

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201901046



空气源热泵及辅助电加热地板 辐射采暖系统耦合优化

王洋涛¹, 赵润俐², 田琦¹, 董旭³, 武斌¹

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600;

2. 山西省建筑节能监管中心, 山西 太原 030000;

3. 青岛海尔空调器有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 从节能性和经济性两方面综合考虑, 提出单价能效系数的概念, 并根据系统单价能效系数选择空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统. 利用瞬态系统模拟程序(TRNSYS), 构建复合采暖系统仿真模型, 并以太原地区住宅为例, 优化空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统的耦合方式. 研究表明: 当空气源热泵占建筑供暖设计热负荷 60%, 辅助电加热设备占 40% 时, 整个采暖系统单价能效系数最高, 性价比最好.

关键词: 空气源热泵; 辅助电加热; 复合采暖系统; 单价能效系数

中图分类号: TU 832.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)05-0661-07

Coupling Optimization for Air Source Heat Pump and Auxiliary Electric Heating Floor Radiant Heating System

WANG Yangtao¹, ZHAO Runli², TIAN Qi¹,
DONG Xu³, WU Bin¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China;

2. Shanxi Building Energy Conservation Supervision Center, Taiyuan 030000, China;

3. Qingdao Haier Air Conditioner Limited General Company, Qingdao 266000, China)

Abstract: Considering the two aspects of energy saving and economy, the concept of unit price energy efficiency coefficient is proposed, and the air source heat pump and auxiliary electric heating compound heating system are selected according to the unit price energy efficiency coefficient of the system. The simulation model of the composite heating system is constructed by using the transient system simulation program (TRNSYS). Taking the residential area in Taiyuan as an example, the coupling mode of air source heat pump and auxiliary electric heating composite heating system is optimized. The research results show that when the air source heat pump accounts for 60% of the building heating design heat load and the auxiliary electric heating equipment accounts for 40%, the unit heating system has the highest unit energy efficiency coefficient and the best cost performance.

Keywords: air source heat pump; auxiliary electric heating; composite heating system; unit price energy efficiency coefficient

收稿日期: 2019-01-22

通信作者: 田琦(1966-), 男, 教授, 博士, 主要从事可再生能源利用及建筑节能新技术的研究. E-mail: 412559908@qq.com.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ04B02)

目前,我国北方地区城镇供暖能耗占建筑能耗的 22%^[1],低温热水地板辐射采暖系统以辐射为主的换热方式向室内供暖,具有卫生、舒适性强等特点,比传统供暖方式节能 20%~30%^[2]. 冬季应用空气源热泵从室外空气中提取热量制取热水,可稳定地向室内进行低温热水地板辐射采暖^[3-7],因其具有适用范围广、高效节能及清洁环保的优点,受到很多专家、学者的关注^[8-18]. 然而,空气源热泵机组显著的缺点是供需不匹配,即在整个供暖期,随着室外温度的降低,室内热负荷需求逐渐增大,其机组制热量却逐渐降低. 为了解决这一矛盾,通常需要添加辅助电加热设备,以提高热泵机组运行的可靠性. 为了合理配置热泵机组与辅助电加热设备,文献[19-20]提出最佳经济平衡点和最佳能量平衡点的概念,王绍瑞^[21]研究以低谷电为辅助热源的设备容量的确定方法. 综上可知,目前的研究侧重于复合采暖系统经济性或节能性的分析,缺乏综合两种因素的研究. 本文考虑节能性和经济性综合评价指标,优化空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统的耦合方式.

1 单价能效系数

美国能源部和美国空调与制冷协会(ARI)推荐制热季节性能系数^[22]作为评价机组性能的指标. 制热季节性能系数反映系统的节能情况,制热季节性能系数越高,表明系统节能性越好. 动态费用年值评价方法是在项目生命周期内,将每年的现金流出量按照标准收益率换算,累计至项目生命周期原点,成为费用现值,再将费用现值按照年均制分摊至项目生命周期内,成为费用现值年金化的等额年值的评价方法^[23]. 动态费用年值反映系统经济情况,动态费用年值越低,表明系统经济性越好. 对于空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统,综合考虑节能性与经济性两方面因素,最终提出一个复合采暖系统评价指标,即单价能效系数,其计算式为

$$\chi = \zeta_{\text{HSPF}} / Z_{\text{d}}. \tag{1}$$

式(1)中: χ 为单价能效系数; ζ_{HSPF} 为制热季节性能系数; Z_{d} 为动态费用年值.

