

空气-土壤双源热泵系统在我国北方地区的应用*

清华大学 游田[☆] 王宝龙 石文星[△]

摘要 土壤热不平衡是制约埋管地源热泵在北方地区长期可靠运行的关键问题。耦合空气源补偿器的复合埋管地源热泵系统可充分利用土壤源和空气源的优势,从根本上解决该问题,满足用户供暖、供冷和供生活热水需求。空气源补偿器从高温空气中取热,可运行于直接补热、结合热泵机组补热、结合热泵机组供暖和结合热泵机组供生活热水 4 种模式,通过增加补热和减少取热两方面维持土壤热量平衡。以 TRNSYS 为平台搭建系统模型,分析了该系统的长期运行特性及其在哈尔滨、长春、沈阳等不同地区的适用性。结果表明:该系统可较好地维持土壤热平衡;机组供暖 COP 为 3.26~3.83,相对燃煤锅炉+分体空调系统节能率为 24%~34%;系统初投资低,新增空气源补偿器初投资仅占 2%~3%,相对燃气锅炉辅助供暖和太阳能集热器辅助补热的复合系统具有较好的经济性。该系统是一种经济可靠、清洁高效的供暖空调形式,有助于埋管地源热泵系统在北方地区的合理推广及应用。

关键词 埋管地源热泵 空气源 补热 北方地区 热不平衡

Air-source and ground-source heat pump application to northern regions of China

By You Tian[☆], Wang Baolong and Shi Wenxing

Abstract The annual soil thermal imbalance is a key problem to limit the application of ground coupled heat pump (GCHP) in northern regions. Hybrid GCHP integrating with air source heat compensator (AHC) can fully use the advantages of air and soil to solve the problem essentially and satisfy the demand of space heating, space cooling and domestic hot water (DHW). AHC absorbs heat from high temperature air and operates in four different modes: direct heat compensation, heat compensation coupled with heat pump, space heating coupled with heat pump and DHW coupled with heat pump, to eliminate soil thermal imbalance effectively through increasing soil heat compensation and reducing soil heat extraction. Builds a system model in TRNSYS platform and analyses the long-term system performance and the applicability in different regions (Harbin, Changchun and Shenyang). The results show that this system can maintain the soil thermal balance very well in different regions, heating COP is about 3.26~3.83 with 24%~34% of energy saving compared with coal boiler plus split air conditioner system, and the system has low initial cost in which AHC only accounts for 2%~3%, far cheaper than GCHP system assisted by gas-fired boiler and by solar collector. Therefore, the system is economic, reliable, clean and efficient and has the reasonable application potential in northern regions.

Keywords ground coupled heat pump, air source, heat compensation, northern region, thermal imbalance

★ Tsinghua University, Beijing, China

0 引言

埋管地源热泵通过埋管与低品位的土壤换热,具有清洁高效、适用范围广的优点^[1-3]。自 20 世纪

☆ 游田,女,1991 年 1 月生,在读博士研究生

△ 石文星(通信作者)

100084 清华大学建筑技术科学系

(010) 62796114

E-mail: wxshi@mail. tsinghua. edu. cn

收稿日期:2016-08-01

* 国家自然科学基金创新群体基金项目(编号:51521005)

80年代引入我国以来,在各地政策的支持下,地埋管地源热泵在我国的应用面积迅速增加,特别是大量用于北方地区建筑的供暖^[4-5]。但该类建筑多以热负荷为主,地埋管地源热泵全年从土壤的累计取热量明显大于排热量,导致土壤热量失衡^[6-8],土壤温度下降,系统供暖性能衰减,甚至无法正常运行。

针对该问题,目前有两类常见解决方案:

1) 优化埋管设计^[9],如增加埋管间距、深度和数量。该方法通过增大土壤蓄热体积,可一定程度缓解热不平衡,但由于未改变系统与土壤的换热量,并不能从本质上解决这一问题。同时,随着埋管间距、深度和数量的增加,施工难度和占地面积增大,系统初投资也将随之增大。2) 增加辅助设备,构建复合系统。实际工程中常用的辅助设备有锅炉^[10]、太阳能集热器^[11]等。采用辅助锅炉供暖能效低且带来高品位能源的浪费,同时也会造成环境污染。太阳能集热器的初投资普遍较高,受天气影响明显,且需要较高的运行维护费用。

在常规地源热泵系统中增加空气源补热器,可充分利用地源和空气源的优势,有效地解决北方地区地埋管地源热泵的热不平衡问题。本文将从阐述系统基本原理入手,建立系统模型,模拟分析系统的长期运行特性,并对比总结该系统在不同地区的适用性。

1 系统原理

增加向土壤的补热量,同时减少从土壤的取热量,实现系统与土壤的取排热量平衡,是解决北方地区地埋管地源热泵热不平衡问题的基本思想。空气源补热器(AHC)是一种具有较高换热性能的风冷换热器。室外空气温度较高时,AHC可通过循环介质与空气的直接换热将热量蓄存在土壤或者供给热泵,具有换热效率高、结构简单、安全性能高的优点。本文在常规地埋管地源热泵(GCHP)基础上增加AHC,构建复合地埋管地源热泵系统^[12](AHC-GCHP),其系统组成如图1所示:实线部分为常规GCHP系统,由地源热泵供暖空调机组和地源热泵热水器分别提供供暖空调和生活热水;虚线部分为新增的AHC部分,可运行直接补热(AHC-dc)、结合地源热泵机组补热(AHC-pc)、结合地源热泵机组供暖(AHC-ph)和结合地源热泵热水器供生活热水(AHC-pw)4种功能,通过增加向土壤的补热量和减少从土壤的取热量两

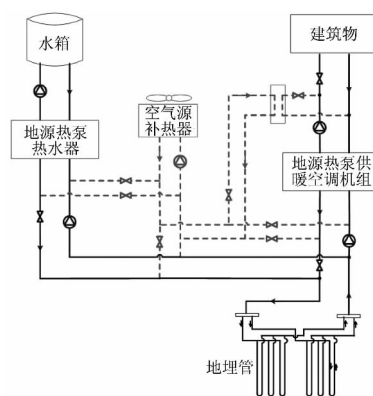
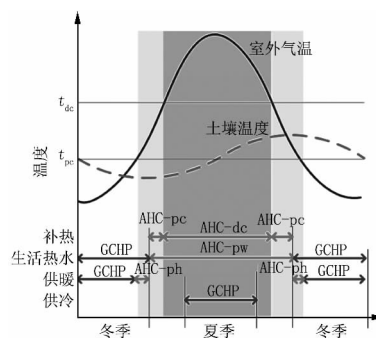


图1 AHC-GCHP系统原理示意图

方面维持土壤热平衡。

AHC-GCHP系统的运行策略如图2所示。

1) 冬季大部分时间和夏季,地源热泵供暖空调机



注： t_{pc} 为结合地源热泵机组补热模式的启动室外气温， t_{dc} 为直接补热模式的启动室外气温。

图2 AHC-GCHP运行策略

组与地埋管连接,与常规地源热泵系统类似,主要用于供暖和供冷。2) 冬季的初期和末期,当室外空气温度升高、室内热负荷减小时,AHC与地源热泵供暖空调机组结合,运行于AHC-ph模式。此时,热泵机组通过AHC从空气中取热向室内供暖,减少系统从土壤的年累计取热量。3) 对于用户的生活热水需求,冬季室外温度较低,地源热泵热水器通过地埋管从土壤取热;当非冬季室外空气温度升高时,AHC与地源热泵热水器连通,运行于AHC-pw模式,地源热泵热水器从空气中取热制取生活热水,减少从土壤的取热量。4) 另外,为维持土壤热量平衡,当室外空气温度高于 t_{dc} 时,AHC直接与地埋管连通,运行于AHC-dc模式,地埋管内循环介质通过AHC直接从空气取热,并将热量蓄存至土壤中。5) 当温度处于 t_{pc} 与 t_{dc} 之间时,AHC直接补热效果变差或无法运行,AHC可与地源热泵供暖空调机组结合,运行于AHC-pc模

