSHP 热水器 (后续简称 XDSHP) 性能, 选择普通 DSHP 热水器 (后续简称 ODSHP) 开展对照实验。统计得到两热水器全工况加热结果见表 3。

表 3 热水器全工况加热结果参数

Table 3 Heating result parameters of full water heater

季节	热水器类型	加热期间环境平均温度 /℃	水温范围 /℃	耗电量 / (kWh)	制热量 /kJ	加热时间/min
春季	XDSHP	20.4	16.2-55.0	1.96	32551	383
	ODSHP	20.8	16.4-55.0	2.13	31058	384
夏季	XDSHP	35.1	26.0-49.0	0.62	21740	355
	ODSHP	35.4	26.7-49.0	0.61	21149	355
秋季	XDSHP	20.5	15.4-54.0	1.43	32803	382

季节	热水器类型	加热期间环境平均温度 /°C	水温范围 /°C	耗电量 / (kWh)	制热量 /kJ	加热时间/min
	ODSHP	20.4	15.4-54.0	1.58	30966	384
<b>续表 3 热水器全工况加热结果参数</b>						
冬季	XDSHP	4.7	3.9-51.0	2.65	35917	411
	ODSHP	4.6	3.8-51.0	3.14	33927	413

由表 3 可知, 在加热期间环境平均温度、加热温差以及其他环节保持一致的条件下, 两种热水器加热时间无显著差别, 但 XDSHP 在除夏季外的其他季节耗电量明显更低, 制热量却有所增加, 例如在选出的冬季工况日中 XDSHP 热水器的耗电量、制热量分别为 2.65kWh、35917kJ 分别比 ODSHP 变化-15.61%、+5.87%。

### 2.2 热水器过热度控制与压缩机运行控制性能分析

各季节的建筑在工地工况中仍然分别选出具有足够代表性的一天分别进行过热度控制效果对比, 结果如图 4 所示。图 4 中横轴为加热时间、纵轴为过热度, 不同线型代表不同热水器, 不同颜色代表不同的季节工况。

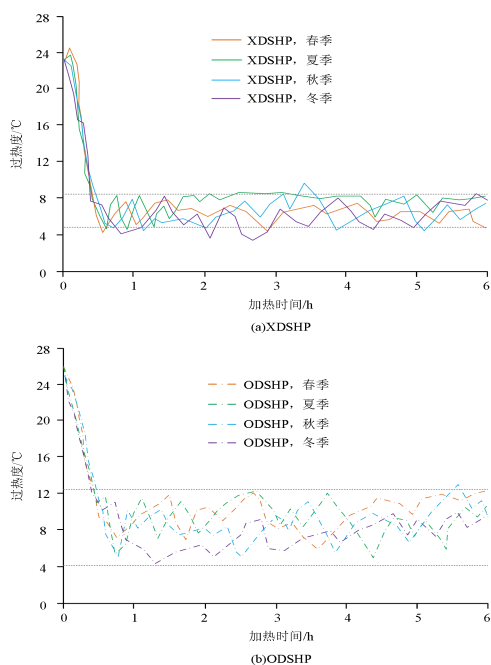


图 4 各季节工况下热水器的过热度-加热时间曲线

Fig.4 Overheat-heating time curve of the water heater under each seasonal working condition

由图 4 可知, 两热水器热泵系统刚启动的前 20 分钟内, 过热度较高, 系统不稳定, 随后热泵

系统逐渐稳定下来。整体上看, 热泵系统稳定后, XDSHP、ODSHP 热水器的在各季典型工况的过热度范围大致处于 4.2°C~8.5°C、5.1°C~12.4°C 范围内。可知前者在四季工况的过热控制效果优于后者。最后分析两热水器的压缩机在四季中的功率消耗情况, 统计结果如图 5 所示。

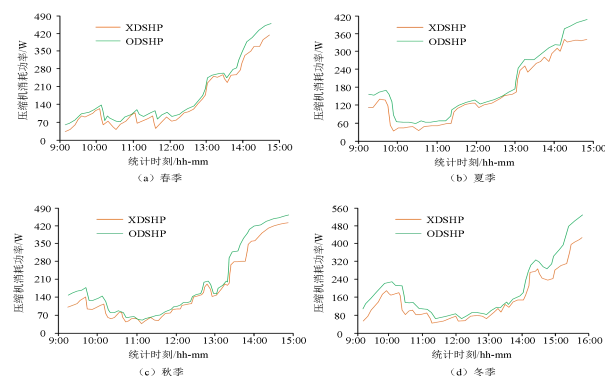


图 5 各季节工况下热水器压缩机的功率消耗情况

Fig.5 Power consumption of water heater compressor under various seasonal working conditions

