

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-073-06

空气源辅助地源复合式 热泵系统运行控制策略优化研究

陈翔宇 敬丽君 王 军 敬成君

(四川大学建筑与环境学院 成都 610065)

【摘要】 针对空气源辅助地源热泵系统运行控制策略优化问题,提出了一种基于传统地源热泵埋管空调季逐时出口温度,制定符合热泵系统控制运行温度的方法,并以成都市某办公建筑为研究对象,应用 EnergyPlus 模拟软件得到 25°C、26°C、27°C、28°C 和 29°C 不同控制温度下的系统全年运行数据。从土壤热平衡及综合性能分析,得出 25°C 作为控制温度为最优运行控制策略,可以实现土壤热平衡。

【关键词】 复合式热泵系统; 运行策略; 热不平衡率; EnergyPlus

中图分类号 TU834 文献标识码 A

Optimization of Operation Control Strategy for Air Assisted Ground Source Hybrid Heat Pump System

Chen Xiangyu Jing Lijun Wang Jun Jing Chengjun

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, 610065)

【Abstract】 Aiming at the optimization of operation control strategy of air source-assisted ground source heat pump system, this paper proposes a method to control operation temperature in accordance with the heat pump system based on the seasonal hourly outlet temperature of the traditional ground source heat pump (GSHP) underground pipe air conditioning system, and takes an office building in Chengdu as the research object. The annual operating data of the system at different control temperatures of 25°C, 26°C, 27°C, 28°C and 29°C were obtained by using EnergyPlus simulation software. From the analysis of soil heat balance and comprehensive properties, it is concluded that 25°C is the optimal operation control strategy to achieve soil heat balance.

【Keywords】 Compound heat pump system; Operation strategy; Thermal unbalance rate; EnergyPlus

基金项目: 中国公共建筑节能提升项目 (CS-20); 四川省科技计划项目 (2020YFN0016)

作者简介: 陈翔宇 (1995.4-), 男, 硕士研究生, E-mail: 1171769154@qq.com

通讯作者: 王 军 (1983.5-), 男, 博士, 副教授, E-mail: wangjunhvac@163.com

收稿日期: 2021-07-03

0 引言

能源是社会经济发展和人们赖以生存的物质基础。随着国民经济不断发展,建筑面积不断增加,建筑能耗也随之增加。据统计,2017年我国建筑能耗占全国能耗的21.10%^[1]。地源热泵作为一种利用低品位可再生能源的高效节能空调系统,得到了广泛的应用。但单一的地源热泵系统受到冬夏负荷差异造成的土壤热不平衡影响,系统的能效会逐年

降低。因此,地源热泵系统通常会辅以其他空调系统配合使用,即复合式地源热泵系统。目前常见的复合式地源热泵系统主要是冷却塔、冷水机组辅助地源热泵,但存在效率较低、系统复杂、初投资大的问题。而空气源辅助地源热泵的复合式热泵系统不仅可以解决两种负荷矛盾情况下土壤的热不平衡问题,而且适用地区范围更广。

