

文章编号:0253-4339(2021)02-0061-08

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.02.061

空气与土壤复合源热泵在北方地区的匹配设计模拟分析

王文涛^{1,2} 李先庭¹ 胡平放²

(1 清华大学建筑学院 北京 100084; 2 华中科技大学环境科学与工程学院 武汉 430074)

摘要 空气与土壤复合源热泵系统通过空气换热器实现了间接空气源热泵模式与补热模式,可补偿取、放热量的差值,解决土壤源热泵系统在我国北方地区长期运行产生的土壤热不平衡问题。为能够在保障供暖效果的前提下最大限度地降低埋管数量,本文以我国 5 个北方城市的住宅为例,在 TRNSYS 平台上建立了空气与土壤复合源热泵系统的仿真模型,对埋管和空气换热器的匹配设计进行了研究,并对减少埋管数量后的复合源热泵系统的应用效果进行了模拟分析。结果表明:复合源热泵系统在哈尔滨、长春、沈阳、北京、济南的埋管数量最大减少比例为 29%~43%,每延米埋管需对应匹配 0.029~0.050 m² 的空气换热器面积;减少埋管数量后的复合源热泵系统在长期运行中可维持土壤温度稳定,其十年总费用节省率为 12.6%~25.3%。

关键词 土壤源热泵;空气源热泵;住宅;匹配设计;清洁供暖

中图分类号:TK124;TU831.3

文献标识码:A

Performance Simulation of Air-ground Hybrid Source Heat Pump Systems in Northern China

Wang Wentao^{1,2} Li Xianting¹ Hu Pingfang²

(1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. School of Environmental Science & Engineer, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China)

Abstract The air-ground hybrid source heat pump system can realize indirect air-source heat pump mode and heat compensation mode through an air-water heat exchanger, which could compensate for the difference between heat extraction and heat injection to the soil. This could solve the problem of soil heat imbalance caused by the long-term operation of the ground-source heat pump system in northern China. In this study, the residential buildings in five cities of northern China were used as examples and a model of air-ground hybrid source heat pump system was established on the TRNSYS platform. To minimize the number of ground heat exchangers and ensure a good heating effect, the matching design of ground heat exchangers and air-water heat exchangers was explored and the performance and reduced number of ground heat exchangers of the air-ground hybrid source heat pump system were simulated and analyzed. The results showed that the maximum reduction ratios of the ground heat exchangers in Harbin, Changchun, Shenyang, Beijing, and Jinan were 29%–43%, and 0.029–0.050 m² of air-water heat exchangers were needed per linear meter of ground heat exchangers. The air-ground hybrid source heat pump system with a reduced number of ground heat exchangers could provide a stable soil temperature during a long-term operation. Its total cost saving rates for ten years were 12.6%–25.3%.

Keywords ground-source heat pump; air-source heat pump; residential building; matching design; clean heating

土壤源热泵以土壤作为低位热源,由于土壤的热稳定性较好且全年温度波动范围较小,因此土壤源热泵具有良好的供热、供冷性能^[1]。但当土壤源热泵系统应用在室外温度较低的地区时,由于建筑累计热负荷明显大于累计冷负荷,一年中土壤源热泵系统的累计取热量大于累计排热量,会出现全年取、排热量

不平衡的问题。当土壤源热泵系统常年运行时,土壤温度势必越来越低,导致土壤源热泵机组的供暖性能变差,不仅无法满足室内人员舒适性的要求,甚至出现系统无法正常运行的情况^[2]。因此,如何保证土壤热平衡是保障土壤源热泵系统安全高效运行的关键。

为解决土壤热不平衡的问题,保证土壤源热泵系统长期可靠高效运行,目前主要的解决方法有:优化埋管设计、增加辅助锅炉、增加辅助太阳能集热器、增加辅助空气源热泵等^[3-7]。但这些方法依然存在着一些缺点:优化埋管设计会受到场地条件、初投资等因素的制约,且无法从本质上解决土壤热不平衡问题^[8];增加辅助锅炉会消耗大量的高品位能源,造成环境污染^[9];辅助太阳能集热器易受天气条件的影响,且占地面积较大^[10];辅助空气源热泵会增加投资,且运行费用会有所提高^[8]。

