

基于分布式 PSODE 算法的太阳能 供暖系统节能控制方法

李嵘^{1†}, 王晓瑜²

(1. 西安安居筑城建筑科技集团有限公司, 陕西 西安 710001; 2. 西安航空学院 电子工程学院, 陕西 西安 710077)

摘 要: 节能控制可以降低太阳能供暖系统的能量消耗, 为了提高太阳能供暖系统的节能控制效果和性能, 提出一种基于分布式 PSODE 算法的太阳能供暖系统节能控制方法。以太阳能供暖系统的工作原理为依据, 建立太阳能供暖房间的热平衡方程, 根据室内恒温过程的湿度浪费量, 引入守恒定律, 建立太阳能供暖系统优化运行的数学模型, 完成太阳能供暖系统的能耗分析。将 DE 算法与 PSO 算法结合, 计算太阳能供暖系统的运行电压, 以太阳能供暖系统的节能控制为目标, 构建目标函数。通过调节和修正太阳能供暖系统的节能控制参数, 实现太阳能供暖系统的节能控制。实验结果表明, 文中方法无论在晴朗天气条件下还是阴雨天气条件下, 太阳能供暖系统的节能控制效果和性能都有所提高。

关键词: 分布式 PSODE 算法; 节能控制; 供暖系统; 能耗分析; 太阳能; 目标函数

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Energy-saving Control Method of Solar Energy Heating System Based on Distributed PSODE Algorithm

LI Rong^{1†}, WANG Xiaoyu²

(1. Xi'an Anjuzhucheng Construction Technology Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710001, China;

2. Electronic Engineering College, Xi'an Aeronautical University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: Energy-saving control can reduce the energy consumption of solar energy heating system. In order to improve the energy-saving control effect and performance of solar energy heating system, an energy-saving control method of solar energy heating system based on distributed PSODE algorithm is proposed. Based on the working principle of solar energy heating system, the heat balance equation of solar energy heating room is established. According to the humidity waste in indoor constant temperature process, the conservation law is introduced, and the mathematical model of optimal operation of solar energy heating system is established to complete the energy consumption analysis of solar energy heating system. Combining DE algorithm with PSO algorithm, the operating voltage of solar energy heating system is calculated, and the energy-saving control of solar energy heating system is taken as the goal, and the objective function is constructed. By adjusting and modifying the energy-saving control parameters of solar energy heating system, the energy-saving control of solar energy heating system is realized. The experimental results show that the energy-saving control effect and performance of solar energy heating system are improved by the method in this paper, whether in sunny weather or rainy weather.

Key words: distributed PSODE algorithm; energy-saving control; heating system; energy consumption analysis; solar energy; objective function

随着石油、煤炭等传统能源的短缺,不可再生能源的应用给环境带来的威胁越来越大,能源问题将成为制约我国国民经济和工业发展的瓶颈^[1]。能源供给的可持续性,可以保证国民经济的持续发展。如今,国内公民的收入水平越来越高,不仅提高了人们对生活品质的要求,传统能源的消耗也越来越多^[2]。随着不可再生能源紧缺程度逐渐提升,节能问题已经成为全球关注的焦点。太阳能供暖系统是一种无污染、易于获取和使用的新型能源系统,它可以将太阳能集中在热泵机组上,既可以减少对环境的污染,又可以节约大量的电能^[3]。所以,在国内大力推行太阳能供暖系统,是实现节能和环保的一项重要举措。

孔祥强等人^[4]建立了一套以环境为基础的供暖系统运行控制方法。利用储热器连接水循环管道,向地面辐射供暖系统输送热量。在实验资料和分析的基础上,对各种环境下的给水温度进行了拟合,并利用实测的太阳能辐照,使水温达到一定的储热要求。实验证明,该方法可以对周围的环境条件进行快速反应,并使压缩机的排烟温度维持在 90℃ 以下。该方案有助于直接膨胀型太阳能热泵供热系统的安全、稳定运行。赵安军等人^[5]在考虑了邻近房间温度效应的基础上,利用状态空间方法对室温进行了建模和仿真。应用基于模型预报的分布式群控技术,实现了对楼宇内部的温度进行控制,并利用所得到的热量需求,对换热站循环水泵进行了优化。通过对不同房间和不同室外环境进行分析,得出了采用分布式的房间温度模式进行群控控制,实现了对不同房间内温度的实时控制和追踪,比常规的控制方式节省了 14.28% 的热量消耗。采用循环泵组控制方案进行了改进,使其节能效果增加 16.74%。