对于一个复合式地源热泵系统来说,合理的运

行控制策略是能否达到节能目的,实现地埋管冬夏季取热、吸热平衡的关键。国内外对于复式地源热泵系统的控制方法主要分为三种:(1)设定温度控制法;(2)温差控制法;(3)时间控制法。乔卫来^[2]以南京某复合式地源热泵系统为研究对象,通过能耗模拟软件 Energyplus 分析能耗认为时间控制法能够保证系统持续高效运行。顾娟^[3]等人基于 TRNSYS 的仿真模型的构建,提出了地源热泵优先运行 3h 的系统。虽然时间控制法相对简单,但其运行时间无法与建筑逐时负荷相匹配,无论建筑负荷大小都将开启空气源,系统经济性会较差。於继康^[4]则认为在夏季空气温度较低的工况下,宜优先运行空气源热泵,减少地埋管排热。在夏季空气温度较高的工况下,空气源热泵性能下降,宜优先运行地源热泵,减少运行能耗。李莹^[5]和 Zhang^[6]等人推荐热泵进口的流体温度与周围环境空气湿球温度之差控制。Zhou^[7]等人通过构建并验证了复合式地源热泵系统的 TRNSYS 模型,认为最佳控制温差 $\Delta T=6^{\circ}\text{C}$ 。王新华^[8]和周铭铭^[9]都认为地源侧温度控制能保证热泵机组可靠和高效运行。设定温度控制法对复合式地源热泵系统最为明确,可以结合地源热泵机组的额定制冷量,充分利用地源热泵高效节能的特性,有效地实现地埋管冬夏季吸排热的平衡。曲云霞^[10]研究表明地热换热器的最高水温以当地土壤温度加上 20°C 为最高限度,但对于设定温度值的确定没有明确的定义。

目前,国内外对于空气源辅助地源复合式热泵系统设定温度控制法的研究还较少,且缺乏对于该系统长时间数据的研究。本文提出了一种基于由 EnergyPlus 软件模拟得到的传统地源热泵地埋管空调季的逐时温度,结合地源热泵机组额定制冷量,确定地埋管出口温度设定值的方法,并以成都某办公建筑为例,优化空气源辅助地源复合式热泵系统的运行控制策略。

1 研究对象

模拟选取建筑为成都某办公建筑,成都市属于夏热冬冷地区。该办公建筑地上两层,建筑层高 4.8 米,如图 1 所示。建筑总面积为 1425.60m^2 ,其中非空调区域为 270.54m^2 。房间功能主要为办公室、会议室和大厅。从 EnergyPlus 软件全年动态负荷模拟结果来看,本建筑设计冷负荷为 185kW ,设计

热负荷为 96kW ,具体结果如图 2 所示。

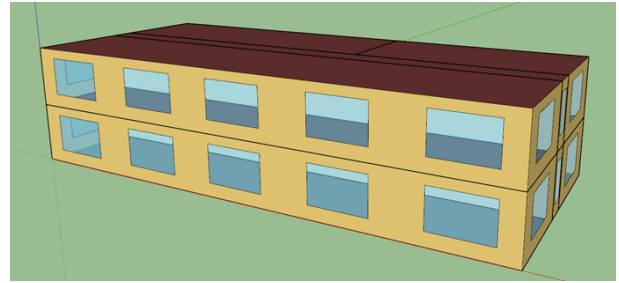


图 1 某办公建筑模型图

Fig.1 Model of an office building

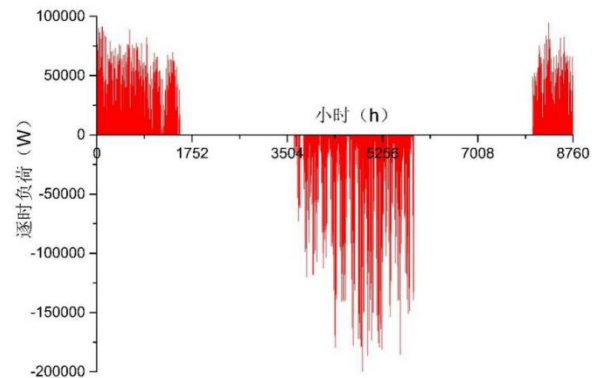


图 2 建筑全年逐时动态负荷

Fig.2 Office building year-on-year dynamic load

根据冷热负荷分布情况,按照设计热负荷选择地源热泵机组一台,地埋管按照设计热负荷设计,总长度为 1800 米,需打井 18 口,井深 100 米。基于所选地源热泵额定冷负荷,空气源热泵补充剩余的冷量。

2 模拟方法及条件

2.1 EnergyPlus 模型简介

本文采取 EnergyPlus 对建筑负荷、设备制冷量以及耗电量进行模拟。1996 年美国能源部开始筹划基于 DOE-2 和 BLAST 开发 EnergyPlus,2001 年发布了 EnergyPlusVersion1.0,目前已经更新到 EnergyPlus8.9.0 版本^[11]。

