

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-298-07

空气源辅助地源复合式热泵系统适宜性模拟研究

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】 分别以冷负荷为矛盾的地区(成都、郑州)和热负荷为矛盾的地区(拉萨)为研究对象,分析在不同地区空气源辅助地源复合式热泵系统的适宜性。针对某办公建筑,设计两种复合式地源热泵系统,通过EnergyPlus模拟得到系统运行能耗,并分析其综合性能。由此得出,以冷负荷为主要矛盾且土壤热不平衡率较大地区,冷却塔辅助复合式地源热泵系统更适宜,而在土壤热不平衡率较小地区和热负荷为主要矛盾地区,空气源辅助地源复合式热泵系统更加适宜。

【关键词】 复合式热泵系统; 适宜性; 热不平衡率; EnergyPlus

中图分类号 TU834 文献标识码 A

Simulation of Suitability of Air Source Assisted Ground Source Composite Heat Pump System

Chen Xiangyu Jing Lijun Wang Jun Jing Chengjun

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

【Abstract】 In this paper, the regions where the cooling load is contradictory (Chengdu, Zhengzhou) and the heat load is contradictory (Lhasa) are taken as the research object, and the suitability of the ground-source composite heat pump system assisted by air source in different regions is analyzed. Two kinds of composite ground source heat pump systems are designed for an office building. The energy consumption of the system is simulated by EnergyPlus, and the comprehensive performance is analyzed. It is concluded that the cooling tower-assisted composite ground source heat pump system is more suitable in the area where the cooling load is the main contradiction and the soil thermal imbalance rate is large. However, in the areas where the soil thermal imbalance rate is small and the heat load is the main contradiction, the air-source assisted ground-source composite heat pump system is more suitable.

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

资助项目: 中国公共建筑能效提升项目(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 前言

随着我国经济的不断发展以及城镇化进程的推进, 建筑面积不断增加, 建筑能耗也随之增加。2017年, 我国建筑能源消费总量9.47亿吨标准煤, 占全国能源消费总量的21.10%^[1]。地源热泵技术因其高效、节能、运行可靠的特点渐渐进入公众视线。而随着研究发现, 地源热泵在为冷热负荷并不平衡的建筑供冷供热过程中, 所累积的土壤热不平衡率会导致地源热泵系统能效逐年衰减, 因此地源热泵

系统需要辅以其他空调系统配合使用, 即复合式地源热泵, 艾民^{Error! Reference source not found.}和杨兴林^{Error! Reference source not found.}分别利用DeST软件和TRNSYS软件研究了复合式地源热泵系统的可行性与经济性, 结果都表明复合式地源热泵系统优于传统地源热泵系统。

然而目前国内外对复合式地源热泵的研究主要集中在冷却塔、冷水机组辅助地源热泵系统, 祝立萍^{Error! Reference source not found.}和李营^{Error! Reference}

source not found.研究了冷却塔辅助地源热泵复合式系统运行控制策略,分别针对住宅小区和办公建筑的复合式系统提出了最佳运行控制策略,Zhang^{Error!} Reference source not found.建立了一种冷却塔辅助地源热泵复合式系统的模拟模型,以量化不同控制策略对系统性能的影响。尽管这两种复合式地源热泵形式的确有效解决了传统地源热泵系统土壤热不平衡的问题,但冷却塔存在效率较低的问题,常规的冷水机组则存在系统复杂、初投资大的问题,并不能实现最大化的节能高效。此外,国内外关于太阳能辅助地源热泵的复合式系统的研究也有许多,Chen^{Error!} Reference source not found.从能源、经济和环境等方面研究太阳能辅助地源复合式热泵的性能,并认为其性能优于传统地源热泵。但太阳能辅助加热复合式地源热泵存在地域限制的问题,在太阳能资源并不丰富的地区无法推广。

在空气能纳入可再生能源之后,空气源辅助地源热泵的复合式热泵系统开始进入大众的视野。该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。本文分别以冷负荷为矛盾的地区(成都、郑州)和热负荷为矛盾的地区(拉萨)为分析对象。对比目前常见的复合式地源热泵系统,分析空气源辅助地源复合式热泵系统的适宜性。