基于以上研究背景,本文将分布式 PSODE 算法应用到了太阳能供暖系统的节能控制中,从而降低太阳能供暖系统的能耗。

1 太阳能供暖系统节能控制方法设计

1.1 分析太阳能供暖系统的能耗

太阳能供暖系统由热泵供暖系统、地埋管换热器和太阳能集热系统组成,其工作原理如图 1 所示。

对于太阳能供暖系统,为了使太阳能集热系统的制热量满足用户对室内温度的需求,对太阳能供暖系统的能耗进行控制。

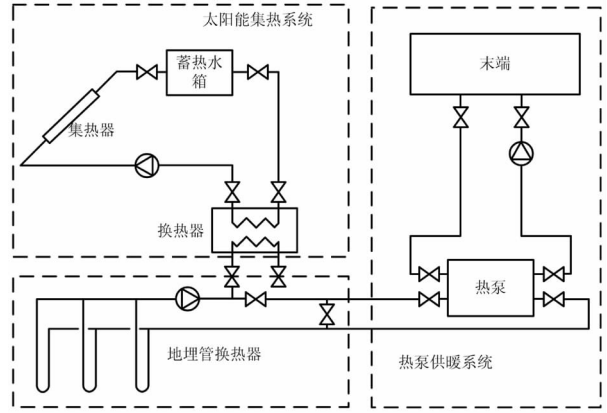


图 1 太阳能供暖系统的工作原理

使用太阳能供暖时,为了确保室内温度始终处于人体舒适的范围内,需要使室内环境中的总热量与失热总量相等^[6],保持室内环境的热量处于平衡状态。将太阳能供暖系统看作是一个开口的系统,当忽略太阳能供暖房间内的湿度变化时,建立太阳能供暖房间的热平衡方程,表示为:

$$cF_p\rho_nT_n + cF_h\rho_nT_n = Q'_h + Q_f^{dt} + cF_s\rho_sT_s \quad (1)$$

上式中, c 表示太阳能供暖房间内,空气在额定压力下的比热容; F_p 表示太阳能供暖房间的温度上升量; ρ_n 表示室内空气密度; T_n 表示室内的温度值; F_h 表示太阳能供暖房间的温度下降量; Q'_h 表示热量从室外到室内的总量; Q_f^{dt} 表示太阳能供暖房间内的总放热量; F_s 表示太阳能供暖系统的升温量; ρ_s 表示升温状态下的空气密度; T_s 表示开启太阳能供暖系统时的室内温度。

考虑到太阳能供暖系统具有一定的滞后性,节能控制机制的选择也存在很多不合理的地方,导致恒温的除湿量变大^[7],在这一过程中就会浪费大量的室内湿度,计算公式为:

$$W = T_{cr} \left(\frac{F_p}{\rho_n} - \frac{F_s}{T_{conds}} \right) / 1000 \quad (2)$$

其中, T_{conds} 表示人体舒适的边界温度; T_{cr} 表示湿度降低后的室内温度。

太阳能供暖系统的温度阀门开度可以控制回温值与降温值之比,假设 $J_{a,out}$ 表示太阳能供暖系统为室内提供热量的总值, $J_{a1,in}$ 表示太阳能供暖系统的回温量,使得太阳能供暖系统在热量供应中遵循守恒定律,表示为:

$$\begin{cases} J_{a,out} = J_{a1,in} + J_{a2,in} \\ W_{a,out} = \frac{J_{a1,in} \times J_{a1,in} + J_{a2,in} \times J_{a2,in}}{J_{a,out}} \\ f_{a,out} = \frac{J_{a1,in} \times f_{a1,in} + J_{a2,in} \times J_{a2,in}}{J_{a,out}} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $J_{a2, in}$ 表示太阳能供暖系统的降温值; $W_{a, out}$ 表示室内的湿度; $f_{a, out}$ 表示室内的热量焓值; $f_{a1, in}$ 表示太阳能供暖系统开启时室内温度的焓值。