地源热泵机组是复合式地源热泵模型中不可或缺的一部分,EnergyPlus 包含水-空气热泵和水-水热泵的模型,Jin 等人^{[12],[13]}提出了参数估计模型,利用制造商目录数据用于计算参数,以便使用全局优化算法最小化误差。Shenoy 提出了方程拟合模型,该模型根据制造商样本手册得到 6 个制冷/热系数 Capacity Coefficient 和 Power Consumption Coefficient,设定好名义制冷量、功率、负荷侧及

源侧的流量即可使用,使得模拟更具有实际性,因此本文选择使用方程拟合模型。地源热泵系统冷凝侧由垂直埋管组成使用地环路换热器 (GLHE, Ground Loop Heat Exchanger), 它将热量输送到地面或从地面输送出去, 本文所采用的 GLHE 模型是基于 Esilson 建立的垂直井眼模型^[14]。根据成都地源热泵响应测试报告, 土壤初始温度为 19.7℃, 岩土综合导热系数为 2.13W/(m³·K)。

表 1 室内设计参数

Table 1 Interior design parameters

房间用途	室内设计温度 (°C)		人员密度 (P/m ²)	照明功率密度 (W/m ²)	设备功率密度 (W/m ²)	新风量 [m ³ /(P·h)]
	夏季	冬季				
办公室	26	20	0.2	11	13	30
会议室	26	20	0.5	20	5	20
大厅	26	20	0.1	5	5	20

3 结果分析与讨论

3.1 埋管出口温度的确定

本文所采取的空气源辅助地源复合式热泵的运行策略为根据埋管的出口设定温度来决定空气源热泵机组的启停, 当地埋管出口超过设定值时, 空气源热泵机组与地源热泵机组联合运行建筑供冷, 在空气源热泵运行期间, 埋管温度低于设定温度 0.2℃温差时, 关闭空气源热泵机组。设定温度值决定空气源辅助地源复合式热泵系统控制策略的合理性。温度过高, 首先土壤吸排热不平衡, 其次在机组选型配置确定了的前提下, 地源热泵机组制冷量不足, 房间温度无法保证。如果设定温度过高, 空气源热泵承担冷负荷太多, 整个系统不节能。因此, 温度设定值的合理选取对复合式地源热泵系统运行尤为重要。从大量的论文研究来看, 对于设定温度值的确定都没有明确的定义, 曲云霞^[10]研究表明地热换热器的最高水温以当地土壤温度加上 20℃为最高限度。郭哲豪^[15]认为当土壤温度大于等于 30℃时启动冷水机组。并且对于不同地区, 不同功能的建筑其设定值可能会随之改变, 本文用 EnergyPlus 模拟得到根据冷负荷选型的传统地源热泵埋管空调季的逐时出口温度, 如图 3 所示。其最大出口水温 32.7℃, 由于复合式地源热泵按照设计热负荷进行, 埋管数量有所减少, 会影响到其换热量。因此设定埋管出口温度为 25℃、26℃、27℃、28℃和 29℃。

2.2 工况条件

本次模拟室外气象参数采用成都市气象参数, 室内设计参数如表 1 所示, 参考《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015 夏热冬冷地区相关规定选取围护结构热工参数取值如下, 屋面传热系数为: 0.63W/(m²·K); 外墙传热系数为: 0.56W/(m²·K); 外窗传热系数为: 2.4W/(m²·K), 太阳得热系数为 0.44。

