地源热泵系统变水温控制节电效果分析

黄新江，刘成刚

（苏州科技大学，江苏 苏州 215009）

摘要：以苏州市某办公楼的地源热泵系统为研究对象，针对其长期在部分负荷下的运行特点，提出了相应的变水温控制策略。测试并分析了其变水温调节后系统能耗情况，并运用TRNSYS模拟软件对比分析了不同运行策略下变水温调节的节电效果。结果表明整个测试期间通过变水温调节累计节约电能6 480 kW·h，节能率达19.6%。机组连续运行10年可节能281 412 kW·h，节能率达20.2%，若该地源热泵系统基于变水温控制采用间歇运行策略，将进一步减少大约9%的系统能耗。

关键词：地源热泵 变水温 节电 性能系数 模拟

Energy saving analysis of a ground source heat pump system

HUANG Xinjiang, LIU Chenggang

(Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009 , China)

Abstract: A ground source heat pump of an office building in Suzhou is the research object. According to the characteristics of the operation under partial load, the control strategy of variable water temperature is put forward. The energy consumption of the system is tested and analyzed, and the energy saving effect of variable water temperature adjustment under different operation strategies is analyzed by using TRNSYS simulation software. The results show that the accumulative energy saving of 6 480 kW·h is achieved during the whole test and energy saving rate reached 19.6%. The saving of about 281412kW·h or 20.2% could be achieved if the unit runs continuously for 10 years. About 9% of energy consumption could be further reduced if the ground source heat pump is operated with intermittent operation strategy based on variable water temperature control.

Key words: ground source heat pump; variable water temperature; energy saving; coefficient of performance; simulation

0 引言

在空调系统运行过程中，实际负荷多数时间为设计负荷的40%～80%[1]，因此运行调节具有很大的灵活性。对于空调负荷不断变化的情况，空调系统节能运行的调节方法有量调节和质调节两种。变水温调节是质调节方式中的一种，适用于负荷实时变化的空调系统，一般采用冷水定流量，通过改变冷水的出水温度来适应空调负荷的变化[2]。文献[3]分析了四种不同的公共建筑中空调系统在不同负荷率下变水温控制策略的适用性，结果表明当负荷率不断降低时，变水温控制仍然适用。文献[4-6]对不同的空调系统进行变水温调节，从理论和实践上进行节能效果验证，取得了显著的节能效果。此外文献[7]通过综合分析典型气象年数据以及主机的年运行能耗，提出了分阶段变水温控制策略。

本文以苏州地区某地源热泵系统为研究对象，通过对夏季工况的测试，分析其变水温调节节能效果，并运用TRNSYS仿真平台模拟该系统长期连续运行，分析对比了不同运行策略下变水温调节的节能效果。

1 系统概况

1.1 地源热泵系统

该空调工程位于江苏省苏州市某办公楼第3~4层，是以土壤为冷热源的地源热泵空调系统，受地区土壤影响，采取浅埋式地埋管。空调机房面积959 m^2，夏季室内设计温度 25 ℃，冬季室内设计温度20 ℃。选取两台水－水模块式水源热泵（冷水）机组进行夏季供冷冬季供热。单台机组制冷输入功率为14.2 kW，名义制冷量为69 kW；制热输入功率14.2 kW，名义制热量58.3 kW。经检测，双U型地埋管冬夏季换热量分别为51.9 W/m和73.6 W/m，每个孔按50 m计算，打40口井。冷冻水泵冷却水泵均一用一备，工频运行，冷却水泵流量为44 m^3/h，功率4.4 kW；冷冻水泵31.3 m^3/h，功率4.1 kW。该工程系统图如图1所示。其中室外埋管方式为垂直单U型埋管，空调末端由新风机组与风机盘管组成，设计时考虑到地埋管长期使用会导致换热能力下降，因此为系统配置了一台冷却塔备用。

1.2 监测系统

系统耗能最大的环节主要在冷热源和末端，为了把握整个系统各环节的能耗情况以及动态运行规律的变化，该工程采用Alerton公司的BACtalk管理系统作为空调系统的楼宇监控系统，监控内容主要包括地源热泵系统、新风机组和空调末端。采用VLC－853和VLC－1600两台现场控制器进行监控。热泵系统的流量测量采用电磁流量计，而系统测试采用超声波流量计。电能通过施耐德电表进行测量，主要监控制冷机、空调系统水泵和地源热泵的功率和电能。温湿度的测量主要采用温湿度变送器、水道温度传感器和HOBO温湿度记录仪（温度范围：－2～70 ℃，±0.21 ℃；湿度范围：15%～95%，±3.5%）。数据采集频率12次/h，监测时间与热泵运行时间一致。

