

# 并联连接混合式土壤源热泵系统运行控制策略研究

## STUDY ON THE OPERATION CONTROL STRATEGIES FOR PARALLEL CONNECTED HGCHPs

邓小茜<sup>1</sup> 范蕊<sup>2</sup> 潘毅群<sup>1</sup> 马宏权<sup>3</sup>

1 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804

2 同济大学中德工程学院, 上海 201804

3 江苏丰盛绿色建筑研究院, 南京 210012

Email: dengxiaoxi1120@126.com

**摘要:** 本文基于实际工程项目建立了并联连接混合式土壤源热泵系统的仿真模型, 通过系统实测数据与模拟数据的比较对模型的准确度进行了检验。并且基于已建立的系统模型分别对系统在温度控制、温差控制和冷却塔运行时间控制这3种控制策略下的长期运行情况进行了模拟, 分析比较了各控制策略在不同控制参数设定值下系统的长期运行性能及土壤热平衡情况, 得出了各控制策略对应的最优控制参数设定值, 并且得出了该系统最适合的控制方案, 最后还分析了温度与温差综合控制策略下系统长期运行的情况。

**关键词:** 并联连接混合式地源热泵; 控制策略; 长期性能; 土壤热平衡

## 0 引言

土壤源热泵系统以其节能、高效、适用范围广等优势在我国得到了快速发展和应用, 但在土壤源热泵的应用和研究过程中发现土壤源热泵系统具有其适用的最佳地域范围。而对于冬季和夏季空调负荷相差过大的地区土壤源热泵系统长期运行却会导致埋管周末土壤温度逐年升高或降低, 严重影响系统的运行效率。近年来在夏季冷负荷大于冬季热负荷的地区大量的采用了地源热泵埋管加冷却塔辅助散热的工程, 这种混合式地源热泵系统可有效改善土壤的热堆积现象, 改善系统长期运行性能, 减少埋管数量, 但是也会产生增加冷却塔初投资和运行费用等问题。所以埋管换热器和冷却塔之间的运行控制问题对于系统的节能降耗有重要意义。

混合式地源热泵系统埋管与冷却塔的连接方式一般有并联和串联两种形式, 目前关于串联连接混合式地源热泵系统的控制策略的研究较多[1-4], 并联的却很少, 并且大多数关于控制策略的研究都是短期的实验研究[4-5]或模拟研究[1-3], 不能反应出不同控制策略下系统长期的运行状况及土壤热平衡的情况。本文基于TRNSYS软件平台建立了某实际工程中的并联连接混合式土壤源热泵系统的仿真模型, 并且通过系统的实际监测数据与模拟值的比较对模型准确性进行了验证。之后基于该系统模型在相同的负荷输入情况下, 对系统在温度控制、温差控制和冷却塔运行时间控制这三种控制策略下的长期(10年)运行情况进行了模拟, 依据系统长期运行性能和土壤热平衡的情况得出各控制策

略下的最优控制参数设定值, 之后还模拟分析了在温度与温差综合控制策略下系统长期运行的情况。本研究有利于了解适合并联连接混合式土壤源热泵系统的控制策略, 为实际工程中该类系统节能环保的运行控制提供一定参考。

## 1 系统模型的建立与验证

### 1.1 系统概况

本文的系统模型是基于南京某住宅小区内的实际工程项目建立的, 该工程采用的是冷却塔与埋管换热器并联连接的混合式土壤源热泵系统。系统采用的一台土壤源热泵主机额定制冷量为1377.3KW, 制冷性能系数为4.9, 额定制热量为1496.4KW, 制热性能系数为4.4。配置的一台冷却塔流量为300m<sup>3</sup>/h, 对应的冷却塔循环水泵功率为30KW。地下埋管换热器采用的都是竖直单U型埋管, 埋管管径为DN25, 埋管区域共有900口井, 钻孔深度为55m, 埋管间距5m。埋管换热器对应的循环水泵额定流量为500 m<sup>3</sup>/h, 额定功率为49.2KW, 埋地管、土壤和回填料的导热系数分别为0.42、1.90和2.25W/(m.K)。由埋管区域监测井测得的土壤温度, 取土壤初始温度为18.6℃。