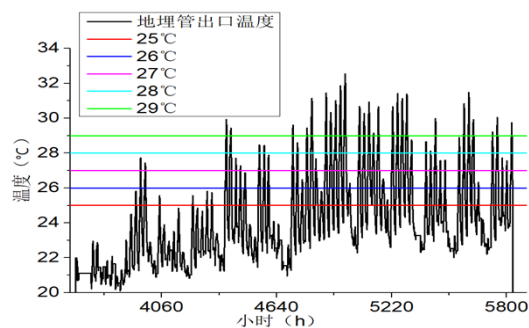


图 2 传统地源热泵系统空调季埋管逐时出口温度

Fig.2 The hourly outlet temperature of the vertical ground heat exchanger of the ground source heat pump system

3.2 不同温度模拟结果

3.2.1 设定温度为 25℃

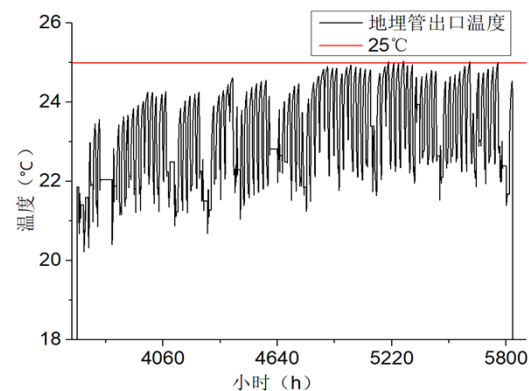


图 3 25℃下埋管逐时出口温度

Fig.3 The hourly outlet temperature of the vertical

ground heat exchanger at 25°C

通过 EnergyPlus 软件模拟得到出口温度设定为 25°C 时机组地埋管空调季逐时出口温度如图 3 所示, 整个空调季基本在 25°C 以下, 空气源辅助地源复合式热泵系统得到合理控制, 其中地源热泵机组运行小时数为 1371h, 空气源热泵运行小时数为 1039h。

当地埋管出口温度设定为 25°C 时, 由 EnergyPlus 软件模拟得到机组的第一年逐时制冷量、耗电量、水泵的逐时耗电量以及地埋管的逐时换热量、出口温度。从结果分析, 地源热泵机组空调季累计制冷量为 24907kWh, 空气源热泵机组空调季累计制冷量为 53300kWh, 供暖季全部热负荷由地源热泵机组承担, 累计热负荷为 49556kWh, 复合式地源热泵系统空调季 EER 为 2.694, 供暖季 COP 为 2.536。地源热泵机组全年耗电量为 22328kWh, 空气源热泵机组全年累计耗电量为 17767kWh。根据地埋管全年逐时换热量, 地埋管夏季累计排热量为-31478kWh, 冬季累计吸热量为 31439kWh, 地埋管夏季排热量最大为-28751W, 土壤热不平衡率为 0.12%。

3.2.2 设定温度为 26°C

通过 EnergyPlus 软件模拟得到出口温度设定为 26°C 时机组地埋管空调季逐时出口温度如图 4 所示, 整个空调季基本在 26°C 以下, 空气源辅助地源复合式热泵系统得到控制, 其中地源热泵机组运行小时数为 1371h, 空气源热泵运行小时数为 1002h。