式。在机组的作用下,AHC 仍可从空气中取热,并提高向土壤的补热温度和补热量。

AHC-GCHP 系统可充分利用地源和空气源的优势,并根据热源能量品位的变化实现其灵活切换,满足北方地区的供暖、供冷和供生活热水的需求。此外,AHC 的补热功能既可减少空气与埋管循环介质间的换热环节进行直接补热,又可结合热泵机组的运行拓宽可利用的室外空气温度范围,提高补热温度和补热量,有效地维持了埋管地源热泵系统的热量平衡。

2 系统设计及模拟

为模拟系统长期运行效果,本文在 TRNSYS 平台^[13]搭建了系统模型进行逐时动态模拟。其

中,地源热泵机组模型基于市场产品样本的实际性能拟合曲线^[14];埋管换热器模型采用 DST 理论^[15];空气源补热器模型参考市场上空气-水换热器的换热性能,取传热系数为 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

以哈尔滨、长春、沈阳的典型宾馆建筑为例,分析 AHC-GCHP 系统在北方不同城市的应用效果。首先,采用负荷模拟软件 DeST^[16-17]分析 3 个城市的宾馆建筑负荷特征,如表 1 所示。3 个城市均位于我国北方地区,建筑累计供暖负荷明显大于累计供冷负荷,同时生活热水负荷的存在进一步加剧了这一不平衡,导致累计热负荷远大于累计冷负荷:哈尔滨、长春和沈阳的负荷不平衡率分别为 90%、90%和 80%。

表 1 不同城市典型宾馆建筑的负荷特点

	哈尔滨	长春	沈阳
供暖期	10月15日至次年4月15日	10月15日至次年4月15日	10月1日至次年4月1日
空调期	6月1日至8月31日	6月1日至8月31日	6月1日至8月31日
生活热水	全年供应,每天制备8h蓄存	全年供应,每天制备8h蓄存	全年供应,每天制备8h蓄存
最大热负荷/kW	845	829	750
最大冷负荷/kW	452	346	550
累计热负荷/(MW·h)	1 898	1 789	1 465
累计冷负荷/(MW·h)	181	175	294
负荷不平衡率/%	90	90	80

注:负荷不平衡率 = $\frac{\text{累计热负荷} - \text{累计冷负荷}}{\max(\text{累计热负荷}, \text{累计冷负荷})}$ 。

根据建筑负荷特点,主要设备选型如表 2 所示。AHC 的运行策略如下:当室外空气温度高于 16°C 时,运行 AHC-dc 模式;当室外空气温度高于 10°C 时,与热泵机组结合运行,根据用户需求供暖(AHC-pc 模式)、供生活热水(AHC-pw 模式)和补热(AHC-ph 模式)。非供暖期,当需要生活热水时,AHC 优先制取生活热水,然后再考虑补热。

表 2 主要设备选型

	哈尔滨	长春	沈阳
地源热泵空调机组额定制热量/kW	1 344	1 256	987
地源热泵热水器额定制热量/kW	451	404	321
埋管数量/个	209	213	205
埋管深度、间距/m	100, 5	100, 5	100, 5
AHC 换热面积/ m^2	1 400	1 400	800