### 1.2 模型建立

本文选用了TRNSYS软件作为仿真平台建立上述的混合式地源热泵系统模型, TRNSYS最早由Wisconsin Madison大学Solar Energy实验室(SEL)开发研制, 其涉及的范围较广, 可对多种系统的运行状况进行动态仿真, 是一种模块化的动态仿真软件。建立系统模型时首先需要调用或建立其各组成部件的数学模型, 按照系统中实际设备的参数确定

模型的输入参数；并按照实际系统的设备布置及控制情况利用一定方式将所有的数学模型连接起来，形成闭式计算环路，之后进行调试，当整个系统每个时刻的计算都收敛后，系统模型才算建成[6-7]。本文建立的并联连接混合式土壤源热泵系统中的主要设备有热泵机组、地理管换热器、冷却塔、循环水泵，所以建立的系统模型中用到的模块主要有水-水热泵模块（Type927: Water to Water Heat Pump）、地理管换热器模块（Type557: Vertical

Ground Heat Exchanger）、冷却塔模块（Type51a: Cooling Tower）变频水泵模块（Type110: Variable Speed Pump）、数据读取模块（Type 9: Data Reader）等。各设备模块的输入参数都是根据设备的实际参数确定，其中循环水泵的性能曲线是根据水泵样本数据拟合得到，热泵机组的性能参数文件也是由样本数据得到。图1为TRNSYS中建成的实际空调系统的结构图。