1.3 变水温控制策略

该系统采取变水温控制策略前，冷冻水供水温度恒定为7 ℃。由于实际工况下，为满足所有人员需求，系统全天连续运行，因此系统大部分时间处于部分负荷下运行，冷水机组性能系数偏低，造成了一定的冷量浪费。系统负荷率跟室外温度成相应比例，因此根据室外温度针对不同负荷率工况制定变水温控制策略，具体供水温度设定如表1所示。冷冻水的供水设定温度是满足室内人员舒适度前提的最高供水温度。

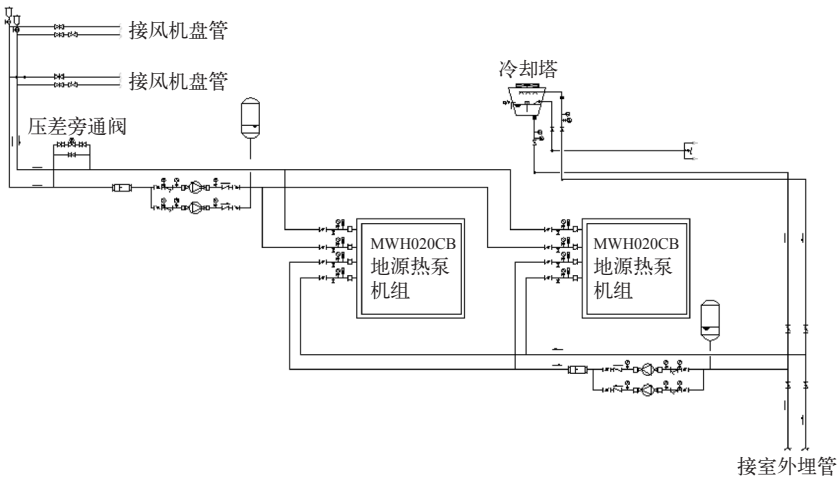

图1 地源热泵系统原理图

Fig.1 Principle diagram of ground source heat pump system

表1 变水温控制前后冷冻水供水设定温度

Tab.1 Setting temperature of frozen water supply before and after variable water temperature control

（单位：℃）

室外温度	变水温前温度	变水温后温度
40	7	8
38	7	9
36	7	9
34	7	10
32	7	10
30	7	10
28	7	11
26	7	12
24	7	12

2 变水温控制节电效果分析

2.1 数据处理

2.1.1 负荷

热泵机组制冷量计算公式为

$$Q_1 = \sum q_1 \Delta\tau \rho c_p (t_{o1} - t_{i1}) / (36 \times 10^3) \quad (1)$$

式中，Q_1为热泵机组制冷量，kW·h；$\Delta\tau$为数据采集时间间隔，h；q_1为冷冻水流量，m^3/h；t_{i1}、t_{o1}为冷冻水进出口水温，℃；ρ为水的密度，kg/m^3；c_p为水的比热容，kJ/(kg·℃)。

2.1.2 耗电量

热泵机组累计耗电量计算公式为

$$P_1 = 2.78 \times 10^{-4} \sum P_{1i} \Delta\tau \quad (2)$$

水泵累计耗电量计算公式为

$$P_2 = 2.78 \times 10^{-4} \sum P_{2i} \Delta\tau \quad (3)$$

式中，P_1、P_2为机组和水泵累计耗电量，kW·h；P_{1i}、P_{2i}为机组与水泵瞬时功率，kW。

2.1.3 性能系数

热泵机组能效系数计算公式为

$$COP = \frac{Q_1}{P_1} \quad (4)$$

热泵机组是系统能耗的主要组成部分，因此冷水机组性能系数变化是影响变水温控制策略节能效果的重要因素。

2.2 实测数据分析

表2给出了夏季工况下，变水温控制前后系统冷冻水供水温度变化以及机组性能系数对比数据。结果显示采用变水温控制策略后，热泵机组性能系数显著提高，热泵机组COP平均值由2.93升高至3.86，采用变水温控制前冷冻水供水平均温度为8.3 ℃，采用变水温控制后冷冻水供水平均温度为10.6 ℃，较之前升高2.3 ℃。

