

超低能耗建筑中土壤源热泵系统的应用分析

刘 昱, 李慧星, 冯国会

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 沈阳 110168)

摘 要: 在分析现行节能标准建筑与超低能耗建筑冷热负荷的基础上,对比北京某办公建筑在现行节能标准建筑与超低能耗建筑标准下的负荷差异,相对现阶段节能标准建筑,建筑热负荷大幅减小,冷负荷则变化不大,同时负荷分布更均匀。通过 Fluent 软件模拟北京地区在设计工况下单孔地埋管换热器运行 30 d 的运行性能。最后,在超低能耗建筑标准下,采用 TRNSYS 软件模拟土壤源热泵机组的相关性能参数。随后通过 TRNSYS 模拟比较不同钻孔深度与钻孔间距时土壤源热泵系统性能差异。

关键词: 能源利用; 土壤源热泵; 性能系数; 数值模拟

中文分类号: TU83

文献标识码: A

0 引 言

目前,全球范围内建筑能耗约占总能耗的 40%^[1,2],同时约占能源相关的温室气体排放的 30%^[3]。为了应对目前的能源与环境问题,减少用于建筑的能源消耗,各国均制定了相应的建筑节能法规,并且不断修改提高标准。如美国的《ASHRAE 90.1 标准》和《IECC 标准》;德国的保温条例与建筑节能条例;日本的节约能源法;中国的公共建筑节能设计标准及分地区居住建筑节能设计标准等等。正是在这样一种背景下,零能耗建筑应运而生。

目前中国也在进行零能耗建筑相关研究,2013 年徐 伟等^[4]结合国际“零能耗建筑”发展历程,结合我国实际情况,给出了适用于中国的“零能耗建筑”的定义。除此之外,建立了一批包括中国建筑科学研究院近零能耗示范建筑^[5]、河北威卢克斯办公楼^[6]以及哈尔滨溪树庭院在内的近零能耗示范建筑项目。徐 伟^[7]在对国内外“近零能耗建筑”发展及研究进行分析的基础上,探讨中国“近零能耗建筑”发展所面临的问题,对中国近零能耗建筑的健康发展提供了相应的建议。徐 伟等^[8]立足中国基本国情,考虑我国气候、生活习惯、建筑特点及能耗现状的基础上,初步建立了中国被动式超低能

耗建筑能耗指标体系。陈 强等^[9]针对寒冷地区被动式超低能耗建筑的特点,对适宜于寒冷地区节能技术进行了详细的探讨。张 颖等^[10]在对寒冷地区超低能耗建筑与常规节能建筑性能指标进行对比的基础上,对某超低能耗建筑设计方案的经济性进行了分析。

近年来超低能耗建筑乃至近零能耗建筑得到广泛认可,土壤源热泵系统由于其同时具有供暖制冷功能以及较高的性能系数和其属于可再生能源的特性导致其在超低能耗建筑中的应用比例较高。本文在比较超低能耗建筑与常规建筑冷热负荷差异的基础上,研究土壤源热泵在超低能耗建筑应用中的实际性能。

1 超低能耗建筑负荷计算

目前实现超低能耗的途径主要包括采用各种被动式节能技术包括:遮阳、被动得热、建筑朝向优化、高性能外围护结构、自然通风、日光照明等;各种主动式节能技术包括:使用节能设备、节能灯具、通风(生活热水)热回收、建筑自动化、照明控制等;以及采用光电、风电、地源热泵、生物质能等可再生能源。由于超低能耗建筑对节能及环保更高的要求,超低能耗建筑通常要求采用更高性能的外围护结

收稿日期: 2016-07-11

基金项目: 辽宁省基金项目(2016010639); 辽宁省教育厅项目(L2015440); 中华人民共和国住房和城乡建设部项目(2016-K1-020)

通信作者: 李慧星(1964—), 女, 硕士、教授, 主要从事可再生能源综合利用和建筑环境室内空气质量保障技术方面的研究。
lihuixing07@163.com

构以及采用更加节能的照明及办公灯具,其相对常规建筑而言在各方面存在着较大的差异。本文拟比较现行公共建筑节能标准及超低能耗建筑技术导则推荐值下建筑负荷差异。以北京某办公建筑为例,比较其在现行节能设计标准《公共建筑节能设计标准》GB 50189—2015 和参照住房和城乡建设部印发的关于超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居