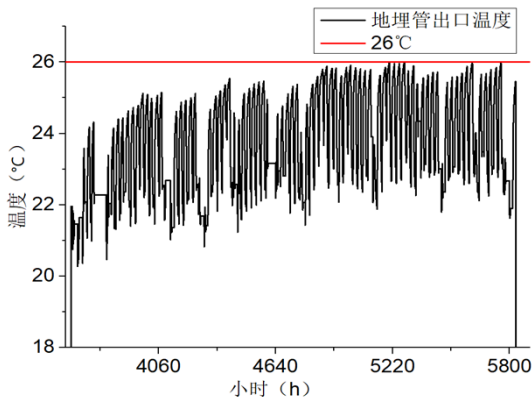


图 4 26°C下地埋管逐时出口温度

Fig.4 The hourly outlet temperature of the vertical

ground heat exchanger at 26°C

当地埋管出口温度设定为 26°C 时, 由 EnergyPlus 软件模拟得到机组的第一年逐时制冷量、耗电量、水泵的逐时耗电量以及地埋管的逐时换热量、出口温度。从结果分析, 地源热泵机组空调季累计制冷量为 28008kWh, 空气源热泵机组空调季累计制冷量为 50198kWh, 供暖季全部热负荷由地源热泵机组承担, 累计热负荷为 49556kWh, 复合式地源热泵系统空调季 EER 为 2.701, 供暖季 COP 为 2.540。地源热泵机组全年耗电量为 23243kWh, 空气源热泵机组全年累计耗电量为 16744kWh。根据地埋管全年逐时换热量, 地埋管夏季累计排热量为-36367kWh, 冬季累计吸热量为 31443kWh, 其中地埋管夏季排热量最大为-34175W, 土壤热不平衡率为 13.54%。

3.2.3 设定温度为 27°C

通过 EnergyPlus 软件模拟得到出口温度设定为 27°C 时机组地埋管空调季逐时出口温度如图 5 所示, 整个空调季基本在 27°C 以下, 空气源辅助地源复合式热泵系统得到控制, 其中地源热泵机组运行小时数为 1371h, 空气源热泵运行小时数为 973h。

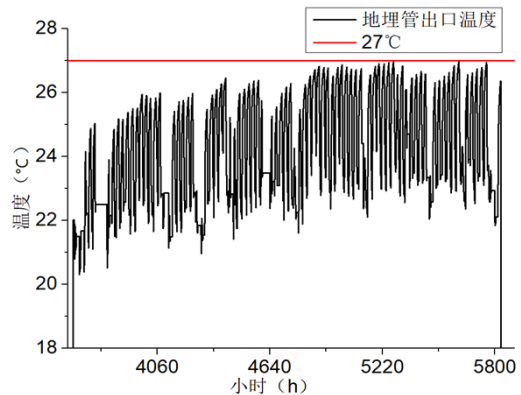


图 5 27°C下地埋管逐时出口温度

Fig.5 The hourly outlet temperature of the vertical ground heat exchanger at 27°C

当地埋管出口温度设定为 27°C 时, 由 EnergyPlus 软件模拟得到机组的第一年逐时制冷量、耗电量、水泵的逐时耗电量以及地埋管的逐时换热量、出口温度。从结果分析, 地源热泵机组空调季累计制冷量为 31635kWh, 空气源热泵机组空

调季累计制冷量为 46571kWh, 供暖季全部热负荷由地源热泵机组承担, 累计热负荷为 49556kWh, 复合式地源热泵系统空调季 EER 为 2.708, 供暖季 COP 为 2.544。地源热泵机组全年耗电量为 27932kWh, 空气源热泵机组全年累计耗电量为 15534kWh。根据地埋管全年逐时换热量, 地埋管夏季累计排热量为-41125kWh, 冬季累计吸热量为 31447kWh, 其中地埋换夏季排热量最大为-39640W, 土壤热不平衡率为 23.5%。

3.2.4 设定温度为 28℃

通过 EnergyPlus 软件模拟得到出口温度设定为 28℃时机组地埋管空调季逐时出口温度如图 6 所示, 整个空调季基本在 28℃以下, 空气源辅助地源复合式热泵系统得到控制, 其中地源热泵机组运行小时数为 1371h, 空气源热泵运行小时数为 932h。

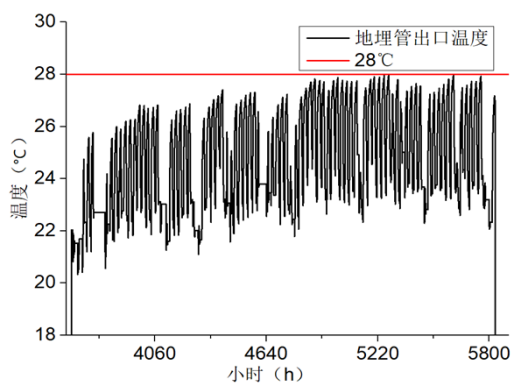


图 6 28℃下地埋管逐时出口温度

Fig.6 The hourly outlet temperature of the vertical ground heat exchanger at 28°C