单价能效系数表示系统单位价格下的节能情况,系统单价能效系数越高,表示系统在相同价格的情况下节能性越好,性价比越高;相反,则表示系统在相同价格的情况下,节能性越差,性价比越低.

1.1 制热季节性能系数

美国能源部和美国空调与制冷协会提出用温度频段法估算 ζ_{HSPF} ^[24],估算表达式为

$$\zeta_{\text{HSPF}} = \frac{\sum Q_j(\theta_j) \times n_j}{\sum W_j(\theta_j) \times n_j}. \tag{2}$$

式(2)中: θ_j 为相应地区典型年制热季节各时刻出现的温度,℃; $Q_j(\theta_j)$ 为温度 θ_j 时机组制热运行的供热量,kW; $W_j(\theta_j)$ 为温度 θ_j 时机组制热运行的耗电量,kW; n_j 为温度 θ_j 在制热季节中出现的时间,h.

1.2 动态费用年值

动态费用年值的计算公式^[25]为

$$Z_{\text{d}} = \frac{i(1+i)^m}{(1+i)^m - 1} \cdot K + C. \tag{3}$$

式(3)中: Z_{d} 为按动态法计算的年计算费用,万元·a⁻¹; i 为年利率,取 6%^[8]; K 为设备初投资,万元; C 为年运行费,万元·a⁻¹; m 为供热设备使用寿命年限,取 15 a^[8].

空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统的设备初投资一般包括设备的购置费用和增容费. 有

$$K = C_{\text{eq}} + C_{\text{Z}}. \tag{4}$$

$$C_{\text{eq}} = P_{\text{hp}} N_{\text{hp}} + P_{\text{b}} N_{\text{b}}, \tag{5}$$

$$C_{\text{Z}} = P_{\text{ez}}(W_{\text{hp}} + W_{\text{eb}}). \tag{6}$$

式(4)~(6)中: C_{eq} 为设备购置费,万元; C_{Z} 为增容费,万元; P_{hp} 为单位铭牌制热量对应热泵价格,万元·kW⁻¹; N_{hp} 为热泵铭牌制热量,kW; P_{b} 为单位铭牌制热量对应的辅助电加热设备价格,万元·kW⁻¹; N_{b} 为辅助电加热设备铭牌制热量,kW; P_{ez} 为单位功率电力增容费,万元·kW⁻¹; W_{hp} 为热泵机组铭牌输入功率,kW; W_{eb} 为辅助电加热设备的铭牌输入功率,kW.

空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统的年运行费用 C 一般包括系统运行能耗费用、设备折旧费

和设备维修费 3 个部分,即

$$\left. \begin{aligned} C &= C_{yx} + C_{zj} + C_{wx}, & C_{yx} &= P_e(W_s + W_{sq}), \\ C_{zj} &= \frac{K(1-j)}{m}, & C_{wx} &= 0.01K. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)中: C_{yx} 为运行能消耗费用,万元; C_{zj} 为设备折旧费,万元; C_{wx} 为设备维修费,万元; P_e 为电价,万元· $(\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$; W_s 为整个供暖季节热泵机组耗功量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; W_{sq} 为整个供暖季节辅助电加热设备耗功量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; j 为预计净残值率,取 4%^[26]. 目前,我国尚无量化的空调供暖系统日常维修费用计算方法,为简化计算,维修费用按设备初投资的 0.01^[27]计算.

从以上分析可知,单价能效系数的目标函数是众多变量的函数,但实际上,针对某一地区,当房间维护结构特性、室内设计参数、供暖室外设计温度、热泵机组的特性、年利率、供热设备使用寿命年限和预计净残值率等确定后,单价能效系数只是空气源热泵与辅助电加热不同耦合方式的单值函数. 对式(1)求最大值,其对应的复合采暖系统的耦合方式即是单价能效系数最高的耦合方式.