住建筑)2 种标准下建筑冷热负荷差异。该办公建筑标准层平面图如图 1 所示,建筑主要包括办公室与会议室及卫生间等附属空间。

参照 2 种标准,选取的主要围护结构参数如表 1 所示。从表 1 可看出,在外围护结构方面,超低能耗建筑推荐值相对现行节能标准规范值而言,性能提升均较大。

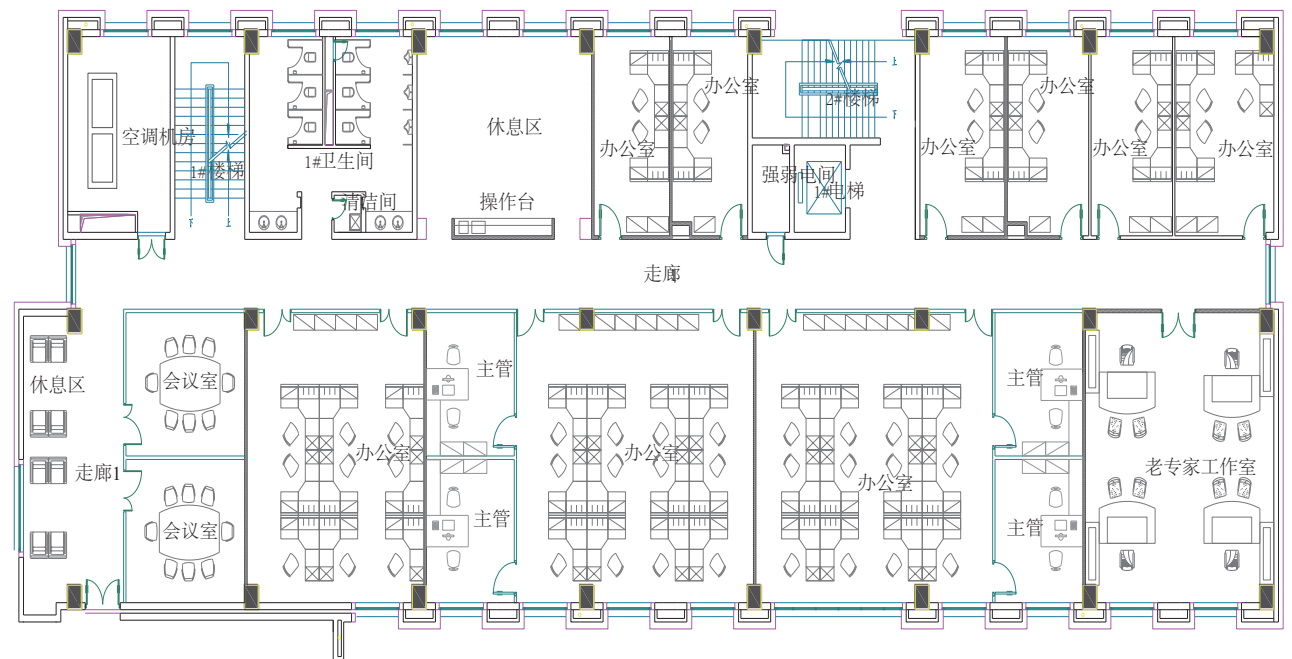


图 1 某办公建筑标准主层平面图
Fig. 1 Standard main floor plan of office building

表 1 围护结构的传热系数				
Table 1 Heat transfer coefficient of building envelop				
标准类型	W/(m ² ·K)			
	外墙	屋顶	外窗	隔墙
公共建筑节能设计标准	0.45	0.40	2.2	1.5
超低能耗绿色建筑技术导则	0.20	0.15	1.0	1.2

在后续进行负荷计算时,除围护结构参数外,其他设定参数如照明功率密度、室内人均使用面积、除照明外其他内部得热量等参数设定如表 2 所示。

参照上述取值,采用 TRNSYS 对其全年负荷进行计算,得到 2 种标准下该办公建筑的负荷分布如图 2 所示。

表 2 其他设定参数				
Table 2 Other setting parameters				
标准类型	照明密度/ W·m ⁻²	人均使用面积/ 米 ² ·人 ⁻¹	除照明其他内部得热/ W·m ⁻²	热回收效率/%
公共建筑节能设计标准	9	10	14	60
超低能耗绿色建筑技术导则	5	10	8	80