当地埋管出口温度设定为 28℃时, 由 EnergyPlus 软件模拟得到机组的第一年逐时制冷量、耗电量、水泵的逐时耗电量以及地埋管的逐时换热量、出口温度。从结果分析, 地源热泵机组空调季累计制冷量为 35275kWh, 空气源热泵机组空调季累计制冷量为 42931kWh, 供暖季全部热负荷由地源热泵机组承担, 累计热负荷为 49556kWh, 复合式地源热泵系统空调季 EER 为 2.711, 供暖季 COP 为 2.552。地源热泵机组全年耗电量为 25461kWh, 空气源热泵机组全年累计耗电量为 28841kWh。根据地埋管全年逐时换热量, 地埋管

夏季累计排热量为-45942kWh, 冬季累计吸热量为 31451kWh, 其中地埋换夏季排热量最大为-45462W, 土壤热不平衡率为 31.5%。

3.2.5 设定温度为 29℃

通过 EnergyPlus 软件模拟得到出口温度设定为 29℃时机组地埋管空调季逐时出口温度如图 7 所示, 整个空调季基本在 29℃以下, 空气源辅助地源复合式热泵系统得到控制, 其中地源热泵机组运行小时数为 1371h, 空气源热泵运行小时数为 886h。

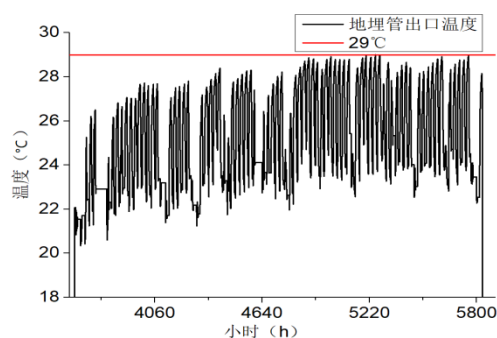


图 7 29℃下地埋管逐时出口温度

Fig.7 The hourly outlet temperature of the vertical ground heat exchanger at 29°C

当地埋管出口温度设定为 29℃时, 由 EnergyPlus 软件模拟得到机组的第一年逐时制冷量、耗电量、水泵的逐时耗电量以及地埋管的逐时换热量、出口温度。从结果分析, 地源热泵机组空调季累计制冷量为 38874kWh, 空气源热泵机组空调季累计制冷量为 39332kWh, 供暖季全部热负荷由地源热泵机组承担, 累计热负荷为 49556kWh, 复合式地源热泵系统空调季 EER 为 2.705, 供暖季 COP 为 2.555。地源热泵机组全年耗电量为 26716kWh, 空气源热泵机组全年累计耗电量为 13119kWh。根据地埋管全年逐时换热量, 地埋管夏季累计排热量为-50748kWh, 冬季累计吸热量为 31455kWh, 其中地埋换夏季排热量最大为-51596W, 土壤热不平衡率为 38.1%。

3.3 不同设定温度综合性能对比

根据复合式地源热泵系统综合性能评价指标计算模型计算不同控制策略下空气源辅助地源复合式热泵系统运行第一年各指标及得分情况, 如表

2 所示。

表 2 不同设定温度控制策略下复合式地源热泵系统综合性得分

评价指标	可再生能 源利用率	常规能源 替代量	土壤热不 平衡率	二氧化碳 减排率	二氧化硫 减排率	烟尘减排率	静态投资 回收期	净现 值率	综合 得分
权重系数	0.16	0.07	0.41	0.06	0.02	0.03	0.06	0.19	
25°C	6.47	2.38	9.95	2.38	2.38	2.38	6.49	10	5.47
26°C	6.49	2.40	3.89	2.40	2.40	2.40	6.57	10	5.35
27°C	6.50	2.42	0	2.42	2.42	2.42	6.66	10	3.77
28°C	6.52	2.43	0	2.43	2.43	2.43	6.74	10	3.78
29°C	6.51	2.42	0	2.42	2.42	2.42	6.82	10	3.78