将公式(2)与公式(3)结合,构建太阳能供暖系统优化运行的数学模型,以此为基础,分析系统的能耗,即:

$$\begin{cases} T_{a, out} = \frac{J_{a1, in} \times T_{conds} + J_{a2, in} \times T_{condsmax}}{J_{a, out}} \\ W_{a, out} = \frac{J_{a1, in} \times W_{a1, in} + J_{a2, in} \times W}{J_{a, out}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $T_{a, out}$ 表示太阳能供暖系统温差控制的响应系数。

根据太阳能供暖系统的工作原理,建立太阳能供暖房间的热平衡方程,依据室内恒温过程的湿度浪费量,引入守恒定律,建立太阳能供暖系统优化运行的数学模型,分析太阳能供暖系统的能耗。

1.2 控制太阳能供暖系统的能耗

以太阳能供暖系统的能耗分析结果为依据,将 PSO 算法与 DE 算法相结合^[8],对太阳能供暖系统的能量进行控制。

在某一个群体中,如果其中一个个体出现了局部最优的现象,那么粒子就会根据群体的方向,确定下一步需要到达的位置。此时,还会根据 PSO 群体或者 DE 群体中最优个体的信息,确定接下来的位置,结合两个位置信息^[9],使局部最优的粒子与初始的局部最优点脱离,选择合适的方向,获取全局最优点,实现太阳能供暖系统的节能控制。

分布式 PSODE 算法运行在最大迭代次数内会出现停滞的现象,为了避免这种现象,引入一种变异机制^[10],获取个体的最新位置,表示为:

$$a_k^{t+q+1} = A_{\min} + \text{rand}(0, 1) \times (A_{\max} - A_{\min}) \quad (5)$$

其中, $A_{\min}$ 为个体搜索的最佳位置; $A_{\max}$ — $A_{\min}$ 表示允许搜索的边界范围。

由于分布式 PSO 算法在太阳能供暖系统的节能控制中会增加计算量,为了方便计算,将 DE 算法与 PSO 算法结合^[11],计算出太阳能供暖系统的电压 $U(k+N)$, 公式为:

$$\begin{cases} U(k+N) = \epsilon_{1N} Y_{1N} + \epsilon_{2N} Y_{2N} + \cdots \epsilon_{LN} Y_{LN} \\ Y_{jN} = \prod_{i=1}^2 \exp \left[- \left(\frac{Z_i - C_{ij}}{U_i} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中, Y_{jN} 表示太阳能供暖系统的预测输出; Z_i 表示太阳能供暖房间内的预测温度输出; C_{ij} 表

示太阳能供暖房间内的温差变化; U_i 表示太阳能供暖系统调节阀的电压。

利用公式(7)定义太阳能供暖系统节能控制的目标函数,即:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (C(k+i), C_r(k+i)) + \sum_{i=1}^N C^0(k+i)^2 \quad (7)$$

上式中, $C(k+i)$ 表示太阳能供暖房间内的舒适温度; $C_r(k+i)$ 表示太阳能供暖房间内的温差; $C^0(k+i)^2$ 表示太阳能供暖房间内的实际温度。

利用公式(7)的目标函数对太阳能供暖系统的节能控制参数进行调节和修正^[12],即:

$$\begin{cases} \alpha_{j, N}(k+1) = \alpha_{j, N}(k) - C(k+i) \\ \beta_{j, N}(k+1) = \beta_{j, N}(k) - C(k+i) \\ \gamma_{j, N}(k+1) = \gamma_{j, N}(k) - C(k+i) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\alpha_{j, N}(k)$ 、 $\beta_{j, N}(k)$ 和 $\gamma_{j, N}(k)$ 表示调节和修正之前的节能控制参数; $\alpha_{j, N}(k+1)$ 、 $\beta_{j, N}(k+1)$ 和 $\gamma_{j, N}(k+1)$ 表示调节和修正之后的节能控制参数。