1 研究对象

1.1 研究对象概况

模拟选取建筑为某办公建筑。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 1425.60m²,其中非空调区域为 270.54m²。房间功能主要为办公室、会议室和大厅。

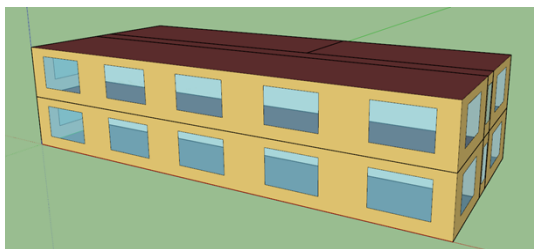


图 1 某办公建筑模型图

Fig.1 Model of an office building

1.2 空调系统参数

该建筑在成都的设计冷负荷为 185kW,设计热负荷为 96kW,传统地源热泵供暖季累计吸热量

为 32533.6kWh,空调季累计排热量为 95273kWh。在冷负荷为主要矛盾的情况下制定两种空调系统,方案一为空气源辅助地源热泵系统,地源热泵机组额定制冷量为 92kW,额定制热量为 96kW,打井数 18 口,空气源热泵机组制冷量为 163kW。方案二为冷却塔辅助散热复合式地源热泵系统,地源热泵机组制冷量为 185kW,打井数 18 口,冷却塔水量 38m³/h。

由于成都土壤热不平衡率较大达到 65%,为了全面分析空气源辅助地源复合式热泵系统,计算得该建筑在郑州的设计冷负荷为 186kW,设计热负荷为 148kW,传统地源热泵埋管累积吸热量 91214kWh,累积排热量为 117351kWh,土壤热不平衡率 22.21%。同时,也制定两种空调系统,方案三为空气源辅助地源热泵系统,地源热泵额定制热量为 148kW,空气源热泵制冷量为 64kW,打井数 20 口。方案四为冷却塔辅助散热复合式地源热泵系统,地源热泵机组额定制冷量为 186kW,打井数 20 口,冷却塔水量 40m³/h。

在以热负荷为矛盾的地区,基本上采用辅助热源进行补热。最常见的形式为锅炉辅助加热复合式地源热泵。因此,本文计算了该建筑在拉萨的设计冷热负荷,分别为 60kW,131kW。方案五选用一台制冷量为 60kW,制热量 45kW 的地源热泵机组,打井数 11 口,一台制热量 86kW 的空气源热泵。方案六选择一台制热量 50kW 的地源热泵机组,打井数 11 口,一台制热量 86kW 的燃气锅炉。六种空调系统选型配置详见表 1。

表 1 不同方案机组选型配置

Table 1 Different types of unit selection configuration

方案	说明	机组配置
方案一(空气源热泵)	成都地区	地源热泵机组: 96kW
		空气源热泵: 163kW
		埋管数: 18 口
方案二(冷却塔)	成都地区	地源热泵机组: 185kW
		埋管数: 18 口
		冷却塔冷却水量: 38m ³ /h
方案三(空气源热泵)	郑州地区	地源热泵机组: 148kW
		埋管数: 20 口
		空气源热泵: 64kW
方案四(冷却塔)	郑州地区	地源热泵机组: 186kW
		埋管数: 20 口
		冷却塔冷却水量: 40m ³ /h

方案五（空气源热泵）	拉萨地区	地源热泵机组：60kW
		打井数：11 口
方案五（燃气锅炉）	拉萨地区	空气源热泵机组：86kW
		地源热泵机组：60kW
		打井数：11 口
		燃气锅炉：86kW

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 Error! Reference source not found.

