

严寒地区空气源热泵耦合电磁能系统 模拟运行研究

冯国会,贾敏,张磊,李旭林,赫娜

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 为了促进空气源热泵耦合电磁能供热系统在严寒地区住宅建筑中的应用,研究该系统的运行性能和稳定性。**方法** 以沈阳地区某住宅建筑为例,应用 Trnsys 软件建立了空气源热泵耦合电磁能供热系统仿真模型,并用实测值对模型进行了验证;深入探讨空气源热泵耦合电磁能供热系统在供热期的运行特点,并与空气源热泵和电磁能供热系统分别进行比较。**结果** 空气源热泵耦合电磁能供热系统模型可靠,相对误差可以控制在 15% 以内;在供热期,室内平均温度可保持在 17.97 ~ 21.84 °C;空气源热泵耦合电磁能供热系统比电磁能供热系统的 COP 提高了 59.17%,空气源热泵耦合电磁能供热系统 CO₂ 减排量比空气源热泵和电磁能供热系统分别提高 1.47% 和 59.50%。**结论** 空气源热泵耦合电磁能供热系统运行和 COP 变化更为稳定,系统环境效益更佳,室内热舒适性更高。

关键词 空气源热泵;电磁能系统;COP;严寒地区;耦合系统

中图分类号 TU833+.1;TK521

文献标志码 A

引用格式:冯国会,贾敏,张磊,等.严寒地区空气源热泵耦合电磁能系统模拟运行研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):322-329.(FENG Guohui, JIA Min, ZHANG Lei, et al. Operation simulation of air source heat pump coupled electromagnetic energy system in cold region[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(2): 322-329.)

Operation Simulation of Air Source Heat Pump Coupled Electromagnetic Energy System in Cold Region

FENG Guohui, JIA Min, ZHANG Lei, LI Xulin, HE Na

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to promote the application of air source heat pump coupled electromagnetic energy heating system on residential buildings in the cold area, the performance and stability of the system is studied. A residential building in Shenyang taken as an example, a simulation model of

收稿日期:2023-06-12

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1100705-02);辽宁省教育厅面上项目(LJKZ0577)

作者简介:冯国会(1964—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事建筑节能、相变储能技术及应用、供热空调节能技术、室内空气品质保障技术等方面研究。

the air source heat pump coupled electromagnetic energy heating system is established by Trnsys software and verified by the measured values. Then operating characteristics of this system during the heating season were thoroughly discussed, and compared with air source heat pump and electromagnetic energy heating system respectively. The results show that this simulation model is reliable, and the relative error of the simulation results can be controlled within 15%. During the heating season, the average indoor temperature can be maintained at 17.97 ~ 21.84 °C; the COP of the air source heat pump coupled electromagnetic energy heating system increases by 59.17% than that of the electromagnetic energy heating system, and the CO₂ emission of the air source heat pump coupled electromagnetic energy heating system is reduced by 1.47% and 59.50% compared with the air source heat pump and electromagnetic energy heating system respectively. So the operation and COP change of the air source heat pump coupled electromagnetic energy heating system are more stable than that of other two systems, its environmental benefit is better, and the indoor thermal comfort is higher.

Key words: air source heat pump; electromagnetic energy system; COP; cold area; coupled system

传统供热方式能耗大、环境污染严重一直是我国北方地区面临的主要问题之一。数据显示,我国北方地区城乡建筑取暖总面积达 206 亿 m², 83% 采用燃煤取暖, 年消耗 4 亿 t 标准煤, 占一次能源消费的 9.17%, 其中约 2 亿 t 标准煤为污染严重的散烧煤, 烟尘产生总量相当于工业用煤的 2.7 倍。因此, 推进北方地区建筑冬季清洁供暖对我国民生工程有重要的促进作用^[1-2]。周光辉等^[3]对供热季不同运行工况下太阳能耦合空气源热泵进行试验研究, 结果表明, 耦合系统相比单一热源具有优势, 能源利用系数 (Coefficient of Performance, COP) 提高了 25%, 即使在恶劣的低温环境下制热量依然有所提高。赵建康等^[4]对空气源热泵供热系统的适宜性、运行成本、供热效果进行了试验研究与理论分析, 以散热器作为末端供热时, 系统 COP 为 2.83, 室内供热温度在 16 ~ 18 °C, 结果表明: 该系统运行稳定、节能性与经济性可观, 具有一定的应用前景。K. Katja 等^[5]利用数值模拟研究了电磁感应加热对壳内流体自然对流的影响。R. Sonke 等^[6]提出了一种电磁加热系统的轨迹规划方法, 优化了执行器的电激励和空间配置。电能的空间供热中的应用研究主要集中在运行策略上, 冯国会等^[7]针对应用电磁能系统和空气