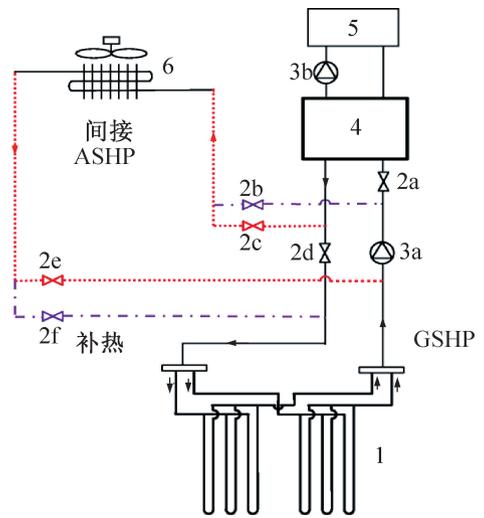
若在常规土壤源热泵系统的基础上增加空气换热器以构成空气与土壤复合源热泵系统,当室外空气温度相对较高时,通过空气换热器把热量从温度较高的空气转移至温度较低的土壤中,用于补偿取、放热量的差值,则有可能以较低的能耗实现地下土壤热平衡^[11-15]。通过合理设计空气换热器容量还有可能在保证室内供热的同时降低埋管换热器的容量,节约供热系统成本。但对于不同地区如何匹配空气源与土壤源的容量以最大限度地降低埋管换热器的容量,埋管数量减少后是否具有有良好的供暖效果、经济性优势,目前该类研究还较为缺乏。

目前我国北方地区的住宅建筑通常仅提供集中供暖,空调季的冷负荷需由自家分体空调承担,若采用土壤源热泵机组供暖,相比其应用在公共建筑中从土壤既取热又放热的工况,此类仅从土壤中取热而不放热的工况更易造成土壤温度的快速下降。因此,本文以我国 5 个北方城市(哈尔滨、长春、沈阳、北京、济南)的住宅建筑为例,在 TRNSYS 平台上建立了空气与土壤复合源热泵系统的仿真模型,对该复合源热泵系统的匹配设计及埋管数量减少后的应用效果进行了模拟分析,为实际应用提供参考。

1 系统原理

增加补热、减少取热是解决北方地区土壤热失衡问题的有效方法。Li Xianting 等^[16]提出在常规土壤源热泵基础上增加空气-水换热器,构建了空气与土壤复合源热泵系统。当室外环境温度较高时,利用空气换热器可将空气中的热量转移至循环介质中,再由循环介质供给热泵或蓄存在土壤中,达到减少取热、增加补热并保持土壤热平衡的目的,其系统构成如图 1 所示。

该空气与土壤复合源热泵系统具有 3 种运行模式:土壤源热泵模式(GSHP)、间接空气源热泵模式(ASHP)、补热模式,如表 1 所示。



1 埋管换热器;2 阀门;3 水泵;4 热泵机组;
5 用户;6 空气-水换热器。

图 1 空气与土壤复合源热泵系统

Fig.1 Air-ground hybrid source heat pump system

表 1 空气与土壤复合源热泵系统运行模式

Tab.1 Operating modes of air-ground hybrid source heat pump system

模式	开启阶段	开启阀门	关闭阀门
GSHP 模式	空调季和供暖季中期	2a,2d	2b,2c,2e,2f
间接 ASHP 模式	供暖季初期和末期	2a,2c,2e	2b,2d,2f
补热模式	非供暖季和空调季	2b,2f	2a,2c,2d,2e

1) 土壤源热泵模式

土壤源热泵模式的循环路径为:4→2d→1→3a→2a→4。在空调季,热泵机组通过埋管与土壤换热进行制冷;在供暖季中期,环境温度低且建筑热负荷大,土壤温度通常会显著高于室外气温,利用土壤中的热量利于提高机组能效,因此运行于土壤源热泵模式。

2) 间接空气源热泵模式

间接空气源热泵模式的循环路径为:4→2c→6→2e→3a→2a→4。供暖季初期和末期的气温较高且建筑热负荷较小,所以此时运行间接 ASHP 模式的效率较高且能满足供暖需求。由于间接 ASHP 模式不经过埋管,由空气换热器单独运行,通过该模式可以减少从土壤吸收的热量,有利于土壤的长期热平衡。

3) 补热模式

补热模式的循环路径为:1→3a→2b→6→2f→1。在非供暖期和空调期,室外气温通常高于土壤温度,此时可以使系统运行补热模式,将空气中的热量转移至土壤中。通过运行补热模式可以增加向土壤排放