3 不同地区系统长期运行效果分析

本章将从维持热平衡的可靠性、节能性和经济性 3 个方面分别分析 AHC-GCHP 系统在不同地区的长期运行效果。

3.1 可靠性

根据设定策略,AHC 各模式的运行时间分布及时长如图 3 和表 3 所示。整体来讲,AHC 以补

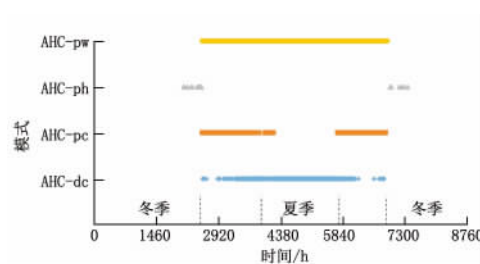


图 3 AHC 各模式运行时间分布

表 3 不同城市 AHC 各模式的运行时长 h

	AHC-dc 模式	AHC-pc 模式	AHC-ph 模式	AHC-pw 模式
哈尔滨	1 523	638	140	1 409
长春	1 636	647	245	1 395
沈阳	1 941	787	113	1 595

热功能为主,以保证土壤全年热量平衡。其中,AHC-dc 模式运行时间约 $1\,523 \sim 1\,941 \text{ h}$,AHC-pc 模式运行时间约 $638 \sim 787 \text{ h}$ 。

不同城市 GCHP 与 AHC-GCHP 系统的土壤取、排热量如表 4 所示。与常规 GCHP 相比,AHC-ph 模式和 AHC-pw 模式可明显降低 AHC-GCHP 系统累计从土壤的取热量,但由于 3 个城市的累计热负荷均大于冷负荷,埋管地源热泵系

表4 不同城市 GCHP 与 AHC-GCHP

		系统的土壤换热量对比		
		MW · h		
系统形式		累计取热量	累计排热量	累计补热量
哈尔滨	GCHP	1 252	206	0
	AHC-GCHP	1 053	212	828
长春	GCHP	1 218	201	0
	AHC-GCHP	1 008	206	782
沈阳	GCHP	1 056	343	0
	AHC-GCHP	817	349	444

统累计从土壤的取热量(817~1 053 MW · h)仍远大于累计排热量(206~349 MW · h)。AHC-dc 和 AHC-pc 模式可增加补热量 444~828 MW · h,

使得取热基本等于排热+补热。因此,AHC 系统既减少了取热量,又增加了补热量,最终实现土壤热量平衡。

不同城市 AHC-GCHP 系统与 GCHP 系统运行 10 年内土壤平均温度的变化如图 4 所示。对于常规 GCHP 系统,由于热量失衡,土壤平均温度逐年下降,哈尔滨最低降至 -6.2°C ,长春降至 -5.0°C ,沈阳降至 -1.0°C ,且 GCHP 系统无法运行 10 年。AHC-GCHP 系统则可维持土壤温度稳定,保证系统长期可靠运行。

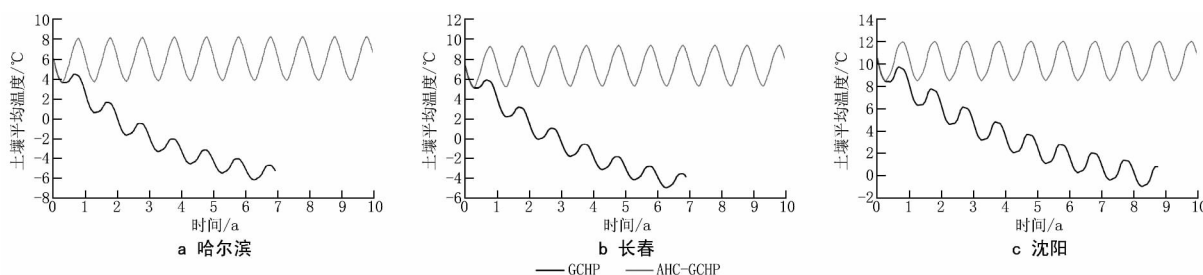


图4 不同城市 AHC-GCHP 与 GCHP 系统土壤平均温度变化对比

3.2 节能性

不同城市 AHC-GCHP 与 GCHP 系统地源热泵机组供暖 COP 对比如图 5 所示。由于土壤温度稳定,AHC-GCHP 的地源热泵机组长期维持较好

的供暖性能,哈尔滨、长春、沈阳的年平均供暖 COP 分别为 3.26,3.43 和 3.83。与之对比,若采用常规 GCHP 系统,哈尔滨、长春、沈阳的最低供暖 COP 则分别降至 1.78,1.94 和 2.42。