由图 2 可知,相对于采用现行公建标准的办公建筑,采用超低能耗导则推荐标准的建筑由于围护结构性能的改善,供暖季热负荷大幅减小。以峰值热负荷为例,采用现行公建标准的建筑峰值热负荷为 2.00×10⁶ kJ/h;而采用超低能耗建筑导则时,峰值热负荷为 1.29×10⁶ kJ/h,超低能耗建筑峰值负荷仅

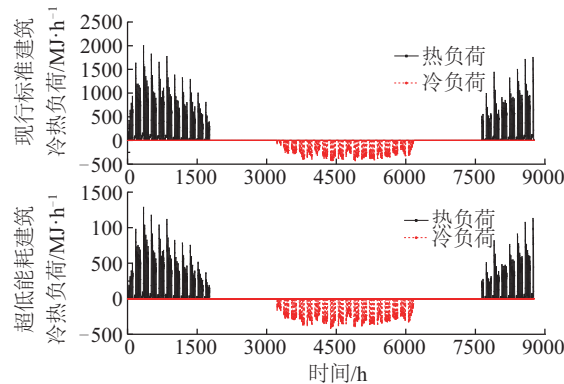
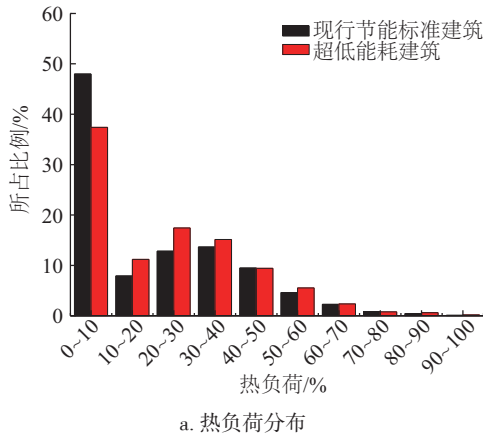


图2 2种标准下建筑负荷比较

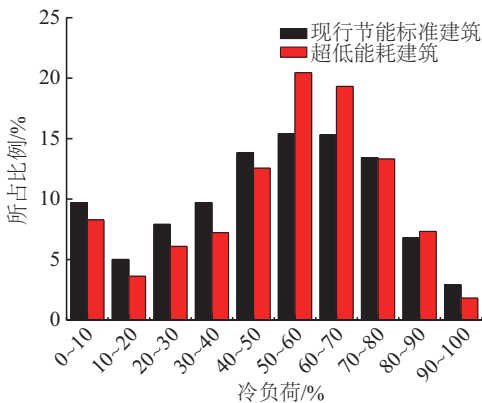
Fig. 2 Comparison of 2 kinds of standard building load

为现行标准的 64.5%。对于供冷季冷负荷,虽然建筑围护结构性能的提升导致通过围护结构传入室内的热量减少,但室内人员、灯光及设备的产热也不能及时散出,总效果是超低能耗建筑相对现行节能标准建筑,其峰值冷负荷略有下降,采用现行公建标准的建筑峰值热负荷为 4.29×10^5 kJ/h;而采用超低能耗建筑导则时,峰值热负荷为 4.17×10^5 kJ/h,峰值冷负荷下降不足 3%。

对上述 2 种标准下的建筑冷热负荷进行统计,得到负荷分布如图 3 所示。由图 3 可知 2 种节能标准下建筑热负荷分布均不太均匀,低负荷所占时间较长,在现行节能标准中热负荷分布在峰值负荷的 0%~10%区间的时间占全年供暖时间的 45%以上;在超低能耗建筑推荐标准中,热负荷分布在峰值负荷的 0%~10%区间的时间占全年供暖时间的 35%以上。相对而言冷负荷分布相对比较均匀,除建筑冷负荷分布在峰值冷负荷 0%~10%的负荷外,其余负荷分布接近正态分布。而且对比超低能耗建筑技术导则与现行公共建筑标准建筑,可知满



a. 热负荷分布



b. 冷负荷分布

图3 某办公建筑在2种节能标准下的负荷分布

Fig. 3 Load distribution of office building under two kinds of energy saving standards