源热泵系统进行了模拟研究。目前诸多学者对空气源热泵系统运行、空气源热泵耦合太阳能系统等模拟和试验的研究已较为深入, 但缺乏对空气源热泵耦合电磁能系统进行模拟和试验, 并进行综合能效分析等方面的研究。

综上所述, 笔者基于沈阳市某住宅建筑中的空气源热泵耦合电磁能供热系统 (简称耦合供热系统) 实例, 建立了耦合系统和空气源热泵系统的仿真模型。在保证室内热舒适的前提下以节约系统整体能耗、运行稳定为目标, 对系统进行合理调控, 使系统运行性能达到最佳, 为空气源热泵耦合电磁能供热系统在严寒地区的推广应用提供参考。

1 典型建筑及负荷

1.1 建筑概况

该住宅建筑位于辽宁省沈阳市, 该市处于中国建筑热工分区中的严寒地区, 属温带半湿润大陆性气候。该建筑的平面图如图 1 所示, 建筑面积 150 m²。该建筑围护结构热工参数如表 1 所示, 符合《农村居住建筑节能设计标准》(GB/T 50824—2013) 要求^[8], 供热期从 11 月 1 日到次年 3 月 31 日, 利用 Dest 软件对建筑负荷计算获得逐时热负荷, 用以指导整个系统的选型与计算, 结果如图 2 所示。全年累计热负荷 9 230 kW·h, 最大

逐时热负荷值为 9.26 kW。

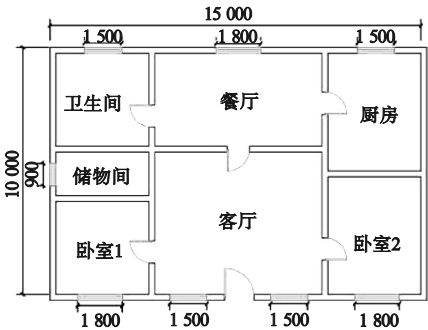


图1 建筑平面简图

Fig. 1 Floor plan schematic of civil building

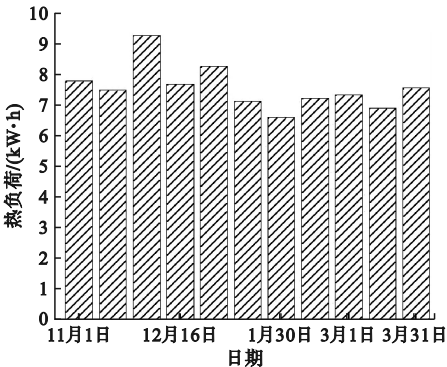


图2 建筑全年逐时热负荷

Fig. 2 An hourly heat load of the building throughout the year

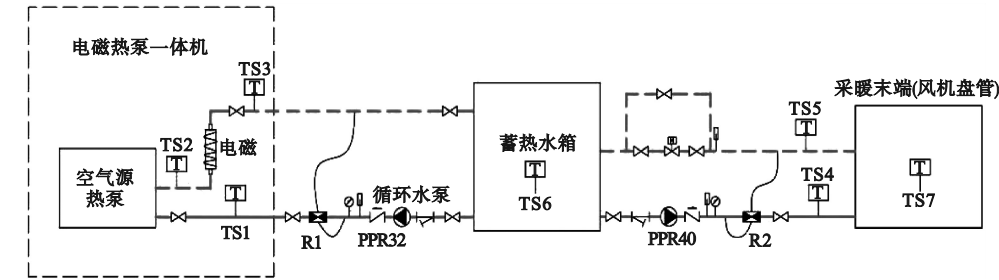


图3 空气源热泵耦合电磁能供热系统图

Fig. 3 Schematic diagram of air source heat pump coupled electromagnetic energy heating system