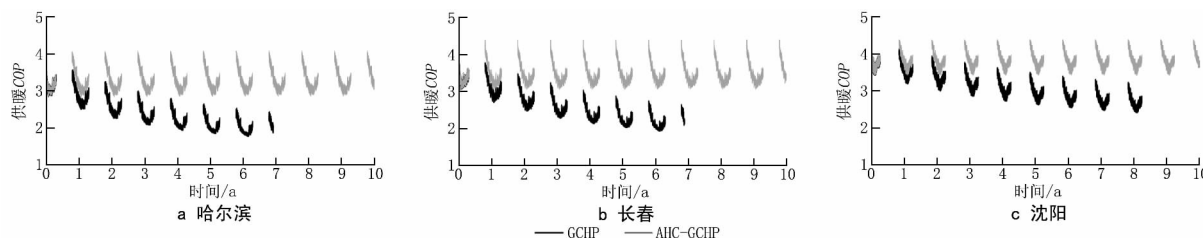


图5 不同城市 AHC-GCHP 与 GCHP 系统地源热泵机组供暖 COP 对比

由表 3 可知,AHC 主要运行于 AHC-dc 模式,因此该模式下补热性能对系统整体的节能性具有重要影响。AHC-dc 模式下,不同城市的补热 COP 如图 6 所示。该模式下地埋管内循环介质直接在 AHC 中与空气换热,省去压缩机运行和制冷

剂的中间换热环节,因而具有较高的能效比。3 个城市中,哈尔滨的土壤温度较低,地埋管介质与空气换热温差大,因而 AHC-dc 模式 COP 最高,最大值为 28.58,平均值可达 14.37。长春和沈阳的 AHC-dc 模式 COP 最大值分别为 26.71 和 25.93,

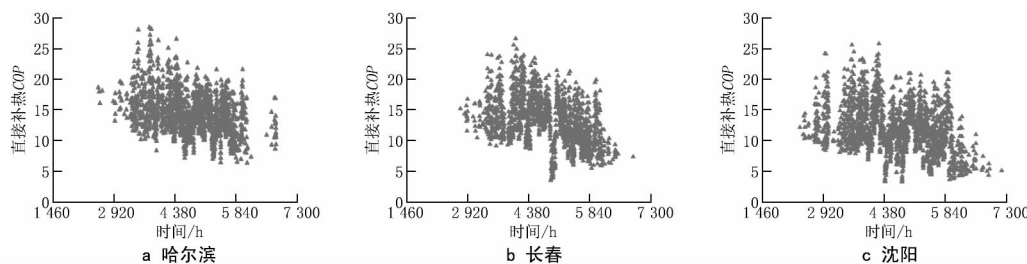


图6 不同城市 AHC-GCHP 系统中 AHC 直接补热 COP

COP 平均值分别为 13.39 和 11.97。

对系统整体而言,AHC-GCHP 与传统“燃煤锅炉+分体空调”系统的能耗对比如表 5 所示。哈尔

滨、长春和沈阳的 AHC-GCHP 系统 COP 分别为 2.71,2.81 和 3.20,相对于北方地区传统的“燃煤锅炉+分体空调”系统,节能率分别为 24%,27%和 34%。

表 5 不同城市 AHC-GCHP 系统与传统系统节能性对比

城市	系统形式	累计负荷/(MW·h)	总电耗/(MW·h)	一次能耗/(MW·h)	一次能源效率	系统 COP	节能率/%
哈尔滨	锅炉+分体空调	2 079	1 012	3 068	0.68	2.05	
	AHC-GCHP	2 079	767	2 325	0.89	2.71	24
长春	锅炉+分体空调	1 965	956	2 898	0.68	2.05	
	AHC-GCHP	1 965	700	2 122	0.93	2.81	27
沈阳	锅炉+分体空调	1 758	828	2 510	0.70	2.12	
	AHC-GCHP	1 758	549	1 663	1.06	3.20	34