假设存在 E 个能量消耗节点, K 个节能控制任务为 $a_1, a_2, \dots, a_K$, 利用分布式 PSODE 算法控制太阳能供暖系统的能耗,具体步骤如下。

步骤 1:在 PSO 群体中随机选取 n 个粒子,将其平均划分为 p_{PSO} 和 p_{DE} 两组^[13],并且两组分布在不同区域,即:

$$p_{PSO} = \{p_1, p_2, \dots, p_{n/2}\} \quad (9)$$

$$p_{DE} = \{q_1, q_2, \dots, q_{n/2}\} \quad (10)$$

步骤 2:设定 PSO 算法和 DE 算法的参数,计算当前粒子个体的适应度值^[14],并在 PSO 群体和 DE 群体中寻找到最优的粒子个体,记作 g_h^{PSO} 和 g_h^{DE} 。

步骤 3:在 g_h^{PSO} 和 g_h^{DE} 中选择最优的粒子个体,如果迭代次数达到最大值,停止运算,将最优个体作为太阳能供暖系统的最佳节能控制方案,否则执行 Step4。

步骤 4:利用 g_h^{PSO} 和 g_h^{DE} 中的最优粒子个体替换 PSO 群体和 DE 群体中的最优粒子个体,产生一代新的 PSO 群体和 DE 群体。

步骤 5:利用 PSO 算法更新 p_{PSO} 中粒子个体的位置和速度,利用 DE 算法对 p_{DE} 中的个体进行杂交和选择^[15],更新 DE 群体。

步骤 6:在迭代计算中,判断群体中的个体是否会出现停滞的现象,如果存在,按照公式(5)对个体进行变异处理,获取个体的最新位置。

步骤 7:执行步骤 2。

综上所述,利用分布式 PSODE 算法,对太阳能供暖系统进行了节能控制。

2 实验分析

2.1 实验对象

为了验证文中方法在太阳能供暖系统节能控制中的效果,在北方寒冷地区选取一座民用住宅,并安装太阳能供暖系统,系统的相关技术参数如表 1 所示。

表 1 太阳能供暖系统的技术参数

组成单元	型号	说明
太阳能集热系统	φ60 mm×2000 mm×18 根的真空管集热器,采光面积约 2.20 m ²	安装在房屋顶部,表面倾斜 40°朝向西南方
供热水箱	容积为 600 L	60 mm 的保温层
太阳能循环泵	IZSDUB-62	最大流量可达 2.5 m ³ /h
空气源热泵机组	KFLPD-68S	额定电压为 220 V,额定制热量为 5000 W,额定功率为 960 W。

2.2 实验步骤

实验过程中,分别在晴朗天(指天空晴朗、阳光强烈、没有云层或只有少量云层的天气,在这种天气下,太阳能供暖系统可以充分利用太阳能进行供暖)和阴雨天(指天空多云、云层厚重、阳光不强或完全被云层遮挡的天气,在这种天气下,太阳能供暖系统无法充分利用太阳能进行供暖,需要通过其他方式进行补充供暖)两种天气条件下,控制太阳能供暖系统的能耗,具体步骤如下。

步骤 1:在晴朗天气的早晨,打开太阳能供暖系统的开关,让水箱自动上水,直到最高水位线。

步骤 2:将太阳能供暖系统调节到手动模式,开启空气源热泵机组,将室内温度升高到 24℃,关闭空气源热泵机组。

步骤 3:将太阳能供暖系统切换到自动模式,模拟不同的室内温度,控制太阳能供暖系统的太阳能循环泵和空气源热泵机组的启动与停止。实时监测室内的温度 t_1 、 t_2 和 t_3 ,太阳能集热器出口水温 t_4 ,空气源热泵机组入口水温 t_5 ,空气源热泵机组出口水温 t_6 ,每间隔 5 分钟采集一次实验数据并记录。