2 复合采暖系统仿真模型的构建

利用瞬态系统模拟程序(TRNSYS)构建复合采暖系统仿真模型,模型采用模块化的动态模拟程序. 所有系统均由若干小模块组成,某一模块实现特定的功能. 利用 TRNSYS 软件模拟分析时,只要调用实现这些特定功能的模块,给定输入条件,就可以对系统进行模拟分析^[28].

2.1 复合采暖系统的物理模型

空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统物理模型,如图 1 所示. 图 1 中:复合采暖系统主要由热泵机组、辅助电加热设备、机组侧水泵、水箱、用户侧水泵、供暖用户组成. 热泵机组和辅助电加热设备串联组成复合采暖系统的热源. 复合采暖系统有空气源热泵单独供暖、空气源热泵与辅助电加热设备联合供暖两种供暖模式. 辅助电加热设备的主要作用是保证供暖系统的稳定性,当逐时热负荷较大时,空气源热泵机组单独供暖无法满足供暖用户的热量需求,此时,需要启动辅助电加热设备进行联合供暖.

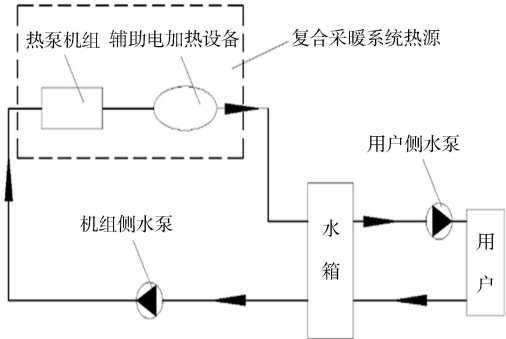


图 1 复合采暖系统物理模型

Fig. 1 Physical model of composite heating system

2.2 复合采暖系统的仿真模型

基于 TRNSYS 软件,根据复合采暖系统物理模型,建立空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统的仿真模型,模型应用的各部件型号,如表 1 所示.

表 1 TRNSYS 仿真模型中主要部件明细
Tab. 1 Detail of main components in TRNSYS simulation model

系统部件	部件型号	测试参数
数据读取器	Type9	不同地区气象参数、不同建筑逐时热负荷
空气源热泵热水机组	Type941	空气源热泵热水机组额定制热量、额定耗功率
辅助电加热	Type659	辅助电加热设备额定耗功率
储热水箱	Type4c	水箱体积
末端用户	Type682	添加系统指定负载以计算出口流体
时间控制器	Type14h	系统运行时间
水泵	Type114	水泵质量流量、扬程
温差控制器	Type2b	温差控制上限和下限

通过 Type9 将建筑所在地区的典型气象年逐时气象数据和建筑逐时热负荷导入模型中,空气源热泵的启停由机组侧回水温度和运行时间共同控制. 当机组侧回水温度低于设定下限值并处于系统运行时间范围内时,热泵开启;当回水温度高于设定上限值或处于系统运行时间范围外时,热泵关闭. 在热泵开启的同时,如果热泵制热量低于建筑逐时热负荷,开启辅助电加热设备. 在系统仿真模型中,回水温度

由 Type2b 温差控制器控制,运行时间由 Type14h 时间控制器控制. 将制热季节性能系数、动态费用年值和单价能效系数的数学模型编入系统仿真模型中,输入空气源热泵和辅助电加热设备机组相关参数、价格、地区电力增容费、电价,系统运行时间等相关参数,最终得到复合采暖系统仿真模型,如图 2 所示.