根据监测系统提供的数据通过式（2）和式（3）计算得出热泵系统的耗电量，具体结果如图2所示。从图2中可以看出变水温调节后，相同室外温度下系统每日耗电量相比变水温调节前略微降低。数据显示，变水温调节前一年的平均每日耗电量为367 kW·h，变水温调节后平均每日耗电量为295 kW·h，节能量达到19.6%。夏季工况测试

表2 变水温控制前后实测数据对比

Tab.2 Comparison of measured data before and after variable water temperature control

室外温度/℃	变水温前		变水温后			
	冷冻水供水温度/℃	机组COP	冷冻水供水温度/℃	机组制冷量/kW	机组功率/kW	机组COP
40	7.4	3.87	8.4	112	23.1	4.84
38	7.5	3.73	9	107	21.2	4.63
36	7.9	3.55	9.4	96	20.1	4.31
34	7.9	3.42	9.8	79	20.0	4.07
32	8.1	3.08	10.2	71	19.2	3.90
30	8.8	3.01	10.7	55	12.7	4.03
28	8.9	2.86	11.5	40	10.6	3.77
26	9	2.17	12.9	29	9.3	3.12
25	9	1.08	13.2	10	6.9	1.44

期共持续90天，累计节电约6 480 kW·h，若按平均电价0.818 3元/(kW·h)计，累计节约电费5 302元，折合0.06元/(m²·d)。

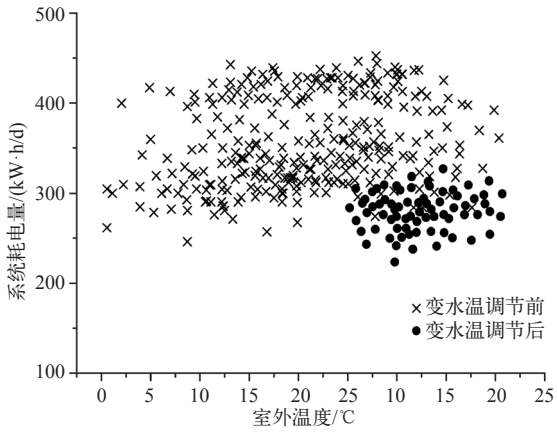

图2　不同室外温度下系统耗电量分布

Fig.2 Distribution of system power consumption at different outdoor temperatures

3　基于TRNSYS的地源热泵系统仿真模拟

建筑能耗分析有两类基本方法：一类是各种简化计算法，包括度日数法、BIN参数法和部分负荷时间频数法等，这类方法都十分简单、实用，因此在工程实际中都得到广泛应用，但过于简化的计算往往无法准确推算出建筑能耗变化[8]；另一类则是较为完善的计算机模拟法。本文采用TRNSYS模拟软件建立地源热泵仿真系统，对变水温调节下的热泵系统进行长期模拟。

3.1　仿真模拟平台的搭建

以TRNSYS软件为仿真模拟平台，搭建变水温控制地源热泵仿真模拟系统，如图3所示。模拟系统主要运用到的模块有热泵模块、定频泵模块、地埋管模块、控制器模块以及数据读取模块等。变水温控制模块的模拟主要通过对室外气象参数文件的读取和对热泵系统负荷率的判断来实现对供水设定温度的控制。模拟时长为87 600 h（10年），步长为1 h。起始时间为1月1日，工况为冬季制热工况。模拟运行总共设定四种工况，工况1～4分别对应为采取连续运行策略、采取间歇运行策略、变水温控制下采取连续运行策略以及变水温控制下采取间歇运行策略。其中间歇运行策略表示热泵系统工作时间为每天8:00～17:00，连续运行策略表示热泵系统全天连续运行。该系统