足超低能耗建筑技术导则的建筑冷热负荷分布更加均匀。

2 土壤源热泵地埋管换热器性能模拟

2.1 模型尺寸

在负荷计算的基础上研究土壤源热泵系统在超低能耗建筑中的应用特点。为了进行系统分析,本文首先研究土壤源热泵系统的性能特性,相关土壤源热泵系统的性能参数可用于指导地埋管换热器系统的设计。首先对单孔地埋管换热器的换热性能进行模拟研究。结合北京地区的实际工程情况,选取地埋管钻孔深度为 100 m,钻孔直径 120 mm,地埋管管径为 25 mm,管中心距为 65 mm,埋管土壤尺寸为 6 m×6 m×103 m。选取某岩土热物性测试相关数据保证模拟结果的可靠性,将测试得到土壤热物性参数、以及相应的回填材料、管材和流体热物性参数见表 3。

表3 物性参数

Table 3 Physical properties

类型	土壤	回填材料	PE管	水
导热系数/ $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	2.29	1.65	0.45	0.57
密度/ $kg\cdot m^{-3}$	1900	1900	960	999.7
比热容/ $kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	1.699	1.737	2.200	4.191

2.2 模型简化

地埋管换热器的运行是一个涉及到对流、导热的长时间,多相,空间区域极大的非稳态复杂传热过程。为了便于计算,做以下假设:

- 1) 忽略地表温度波动对岩土温度的影响,认为岩土的温度均匀;
- 2) 岩土各向同性且热物性参数保持不变;
- 3) 认为回填材料与管壁及钻孔壁密实接触,忽略 2 部分的接触热阻;
- 4) 忽略地下水流动对换热器的影响;
- 5) 土壤远边界温度保持恒定。

2.3 模型及网格划分

参照上述几何尺寸通过 SpaceClaim 建立地埋管换热器模型,导入 ANSYS 的几何模型读取文件如图 4 所示。随后通过 ANSYS 中 MESH 部件采用扫掠法对模型进行网格划分,同时控制地埋管换热器各细部尺寸,保证网格质量。网格划分结果如图 5 所示。

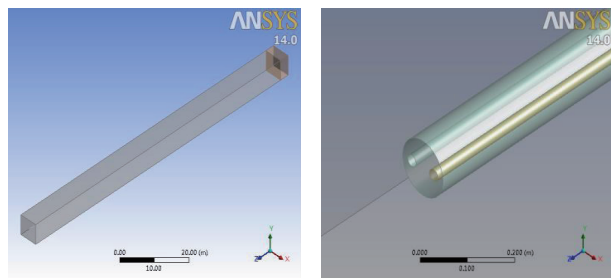


图 4 地埋管换热器物理模型

Fig. 4 Physical model of buried tube heat exchanger

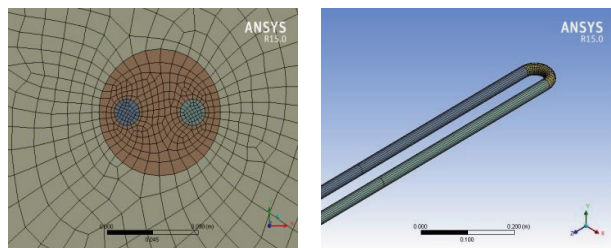


图 5 地埋管换热器的网格划分

Fig. 5 Mesh of ground heat exchanger

如图 5 所示,由于主要关注地埋管换热器的横向传热,纵向上地埋管换热器温差较小,因此纵向网格相对稀疏,而横向格划分比较密集。参照相关地埋管换热器热阻计算结果,地埋管换热器的对流热阻占总热阻比例较小,可忽略不计,因此这里并