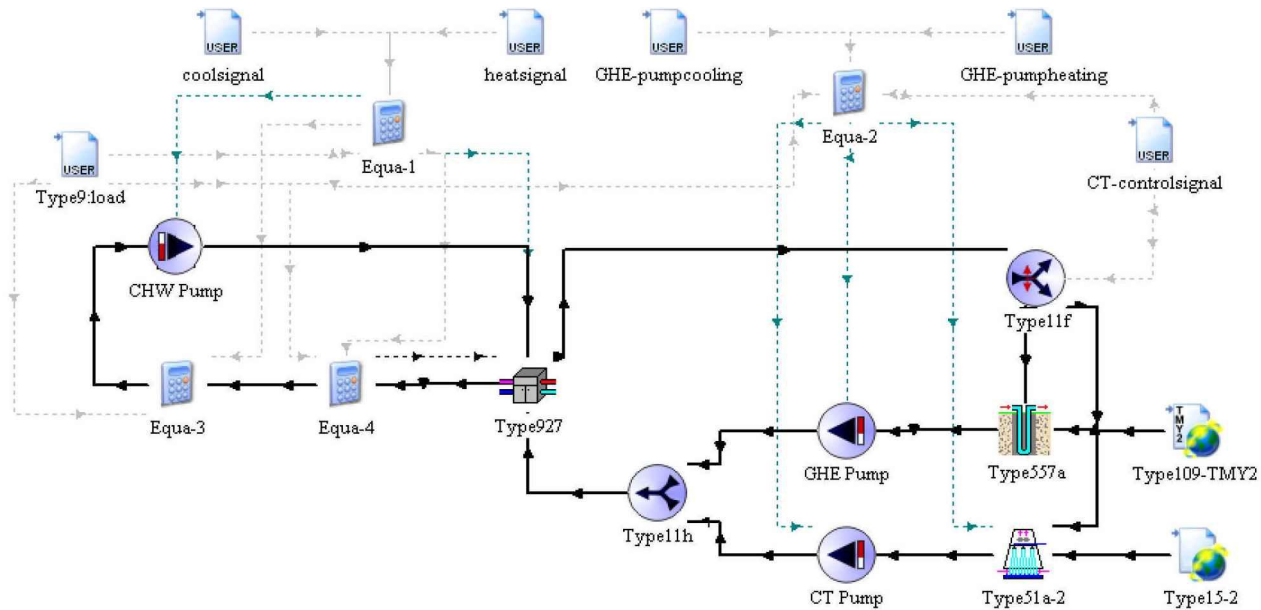


图1 simulation studio中空调系统结构图

### 1.3 模型验证

根据监测系统测得的2010年全年热泵机组负荷侧进、出口水温和流量的逐时数据，处理得到建筑全年的逐时负荷如图2所示，计算得到建筑全年

累计冷热负荷比为1.16。系统供冷季为5月1日至9月30日，供暖季为11月1日至12月31日和1月1日至3月31日。

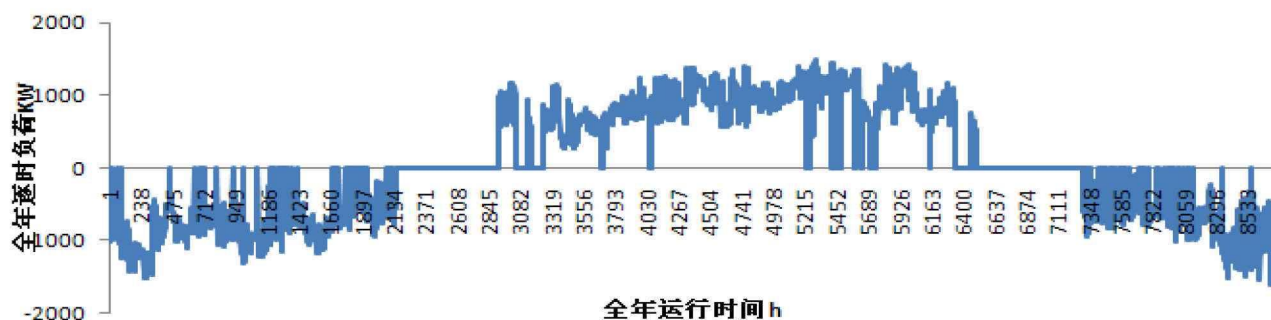


图2 建筑全年逐时负荷

根据实际运行情况在5月10日的11:00至5月20日的16:00、5月26日的13:00至6月7日的10:00和8月10日的11:00至8月31日的18:0系统单独运行冷却塔进行散热，其余时间都是地理管换热器负责散热，图1所示系统模型中的控制系统就是按照实际运行情

况建立的。为了检验所建立的系统模型的计算准确度，以建筑实际负荷为模型输入文件，将5月19日至6月25日的热泵机组源侧进、出水温逐时的实测值与模拟进行对比，热泵机组进、出水温度的实测值和模拟值及计算误差如图3和4所示。