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 Error! Reference source not found.等人 Error! Reference source not found.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 Error! Reference source not found.。根据成都地泵热响应测试报告, 土壤初始温度为 19.7℃, 岩土综合导热系数为 2.13W/(m³·K)。

2.2 工况条件

本次模拟室外气象参数分别采用 EnergyPlus 中的成都、郑州、拉萨气象参数, 室内设计参数如表 2 所示。

表 2 室内设计参数

Table 2 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 冷负荷为矛盾地区适宜性分析

本节通过对成都地区方案一和方案二以及郑州地区方案三和方案四的软件模拟, 得到系统相关数据, 整理如下。

3.1.1 成都地区

通过 EnergyPlus 模拟两种方案第一年的运行数据, 统计空调季设备的耗电量、埋管累计吸排热量结果如表 3 所示。

表 3 不同方案累计耗电量对比分析 (单位: kWh)

Table 3 Comparative analysis of the cumulative power consumption of different schemes

	埋管 吸热量	埋管 排热量	地源热泵机组 耗电量	辅助设备 耗电量	负荷侧 循环水泵	埋管 循环水泵
方案一	31406	-31454	6379	17767	3701	1188
方案二	31408	-31771	22439	冷却塔: 544 循环泵: 856	3701	1188

方案一空调季系统累计耗电量为 29034kWh, 方案二系统累计耗电量为 29969kWh, 从系统能效来看, 空气源辅助优于冷却塔辅助。两种方案冬季

热负荷全都由地源热泵机组承担, 在土壤热不平衡率为 0%的前提下, 系统能效基本无差别。供暖季累计耗电量为 19535kWh。两种方案经济指标如表

4 所示, 可以看出冷却塔初投资较低, 方案二整个复合式地源热泵系统初投资比方案一低 3.45 万元, 成本增量较小, 方案一的净现值率 NPVR 小于方案二。又因为初投资高, 方案二的静态投资回收期为 8.78 大于方案一, 但在 8.78 年后, 每年均可节

约 4129 元的运行费用, 考虑利率的影响, 其净现值 NPV 指标小于方案一。因此, 从复合式地源热泵系统的经济性指标来看, 方案二的辅助设备冷却塔初投资较小, 运行费用较高, 系统的静态投资回收期 and 净现值率要高于方案一。

表 4 方案一、二经济性指标

Table 4 Scheme 1 and 2 Economic Indicators

	方案一	方案二
地源热泵	8.64	16.65
空气源热泵	13.04	0
冷却塔	0	1.58
地埋管	14.40	14.40
初投资	36.08	32.63
复合式地源热泵空调季运行费用	2.06	2.13
复合式地源热泵供暖季运行费用	1.39	1.39
传统冷热源初投资	20.05	20.05
传统冷热源年运行费用	5.27	5.27
静态投资回收期	8.78	7.19
NPV	1.89	4.6
NPVR	0.12	0.36

复合式地源热泵综合性能评价得分结果如表 5 所示, 虽然方案二能耗略高于方案一, 但由于冷却塔经济性优于方案一。综合各指标得分, 方案二综合评价得分 6.59 分高于方案一 6.14 分。因此在

保证地埋管冬夏吸排热平衡额定情况下, 冷却塔辅助散热复合式地源热泵系统优于空气源辅助地源复合式热泵系统。

表 5 方案一、二综合性能打得分表

Table 5 Scheme 1, 2 comprehensive performance score table

	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	
方案一	6.48	2.15	10.00	2.15	2.15	2.15	6.49	1.2	6.14
方案二	6.34	2.00	10.00	2.00	2.00	2.00	7.12	3.6	6.59

3.1.2 郑州地区

通过 EnergyPlus 模拟两种方案第一年的运行

数据, 统计空调季设备的耗电量、地埋管累计吸排热量结果如表 6 所示。

表 6 不同方案累计耗电量对比分析 (单位: kWh)

Table 6 Comparative analysis of cumulative power consumption in different schemes

	地埋管 吸热量	地埋管 排热量	地源热泵 机组耗电量	辅助设备 耗电量	负荷侧 循环水泵	地埋管 循环水泵
方案三	91214	-91383	18461	7039	2917	1529

方案四	91214	-91374	2490	冷却塔: 387 循环泵: 622	2917	1529
-----	-------	--------	------	----------------------	------	------

统计得到方案三系统总累计耗电量 29946kWh, 方案四系统总耗电量为 30415kWh。方案四由于存在冷却塔及循环泵额外的耗电量, 因此其能效略低于方案三的空调系统。方案三与方案四冬季热负荷全部有地源热泵机组承担, 在土壤热不平衡率为