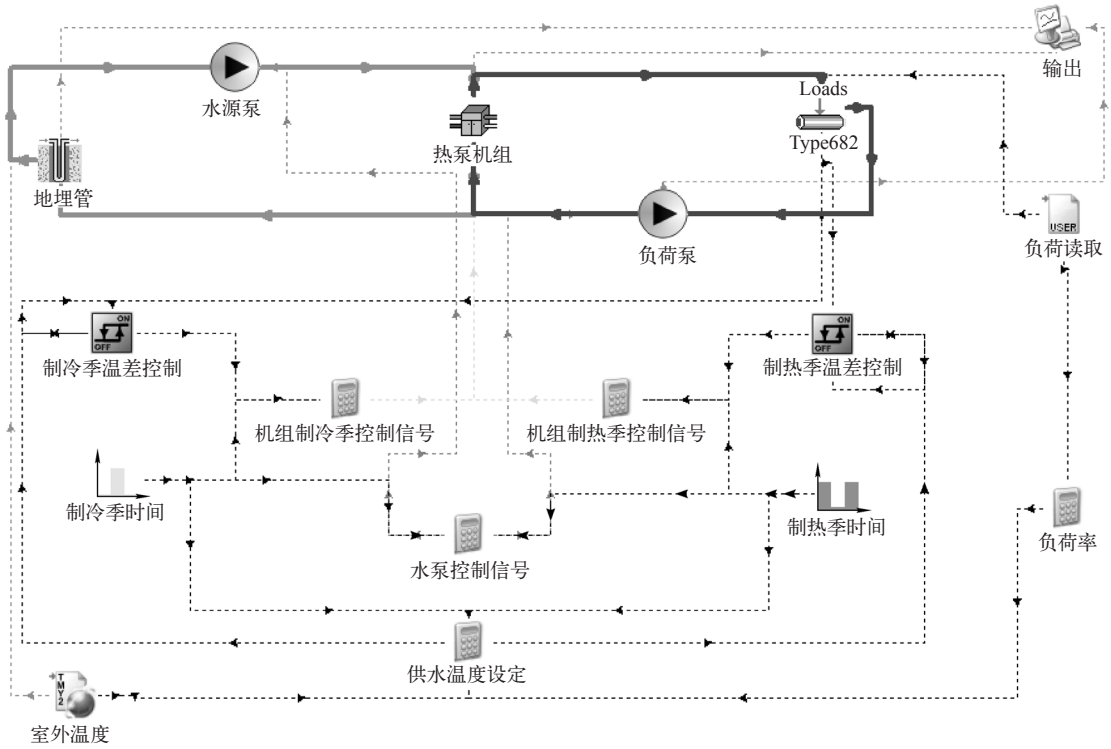

图3　地源热泵系统仿真模型

Fig.3 Simulation model of ground source heat pump system

变水温调节前采用工况1，变水温调节后采用工况3。

3.2 变水温控制策略长期运行节电效果分析

图4给出变水温调节后即工况3模拟运行10年系统耗电量和机组COP变化。数据显示，系统运行10年机组COP逐年降低，平均COP为3.90，系统运行能耗逐年增加，但整体呈减缓趋势，第10年耗电量达117 756 kW·h，10年平均耗电量为113 478 kW·h/y。

该热泵系统上述四种工况模拟运行结果如表3所示。数据显示，四种不同运行工况下，地源热泵系统运行10年土壤平均温升均不超过8 ℃，满足实际运行要求。最低机组平均COP出现在工况1，为2.86，工况4下机组平均COP最高，达4.21。变水温调节后，运行第10年系统耗电量较第1年高出9 723 kW·h，10年累计耗电为1 111 719 kW·h，相比变水温调节前节电281 412 kW·h，约20.2%。若采取系统间歇运行策略，运行10年累计能耗减少约29.2%。结果表明地源热泵系统采取变水温控制不仅能够提高热泵机组性能系数，而且能够降低系统运行能耗，减缓系统长期运行土壤温升，若采取间歇运行策略将获得更进一步的节能效果。

4 结束语

该地源热泵系统长期处于部分负荷下运行，采取变水温控制后不仅能提高机组运行效率，而且能够节约系统能耗，降低运行费用，取得了显著的节能效果。测试结果显示，制冷季期间当供水温度由7 ℃提高到8～12 ℃时，变水温调节可节能6 480 kW·h，相比于定水温节能约19.6%。