未对地埋管换热器管壁边界部分进行网格加密,但为了保证计算结果的准确性,地埋管截面网格划分仍比较密集。U 形管弯管处属于流场急剧变化区域,其网格也被加密。

2.4 模拟结果

分析上述办公建筑参照超低能耗建筑技术导则时的冷热负荷计算结果可知,对于北京地区冬季供暖负荷仍是其主要负荷,因此模拟了地埋管换热器冬季取热工况,用于指导地埋管换热器设计。参照北京地区空调室外设计温度,设定土壤顶面温度为 $-9.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;参照北京地区土壤温度分布曲线,设定远边界土壤温度为 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$;参照相关标准要求,冬季地埋管换热器源侧进口水温不宜低于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,设定入口水温为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$;管内流速则参照《地源热泵系统工程技术规范》相关要求,设为 0.6 m/s ;工作时间参照北京地区正常的工作时间,设定土壤源热泵系统运行时间为 $08:00 \sim 18:00$ 。采用上述边界条件,得到运行 30 d 的地埋管换热器运行时间内日平均出口水温及日平均换热量如图 6 所示。

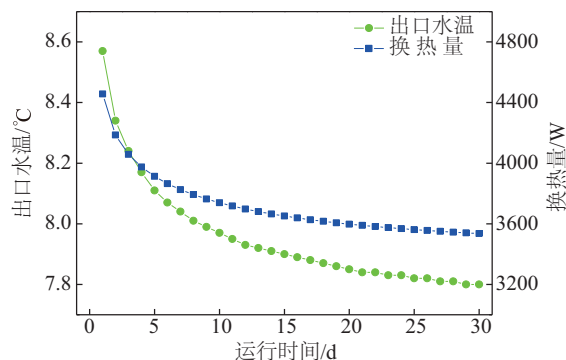


图 6 地埋管换热器性能模拟

Fig. 6 Simulation of ground heat exchanger performance

由图 6 可知,在冬季取热工况,在给定入口温度的情况下,随着运行时间的增长,地埋管换热器出口水温逐渐下降,而且呈现先快后慢的趋势。在运行的第 1 天,地埋管换热器运行时间内的平均出口水温为 $8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$;在运行的第 30 天,地埋管换热器运行时间内的平均出口水温为 $7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相应的地埋管换热器换热能力也逐渐下降,地埋管运行第 1 天平均换热量为 4456.9 W ,而在第 30 天换热量为 3535.5 W ,30 d 内平均换热量为 3722.5 W 。

3 土壤源热泵系统模拟

3.1 模型建立

在超低能耗建筑负荷计算及设计工况下地埋管换热器换热性能模拟的基础上,进行土壤源热泵系统在超低能耗建筑应用的系统性能模拟分析。在上述地埋管换热器性能模拟中,得到地埋管换热器换热能力为 3722.5 W,上述模拟的超低能耗建筑峰值热负荷为 1.29×10^6 kJ/h (358.3 kW),设定地埋管换热器钻孔数目为 97,研究土壤源热泵系统在超低能耗建筑中的运行性能。在 TRNSYS 中土壤源热泵系统的模型如图 7 所示。

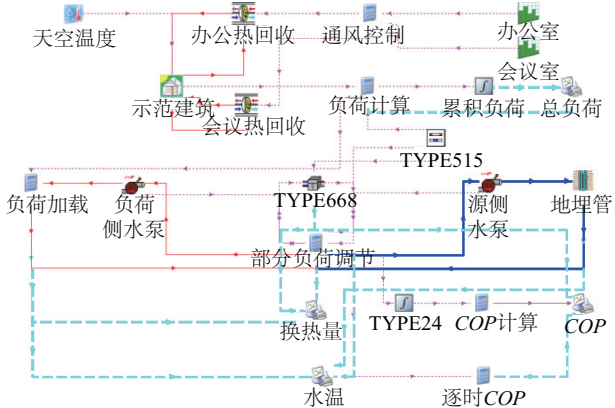


图7 土壤源热泵系统模型原理图

Fig. 7 Principle diagram of model of ground-coupled heat pump system

图 7 中上半部分用于建筑的负荷计算,主要包括气象参数部件、太阳辐射、天空温度、建筑模型、新风热回收机组以及相应附属部件;下半部分主要用于系统模拟,主要包括热泵机组、源侧及负荷侧水泵、地埋管换热器及相应的计算显示部件。