随着埋管出口温度设定值由 25°C到 29°C时,复合式地源热泵系统的土壤热不平衡率随之增加。从不同埋管出口温度下空气源辅助地源复合式热泵系统的综合性能评价指标打分结果来看,当地埋管出口温度设定为 25°C时系统综合性能最优,埋管冬夏季吸排热也达到平衡。

4 结论

合理的运行控制策略是复合式地源热泵是否能达到节能目的,实现埋管冬夏季取热、吸热平衡的关键,本文分别设定埋管出口温度为 25°C、26°C、27°C、28°C和 29°C模拟并得出最佳控制策略,所得到的结论如下:

(1) 空气源辅助地源复合式地源热泵不同设定温度运行能耗差距不大。

(2) 复合式地源热泵系统的土壤热不平衡率随埋管出口温度设定值增加而增加,埋管冬夏季吸排热平衡越来越难以控制。

(3) 空气源辅助地源复合式热泵系统运行控制策略在埋管出口温度设定为 25°C时综合性能得分最高,热不平衡率为 0.12%。地源热泵冬夏季吸排热量达到平衡。

参考文献:

[1] 中国建筑节能协会.2019 中国建筑能耗研究报告[J].建筑,2020,(7):30-39.

[2] 乔卫来,陈九法.复合式地源热泵运行控制策略比较[J].建筑热能通风空调,2015,(4):47-50.

[3] 顾娟,陈剑波,胡毛毛.夏热冬冷地区地源与空气源热泵联合空调系统运行策略的研究[J].制冷技术,2017,37(5):41-47.

[4] 於继康,温勇萍,于国清.夏热冬冷地区复合式地源热泵

设计与运行策略研究[J].建筑节能,2020,(5):60-64,79.

[5] 李营,由世俊,张欢,等.冷却塔复合式地源热泵系统的运行策略研究[J].太阳能学报,2017,38(6):1680-1684.

[6] Qing Zhang, Nan Lv, Shengpeng Chen, et al. Study on Operating and Control Strategies for Hybrid Ground Source Heat Pump System[J]. Procedia Engineering, 2015,121:189-1901.

[7] Shiyu Zhoua, Wenzhi Cui, Shuanglong Zhao, et al. Design and operation of an improved ground source heat pump system assisted with cooling tower[J]. Procedia Engineering, 2017,205:3214-3221.

[8] 王新华,李鹏辉.地源热泵系统地热平衡耦合控制策略研究[J].洁净与空调技术,2020,(4):54-56.

[9] 周铭铭.复合式地源热泵系统的经济性和运行策略研究[J].建筑热能通风空调,2017,36(10):45-49.

[10] 曲云霞,张林华,方肇洪.地源热泵系统辅助散热设备及其经济性能[J].可再生能源,2003,(4):9-11.

[11] ENERGY U S D O. Getting started with Energyplus version 7.7 documentation [M]. 2016.

[12] JIN H. Parameter Estimation Based Models of Water Source Heat Pumps[D]. PhDThesis,Oklahoma State University, 200, Stillwater, Oklahoma.

[13] JIN H, SPITLER J D. A Parameter Estimation Based Model of Water-To-Water Heat Pumps for use in Energy Calculation Programs[J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108(1):3-17.

[14] PERESKILSON, JOHANCLAESSON. SIMULATION MODEL FOR THERMALLY INTERACTING HEAT EXTRACTION BOREHOLES[J]. Numerical Heat Transfer, 1988,13(2):149-165.

[15] 郭哲豪,卢军.夏热冬冷地区冷却塔复合式地源热泵系统土壤温度模拟及分析[C].第十七届西南地区暖通热