步骤 4:在阴雨天气条件下,重复上述操作。

步骤 5:分析实验数据,检测并分析太阳能供

暖系统的能耗。

2.3 太阳能供暖系统的能耗控制效果

启动太阳能供暖系统,在不同的室内温度下,按照 2.2 的实验步骤,利用文中方法控制系统的能耗,当系统的总功率低于 70 kW 时,满足太阳能供暖系统的节能要求,能耗控制结果如图 2 所示。

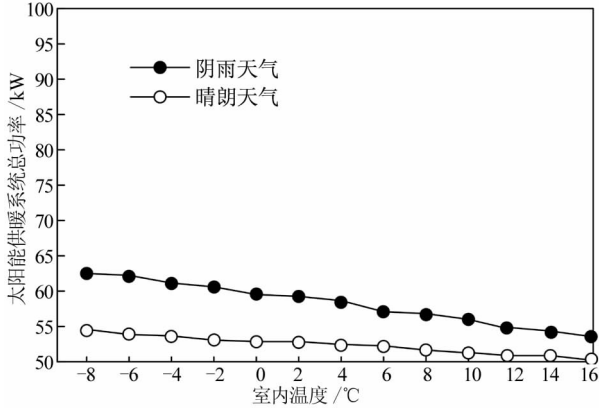


图 2 太阳能供暖系统的能耗控制结果

根据图 2 的结果可知,随着室内温度的逐渐升高,太阳能供暖系统的总功率呈下降趋势。采用文中方法对太阳能供暖系统进行节能控制时,无论在晴朗天气条件下还是阴雨天气条件下,太阳能供暖系统在运行中的总功率的范围存在一定差距,但在两种天气条件下,系统的总功率均能保持在 70 kW 以下,说明了太阳能供暖系统能够根据天气条件和室内温度变化自动调整能耗,实现节能控制的目的。

2.4 对比分析

为了避免实验结果的单一性,引入基于环境参数的控制方法和基于分布式群控技术的控制方法作对比,当太阳能供暖系统处于不同负荷时,测试了太阳能供暖系统的节电率,结果如图 3 所示。

从图 3 的结果可以看出,在晴朗天气条件下,随着太阳能供暖系统的负荷逐渐增大,采用基于环境参数的控制方法时,太阳能供暖系统的节电率从 84.3% 下降到 65.6%;采用基于分布式群控技术的控制方法时,太阳能供暖系统的节电率从 88.8% 下降到 75%;采用文中方法时,太阳能供暖系统的节电率仍然呈下降趋势,但是始终高于 95%。在阴雨天气条件下,太阳能供暖系统的节电率明显低于晴朗天气条件下的节电率,采用基于环境参数的控制方法时,太阳能供暖系统的节电率从 74.2% 下降到 57.5%;采用基于分布式群控技术的控制方法时,太阳能供暖系统的节电率从 79.1% 下降到 64.6%;采用文中方法时,太阳能供暖系统的节电