3.2 常规设计参数下的模拟结果

3.2.1 地埋管换热器负荷侧进出口水温

图 8 为热泵机组负荷侧(即是冬季供暖供回水温度和夏季的冷冻水温度)进出口水温变化曲线。由图 8 可知,冬季热泵供水温度在 45.0 ℃附近波动,最低供水温度为 43.8 ℃,最低供水温度对应着建筑热负荷峰值出现的时间,供暖季平均供水温度为 44.9 ℃;供暖季最高供回水温差为 6.27 ℃,平均供回水温差为 1.52 ℃,平均供回水温差较低的原因

是冬季低负荷运行时间较长。夏季热泵供水温度始终维持在 12.0 ℃,这是因为机组是根据冬季峰值负荷选取的,在此情况下夏季逐时负荷均低于机组的额定负荷。制冷季最大供回水温差为 4.98 ℃,平均供回水温差为 2.60 ℃,夏季负荷侧平均供回水温差大于冬季负荷侧平均供回水温差,这是由于夏季负荷分布更加均匀。

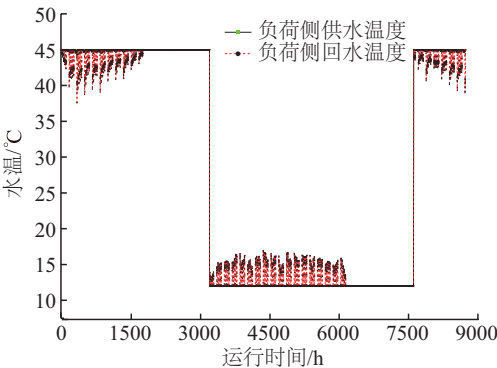


图8 地埋管换热器负荷侧供回水温度

Fig. 8 Supply and return water temperature of heat exchanger load side

3.2.2 地埋管换热器源侧进出口水温

图 9 为热泵源侧(即夏季冷却水)进出口水温变化曲线。由图 9 可知,冬季热泵源侧最高进水温度为 16.2 ℃,最低进水温度为 13.0 ℃,最低供水温度对应着建筑热负荷峰值出现的时间,且整个供暖季热泵机组的供水温度高于标准推荐的 4 ℃的下限值。供暖季平均供水温度为 15.2 ℃,供暖季平均供回水温差为 1.1 ℃。夏季热泵机组源侧进口温度在 16.0 ~ 18.2 ℃之间,整个供暖季热泵机

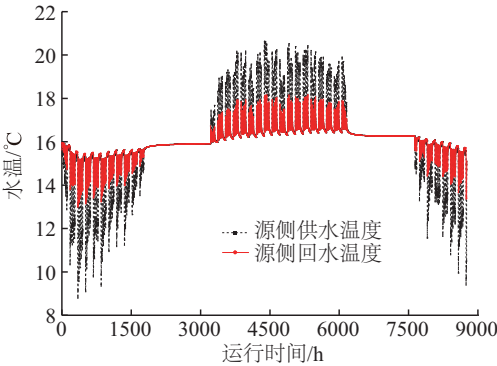


图9 地埋管换热器源侧供回水温度

Fig. 9 Supply and return water temperature of ground heat exchanger source

组的源侧进口温度低于推荐的上限值 33.0 ℃,同样最高供水温度出现在建筑冷负荷的峰值时刻,制冷季平均供水温度为 16.8 ℃,制冷季平均供回水温差为 1.1 ℃。

3.2.3 机组制冷制热量及逐时性能参数

由图 10 可知,机组制冷制热量与建筑冷热负荷相近。而且从图 10 可看出,机组在冬夏季性能参数均较高,在夏季机组 *EER* 为 5.19~5.95,机组夏季机组平均 *EER* 为 5.73;在冬季机组 *COP* 为 3.32~3.64,机组冬季平均 *COP* 为 3.58。

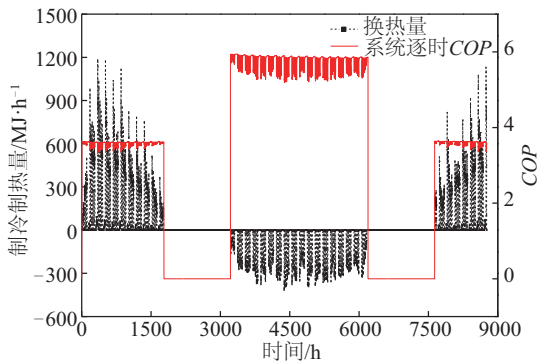


图 10 热泵机组逐时制冷制热量及逐时性能参数
Fig. 10 Hourly cooling and heat capacity and hourly coefficient of performance of heat pump units