的热量,也有利于土壤的长期热平衡。

2 研究对象与方法

2.1 研究对象

本文选取的住宅共有 6 层,总建筑面积约为 3 911 m²,空调/供暖房间面积约为 2 982 m²,建筑的主要使用功能为主卧室、次卧室、起居室、厨房、卫生间,供暖季/空调季的室内设计温度为 18 ℃/26 ℃。起居室的空调启停作息时间为:18:00—24:00(工作日)或 8:00—24:00(周末)开启,其余时间关闭;卧室的空调启停作息时间为:22:00—次日 7:00(工作日)或 0:00—24:00(周末)开启,其余时间关闭。选取的 5 个城市(哈尔滨、长春、沈阳、北京、济南)的热工分区及建筑围护结构性能参数如表 2 所示。

表 2 气候分区及围护结构传热系数

Tab.2 Climate zone and heat transfer coefficient of envelop structure

城市	气候分区	供暖季	传热系数/(W/(m ² ·K))		
			外墙	屋顶	窗
哈尔滨	严寒 A 区	10 月 15 日— 次年 4 月 15 日	0.359	0.269	2.200
长春	严寒 C 区	10 月 20 日— 次年 4 月 6 日	0.374	0.273	2.400
沈阳		11 月 1 日— 次年 3 月 31 日			
北京 济南	寒冷地区	11 月 15 日— 次年 3 月 15 日	0.424	0.398	2.400

2.2 研究方法

2.2.1 负荷计算

采用 DeST 软件计算建筑负荷,住宅平面图如图 2 所示,负荷计算结果如表 3 所示。由表 3 可知,随着城市纬度的减小,该住宅建筑的全年最大热负荷和供暖季累计热负荷均呈减小趋势。

2.2.2 设备选型

根据市场产品的性能参数及变工况参数,拟合出热泵机组的性能曲线,如式(1)~式(3)所示。

$$Q_h = 1.196 6t_{ei} + 17.789, R^2 = 0.998 5 \quad (1)$$

$$P_h = 0.029 3t_{ei} + 6.873, R^2 = 0.958 2 \quad (2)$$

$$COP_h = 0.138 5t_{ei} + 2.815, R^2 = 0.996 5 \quad (3)$$

式中: Q_h 为热泵机组的制热量,kW; P_h 为热泵机组的制电耗,kW; t_{ei} 为蒸发器入口温度,℃; COP_h 为热泵机组的制热能效比。由上述计算式可得热泵机组的实际制热量,通过式(4)可计算出所需热泵台数。

$$\text{台数} = \max\left(\frac{\text{最大热负荷}}{\text{单台实际制热量}}\right) \quad (4)$$

根据埋管的每延米换热量估算法,取每延米取热量为 30 W/m,埋管间距取 5 m,埋管深度取 100 m,由最大取热量可计算出埋管数量。不同地区所拥有的土壤热物性参数不同,即使在同一地区,不同地点的土壤热物性参数也可能会有较大差异,考虑到影响土壤温度、建筑负荷的主要因素是气象条件,本文将地质参数设为定值:储存热导率取 1.4 W/(m·K),储热容量取 2 016 kJ/(m³·K)^[8]。取空气换热器的传热系数为 40 W/(m²·K)^[17],以保持土壤热平衡为基础,经过模拟试算得出空气换热器面积,主要设备选型如表 4 所示。

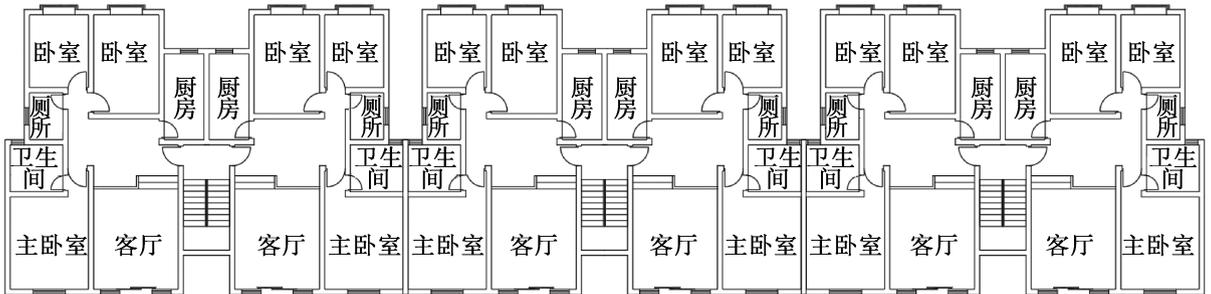


图 2 住宅平面图

Fig.2 Floor plan of the residential building

表 3 负荷统计表

Tab.3 Statistics of heating load

参数	哈尔滨	长春	沈阳	北京	济南
全年最大热负荷/kW	283	267	231	194	166
供暖季累计热负荷/(kW·h)	140 795	109 734	87 975	62 171	46 279