表2 主要应用设备参数及数量

Table 2 Main application equipment parameters and its amount		
设备名称	参 数	数量/台
空气源热泵耦合电磁能系统供热装置	制热量 9.70 kW, 额定功率 2.70 kW; 电磁能系统制热功率 9 kW	4
普通蓄热水箱	体积 2.00 m ³ , 1 000 × 1 000 × 2 000 mm, 保温层厚度 80 mm	1
机组侧循环水泵	流量 1 m ³ /h, 扬程 10.00 m, 功率 0.12 kW	2(1 用 1 备)
用户侧循环水泵	流量 3 m ³ /h, 扬程 25.00 m, 功率 0.25 kW	2(1 用 1 备)

空气源热泵和电磁能供热系统既可独立作为供热热源,也可以同时作为热源,因此,

表1 围护结构热工参数表

Table 1 The thermal parameters of the envelope structure		
结构	材质构造	W/(m ² ·K)
外墙	水泥砂浆 + 红黏土砖 + 水泥砂浆	1.0
屋顶	双坡屋顶,上铺琉璃瓦	0.5
外窗	双层真空玻璃,均采用断桥铝合金窗框	2.0
外门	双开玻璃门	2.1

1.2 运行原理

空气源热泵耦合电磁能供热系统如图3所示,供回水设计温度为 45/40 ℃。末端风机盘管输出额定功率为 2.70 kW(4 台)。该自动控制供热系统可实现手动操作与线上调控三种运行模式,通过监测平台可实现线上参数设置、数据及故障查看等功能,可实时读取蓄放热侧供回水温度和室内外温度变化值、各环路中热量值、电量表中的电量值等,以及对运行模式的选取。主要设备参数及数量如表 2 所示。

设立以下 3 种运行模式。
模式 1:空气源热泵供热系统。室外温

度较高时,空气源热泵能效高,空气源热泵单独进行蓄热或者直接供热,可满足用户供热需求。

模式2:电磁能供热系统。由电磁加热器直接对蓄热水箱进行补热,可利用谷电蓄热,满足供热需求。

模式3:耦合供热系统。随着室外温度的下降,建筑热负荷随之增加,原有的蓄热量难以满足建筑的供热需求,此时空气源热泵和电磁能系统耦合运行,共同工作可满足室内供热需求。

2 系统仿真模型

2.1 Trnsys 模型

2.1.1 空气源热泵数学模型

当空气源热泵系统处于制热条件下,根据热泵的进口空气温度与流体进口温度等参数,用户可以将相应的外部文件数据输入到空气源热泵模型,可计算出空气源热泵的能效比,计算方法如下^[9]:

$$K_{\text{cop}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

式中: P_{out} 为空气源热泵的输出功率,kW; P_{in} 为空气源热泵的输入功率,kW; K_{cop} 为空气源热泵的COP。

2.1.2 蓄热水箱数学模型

蓄热水箱的蓄热量^[10]:

$$Q_N = \rho V C \frac{dT}{d\tau} \quad (2)$$

式中: ρ 为水的密度,kg/m³;V为蓄热水箱的容积,m³;dT为水箱中在时间间隔dτ内的水温变化;C为水的比热容,J/(kg·K)。

2.1.3 电磁加热装置数学模型

尽管电磁能系统加热装置在运行中涉及电容器和线圈,但最终产出的表现形式是热量,因此,电磁加热装置产热量^[11]:

$$Q_E = \begin{cases} 0, & T_s > T_E; \\ R_E T_{\eta_i}, & T_s \leq T_E. \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_E 为电磁加热装置产热量,J; R_E 为电

磁能系统加热装置加热功率,W; T 为加热时间,s; η_i 为加热效率。

电磁加热的COP小于1时,罐壁、管壁或釜壁会直接感应交变磁场,并主动发热。在匹配良好的变频主机中,电能转化为热能的过程中自身损耗极小,小于1%,而线圈损耗约为1%~4%。

2.1.4 环境效益模型

以标准煤为常规能源,通过计算系统的常规能源替代量来评价空气源热泵电磁能供热系统的节能效益,系统的常规能源替代量为^[13]

$$Q_{\text{TR}} = Q_T - Q_R \quad (4)$$

式中: Q_{TR} 为常规能源替代量,MJ; Q_T 为以煤为能源传统供热系统的总能耗,MJ; Q_R 为耦合系统的总能耗,MJ。

传统供热系统总能耗按下式计算:

$$Q_T = \frac{Q_H}{\eta_i \sigma} \quad (5)$$

式中: Q_H 为建筑全年累计热负荷,MJ; σ 为标准煤系数,取 $\sigma = 29.3$; η_i 为传统能源下的运行效率,燃煤取0.7^[12]。

采用Dest软件计算得出全年累计热负荷为9230 kW·h,不同运行策略对应的系统能耗不同,将按照系统综合能效和耗电量分别进行计算:

$$Q_R = \frac{D Q_H}{3.6 K_{\text{cop}}} \quad (6)$$

式中: D 为每度电折合所耗标准系数, $D = 0.1229$ ^[12]。

环境效益是检验可再生能源利用的重要因素。同样,采用常规能源替代量方法,可以计算出耦合供热系统的CO₂、SO₂、粉尘的减排量^[12]:

$$M_{\text{co}_2} = Q_{\text{TR}} V_{\text{co}_2} \quad (7)$$

式中: M_{co_2} 为耦合系统的CO₂减排量,kg; V_{co_2} 为CO₂排放因子,kg/MJ,取2.47。

$$M_{\text{so}_2} = Q_{\text{TR}} V_{\text{so}_2} \quad (8)$$

式中: M_{so_2} 为耦合系统的SO₂减排量,kg; V_{so_2}

为 SO₂ 排放因子,kg/MJ,取 0.02。

$$M_{fc} = Q_{TR} V_{fc} \tag{9}$$

式中: M_{fc} 为耦合系统的粉尘减排量,kg; V_{fc} 为粉尘排放因子,kg/MJ,取 0.01。

2.1.5 Trnsys 模型的建立

使用 Trnsys 软件建立仿真模型,通过模拟分析,可以得出各个设备的能耗、供热量和

COP 等供热参数曲线。整个供热期为151 d,为了获得更准确的结果,将模拟步长调节为 0.125 h,对系统进行全过程模拟研究。图 4 (a)为耦合供热系统仿真模型,也可以实现电磁能系统的单独运行模式;为了对比分析,单独建立了空气源热泵供热系统的仿真模型作为参考,如图 4(b)所示。

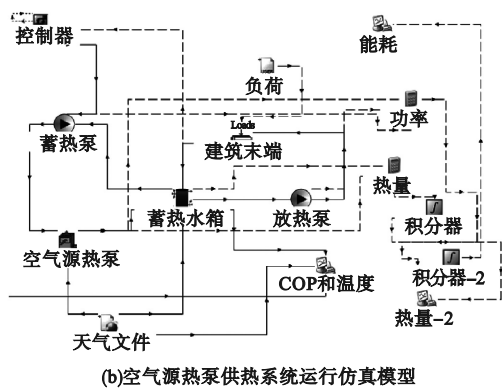
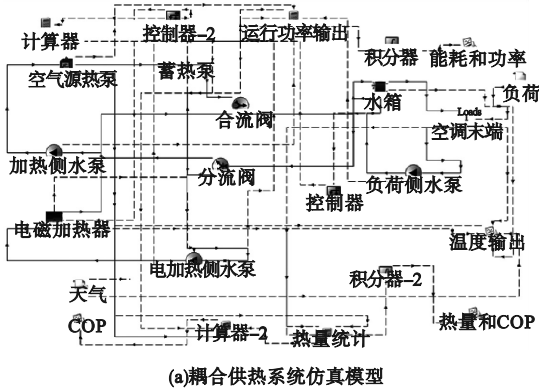


图 4 不同供热系统的仿真模型

Fig. 4 Simulation models for the different heating system

2.2 系统的控制策略

仿真模型的具体逻辑控制如下:由于建筑热负荷是在满足相应室内供热温度下得到的模拟值,因此模拟控制以蓄热水箱为主要控制对象。设计供热温度为45℃,供回水温差为5℃,对水箱向末端的出口温度进行监控,若水箱出口温度大于46℃,关闭空气源热泵,关闭循环泵;当水箱出口温度小于43℃,开启空气源热泵,开启循环泵;当空气源热泵开启时,水箱出口温度小于40℃时,开启电磁能系统加热器进行加热;当水箱出口温度大于45℃且小于50℃时,关闭电磁加热器。

2.3 试验数据选取

测试时间段为 2022 年 12 月 31 日—2023 年 2 月 1 日,共 33 d。因为最冷月的数据最具有代表性,若该系统在最冷月时可以满足热量需求,则其余时间也能满足。如图 5 所示,1 月系统累计耗电量为1 640 kW·h,耗电量较大,主要是由于从 12 月末开始,室外温度逐渐降低,末端需求量逐渐增加,在一