3.2.4 系统性能系数分析

通过上述系统模型,计算得到全年土壤源热泵系统制冷制热量、水泵耗功、机组耗功以及系统 *COP* 如表 4 所示。

表 4 地埋管换热系统性能参数
Table 4 performance parameters of ground heat exchanger system

参数	数值	参数	数值
制冷季水泵耗功/kWh	2547	机组制冷量/kWh	63889
制热季水泵耗功/kWh	5813	机组制热量/kWh	135800
制冷季机组耗功/kWh	11722	系统制冷季 <i>EER</i>	4.48
制热季机组耗功/kWh	38889	系统制热季 <i>COP</i>	3.04

由表 4 可知,由于夏季供水温度较高(12 ℃),冬季供水温度较低(45 ℃),因此机组性能系数均偏高。对全年制冷制热量及相应功耗进行分析,计算得到夏季系统 *EER* 为 4.48,冬季系统 *COP* 为 3.04。

3.3 不同条件下的模拟结果

上述 3.2 节对常规设计参数即地埋管埋深为 100 m,钻孔间距为 6 m 的情况进行了模拟。为增强结果的适用性,通过 TRNSYS 模拟采用与上述过程相同的方法研究了不同埋管深度、不同埋管间距时系统的性能参数。为便于比较,在研究埋管间距的影响时,钻孔深度保持不变;而在研究埋管深度的影响时,保持钻孔总长度不变,得到的研究结果如表 5 所示。

表 5 埋管深度与埋管间距对系统性能的影响

Table 5 Effect drilling depth and spacing on system performance

埋深/m	间距 3.0 m		间距 4.5 m		间距 6.0 m	
	<i>COP</i>	<i>EER</i>	<i>COP</i>	<i>EER</i>	<i>COP</i>	<i>EER</i>
80	4.07	2.82	4.35	2.99	4.55	3.09
100	4.03	2.80	4.30	2.95	4.48	3.04
120	4.00	2.79	4.28	2.92	4.44	3.02

从表 5 可看出,在较高流速下(模拟过程取值为 0.6 m/s)在国标推荐的埋管钻孔间距范围内,地埋管钻孔间距对土壤源热泵系统性能有一定的影响,当埋深为 100 m 时,间距为 6.0 m 的地埋管换热器相对间距为 3.0 m 的地埋管换热器其 *COP* 和 *EER* 分别提升 11.2%和 8.6%,因此在条件允许的情况下,应该适当地增大钻孔间距。在保证地埋管换热器总长度一致的情况下,钻孔深度对土壤源热泵系统性能影响较小,且钻孔深度越小越优。以间距为 6 m 的地埋管换热器为例,深度为 120 m 钻孔相对深度为 80 m 钻孔,其 *COP* 和 *EER* 分别下降了 2.4%和 2.3%。但是考虑到在保持地埋管换热器的总长度一致的情况下,钻孔深度较大时,需要的钻孔数较少,可节省埋管面积及初投资,因此在地质条件可行的情况下,应该尽量采用较深的钻孔。

4 结 论

- 1)超低能耗建筑相对现阶段节能标准建筑,建筑热负荷大幅减小,冷负荷则变化不大。
- 2)超低能耗建筑相对现阶段节能标准建筑,其

负荷分布更加均匀。

3)在极端气候情况下,地埋管换热器冬季日平均单孔换热量 3500~4400 W。

4)在该超低能耗建筑中,土壤源热泵机组夏季平均 EER 约 5.73,冬季 COP 约 3.58;系统夏季平均 EER 为 4.48,冬季平均 COP 为 3.04,机组与系统性能均较好。

5)在钻孔深度及钻孔数量一致的情况下,在国标推荐范围内,钻孔间距为 6.0 m 的土壤源热泵系统相对钻孔间距为 3.0 m 其系统性能提升 8.2%~11.7%,因此在条件允许的情况下应尽量增大埋管间距。而在保证地埋管换热器总长度一致的情况下,钻孔深度的差异所导致系统差异较小,考虑采用深度较大的钻孔可节省埋管面积及初投资,因此在地质条件许可的情况下,应尽量增大钻孔深度。