表 4 主要设备选型
Tab.4 Main equipment selection

项目	哈尔滨	长春	沈阳	北京	济南
热泵机组额定制热量/kW	455	364	273	212	182
地理管数量/根	63	63	57	50	44
空气换热器面积/m ²	110	110	100	100	100

2.2.3 系统模拟方法

在土壤源热泵系统的模拟中,TRNSYS 软件的地理管模型因具有良好的被认可性而被广泛应用^[18]。因此,本文采用 TRNSYS 软件对系统进行 10 年运行期的模拟,以得到常规土壤源热泵系统、

空气与土壤复合源热泵系统的土壤温度、运行能耗等参数,从而得出复合源热泵系统相对常规系统的节能率及费用节省率。空气与土壤复合源热泵系统 TRNSYS 模型如图 3 所示,该系统模型的控制策略如表 5 所示。

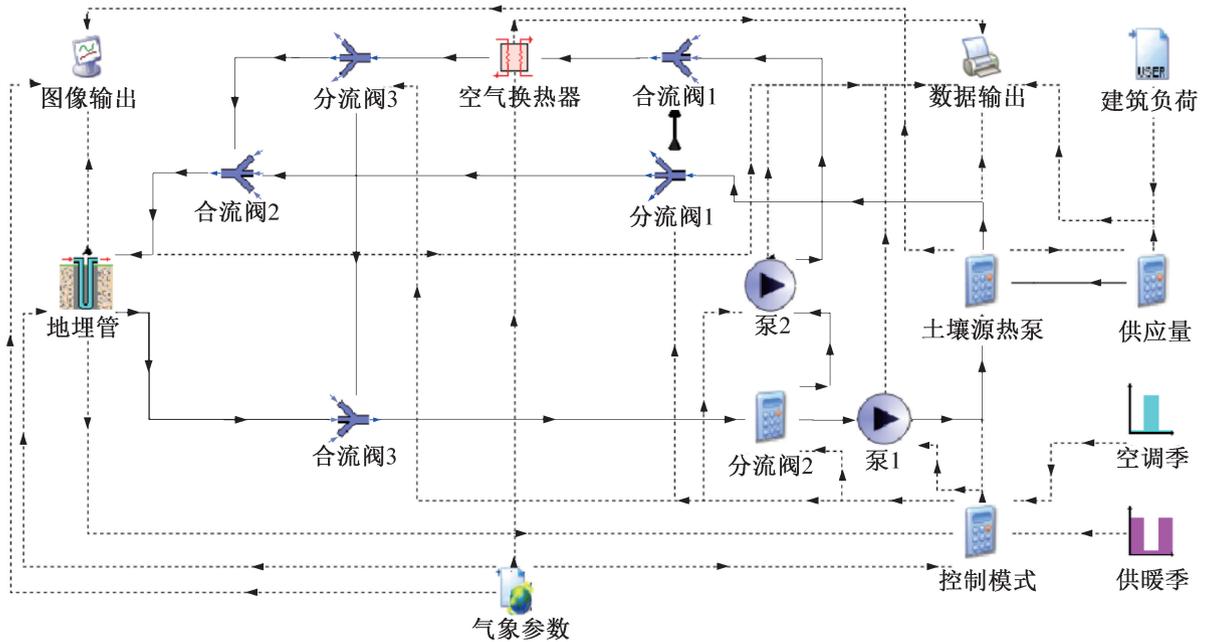


图 3 空气与土壤复合源热泵系统 TRNSYS 模型

Fig.3 TRNSYS model of air-ground hybrid source heat pump system

表 5 控制策略

Tab.5 Control strategy

模式	哈尔滨	长春	沈阳	北京	济南
GSHP 模式	供暖季, $T_{air} \leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	供暖季, $T_{air} \leq 6\text{ }^{\circ}\text{C}$	供暖季, $T_{air} \leq 8\text{ }^{\circ}\text{C}$	供暖季, $T_{air} \leq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	供暖季, $T_{air} \leq 13\text{ }^{\circ}\text{C}$
间接 ASHP 模式	供暖季, $T_{air} > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	供暖季, $T_{air} > 6\text{ }^{\circ}\text{C}$	供暖季, $T_{air} > 8\text{ }^{\circ}\text{C}$	供暖季, $T_{air} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	供暖季, $T_{air} > 13\text{ }^{\circ}\text{C}$
补热模式	非供暖季和空调季, $T_{air} > 16\text{ }^{\circ}\text{C}$	非供暖季和空调季, $T_{air} > 18\text{ }^{\circ}\text{C}$	非供暖季和空调季, $T_{air} > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	非供暖季和空调季, $T_{air} > 24\text{ }^{\circ}\text{C}$	非供暖季和空调季, $T_{air} > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$