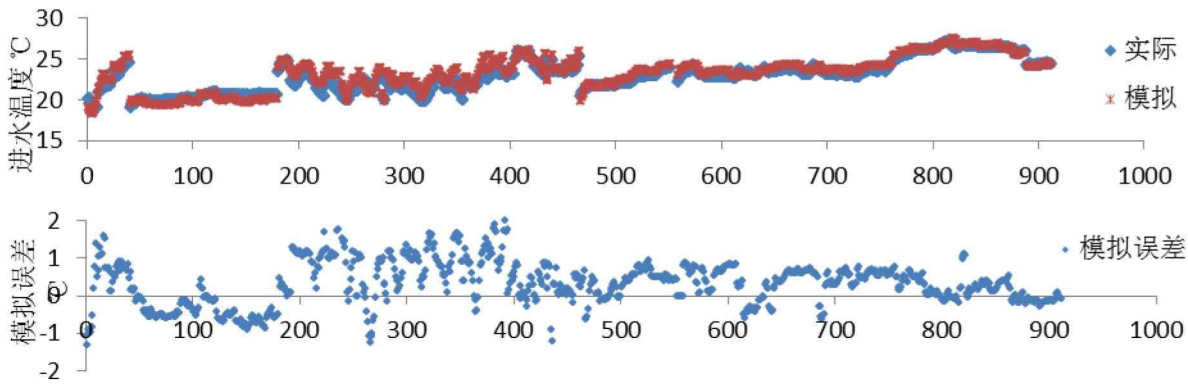


图3 热泵机组进水温度实测值与模拟值对比及误差

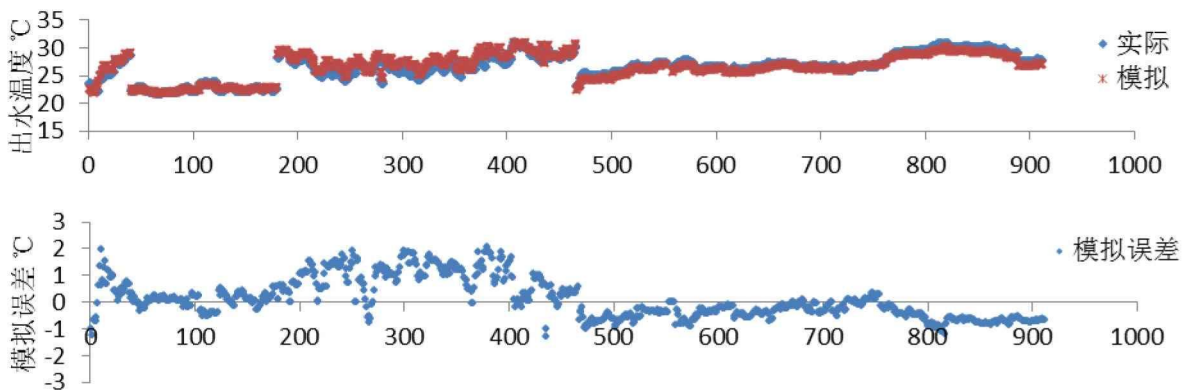


图4 热泵机组出水温度实测值与模拟值对比及误差

从图中可以看到，对于进水和出水温度模拟值与实测值的差值绝大部分都能保持在 $-1^{\circ}\text{C}$ 与 $1^{\circ}\text{C}$ 范围内，少数点误差超过 $1^{\circ}\text{C}$ ，其中超过 $1^{\circ}\text{C}$ 的点大多出现在冷却塔运行期间，主要是由于受环境参数影响较大，而模型中使用的天气文件是典型年的气象文件，所以会有所差异。对于系统的验证，除了

## 2 运行控制策略模拟分析

对于同一个混合式土壤源热泵系统采取不同的运行策略，其长期运行性能和土壤热平衡情况都会存在很大差异，因此选取一个好的运行策略非常重要。并联混合式土壤源热泵系统中冷却塔及地理管换热器分别与热泵机组组成循环环路，两环路可单独运行作为系统供冷。本文研究的系统实际运行情况是在5月10日的11:00至5月20日的16:00、5月26日的13:00至6月7日的10:00和8月10日的11:00至8月31日的18:00这三个时间段单独运行冷却塔环路进行散热，其余时间都是地理管换热器负责散热。由按照系统实际运行情况建立的系统模型模拟系统运行10年的运行情况，得到系统十年平均COP为3.12，土壤年平均温度10年升高 $1.7^{\circ}\text{C}$ ，说明系统在现在的运行控制方案下，土壤长期的热平衡情况在可接受范围内。下面对系统在其它运行策略下的长期运行性能情况和土壤热平衡情况进行

热泵机组源侧进、出水温度外，系统能耗也是重要的指标，系统在5月19日至6月25日期间总耗电量的实测值为222565KWh，模拟值217195KWh，模拟误差为2.5%。总的来说，通过热泵机组源侧进、出水温度和系统能耗的实测值与模拟值的比较结果可以看出系统模型显示了较高的准确度。

模拟分析，首先研究温度设定控制、温差控制和冷却塔运行时间设定控制这三种常见的控制策略，并选出各控制策略下最优的控制方案与实际系统和常规土壤源热泵系统进行比较得出系统最优的控制方案，最后还分析了温度与温差联合综合下系统的运行情况。

### 2.1 温度控制

温度控制是指夏季时当热泵机组源侧进口水温低于设定值时由地理管换热器负责散热；当进水温度超过设定值时，开启冷却塔负责散热，地理管换热器关闭处于休息状态。表1列出了设定温度分别为 $25^{\circ}\text{C}$ 、 $26^{\circ}\text{C}$ 、 $27^{\circ}\text{C}$ 、 $28^{\circ}\text{C}$ 、 $29^{\circ}\text{C}$ 、 $30^{\circ}\text{C}$ 时系统模拟运行10年的结果数据，其中系统COP是指系统运行10年的平均COP。从表中可以看出随着设定温度升高冷却塔运行时间减少，冷却塔散热量减少，土壤升温增大；热泵机组的系统10年平均COP则先减小后增大，这主要是由于当设定温度过低时

冷却塔运行时间过长造成系统 10 年平均 COP 降低；而当设定温度过高时冷却运行时间太少，地埋管换热器吸、放热不平衡土壤温度升高导致热泵机组运行效率降低，从而使得系统 10 年平均 COP 减低。以系统长期运行性能及土壤热平衡情况为依据从表中结果可以看出该系统在温度控制策略下温度设定值取 27℃是最合理的。