[参考文献]

- [1] Xing Yangang, Hewitt N, Griffiths P. Zero carbon buildings refurbishment—A hierarchical pathway[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15 (6): 3229—3236.
- [2] Ibn- Mohammed T, Greenough R, Taylor S, et al. Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends[J]. Energy and Buildings, 2013, 66: 232—245.
- [3] D' Agostino D. Assessment of the progress towards the establishment of definitions of nearly zero energy buildings (nZEBs) in european member states[J]. Journal of Building Engineering, 2015, 1: 20—32.
- [4] 张时聪,徐 伟,姜益强,等.“零能耗建筑”定义发展历程及内涵研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(10): 114—120.
- [4] Zhang Shicong, Xu Wei, Jiang Yiqiang, et al. Research on definition development and main content of zero energy building[J]. Building Science, 2013, 29 (10): 114—120.
- [5] Zhang Shicong, Jiang Yiqiang, Xu Wei, et al. Operating performance in cooling mode of a ground source heat pump of a nearly-zero energy building in the cold region of China[J]. Renewable Energy, 2016, 87: 1045—1052.
- [6] 郭成林,赵金彦,臧海燕.“主动房”理念指导下的实践——威卢克斯(中国)办公楼设计[J]. 建筑学报, 2015, (3): 89—92.
- [6] Guo Chenglin, Zhao Jinyan, Zang Haiyan. Practicing the concept of “Active House” on the design of the headquarters of VELUX (China) Co., Ltd.[J]. Architectural Journal, 2015, (3): 89—92.
- [7] 徐 伟,刘志坚,陈 曦,等.关于我国“近零能耗建筑”发展的思考[J]. 建筑科学, 2016, 32 (4): 3—5.
- [7] Xu Wei, Liu Zhijian, Chen Xi, et al. Thoughts of development of chinese nearly zero energy buildings[J]. Building Science, 2016, 32 (4): 3—5.
- [8] 徐 伟,孙德宇.中国被动式超低能耗建筑能耗指标研究[J]. 动感:生态城市与绿色建筑, 2015, (1): 37—41.
- [8] Xu Wei, Sun Deyu. Research on performance criteria of passive and ultra-low-energy building in China[J]. Eco-city and Green Building, 2015, (1): 37—41.
- [9] 陈 强,王崇杰,李 洁,等.寒冷地区被动式超低能耗建筑关键技术研究[J]. 山东建筑大学学报, 2016, 31(1): 19—26.
- [9] Chen Qiang, Wang Chongjie, Li Jie, et al. Research on key technologies of passive house in cold region [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2016, 31(1): 19—26.
- [10] 张 颖,舒海文,端木琳.寒冷地区超低能耗建筑的设计和经济学分析[J]. 建筑热能通风空调, 2009, (6): 49—52.
- [10] Zhang Ying, Shu Haiwen, Duanmu Lin. Design and economics assessment of energy efficient building in the cold area[J]. Building Energy & Environment, 2009, (6): 49—52.

APPLICATION OF GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM IN ULTRA LOW ENERGY CONSUMPTION BUILDING

Liu Yu, Li Huixing, Feng Guohui

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

Abstract: The load differences of an office building in Beijing under the current energy-saving building standard and ultra-low energy consumption building standard is compared based on the analysis of the current energy saving building standard and the cold and heat load of the ultra low energy consumption buildings. The results show that compared with the energy-saving standard building at this stage, the thermal load of building is greatly reduced, and the cold load just has a little change, at the same time the load distribution is more uniform. And the FLUENT software is used to simulate 30 days operation performance of single-hole buried tube heat exchanger in Beijing under the design conditions. Finally, the TRNSYS software is used to simulate the performance parameters of the soil source heat pump system under the ultra low energy consumption building standards. Then the performance differences of soil source heat pump systems under the different drilling depth and spacing are simulated and compared by the TRNSYS software.

Keywords: energy utilization; ground source heat pumps; coefficient of performance; numerical simulation