注: T_{air} 为环境空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

3 结果分析

3.1 匹配设计方案

为充分发掘空气与土壤复合源热泵系统的优点,在保证土壤热平衡的前提下,对减少埋管数量从而减少初投资的效果进行分析。在减少埋管数量的同时,为免地温降低,通过增大空气换热器容量来维持地温平衡。经过模拟调试,在保障供暖效果的前提下,设计出各城市埋管数量最少时的空气换热器与埋管的匹配方案,并与土壤源热泵系统(常规方案)汇总于表 6 中,相关的比例系数如图 4 所示。由表 6 和图 4 可知,随着城市纬度的减小,该住宅建筑的常规方案和新匹配方案的埋管数量均减小,埋管减少比例、空气换热器面积/埋管长度的比例总体呈上升趋势。

对于哈尔滨、长春、沈阳 3 个地区,三者的埋管减少比例、空气换热器面积/埋管长度比例基本相同,相比于常规方案,采用新匹配方案时可将埋管数量减少约 29%,此时每延米埋管需对应匹配 0.029 m^2 的空气换热器面积;对于北京地区,相比于常规方案,采用新匹配方案时可将埋管数量减少约 40%,此时每延米埋管需对应匹配 0.040 m^2 的空气换热器面积;对于济南地区,相比于常规方案,采用新匹配方案时可将埋管数量减少约 43%,此时每延米埋管需对应匹配 0.050 m^2 的空气换热器面积。

表 6 设备选型
Tab.6 Equipment selection

参数	哈尔滨	长春	沈阳	北京	济南
常规方案埋管数量/根	63	63	57	50	44
新匹配方案埋管数量/根	45	45	40	30	25
新匹配方案空气换热器面积/ m^2	130	130	120	120	125

3.2 新匹配设计方案的效果

根据文献[16]可知,该空气与土壤复合源热泵系统通过空气换热器的补热作用,有效保证了土壤热平衡,也能够提供良好的供暖保障效果。因此,本文仅分析埋管数量减少后的新匹配设计方案的土壤热平衡和供暖保障效果。

3.2.1 土壤温度变化

利用 TRNSYS 软件模拟了常规系统与复合源新方案系统运行 10 年后的状况,表 7 所示为初始土壤

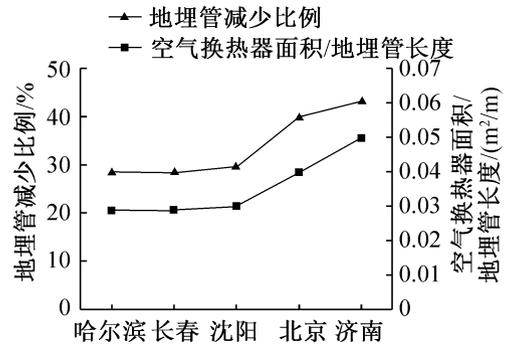


图 4 埋管减少比例及空气换热器面积与埋管长度之比
Fig.4 Reduction rate of ground heat exchangers and the ratio of air-water heat exchanger area to ground heat exchanger length

温度和 10 年运行期结束时的土壤温度。由表 7 可知,常规热泵的长期运行会使土壤温度降低,而复合源新方案系统仍可以保持土壤温度稳定。

表 7 土壤温度统计
Tab.7 Statistics of soil temperature

温度/ $^{\circ}\text{C}$	哈尔滨	长春	沈阳	北京	济南
初始温度	6.20	7.70	10.40	14.30	16.70
常规系统结束温度	1.21	3.32	6.46	11.02	13.88
新方案系统结束温度	6.05	7.80	10.65	14.21	17.01

3.2.2 供暖保障效果

在北方地区,土壤源热泵长期运行后,通常会因地下土壤温度降低而导致机组制热性能下降,从而无法提供足够的热量来保证供暖效果,对此通常采用供暖不保证小时数来评估供暖保障效果。供暖不保证小时数越小,表明系统的可靠性和供暖的保障效果越好。

5 个城市的常规系统、复合源新方案系统的第 10 年供暖不保证小时数如表 8 所示。由表 8 可知:1)对于常规方案,哈尔滨地区的供暖不保证小时数最大,济南地区的供暖不保证小时数最小,供暖不保证小时数的大小与埋管供暖季累计取热量有关;取热量越大,土壤温度降低越快,则更易出现供暖不保证时间;2)复合源新方案系统的供暖不保证小时数均小于常规系统,说明复合源新方案系统的供暖保障效果好于常规热泵,但在不同地区,二者效果的相差程度是不同的,哈尔滨地区二者相差 28 h,而济南地区仅相差 1 h,说明二者的相差程度与埋管供暖季累计取热量的大小呈正相关;3)5 个城市的复合源新方案系统的供暖不保证小时数均较小,说明新方案仍然具有良好的供暖保障效果。