表 1 温度控制下系统运行 10 年模拟结果

设定温度/℃	土壤十年温升/℃	冷却塔排热/总排热	冷却塔运行时间/h	系统 COP
25	-2.1	0.5	13517	3.1235
26	-1.2	0.45	12296	3.1244
27	0.28	0.37	9807	3.1274
28	1.29	0.32	8396	3.1265
29	2.31	0.26	6720	3.1252
30	3.82	0.19	4620	3.1237

## 2.2 温差控制

温差控制是指夏季时当热泵机组源侧进口水温与室外湿球温度的差值大于设定值时，由冷却塔负责散热；当差值低于设定值时，由地埋管换热器负责散热。表 2 列出来了温差设定值分别取为 3℃、4℃、5℃、6℃、7℃时系统模拟运行 10 年的结果数据。通过表中数据可以看出温差控制策略下系统 10 年平均 COP 整体比温度控制策略下的好。当温差设定值为 5℃时土壤的热平衡效果最好，但是系统的 10 年平均 COP 却不是最高的，这主要是由于该设定值情况下冷却塔运行时间太长，而热泵机组的 COP 在冷却塔运行时可能没有地埋管换热器运行时高，所以会使系统平均 COP 有所降低。综合系统 10 年运行性能及土壤热平衡情况来看，该系统在温差控制策略下温差设定值取 5℃是最合适的。

表 2 温差控制下系统运行 10 年模拟结果

设定温差/℃	土壤十年温升/℃	冷却塔排热/总排热	冷却塔运行时间/h	系统 COP
3	-2.35	0.51	16282	3.1383
4	-1.12	0.45	14333	3.1420
5	0.43	0.36	12056	3.1441
6	1.99	0.28	9470	3.1471
7	3.69	0.2	6490	3.1429

## 2.3 冷却塔运行时间控制

冷却塔运行时间控制是指夏季时设定特定的时间段开启冷却塔负责散热，其它时间均由地埋管换热器负责散热。由于在晚上环境温度较低时冷却

塔散热效果较好，所以设定夜间开启冷却塔负责散热。表 3 列出了冷却塔夜间运行时间段分别取为 20:00-2:00、20:00-3:00、20:00-4:00、20:00-5:00、20:00-6:00 时系统模拟运行 10 年的结果数据。从表中可以看出，随着冷却塔夜间运行小时数的增加，冷却塔负责的散热量增加，土壤累积热量减少，土壤温升降低，系统 10 年平均 COP 先增大后减小，这同样是由于冷却塔运行时间过长承担了过多的散热量，而且这不能充分发挥土壤热泵系统的优越性，所以从结果数据看出该系统比较适合夜间冷却塔运行时间是 20:00-5:00，在此控制方案下土壤热平衡情况和系统长期性能都较好。

表 3 冷却塔运行控制下系统运行 10 年模拟结果

运行时间	土壤十年温升/℃	冷却塔排热/总排热	冷却塔运行时间/h	系统 COP
20-2	2.79	0.26	7900	3.1469
20-3	1.96	0.29	9210	3.1488
20-4	1.13	0.33	10520	3.1497
20-5	0.31	0.37	11820	3.1494
20-6	-0.52	0.41	13120	3.1482

## 2.4 运行控制策略比较

表 4 是上述 3 种控制策略中的最优方案与该系统实际运行控制方案和不带冷却塔的常规地源热泵系统方案模拟运行 10 年的结果比较。从表中可以看出不带冷却塔的常规土壤源热泵系统由于地埋管换热器吸、放热差异较大导致 10 年后土壤平均温度上升了 8.44℃，系统 10 年平均 COP 也明显比混合系统低。而温度、温差和冷却塔运行时间控制方案下的土壤热平衡情况和系统 10 年平均 COP 都比实际运行方案下更好，其中温差方案和冷却塔运行时间控制方案下系统长期运行性能最好，这主要跟冷却塔运行特性有关，由于温差大冷却塔冷却效果较好，而夜间室外温度较低也有利于冷却塔的冷却效果。结果显示该系统在冷却塔夜间运行时间段为 20:00-5:00 时系统 10 年平均 COP 最高，土壤热平衡效果也很好。