定程度上加大了耗电量。耦合供热系统累计供热量为 3 609 kW·h,单日供热量最大值为 180 kW·h,最小值为 102 kW·h。

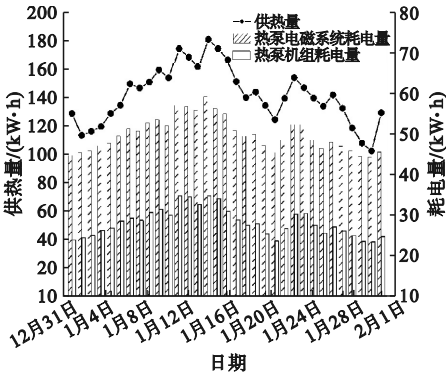


图 5 实测期间耦合供热系统供热量与耗电量变化情况

Fig. 5 Change of heat supply and power consumption of the coupled heating system during the measured period

图 6 为实测期间环境及供回水温度变化情况。室外平均温度为 -15.43℃,室外日最低温度为 -24.10℃,室外日最高温度为 -9.20℃。室内平均温度为 19.69℃,耦合供热系统的供回水温度变化随着室外温度的

变化波动。耦合供热系统的供回水流量基本保持在 $1\text{ m}^3/\text{h}$;耦合供热系统供水温度平均为 $43.27\text{ }^{\circ}\text{C}$,末端回水温度平均为 $38.59\text{ }^{\circ}\text{C}$;供回水温差保持在 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

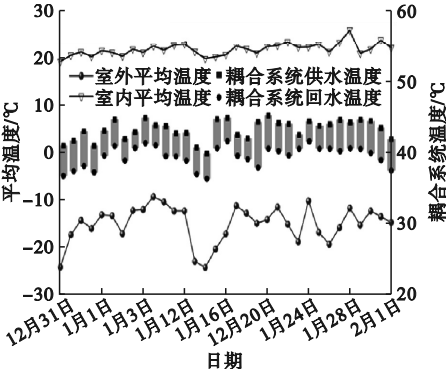


图6 实测期间耦合供热系统环境及供回水温度变化情况

Fig. 6 Environment of the coupled heating system and temperature change of water supply and return in this system during the measured period

2.4 模型验证

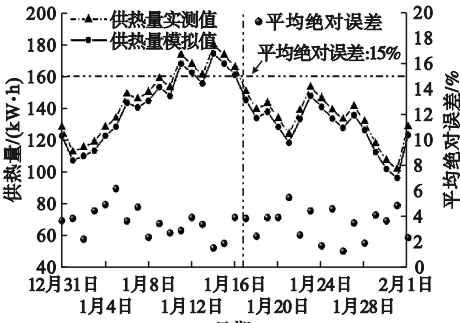
以1月为例,用实测数据验证 Trnsys 模型模拟值的准确性,各设备参数值误差精度如表3所示。

表3 模拟结果与实测值对比

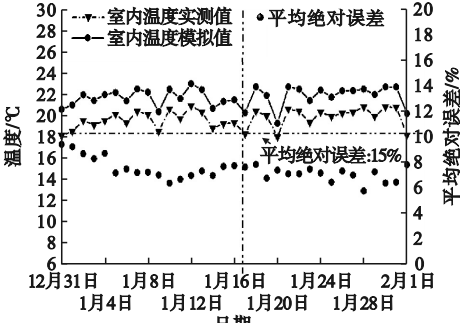
Table 3 Comparison of the simulation results and the measured values

结果	系统制热量/(kW·h)	系统COP	室内平均温度/℃	供水平均温度/℃	回水平均温度/℃
模拟值	140	2.37	21.75	44.65	39.98
实测值	135	2.20	19.69	43.27	38.59

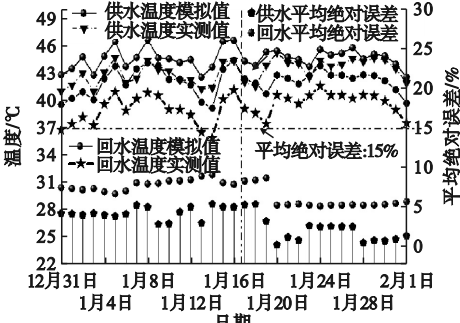
图7为模拟结果和实测值对比结果,两者误差最小者为系统供水平均温度,误差为3.19%,两者误差最大者为室内平均温度,误差为10.46%,应适当调整模拟的围护结构传热系数设置,减小误差。测量环境的温度、气压、空气湿度以及风力等因素是动态变化的,导致测量过程中可能会出现偶然误差^[13];但误差范围均在15%以内,仿真结果基本达到了要求,验证了耦合供热系统模型的可行性。