表 8 供暖不保证小时数
Tab.8 Unguaranteed heating time

参数	哈尔滨	长春	沈阳	北京	济南
常规系统供暖不保证小时数/h	38	22	18	9	9
新方案系统供暖不保证小时数/h	10	13	8	8	8

3.2.3 节能性分析

通过 TRNSYS 模拟,得到 10 年运行期系统功耗的模拟结果,如表 9 所示。由表 9 可知,该住宅建筑的复合源新方案系统在哈尔滨地区的节能率为正值,在其他 4 个城市的节能率均为负值。由 2.2.1 节的负荷结果可知,随着 5 个城市纬度的降低,供暖季累计热负荷逐渐减小,则相应的地理管累计取热

量也会减小,此时常规系统的土壤温度降幅较小,常规系统与复合源系统的土壤温度差距较小,因此机组的性能差距较小。当建筑累计热负荷的数值基数比较小时,由于复合源系统有附加的补热水泵功耗,导致复合源系统因制热 COP 相对提高而节省下来的能耗小于补热水泵的附加功耗,使节能率呈现为负值。

表 9 系统能耗及节能率
Tab.9 Energy consumption and energy saving rate of heat pump systems

参数	哈尔滨	长春	沈阳	北京	济南
常规系统能耗/(MW·h)	536	363	255	151	102
新方案系统能耗/(MW·h)	514	366	263	169	119
节能率	4.1%	-0.8%	-3.1%	-11.9%	-16.7%

由此可知,建筑全年累计热负荷的数值基数较大时,复合源系统具有一定的节能性;但全年累计热负荷的数值基数较小时,复合源系统不一定具有节能性。

3.2.4 经济性分析

本文以 10 年运行期为例计算系统总费用,总费用由初投资费用和运行费用构成。根据实际工程经验,取热泵机组为 700 元/kW、钻孔为 100 元/延米、

空气换热器为 42 元/m²、水泵为 200 元/(m³/h),估算各方案的初投资费用;取电价为 0.7 元/(kW·h) 计算运行费用。将初投资按 10 年运行期平均至每一年,再与每年的运行费用合计,即得到费用年值,表 10、表 11 分别列出了费用年值、费用统计表(其中“节省占比”代表节省的初投资或运行费用占总节省费用的比例,用以表明费用的节省来源)。

表 10 费用年值
Tab.10 Annual cost

年份	哈尔滨		长春		沈阳		北京		济南	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	13.1	11.9	11.3	10.1	9.5	8.1	7.6	6.0	6.5	4.9
2	13.3	11.9	11.4	10.1	9.5	8.1	7.7	6.0	6.5	4.9
3	13.4	11.9	11.5	10.1	9.5	8.1	7.7	6.0	6.5	4.9
4	13.5	11.9	11.5	10.1	9.6	8.1	7.7	6.0	6.5	4.9
5	13.6	11.9	11.6	10.1	9.6	8.1	7.7	6.0	6.5	4.9
6	13.7	11.9	11.6	10.1	9.6	8.1	7.7	6.0	6.5	4.9
7	13.8	11.9	11.7	10.1	9.7	8.1	7.7	6.0	6.5	4.9
8	13.8	11.9	11.7	10.1	9.7	8.1	7.7	6.0	6.5	4.9
9	13.9	11.9	11.7	10.1	9.7	8.1	7.7	6.0	6.5	4.9
10	13.9	11.9	11.8	10.1	9.7	8.1	7.8	6.0	6.5	4.9
总计/万元	135.9	118.8	115.7	101.0	96.0	81.3	77.1	59.7	65.2	48.7

注:A 代表常规方案;B 代表复合源新方案。

表 11 费用及节省率统计表
Tab.11 Statistics of cost and saving rate

项目	哈尔滨	长春	沈阳	北京	济南
常规系统的初投资/运行费用/总费用/万元	98.4/37.5/135.9	90.3/25.4/115.7	78.2/17.8/96.0	66.5/10.6/77.1	58.1/7.1/65.2
新方案系统的初投资/运行费用/总费用/万元	82.8/36.0/118.8	75.4/25.6/101.0	62.9/18.4/81.3	47.9/11.8/59.7	40.4/8.3/48.7
初投资/运行费用/总费用的节省量/万元	15.6/1.5/17.1	14.9/-0.2/14.7	15.3/-0.6/14.7	18.6/-1.2/17.4	17.7/-1.2/16.5
总费用节省率	12.6%	12.7%	15.3%	22.6%	25.3%
初投资/运行费用的节省占比	91.2%/8.8%	101.4%/-1.4%	104.1%/-4.1%	106.9%/-6.9%	107.3%/-7.3%