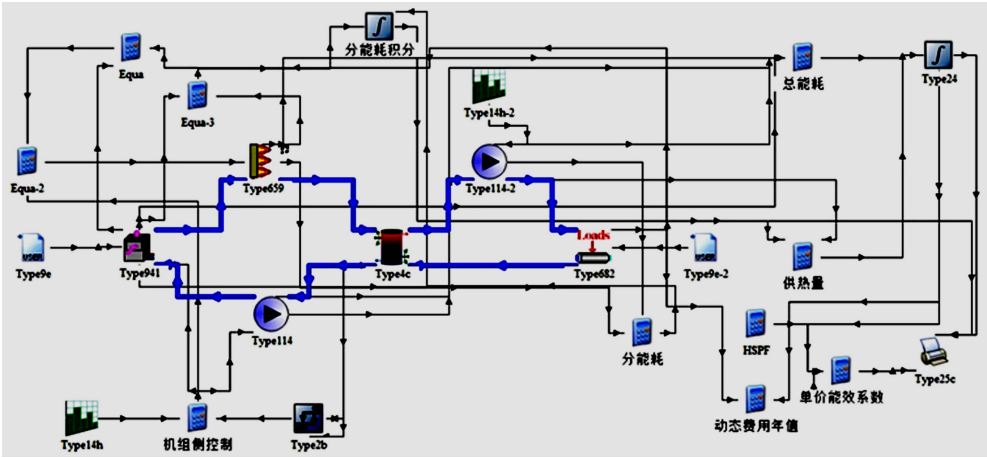


图 2 复合采暖系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of composite heating system

3 复合采暖系统仿真模型的验证

3.1 实验概况及方法

室外气象参数,如图 3 所示. 图 3 中: H 为湿度(相对湿度); θ 为温度; t 为时间. 在实验室建立空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统,以验证仿真模型的准确性. 实验建筑面积为 153 m^2 ,供暖热负荷为 6.3 kW ,房间设定温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. 选用 NE-C3BZ-B2 型空气源热泵机组,机组额定制热量为 5.39 kW ,额定功率为 2.3 kW ,辅助电加热设备额定功率为 1 kW . 室内外气象参数采用 ETH-P 型环境试验设备智能多路巡检仪进行测量,其温度误差为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度误差为 $\pm 5\%$. 空气源热泵与辅助电加热耗电量均采用电子式单相表测量,复合采暖系统供热量采用 JQCR-20 型超声波热量表(2 级精度)测量,实验时间为 2018 年 12 月 24 日—2019 年 1 月 2 日.

3.2 实验数据及误差分析

需要验证的参数为复合采暖系统的空气源热泵功率、辅助电加热功率、复合采暖系统供热量. 复合系统的能耗(Q),如图 4 所示. 复合采暖系统供热量(P)的实验值与模拟值,如图 5 所示.

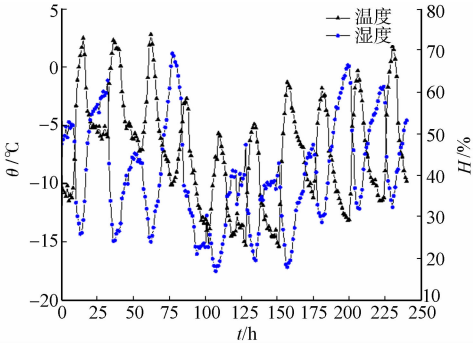


图 3 室外气象参数

Fig. 3 Outdoor weather parameters

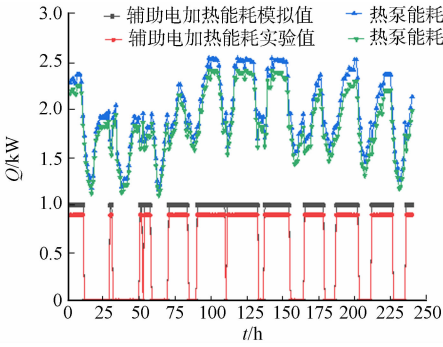


图 4 复合系统能耗

Fig. 4 Energy consumption of composite system

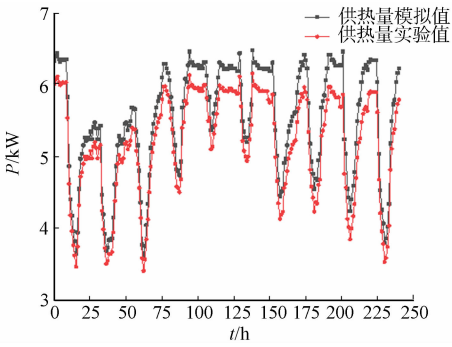


图 5 复合系统供热量

Fig. 5 Heat of composite system

由图 4,5 可知:空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统的能耗和供热量的模拟数据与实验数据存

在一定误差,这是测试过程本身及模型中的某些假设条件造成的,但最大误差均不超过 9.2%,且在允许范围内,验证了复合采暖系统仿真模型的准确性.