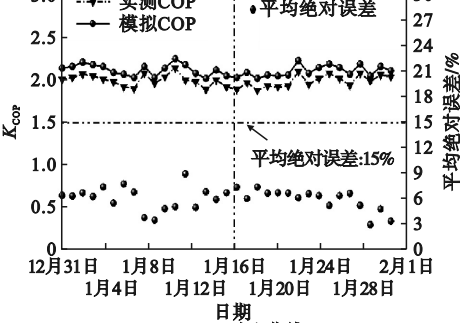
(a)热量对比曲线



(b)室内温度对比曲线



(c)供回水温度对比曲线



(d)COP对比曲线

图7 模拟值与实测值对比结果
Fig. 7 Comparison of simulated values and measured values

3 结果与分析

3.1 能耗分析

图8为三种供热模式COP对比。供热

期耦合供热系统的COP均值为2.40,耦合系统COP从11月的2.48逐渐降至1月的2.16,然后一直上升,至3月,最高值为2.56,这表明,系统的COP受室外温度的影响较大。电磁能系统加热器的COP稳定在0.98,与电磁能供热系统相比,耦合供热系统的COP可以提高2~3倍。

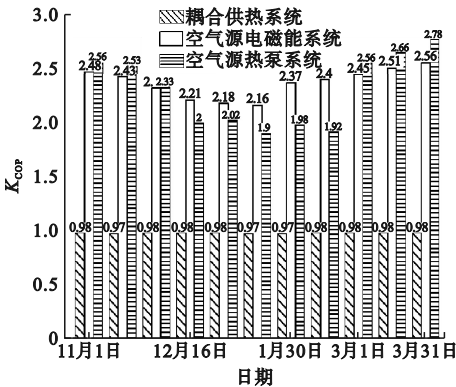


图8 三种模式COP对比

Fig.8 COP of the three systems

图9为三种模式的能耗对比。从图9中可以看出,三种模式的能耗变化明显,即首先出现高峰,然后回落。当使用电磁能供热系统时,月平均使用能耗要远远高于耦合供热系统,特别是12月、1月、2月,这种现象的出现是由于当室外温度降低时,室内外温差大,对热负荷的要求更高。例如1月,电磁能供

热系统能耗为3197kW·h,耦合供热系统能耗为1568kW·h;而在11月和3月,室外温度较高,房屋的散热量减少,因而供热系统的能耗有明显的降低趋势。

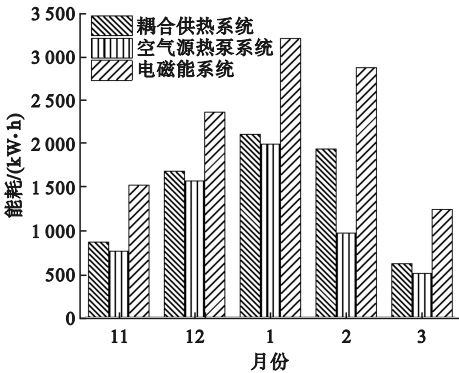


图9 三种模式能耗对比

Fig.9 The energy consumption of the three systems

3.2 环境效益分析

常规能源替代量和耗煤量作为评价耦合供热系统的一个重要参数,它指耦合供热系统节能的能力。这样,可用系统的常规能源替代量来评价耦合供热系统的环境效益,根据式(4)~(9)可以计算出各种模式的能耗和CO₂、SO₂、粉尘减排量,结果如表4所示。统一设定系统的使用年限为15a,可以看出,耦合供热系统CO₂、SO₂、粉尘的减排效果非常明显。

表4 环境效益评价

Table 4 Evaluation of environmental benefits

模 式	以煤为传统系统的总能耗/MJ	运行系统总能耗/MJ	CO ₂ 减排量/kg	SO ₂ 减排量/kg	粉尘减排量/kg
空气源热泵运行系统	1 606	491	2 755	22. 31	11. 15
空气源热泵耦合电磁能系统	1 606	474	2 796	22. 64	11. 32
电磁能运行系统	1 606	1 148	1 132	9. 17	4. 59