0% 的前提下, 系统不受影响, 累计耗电量为 50259kWh。郑州市商业电价为 0.86 元/度, 天然气价格为 3.3 元/m³。根据工程经验, 计算得到系统的初投资及运行费用, 根据经济指标计算模型, 得到结果如表 7 所示。

表 7 方案三、四经济性指标

Table 7 Scheme 3 and 4 Economic Indicators

	方案三	方案四
地源热泵	13.32	16.74
空气源热泵	5.12	0
冷却塔	0	1.6
地埋管	20	20
初投资	38.44	38.34
复合式地源热泵空调季运行费用	2.57	2.62
复合式地源热泵供暖季运行费用	4.32	4.32
传统冷热源初投资	22.19	22.19
传统冷热源年运行费用	9.61	9.61
静态投资回收期	5.97	6.05
NPV	10.45	10.06
NPVR	0.64	0.62

从表 7 可以看出, 随着土壤热不平衡率的降低及 50% 负荷率小时数的增加, 空气源热泵额定制冷量相对于成都地区的方案一大幅度降低。在郑州地区, 两种复合式地源热泵系统初投资仅相差 0.1 万

元。方案三相对于方案一每年可节约 500 元, 因此与常规复合式地源热泵系统相比, 方案三的静态投资回收期和净现值率均优于方案四。

表 8 方案三、四综合性能打得分表

Table 8 Scheme 3, 4 comprehensive performance score table

	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	
方案三	10	2.71	10.00	2.71	2.71	2.71	7.61	6.43	7.87
方案四	10	2.67	10.00	2.67	2.67	2.67	7.58	6.23	7.82

最终, 从两种方案的综合性能评价得分结果表 8 来看, 方案三综合得分 7.87 高于方案四的 7.82 分, 两者差距不大。但方案三的系统相对于方案四节能, 每年可以节约 469kWh, 技术节能性、环境

保护性及经济性指标均较优。即在保证地埋管冬夏季吸排热平衡额定情况下, 空气源辅助地源复合式热泵系统要优于冷却塔辅助散热复合式地源热泵系统。

3.2 热负荷为矛盾地区适宜性分析

在以热负荷为矛盾的拉萨, 方案六为锅炉辅助加热复合式地源热泵系统, 这种系统适宜性取决于当地燃气价格, 在此以拉萨地区为例, 分析了不同燃气价格时燃气锅炉辅助加热复合式地源热泵、空气源辅助地源复合式热泵系统的综合性能指标, 模

拟得到方案五、六系统年累计耗电量、耗气量, 如表 9 所示。方案五在供暖季总耗电量为 23713kWh, 方案六总耗电量为 12175kWh, 耗气量 3939m³。根据综合能耗计算通则^[12]折算为标准煤, 方案五能耗为 2914.33kgce, 方案六能耗为 6279.44kgce, 方案六能耗远远大于方案五。

表 9 方案五、六系统累计耗电量

Table 9 Scheme 5 and 6 system cumulative power consumption

案例		地源热泵机	辅助设备	负荷侧循环	地埋管侧循	系统总耗 电量(kWh)
		组耗电量 (kWh)	耗电量 (kWh)	泵耗电量 (kWh)	环泵耗电量 (kWh)	
方案五	空调季	2792	0	447	887	4126
	供暖季	8778	11538	1829	1568	23713
方案六	空调季	2792	0	447	887	4126
	供暖季	8778	X1	1829	1568	12175

注: X1 为锅炉供暖季累计耗气量 3939m³

对比不同燃气价格下两种方案的性能见表 10, 在天然气价格为 3.4 元/m³ 以下时, 系统 NPVR 值均低于 0, 即与常规冷热源相比不具有可行性。随着燃气价格的增加, 系统静态投资回收期随着降低。

当燃气价格由 3.0 元/m³ 增长到 3.6 元/m³, 静态投资回收期从 18.39 年降低到 9.4 年。同时, 净现值率也由负值增长为正值, 与常规冷热源相比, 复合式地源热泵那个系统更具有可行性。