4 算例分析

4.1 项目概况

以山西省太原市某住宅楼为例,总供暖面积为 1 200 m²,热负荷为 45.84 kW,建筑为 6 层,层高为 3 m,总高度为 18 m,室内采用地板辐射采暖系统.太原市整个供暖季(11 月 1 日至次年 3 月 31 日,共 5 个月)全天 24 h 不间断地供暖,根据 JGJ 142—2012《辐射供暖供冷技术规程》^[29],设置供水温度为 35 ℃.不同品牌的设备价格差别较大,对空气源热泵机组和辅助电加热设备取平均价格,分别为 3 000,649 元·kW⁻¹.太原地区电力增容费取 1 000 元·kW⁻¹,电价为 0.487 元·(kW·h)⁻¹.

4.2 复合采暖系统不同耦合方式的设备选型

供暖室外,在计算温度为-10.1 ℃的条件下,建筑热负荷为 45.84 kW,空气源热泵分别按占比(γ) 0%,15%,30%,45%,60%,75%,90%,100%承担热负荷,辅助电加热设备承担剩余热负荷,并进行 8 组运行工况的模拟.复合采暖系统不同耦合方式的设备选型,如表 2 所示.

表 2 复合采暖系统不同耦合方式的设备选型

Tab. 2 Different coupling mode equipment selection of composite heating system		kW							
设备	参数	γ							
		0%	15%	30%	45%	60%	75%	90%	100%
热泵机组	额定制热量	0	6.80	13.70	20.60	27.50	34.40	41.20	45.84
	额定耗功率	0	2.90	5.80	8.70	11.70	14.60	17.50	19.50
辅助电加热	功率	45.84	39.04	32.14	25.24	18.34	11.46	4.64	0

4.3 复合采暖系统耦合方式的节能性与经济性分析

4.3.1 复合采暖系统节能性分析 在整个供暖季,空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统在不同耦合方式下的系统运行能耗,如表 3 所示.

表 3 复合采暖系统不同耦合方式的能耗

Tab. 3 Energy consumption of composite heating system with different coupling modes		kW·h							
参数		γ							
		0%	15%	30%	45%	60%	75%	90%	100%
辅助电加热能耗		47 289	31 230	15 671	4 321	931	402	131	0
空气源热泵能耗		0	5 665	10 700	13 918	14 709	15 102	15 360	15 468
系统总能耗		47 289	36 895	26 371	18 239	15 640	15 504	15 491	15 468
ζ_{HSPF}		0.99	1.25	1.70	2.35	2.68	2.69	2.70	2.71

由表 3 可知:随着空气源热泵机组在供暖系统中所占比例的增加,复合采暖系统制热季节性能系数逐渐升高;当空气源热泵机组占整个供暖设计热负荷的 100%时,系统的制热季节性能系数 ζ_{HSPF} 最高.这是由于同一建筑物的供热量相同,而相较于电加热设备,空气源热泵机组是一种高能效比的供热设备,随着空气源热泵机组占比的不断增加,系统总能耗逐渐降低.

4.3.2 复合采暖系统经济性分析 复合采暖系统不同耦合方式的动态费用年值,如表 4 所示.

表 4 复合采暖系统不同耦合方式的动态费用年值

Tab. 4 Dynamic cost annual value of composite heating system with different coupling modes		万元							
参数		γ							
		0%	15%	30%	45%	60%	75%	90%	100%
系统初投资		7.56	8.76	9.99	11.21	12.44	13.66	14.87	15.70
年运行费用		2.86	2.44	2.02	1.71	1.68	1.76	1.85	1.91
动态费用年值		3.64	3.34	3.05	2.87	2.96	3.17	3.38	3.53

由表 4 可知:空气源热泵机组较电加热设备初期投资大,随着空气源热泵机组在整个复合采暖系统中所占比例的逐渐增加,系统初投资不断增大;空气源热泵较辅助电加热设备更加节能,用电量更小;由

于折旧费和维修费与系统初投资有关,随着热泵所占比例的不断增加,系统折旧费和维修费逐渐增加;年运行费用随着热泵占比的增加,呈现先减小后增大的趋势;随着空气源热泵机组在采暖系统中所占比例的增加,动态费用年值呈现先减小,后增大的趋势,当空气源热泵机组占整个供暖设计热负荷的 45% 时,系统的动态费用年值最小,经济性最好.