3.3 经济性

3 个城市的 AHC-GCHP 系统初投资为 251~286 元/m²,供暖、供冷和供生活热水总运行费用为 54~77 元/m²。其中,GCHP 部分设备初投资较高,占系统总设备投资的绝大部分;相对于常规 GCHP 系统,新增的 AHC 部分设备初投资较低,3 个城市普遍低于 10 元/m²,仅占系统总投资的 2%~3%。

在常规 GCHP 系统基础上增加燃气锅炉辅助供暖,构建燃气锅炉-GCHP 复合系统,是实际工程中常见的北方地区热不平衡问题解决方案。因此,本文将 AHC-GCHP 系统的经济性与燃气锅炉-

GCHP 复合系统对比,如表 6 所示。可以看出,AHC-GCHP 的初投资和运行费均较低,不仅节省初投资 4%~5%,而且节省年运行费 13%~17%。

太阳能作为可再生能源,越来越多地与 GCHP 系统耦合,构建太阳能-GCHP 复合系统,用于向土壤蓄热解决热不平衡问题。本文进一步将 AHC-GCHP 系统的经济性与太阳能-GCHP 复合系统作对比,结果如表 6 所示。AHC-GCHP 系统的主要设备初投资比太阳能-GCHP 复合系统节省 51%~56%。即使忽略太阳能集热器的运行维护费用,AHC-GCHP 在工程运行的前 19~27 a 内总费用更低。

表 6 不同地区 AHC-GCHP 系统经济性对比

城市	系统总初投资/(元/m ²)	AHC 部分初投资/(元/m ²)	系统年运行费/(元/m ²)	与燃气锅炉-GCHP 复合系统对比	与太阳能-GCHP 复合系统对比
哈尔滨	285.2	8.4	76.7	初投资节省 5%,年运行费节省 13%	初投资节省 56%,运行 27 a 内更便宜
长春	280.3	8.4	70.0	初投资节省 4%,年运行费节省 15%	初投资节省 56%,运行 26 a 内更便宜
沈阳	251.1	4.8	54.9	初投资节省 4%,年运行费节省 17%	初投资节省 51%,运行 19 a 内更便宜

4 结论

耦合空气源补热器的复合埋管地源热泵系统可用于解决北方地区埋管地源热泵系统的热不平衡问题。详细阐述了其工作原理及运行策略,在 TRNSYS 平台上建立了系统模型,分析了其在哈尔滨、长春、沈阳 3 个城市的适用性,主要结论如下。

1) 3 个城市 AHC-GCHP 系统从土壤的年累计取热量为 817~1 053 MW·h,排热量为 206~349 MW·h,补热量为 444~828 MW·h,有效维持了土壤换热量平衡,保证土壤温度稳定和系统长期可靠运行。

2) 哈尔滨、长春、沈阳 3 个城市 AHC-GCHP 系统的机组供暖 COP 分别为 3.26,3.43 和 3.83;AHC 的直接补热平均 COP 分别为 14.37,13.39 和 11.97;相对于传统“锅炉+分体空调系统”分别

节能 24%,27%和 34%。

3) 3 个城市 AHC-GCHP 系统初投资约为 251~286 元/m²,其中新增 AHC 部分初投资较低,仅占 2%~3%,相对于耦合燃气锅炉或太阳能集热器的复合埋管地源热泵系统更经济。

AHC-GCHP 系统具有良好的可靠性、节能性和经济性,是一种清洁有效的北方地区供暖空调形式,有助于埋管地源热泵系统在北方地区的合理推广和应用。

参考文献:

- [1] OZGENER O, HEPBASLI A. Modeling and performance evaluation of ground source (geothermal) heat pump systems[J]. Energy and Buildings, 2007, 39(1): 66-75
- [2] 钱程,徐伟. 严寒地区土壤源热泵系统的运行性能分析[J]. 建筑科学, 2008, 24(12): 77-80

- [3] FLORIDES G, KALOGIROU S. Ground heat exchangers—a review of systems, models and applications[J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(15): 2461-2478
- [4] 徐伟. 中国地源热泵发展研究报告 2008[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008:3-6
- [5] 徐伟. 地源热泵技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011:14-16
- [6] 马宏权, 龙惟定. 埋管地源热泵系统的热平衡[J]. *暖通空调*, 2009, 39(1): 102-106
- [7] 范蕊, 高岩, 陈旭, 等. 基于热平衡的土壤源热泵系统特性分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(2): 282-286
- [8] YOU T, WU W, WANG B L, et al. Dynamic soil temperature of ground-coupled heat pump system in cold region[C] // *Proceedings of the 8th ISHVAC*. Springer Berlin Heidelberg, 2014: 439-448
- [9] 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
- [10] NI L, SONG W, ZENG F, et al. Energy saving and economic analyses of design heating load ratio of ground source heat pump with gas boiler as auxiliary heat source [C] // *Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*, 2011 International Conference on IEEE, 2011: 1197-1200
- [11] KJELLSSON E, HELLSTRÖM G, PERERS B. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings[J]. *Energy*, 2010, 35(6): 2667-2673
- [12] YOU T, SHI W, WANG B, 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] KLEIN S A, BECKMAN W A, MITCHELL J W, et al. TRNSYS 16—a transient system simulation program user manual[M]. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2004
- [14] YOU T, WANG B L, WU W, et al. A new solution for underground thermal imbalance of ground-coupled heat pump systems in cold regions; heat compensation unit with thermosyphon[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 64(1): 283-292
- [15] HELLSTRÖM G, MAZZARELLA L, PAHUD D. Duct ground storage model—TRNSYS version[M]. Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, 1996
- [16] YAN D, XIA J J, TANG W, et al. DeST—an integrated building simulation toolkit part I: fundamentals[M]. *Building Simulation*, 2008, 1(2): 95-110
- [17] ZHANG X L, XIA J J, JIANG Z Y, et al. DeST—an integrated building simulation toolkit part II: applications[M]. *Building Simulation*, 2008, 1(3): 193-209

(上接第 27 页)

5) 及时清洗换热站内的板式换热器。再生水热泵系统的板式换热器易堵塞, 目前运行人员根据板式换热器二次侧出水温度决定是否清洗换热器(清洗换热器需一周时间), 当发现出水温度明显变化时, 就切换到备用换热器, 进行清洗, 从而确保换热温差维持在合理的范围内。

5 结论

奥运村再生水热泵冷热源系统承担了奥运村 41.3 万 m^2 的住宅和公共建筑的供暖和供冷任务。对 2009—2013 年连续 5 个制冷季和 5 个供暖季的实测数据进行了分析, 结果表明:

1) 奥运村近年来的单位面积耗电量夏季平均为 $6.2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$, 冬季平均为 $15.3 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$, 全年平均为 $21.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$, 总体电耗水平较低。

2) 夏季典型日系统 COP 为 3.71, 冬季典型日系统 COP 为 4.24, 在同类项目中能效处于较高水平。

3) 该项目在再生水提升泵、循环水、换热器方面仍有一定的节能空间, 可进一步通过节能改造来提升整个系统的能源利用效率。

参考文献:

- [1] 石兆玉. 供热系统运行调节和控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 301-302
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑能耗标准: GB/T 51161—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 8
- [3] 清华大学, 中国标准化研究院, 西北建筑设计院. 空气调节系统经济运行: GB/T 17981—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 6
- [4] 刘珊, 郝斌. 基于检测数据的地源热泵示范项目系统能效水平初步分析[J]. *建设科技*, 2012(13): 28-30