表 10 不同燃气价格方案五、六综合性能对比

Table 10 Comparison of comprehensive performance of scheme 5 and 6 with different gas prices

费用(万元)	3.0 元/m ³		3.2 元/m ³		3.4 元/m ³		3.6 元/m ³	
	方案五	方案六	方案五	方案六	方案五	方案六	方案五	方案六
冷热源系统初投资	21.08	18.67	21.08	18.67	21.08	18.67	21.08	18.67
空调季运行费用	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
供热季运行费用	2.02	2.22	2.02	2.3	2.02	2.38	2.02	2.46
基准系统初投资	12.62	12.62	12.62	12.62	12.62	12.62	12.62	12.62
空调季运行费用	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
供热季运行费用	2.33	2.33	2.48	2.48	2.63	2.63	2.77	2.77
静态投资回收期	18.39	23.27	13.87	18.33	11.13	15.13	9.40	13.15
NPV	-5.29	-4.07	-3.90	-3.47	-2.41	-2.78	0.47	-1.49
NPVR	-0.62	-0.67	-0.46	-0.57	-0.28	-0.46	0.06	-0.25
可再生能源利用率	126.42	42.95	126.42	42.95	126.42	42.95	42.95	42.95
常规能源替代率	14.3	7.62	14.3	7.62	14.3	7.62	14.3	7.62

无论从经济性还是环境保护性考虑, 方案五均优于方案六。综上, 无论燃气价格多少, 空气源辅助地源复合式热泵系统综合性能均优于锅炉辅助加热复合式地源热泵系统。

4 结论

通过 EnergyPlus 分别模拟了成都、郑州和拉萨地区不同复合式地源热泵系统运行能耗, 并对其综

合性能做了对比, 得出以下结论:

(1) 在以冷负荷为主要矛盾地区, 若土壤热不平衡率较大(成都), 冷却塔辅助冷却复合式地源热泵系统较优。

(2) 在以冷负荷为主要矛盾地区, 若土壤热不平衡率较小(郑州), 空气源辅助地源复合式热泵系统较优。

(3) 在以热负荷为矛盾的地区, 与常规冷水机组+锅炉系统相比, 复合式地源热泵系统受燃气价格的影响, 当燃气价格低于 3.6 元/m³ 时, 经济性较差。而与空气源辅助地源复合式热泵系统相比, 无论燃气价格多少, 空气源辅助地源复合式热泵系统在技术节能、环境保护、经济性方面均优于锅炉辅助加热复合式地源热泵系统。

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] 艾民,朱柏山,唐长江.某科研办公楼复合式地源热泵可行性分析[J].暖通空调,2016,46(4):41-44,40.
- [3] 杨兴林,杨欢欢,张礼松,等.辅助冷却的复合式地源热泵系统性能分析[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2015,29(6):540-545,559.
- [4] 祝立萍,石玉洋,张希楨,等.不同入住率下住宅小区复合式地源热泵系统运行策略的研究[J].流体机械,2016,44(3):76-79.
- [5] 李莹,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, N Lv, S Chen, et al. Study on Operating and Control Strategies for Hybrid Ground Source Heat Pump System[J]. Procedia Engineering, 2015,121:1894-1901.
- [7] Yuzhu Chen, Jiangjiang Wang, Chaofan Ma, et al. Multicriteria performance investigations of a hybrid ground source heat pump system integrated with concentrated photovoltaic thermal solar collectors[J]. Energy Conversion and Management, 2019:197.
- [8] ENERGY U S D O. Getting started with Energyplus version 7.7 documentation[S]. 2016.
- [9] JIN H. Parameter Estimation Based Models of Water Source Heat Pumps[D]. PhD Thesis, Oklahoma State University, 2002, Stillwater, Oklahoma.
- [10] 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.
- [11] PERESKILSON, JOHANCLAESSON. SIMULATION MODEL FOR THERMALLY INTERACTING HEAT EXTRACTION BOREHOLES[J]. Numerical Heat Transfer, 1988,13(2):149-65.
- [12] GB/T 2589-2008,综合能耗计算通则[S].北京:中国标准出版社,2008.