4.4 基于单价能效系数的复合采暖系统耦合方式分析

根据式(1)计算太原地区住宅空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统不同耦合方式的单价能效系数,结果如图 6 所示.

由图 6 可知:对于太原地区住宅的空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统,通过单价能效系数对复合采暖系统进行评价,当空气源热泵机组占整个供暖设计热负荷的 60% 时,系统单价能效系数最高,即在相同价格情况下的节能效果最好,性价比最高.

由表 3,4 和图 6 可知:当热泵占比 γ 为 60% 时,系统单价能效系数高于热泵占比为 100% (系统节能性最好) 和 45% (系统经济性最好) 时的系统单价能效系数,这是由于热泵占比为 60% 时系统的 ζ_{HSPF} 略低于热泵占比为 100% 时的 ζ_{HSPF} ,节能性相差不大,但其动态费用年值远远低于占比为 100% 时的动态费用年值,经济性优势较为明显;系统动态费用年值略高于热泵占比为 45% 时的动态费用年值,经济性相差不大,但其 ζ_{HSPF} 高于热泵占比为 45% 时的 ζ_{HSPF} ,节能优势较为明显. 因此,利用单价能效系数优化复合采暖系统耦合方式兼具节能性与经济性,对于复合采暖系统耦合方式的选择较有指导意义.

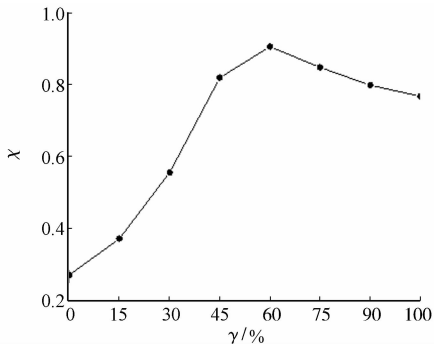


图 6 不同耦合方式系统单价能效系数
Fig. 6 Unit price energy efficiency coefficient of system in different coupling modes

5 结论

- 1) 从节能性和经济性两方面综合考虑,提出单价能效系数的概念,根据系统单价能效系数,选择空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统,可使系统在相同价格情况下节能效果最好,性价比最高.
- 2) 以太原地区住宅为例,利用 TRNSYS 搭建的空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统仿真模型,综合分析符合采暖系统的节能性和经济性. 结果表明:当空气源热泵占供热设计热负荷的 60%,辅助电加热设备占 40% 时,系统单价能效系数最高;空气源热泵占比为 60% 时耦合方式的 ζ_{HSPF} 仅低于空气源热泵占比为 100% (系统节能性最好) 时的 1%,但其动态费用年值却低于后者的 16%;空气源热泵占比为 60% 时耦合方式的动态费用年值仅高于空气源热泵占比为 45% (系统经济性最好) 时的 3%,但其 ζ_{HSPF} 却高于后者的 14%.

参考文献:

[1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2017[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

[2] 王子介. 低温辐射供暖与辐射供冷[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[3] STARK S, LOOSE A, DRÜCK H. Field test results from combined solar thermal and air-source heat pump systems with a special focus on defrosting[J]. Energy Procedia, 2014, 48: 654-663. DOI: 10. 1016/j. egypro. 2014. 02. 076.

[4] 杜彦, 田琦, 杨晋明, 等. 空气源热泵直接地板辐射供暖系统优化运行方式[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 199-204. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2015. 02. 0199.

[5] 黎珍, 田琦, 董旭. 太原地区太阳能耦合空气源热泵一体化热水系统性能分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 670-675. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201612014.

[6] 林辩启, 罗会龙, 王浩, 等. 热泵辅助供热太阳能热水系统运行模式对比分析[J]. 制冷与空调(四川), 2015, 29(6): 706-710. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-6612. 2015. 06. 020.