由表 10 可知,5 个城市常规方案的费用年值基本呈逐年上升趋势,说明常规系统长期运行导致土壤温度下降使每年的耗电量逐渐增加;而复合源新方案系统的费用年值基本保持不变,再次说明复合源方案具有保持土壤热平衡的优势。

由表 11 可知,在总费用方面,复合源新方案系统相对于常规方案具有经济性优势。但在节省占比方面,不同地区特点各异:哈尔滨地区的初投资节省占比为 91.2%,运行费用节省占比为 8.8%,可见系统节省潜力主要来源于初投资,运行费用具有节省效果但所起作用较小;长春、沈阳、北京、济南 4 个城市的运行费用节省量为负,运行费用节省占比为负,而初投资的节省占比大于 100%,可见在这 4 个城市只有初投资方面具有节省潜力。由此可知,建筑累计热负荷的数值基数较大时,复合源系统在初投资、运行费用均具有一定的经济性优势;但累计热负荷的数值基数较小时,复合源系统仅在初投资方面具有一定的经济性优势。

4 结论

本文以哈尔滨、长春、沈阳、北京、济南的住宅为例,建立了空气与土壤复合源热泵系统的 TRNSYS 仿真模型,并进行了 10 年运行期的模拟。对埋管和空气换热器的匹配设计及减少埋管数量后的空气与土壤复合源热泵系统在供暖保障效果、节能性、经济性方面的模拟结果进行了分析,得到如下结论:

1) 在保障供暖效果的前提下,空气与土壤复合源热泵系统在哈尔滨、长春、沈阳、北京、济南的埋管数量最大减少比例分别为 29%、29%、30%、40%、43%,每延米埋管需对应匹配 0.029、0.029、0.030、

0.040、0.050 m² 的空气换热器面积。

2) 与常规土壤源热泵系统相比,减少埋管数量后的空气与土壤复合源热泵系统在长期运行中可维持土壤温度稳定,且具有良好的供暖保障效果,可适用于各种埋管全年累计取热量大于全年累计放热量的场合。

3) 建筑累计热负荷的数值基数较大时,减少埋管数量后的复合源系统具有一定的节能性;但累计热负荷的数值基数较小时,则不一定具有节能性。因此,应用该系统时主要关注点不应放在节能上。

4) 减少埋管数量后的空气与土壤复合源热泵系统具有经济性优势,在哈尔滨、长春、沈阳、北京、济南的 10 年总费用节省率分别为 12.6%、12.7%、15.3%、22.6%、25.3%。

参考文献

[1] 武思彤,白莉,刘伟娟. 严寒地区土壤源热泵系统热失衡问题及其技术进展[J]. 北方建筑,2017,2(3):56-59. (WU Sitong, BAI Li, LIU Weijuan. The technical progress of solving the thermal imbalance of ground source heat pump system in extreme cold area[J]. Northern Architecture, 2017, 2(3):56-59.)

[2] YOU Tian, WU Wei, SHI Wenxing, et al. An overview of the problems and solutions of soil thermal imbalance of ground-coupled heat pumps in cold regions[J]. Applied Energy, 2016, 177:515-536.

[3] 纪文杰,游田,白绍文,等. 埋管设计对寒冷地区埋管地源热泵系统性能的影响[J]. 暖通空调,2015,45(3):113-118. (JI Wenjie, YOU Tian, BAI Shaowen, et al. Effect of buried pipe design parameters on performance of ground-source heat pump systems in cold zone[J]. Journal of HV&AC, 2015, 45(3):113-118).