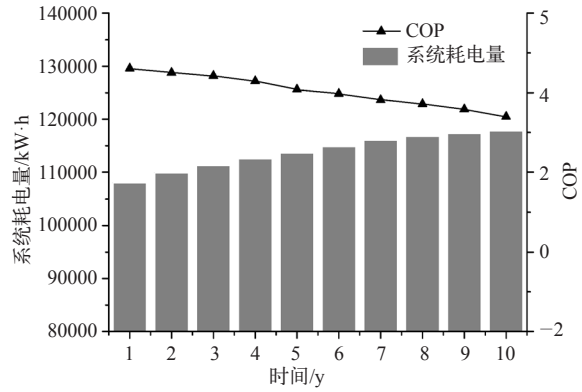

图4 系统逐年耗电量与机组COP变化

Fig.4 Annual power consumption of system and COP change of unit

仿真模拟结果表明采用变水温控制，不仅能够取得一定的节能效果，而且能够减缓系统长期运行而导致的土壤温升。机组连续运行10年可节能281 412 kW·h，节能率达20.2%，若该地源热泵系统基于变水温控制采用间歇运行策略，将进一步减少大约9%的系统能耗。

参考文献

[1] 唐娟．中央空调系统变水温调节可适用域的研究[D]．广州：华南理工大学，2011．
TANG Juan．Study on the applicability of variable water temperature regulation in central air conditioning system[D]．Guangzhou: South China University of Technology，2011．

表3 模拟地源热泵系统运行10年能耗对比分析

Tab.3 Energy consumption comparison analysis of simulated ground source heat pump system for 10 years

运行工况	土壤平均温度变化/℃	机组平均COP	系统耗电量/kW·h			能耗减少百分比（%）
			第1年	第10年	总10年	
工况1	+7.9	2.86	133 955	144 671	1 393 132	—
工况2	+4.5	3.76	117 530	128 108	1 228 189	-11.8
工况3	+6.8	3.90	108 033	117 756	1 111 719	-20.2
工况4	+3.2	4.21	92 613	101 874	972 437	-29.2

[2] 闫军威，刘飞龙，朱冬生，等．广州大学城区域供冷系统质调节的节能分析[J]．建筑科学，2007，23(12)：27-29．
YAN Junwei，LIU Feilong，ZHU Dongsheng，et al．Energy efficiency analysis of quality regulation of district cooling system in Guangzhou University town[J]．Building Science，2007，23(12)：27-29．

[3] 刘金平，唐娟．中央空调系统变水温调节可适用性研究[J]．建筑科学，2011，27(2)：78-82．
LIU Jinping，TANG Juan．Applicability of variable water temperature regulation in central air conditioning system[J]．Building Science，2011，27(2)：78-82．

[4] 林秀军，赵波峰．深圳机场候机楼空调系统变水温运行分析[J]．建筑热能通风空调，2015，34(4)：59-60．
LIN Xiujun，ZHAO Bofeng．Analysis of variable water temperature operation of air conditioning system in Shenzhen airport terminal[J]．Building Energy & Environment，2015，34(4)：59-60．

[5] 陆琼文，刘传聚，曹静．浦东国际机场变空调供水温度节能运行方案分析[J]．暖通空调，2003，33(2)：123-125．
LU Qiongwen，LIU Chuanju，CAO Jing．Analysis on energy-saving operation scheme of variable air-conditioning water supply temperature at Pudong international airport[J]．Journal of HV & AC，2003，33(2)：123-125．

[6] 陈剑波，杜宁，林欣．变水温空调系统的运行节能分析[J]．暖通空调，2007，37(8)：161-164．
CHEN Jianbo，DU Ning，LIN Xin．Energy-saving analysis of variable water temperature air-conditioning system[J]．Journal of HV & AC，2007，37(8)：161-164．

[7] 余俊祥，高克文，宁太刚．空调系统变水温运行能耗特性研究[J]．建筑技术开发，2016，43(10)：34-37．
YU Junxiang，GAO Kewen，NING Taigang．Study on energy consumption characteristics of air conditioning system under variable water temperature operation [J]．Building Technique Development，2016，43(10)：34-37．

[8] 翁文兵，宋振宁，陈剑波，等．空调系统变水温调节的特性实验及节能分析[J]．制冷与空调，2007(1)：43-46．
WENG Wenbing，SONG Zhenning，CHEN Jianbo，et al．Characteristic experiments and energy saving analysis of variable water temperature regulation in air conditioning system[J]．Refrigeration and Air-conditioning，2007(1)：43-46．

作者简介

黄新江

黄新江（1993－），男，在读硕士研究生，研究方向为供热燃气通风及空调工程。

(收稿日期：2018－07－03)EA