4 结 论

(1)耦合供热系统供回水温度在38~

46.48℃波动。平均供水温度为43.16℃,平均回水温度为39.30℃,室内温度保持在17.97~21.84℃,具有良好的室内热舒适性。

(2)空气源热泵耦合电磁能系统 COP 为 2.40,空气源热泵供热系统在 11 月、3 月虽然有较高的能效,但在供热季 1 月存在机组停止运行的状况,且受室外温度的影响,COP 变化相差较大,系统运行不稳定;电磁能系统 COP 为 0.98,耦合供热系统相比于电磁能系统 COP 提高了 59.17%,耦合供热系统比空气源热泵和电磁能供热系统更稳定。

(3)在使用寿命为 15 a 的情况下,耦合供热系统的能耗比电磁能供热系统少 3 975 kW·h,耦合供热系统 CO₂ 减排量比空气源热泵供热系统和电磁能供热系统分别增加 1.47% 和 59.50%,耦合供热系统具有更好的节能性、环保性。

参考文献

[1] 江亿. 中国建筑能耗研究报告 2020 [J]. 建筑节能(中英文),2021,49(2):1-6.
(JIANG Yi. Research report on energy consumption of building in China 2020 [J]. Building energy conservation (in Chinese and English),2021,49(2):1-6.)

[2] LOWE R J, DRUMMOND P. Solar, wind and logistic substitution in global energy supply to 2050 Barriers and implications [J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2022, 153: 111720.

[3] 周光辉,刘寅,张岑,等. 太阳能辅助空气源复合热泵冬季供热特性试验研究[J]. 太阳能学报,2011,32(11):1662-1665.
(ZHOU Guanghui, LIU Yin, ZHANG Cen, et al. Experimental study on heating performance of a solar assistant air source heat pump [J]. Acta energy solaris sinica,2011,32(11):1662-1665.)

[4] 赵建康,高沛洋,王敬民,等. 户式空气源热泵散热器供热系统在北京农村地区的典型示范应用案例[J]. 制冷与空调,2017,17(3):85-89.
(ZHAO Jiankang, GAO Peifeng, WANG Jingmin, et al. Application of household air source heat pump radiator heating system in Beijing area [J]. Refrigeration and air-conditioning,2017,17(3):85-89.)

[5] KATJA K, URBAN T, BLAZ J, et al. New frontiers in magnetic refrigeration with high

oscillation energy-efficient electromagnets [J]. Applied energy,2019,236(12):1062-1077.

[6] SONKE R, KNUT G. Constrained trajectory planning and actuator design for electromagnetic heating systems [J]. Control engineering practice,2018,74:191-203.

[7] 冯国会,刘彦廷,李旭林,等. 空气源热泵-电磁能系统耦合供热系统模拟研究[J]. 建筑节能(中英文),2021,49(8):139-144.
(FENG Guohui, LIU Yanting, LI Xulin, et al. Simulation of air source heat pump coupling electromagnetic energy heating system [J]. Building energy efficiency,2021,49(8):139-144.)

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 农村居住建筑节能设计标准: GB/T50824—2013 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
(Ministry of Housing and Urban Rural Develepment of the People's Republic of China. Energy efficiency design standard for of rural residential buildings: GB/T50824—2013 [S]. Beijing: China & Architectare Building Press,2013.)

[9] ZHANG S, CHEN W. China's energy transition pathway in a carbon neutral vision [J]. Engineering,2022,14:64-76.

[10] SALMAN H. HAMMAD I. Tempering of water storage tank temperature in hot climates regions using earth water heat exchanger [J]. Thermal science and engineering progress, 2018(6):157-163.

[11] 王刚. 农宅太阳能耦合电磁能供热系统优化与案例分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2022.
(WANG Gang. Optimization and case analysis of solar coupled electromagnetic heating system for rural buildings [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2022.)

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 可再生能源建筑应用工程评价标准: GB/T50801—2013 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Develepment of the People's Republic of China. Evaluation standard for renewable energy in buildings: GB/T50801—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.)

[13] LIU Z, LIU Y, WU D, et al. Performance and feasibility study of solar-air source pump systems for low-energy residential buildings in Alpine regions [J]. Journal of cleaner production,2020,256:120735.

(责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)