- [4] 游田,吴伟,李先庭,等. 太阳能在夏热冬冷地区土壤源热泵系统中的耦合应用[J]. 建筑科学, 2014, 30(12): 20-24. (YOU Tian, WU Wei, LI Xianting, et al. Application of solar energy combined with ground-coupled heat pump system in hot summer and cold winter region [J]. Building Science, 2014, 30(12):20-24.)
- [5] 韩宗伟,王一茹,阿不来提·依米提,等. 空气源热泵辅助吸收式地源热泵系统的适用性分析[J]. 制冷技术, 2014, 34(1): 55-59. (HAN Zongwei, WANG Yiru, ABLAT Yimit, et al. Applicability analysis on absorption ground source heat pump system assisted by air source heat pump [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2014, 34(1):55-59.)
- [6] 杨卫波,施明恒,董华. 太阳能-土壤源热泵系统联合供暖运行模式的探讨[J]. 暖通空调, 2005, 35(8): 25-31. (YANG Weibo, SHI Mingheng, DONG Hua. Combined heating mode of solar-earth source heat pump systems [J]. Journal of HV&AC, 2005, 35(8):25-31.)
- [7] 余延顺,廉乐明. 寒区太阳能-土壤源热泵系统太阳能保证率的确定[J]. 热能动力工程, 2002, 17(4): 393-395, 436. (YU Yanshun, LIAN Leming. Determination of the solar energy assurance factor of a solar energy-ground soil-source heat pump system in frigid regions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2002, 17(4):393-395,436.)
- [8] 游田. 复合补热机组与土壤源热泵系统联合运行特性研究[D]. 北京:清华大学, 2014. (YOU Tian. Research on operating performance of hybrid ground-coupled heat pump system with heat compensation unit [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.)
- [9] 花莉,范蕊,潘毅群,等. 复合式地源热泵系统的回顾与发展[J]. 制冷与空调(四川), 2011, 25(5): 518-525, 530. (HUA Li, FAN Rui, PAN Yiqun, et al. Review and development of hybrid ground-coupled heat pump system [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 25(5): 518-525,530.)
- [10] 程晋洋,朱彩霞,李晓光. 复合地源热泵系统的研究进展探讨[J]. 建筑节能, 2015, 43(6): 6-9. (CHENG Jinyang, ZHU Caixia, LI Xiaoguang. Research progress of composite ground source heat pump air conditioning system [J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(6):6-9.)
- [11] 游田,王宝龙,石文星. 空气-土壤双源热泵系统在我国北方地区的应用[J]. 暖通空调, 2016, 46(12): 40-45. (YOU Tian, WANG Baolong, SHI Wenxing. Air-source and ground-source heat pump application to northern regions of China [J]. Journal of HV&AC, 2016, 46(12): 40-45.)
- [12] YOU Tian, SHI Wenxing, WANG Baolong, et al. A new ground-coupled heat pump system integrated with a multi-mode air-source heat compensator to eliminate thermal imbalance in cold regions [J]. Energy and Buildings, 2015, 107:103-112.
- [13] 孟莉思. 严寒地区土壤空气复合热源热泵的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013. (MENG Lisi. Probe on soil-air composite heat pump system in severe cold zone [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [14] 穆康. 土壤源热泵冬夏取排热量不平衡的大气热补偿方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010. (MU Kang. Air thermal to compensate the imbalance of heat absorption in winter and heat releasing in summer of ground source heat pump system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [15] 孙海龙. 严寒地区空气热源土壤蓄热热泵供暖系统可行性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011. (SUN Hailong. The feasibility study on ground source heat pump heating system with air source ground thermal storage in severely cold region [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [16] LI Xianting, LYU Weihua, RAN Siyuan, et al. Combination principle of hybrid sources and three typical types of hybrid source heat pumps for year-round efficient operation [J]. Energy, 2020, 193:116772.
- [17] 杨子旭,吕伟华,冉思源,等. 空气-土壤源柔性热泵系统在寒冷地区小型建筑中的能耗分析[J]. 流体机械, 2018, 46(9): 75-79. (YANG Zixu, LYU Weihua, RAN Siyuan, et al. Analysis of energy consumption of air-ground source flexible heat pump system in small buildings in cold regions [J]. Fluid Machinery, 2018, 46(9):75-79.)
- [18] 吴音璇,王健. 基于 TRNSYS 的地源热泵系统运行策略分析[J]. 建筑热能通风空调, 2018, 37(11): 16-20. (WU Yinxuan, WANG Jian. Operation strategy analysis of ground source heat pump system based on TRNSYS [J]. Building Energy & Environment, 2018, 37(11):16-20.)

通信作者简介

李先庭,男,教授,清华大学建筑学院,(010)62785860, E-mail: xtingli@tsinghua.edu.cn. 研究方向:面向需求的非均匀环境营造理论与节能高效的人工环境系统。

About the corresponding author

Li Xianting, male, professor, School of Architecture, Tsinghua University, +86 10-62785860, E-mail: xtingli@tsinghua.edu.cn. Research fields: demand-oriented non-uniform indoor environment and energy-efficient equipment and system for built environment.