## 3 温度与温差综合控制策略

从三种控制策略的结果可以看出温度控制策略下系统的长期运行性能相对最差，温差控制策略下系统长期性能较好，但是设定值对其长期运行情

况影响都很大。所以下面研究温度和温差综合控制策略下系统长期运行性能和土壤热平衡的情况。温度和温差综合控制策略就是指夏季当热泵机组源侧进口水温大于温度设定值或热泵机组源侧进口水温与室外湿球温度的差值大于温差设定值时都开启冷却塔负责散热,其它时间都由埋管换热器负责散热。温度和温差综合控制策略下系统运行 10 年的模拟结果如表 5 所示。

表 4 各方案下系统运行 10 年模拟结果

方案	土壤十年 温升/℃	冷却塔排 热/总排热	冷却塔运 行时间/h	系统 COP
温度27	0.28	0.37	9807	3.127 4
温差5	0.43	0.36	12056	3.144 1
20-4	0.31	0.37	11820	3.149 4
实际运行	1.70	0.31	10780	3.120 8
常规地源	8.44			3.094 6

从模拟结果可以看出温度与温差综合控制策略很明显的优于同样温度设定值下的温度控制策略,但是比同样温差设定值下的温差控制策略优势并不明显,而文献[8]中得出该控制策略应用于串联连接混合式土壤源热泵系统时优势较明显,说明同样的控制策略对于并联与串联连接的混合式土壤源热泵系统运行效果有可能会有很大差异。应该根据特定的系统情况选择最适合的运行控制策略。

## 4 结论

本文基于实际工程建立了并联连接混合式土壤源热泵系统的仿真模型,分析了系统实际运行方案下长期运行性能及土壤热平衡情况,并对该系统分别在温度控制、温差控制和冷却塔运行时间控制这 3 种控制策略下的长期运行(10 年)情况进行了模拟,分析比较了各控制策略在不同控制参数设定值下系统的运行效果,得出了最优控制方案,最后模拟分析了系统在温度和温差综合控制策略下的长期运行情况。得到的主要结论如下:

(1) 本文用 TRNSYS 建立的并联连接混合式土

壤源热泵系统模型能较准确的模拟系统的运行情况。

(2) 对于本文研究的并联连接混合式土壤源热泵系统比较适合采用温差控制策略和冷却塔运行时间控制策略,或者温度与温差综合控制策略。

(3) 对于本文研究的实际系统在冷却塔运行时间控制策略下运行时间设定为 20:00-5:00 时(即夜间运行 7 小时左右时)系统长期运行性能最好,且能很好的满足土壤热平衡。

(4) 并联连接混合式土壤源热泵系统在同一种控制策略下不同的控制参数设定值对系统长期运行性能有很大的影响,所以针对系统的具体情况确定合适的控制参数值对土壤热平衡和系统的节能运行也很重要。

(5) 对于并联连接混合式土壤源热泵系统温度与温差综合控制策略优于温度控制策略,但是比温差控制策略并没有太大优势。

## 参 考 文 献

- 1 欧阳长文,徐菱虹,许双霜,等. 武汉地区混合式土壤源热泵系统的优化运行[J]. 太阳能学报,2012,33(5):832-837.
- 2 王华军,赵军. 混合式地源热泵系统的运行控制策略研究[J].暖通空调,2007,37(9):131-134.
- 3 Yavuzmrk C, Spitler J D. Comparative study of operating and control strategie8 for hybrid ground source heat pump systems using a short time step simulation model [J]. ASHRAE Transactions,2000,106(2):192-209.
- 4 王景刚,李芳,李恺渊. 辅助冷却复合式地源热泵系统运行控制策略研究. 暖通空调,2007,37(12):129-132.
- 5 郝先栋,罗寿平,王从龙. 并、串联连接混合式地源热泵比较.制冷与空调,2009,23(2):42-45.
- 6 Kavanaugh S P. A design method for commercial ground-coupled heat pumps [J]. ASHRAE Transactions,1995,101(2):1088-1094.
- 7 Yavuzturk C, Spitler J D, Rees S J. A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers[J]. ASHRAE Transactions,1999,105(2):475-485.
- 8 花莉. 复合式地源热泵系统土壤热平衡问题研究. 同济大学硕士学位论文. 2012