[7] 王子介. 空气源热泵用于住宅地板辐射供暖的实测研究[J]. 暖通空调, 2003, 33(1): 9-14. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-8501. 2003. 01. 004.

[8] 陈晓宁, 李万勇, 张成全, 等. 低温环境下户式变频空气源热泵地板辐射采暖系统性能测试及分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 1-6.

- 2018,39(1):57-63.
- [9] 丁强,邢长新,江爱朋,等. 热泵供暖系统动态操作节能优化[J]. 化工学报,2015,6:2166-2173. DOI:10.11949/j.issn.0438-1157.20141763.
- [10] 杜海存,叶茂杰,戴源德. 太阳能-空气源热泵直接地板辐射采暖系统的实验研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(20):275-279. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2016.20.050.
- [11] 李元哲,于涛,陈天侠. 空气源热泵地板供暖系统在北方寒冷地区应用的节能性与适用性[J]. 暖通空调,2012,42(2):62-65. DOI:10.3969/j.issn.1002-8501.2012.02.014.
- [12] 许可,王树刚,蒋爽,等. 空气源热泵用于低温热水地板辐射供暖系统的模拟研究[J]. 制冷技术,2014,34(1):12-17. DOI:10.3969/j.issn.2095-4468.2014.01.103.
- [13] 肖益民,付祥钊. 户式空气源热泵地板供暖系统实测分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2009,36(增刊2):14-18.
- [14] 曾章传,吴锦京,魏新利. 空气源热泵直接地板辐射采暖系统实验研究及热力性能分析[J]. 太阳能学报,2011,32(8):1151-1157.
- [15] 吴锦京. 空气源热泵直接地板辐射采暖热舒适及经济性研究[D]. 郑州:郑州大学,2010.
- [16] 马云,蔺洁,陈超,等. 热水地面辐射供暖系统热响应特性实验研究[J]. 暖通空调,2016,46(12):125-131.
- [17] 闫全英,王小,阮振邦. 预制轻薄相变复合供暖地板的构造与研究[J]. 建筑节能,2014,42(11):4-7. DOI:10.3969/j.issn.1673-7237.2014.11.04.
- [18] 刘成林,杨昌智. 低温地板辐射采暖系统中辐射板布置方式的优化[J]. 节能技术,2004,22(2):6-8. DOI:10.3969/j.issn.1002-6339.2004.02.002.
- [19] 姜益强,姚杨,马最良. 空气源热泵供热最佳经济平衡点的探讨[J]. 暖通空调,2001,31(3):39-41. DOI:10.3969/j.issn.1002-8501.2001.03.013.
- [20] 姜益强,姚杨,马最良. 空气源热泵冷热水机组供热最佳能量平衡点的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2001,34(3):83-87.
- [21] 王绍瑞. 基于空气源热泵系统的低谷电辅助热源的应用[J]. 暖通空调,2016,46(7):6-9,5.
- [22] 蒋能照. 空调用热泵技术及应用[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [23] 杜彦. 空气源热泵直接地板辐射供暖系统运行方式及经济性研究[D]. 太原:太原理工大学,2015.
- [24] 龙惟定,范存养. 上海地区使用风冷热泵冷热水机组的经济性分析[J]. 暖通空调,1995,25(5):3-7.
- [25] 吴添祖,虞晓芬,龚建立. 技术经济学概论[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
- [26] 杨庆,侯军霞,高孟理,等. 空气源热泵辅助建筑一体化太阳能热水系统的经济性分析[J]. 给水排水,2007,33(11):193-196. DOI:10.3969/j.issn.1002-8471.2007.11.054.
- [27] 李哲,田琦,郭卫强. 华北地区空气源热泵无水地板采暖系统节能经济性研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(2):228-232. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2014.02.052.
- [28] 蔡颖玲,张华,徐辉,等. 基于 TRNSYS 的岩土热响应测试及影响因素分析[J]. 暖通空调,2016,46(9):135-140.
- [29] 中国建筑科学研究院. 辐射供暖供冷技术规程: JGJ 142—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)