图 5 中各子图横轴代表选出工况日的加热时刻, 纵轴代表热水器压缩机的功率, 不同图线颜色代表不同的热水器。观察图 5 可知, 在选出的各季节工况中, XDSHP 系统的压缩机功率均低于 ODSHP, 同时夏季工况中两者压缩机功率整体差异最小, 冬季工况中两者压缩机功率整体差异最大。例如在春夏秋冬各典型工况的下午 15:00 时刻, XDSHP 系统的压缩机功率分别为 415W、438W、417W、425W, 分别比 ODSHP 低 9.98%、7.99%、10.13%、20.11%。

### 3 结论

建筑工地对非生活热水有更高的温度控制需求与更低的能耗需求, 为满足建筑工地对热水器的需求, 本研究对直膨式太阳能热泵热水器的电子膨胀阀运行与压缩机转速控制方法进行改进, 并开展

实验研究改进后的 XDSHP 热水器性能。实验结果表明,热泵系统稳定后, XDSHP、ODSHP 热水器的在各季典型工况的过热度范围大致处于  $4.2^{\circ}\text{C}$ ~ $8.5^{\circ}\text{C}$ 、 $5.1^{\circ}\text{C}$ ~ $12.4^{\circ}\text{C}$  范围内。可知前者在四季工况的过热控制效果优于后者。在选出的各季节工况中, XDSHP 系统的压缩机功率均低于 ODSHP, 同时夏季工况中两者压缩机功率整体差异最小, 冬季工况中两者压缩机功率整体差异最大。实验数据证明, 该研究设计的改进直膨式太阳能热泵热水器具有更好的控温效果, 比起传统的直膨式太阳能热泵热水器, 更适合应用于建筑工地环境。

#### 参考文献:

- [1] 王万召,铁玮,谭文.直接蒸汽发电槽式太阳能集热器蒸汽温度自抗扰控制[J].热力发电,2019,48(3):41-46.
  - [2] 孔祥强,董山东,姜开林,等.基于电子膨胀阀开度的直膨式太阳能热泵过热度智能控制[J].农业工程学报,2018,034(12):230-235.
  - [3] 姚剑,彭浩,寿春晖,等.直膨式太阳能 PV/T 热泵系统性能分析[J].太阳能学报,2021,42(12):35-40.
  - [4] 和永康,杨其长,张义,等.直膨式太阳能热泵用于温室番茄根际-空气加温的试验研究[J].中国农业大学学报,2019,24(4):124-135.
  - [5] 刘业凤,余军.带喷射器的直膨式太阳能辅助热泵的理论研究[J].建筑节能,2018,46(6):38-43.
  - [6] 邢琳,闫金州,汪坤海,等.直膨式太阳能热泵柔性设计[J].制冷学报,2018,39(2):31-38.
  - [7] 刘少锋,杨正武,司鹏飞,等.水平轴跟踪槽式太阳能集热器动态集热量计算与分析[J].制冷与空调(四川),2020,34(2):197-201.
  - [8] 孔祥强,刘晓东,尚燕平,等.基于多元线性回归直膨式太阳能热泵性能预测[J].太阳能学报,2022,43(1):443-449.
  - [9] 孙浩文.网络环境下太阳能热水器远程智能控制系统设计研究[J].自动化技术与应用,2018,37(11):146-150.
  - [10] 许文华,李惟毅,郭强.考虑环境影响的  $\text{CO}_2$ /低 GWP 混合工质热泵热水器工质优选简[J].太阳能学报,2018,39(1):84-89.
  - [11] 房永文,王春芳,李厚基.基于太阳能电热水器的升降压变换器研究[J].电源技术,2020,44(3):434-437.
- 
- (上接第 908 页)
- [4] 王双庆,邢建春,王平.防护工程能耗管理系统研究[J].防护工程,2011,33(5):52-57.
  - [5] 杨昌智,罗志文,蒋新波.夏季潮湿地区不同 THIC 空调系统综合 COP 对比分析[J].湖南大学学报,2016,43(5):144-150.
  - [6] 谭仪忠,刘元雪,孙树国.地下工程节能减排研究进展[J].地下空间与工程学报,2010,6:1533-1537.
  - [7] 高虎杉,耿世彬,周文生.地下工程空调系统节能控制新技术[J].洁净与空调技术,2011,(2):47-50.
  - [8] 屠志远,彭福胜,徐梦迪.防护工程水环热泵空调系统的节能运行分析[J].防护工程,2020,42(5):58-63.
  - [9] 杨波.地下建筑能耗特性研究[J].四川建材,2021,47(10):24-25.
  - [10] 耿世彬,陈莎莎,李永.防护工程传热负荷的相关研究[J].防护工程,2013,35(3):54-60.
  - [11] 中国建筑标准设计研究院.全国民用建筑工程设计技术措施/防空地下室[M].北京:中国计划出版社,2009.