率从 98.8%下降到 93.3%，始终高于 90%。因此说明文中方法对太阳能供暖系统的节能控制性能更好。

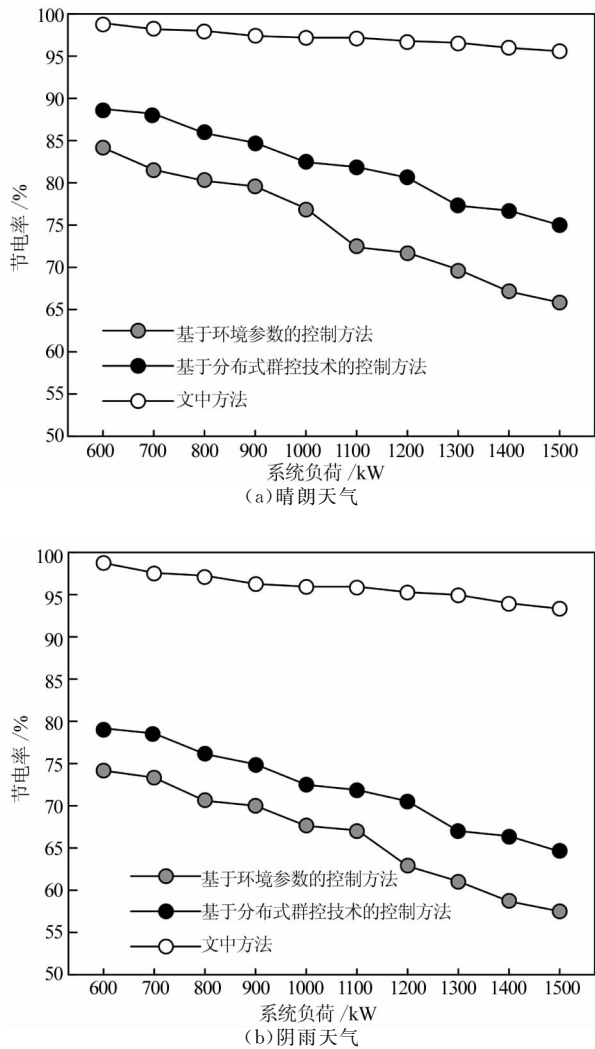


图 3 太阳能供暖系统的节电率测试结果

3 结 论

研究了一种基于分布式 PSODE 算法的太阳能供暖系统节能控制方法。分别在晴朗天气条件下和阴雨天气条件下进行测试。结果显示,该方法对太阳能供暖系统的节能控制效果和性能更好。但是本文的实验测试仅考虑了晴朗天气和阴雨天气,在今后的研究中,希望可以建立系统模型,增加雾霾天气、多云天气等条件进行模拟,补充客观条件对实验结果的影响,扩大文中方法的应用范围。

参考文献

[1] 郭泉,邱云峰,史志国,等. 储热型太阳能供暖系统热输送全过程特性研究[J]. 化工学报,2021,72(10):5384—5395.

[2] 孟祥鑫,刘衍,王赏玉,等. 小型太阳能采暖建筑节能性能指标简化计算[J]. 太阳能学报,2022,43(6):115—123.

[3] 刘庆玉,关琦,张敏,等. 北方典型农村住宅太阳能辅助采暖优化设计[J]. 可再生能源,2020,38(4):447—452.

[4] 孔祥强,徐显,张鹏,等. 直膨式太阳能热泵供暖系统运行控制策略[J]. 农业工程学报,2022,38(8):38—44.

[5] 赵安军,周梦,于军琪,等. 基于分布式群控技术的高层建筑集中供暖系统控制与优化研究[J]. 建筑科学,2020,36(6):23—34.

[6] 谢金鑫,张九根,张宏伟. 基于外部参照优化算法的空调系统节能控制[J]. 暖通空调,2019,49(7):138—143.

[7] 田海,杨曼柔,霍禹同. 利用剩余风电的感应储能供暖控制系统研究[J]. 热能动力工程,2022,37(7):155—163.

[8] 吕世轩,马素霞,宋建成,等. 燃气-蒸汽联合循环机组灵活性供热控制策略[J]. 热力发电,2021,50(3):114—120.

[9] 李洁,徐鑫,姚新强,等. 新疆地区既有农宅被动式改造与供暖初期运行效果分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(13):5332—5337.

[10] 王宏伟,敖鑫,刘璐. 基于神经网络的集中供暖系统约束控制[J]. 热能动力工程,2019,34(4):23—28.

[11] 周涵宇,刘刚,王立雄,等. 不同气候区遮阳控制策略的节能与舒适度优化[J]. 重庆大学学报,2021,44(9):67—76.

[12] 孙锐,崔红社,刘龙,等. 基于粒子群算法的空气源热泵供暖系统运行优化研究[J]. 可再生能源,2022,40(11):1465—1472.

[13] 姚剑,史天运,端嘉盈. 铁路客站站台照明节能控制策略研究[J]. 铁道运输与经济,2022,44(8):58—64+90.

[14] 信博文,南新元,高丙朋,等. 基于 Beta 分布的空气源热泵联合蓄热器供热系统储热容量最小区间研究[J]. 太阳能学报,2021,42(9):8—13.

[15] 梁艳辉,闫军威. 某高校建筑集中供热节能控制系统设计与实现[J]. 暖通空调,2020,50(8):94—99.