

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.03.013

# 冷却塔辅助地源热泵系统控制算法仿真

吕艺青, 傅允准

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

**摘要:**针对目前复合式地源热泵系统控制方法不完善的问题,文中以小型冷却塔辅助地源热泵系统为研究对象,通过响应实验法进行控制器参数整定,利用 MATLAB/Simulink 软件对其不同运行模式、不同控制算法进行了控制仿真。仿真结果表明:与传统 PID 控制和模糊 PID 控制相比,Smith 预估 PID 控制在冷却塔单独运行、地埋管单独运行、二者联合运行 3 种不同模式下均可以达到较好的控制效果。该控制方法调节精度较高,速度快,超调小,对冷却塔辅助地源热泵系统具有一定的可行性。

**关键词:**冷却塔辅助地源热泵系统;Smith 预估 PID 控制;控制仿真;响应曲线;MATLAB/Simulink 软件

**中图分类号:**TU831.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2895(2017)03-0056-04

## Simulation on Control Algorithm of Ground Source Heat Pump System with Cooling Tower

LÜ Yiqing, FU Yunzhun

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In view of currently hybrid ground source heat pump system control method not perfect, the ground source heat pump system with a small cooling tower was researched. The method of response test was used to determine the parameters of controller, and MATLAB/Simulink software was applied for control simulation in different operation model and different control algorithm. The simulation results shows that Smith predictive PID control has a better control effect compared with traditional PID control and fuzzy PID control. This control algorithm is applicable to three different operating modes, such as separate operation of cooling tower, separate operation of ground buried pipes, and joint operation of both. The controller has a high controlling accuracy, fast adjusting speed, small overshoot, it is feasible for ground source heat pump system with cooling tower.

**Keywords:** ground source heat pump system with cooling tower; Smith predictive PID control; control simulation; response curve; MATLAB/Simulink

近年来,针对单一的地源热泵系统长期运行所存在的问题,不少学者提出了复合式地源热泵系统。复合式地源热泵多用于冷热负荷不平衡地区,采用一些辅助设备承担一部分负荷,从而使地源热泵系统的性能维持稳定,解决长期运行后土壤热累积问题。

复合式地源热泵系统的控制策略以及控制方法对整个系统的性能有着十分重要的影响。因此有不少学者对此进行了大量的研究,但是由于实验周期长,代价大,研究的方法主要还是采用模拟的手段。如学者王

三元<sup>[1]</sup>等优化控制方法,研究了串级控制在复合式地源热泵系统的应用;贾宇<sup>[2]</sup>研究了重庆地区冷却塔复合式地埋管地源热泵系统动态控制策略,指出地埋管单独运行、冷却塔单独运行及二者联合运行的 3 种控制模式,但是并没有涉及具体控制算法的应用;禹添<sup>[3]</sup>研究了人工神经网络在辅助式地源热泵系统控制中的应用;刚文杰<sup>[4]</sup>以办公建筑为研究对象,利用人工神经网络建立冷却塔和土壤换热器的预测模型,提出了直接比较土壤换热器与冷却塔出口水温的控制

收稿日期:2016-09-21;修回日期:2017-02-08

**第一作者简介:**吕艺青(1989),女,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要研究方向为冷却塔辅助地源热泵系统。通信作者:傅允准(1978),男,浙江温州人,博士,副教授,主要从事热泵技术及建筑节能的研究。E-mail:fuyunzhun@126.com

办法,并与常用的时间控制法、温差控制法进行了对比;祝立萍<sup>[5]</sup>等针对住宅小区不同入住率条件下复合式地源热泵系统运行策略优化问题,以合肥市的某住宅小区为研究对象,应用 TRNSYS 模拟软件建立小区复合式地源热泵系统仿真模型,分别对入住率为 100%、70%、50%、30% 等 4 种情况进行了仿真模拟,研究了复合式地源热泵系统的性能;Hu 等<sup>[6]</sup>以冷却塔复合式地源热泵系统能耗作为反馈信号来控制冷却塔的流量,并提出极限寻优控制方案用以研究系统的性能。

众多学者的研究主要集中在最优控制策略的寻求,以及简单控制方法的优化上<sup>[7-10]</sup>。在通过控制算法实现智能控制方面的研究甚少,部分控制方法适用范围小,而在实际工程中单一的运行方式是无法满足需求的,因此控制方法应该具有大范围的(不同运行模式)的适用性。且大多数关于控制的研究是针对单一的地源热泵系统,用于复合式地源热泵系统的控制研究较少。作者则针对小型冷却塔辅助地源热泵系统,提出了适用于不同运行模式的控制方法,为复合式地源热泵系统的工程应用提供了参考。

## 1 实验系统

作者研究的冷却塔辅助地源热泵系统示意图如图 1 所示,整个系统由 4 部分组成,分别是:地埋管侧环路、开式冷却塔+板式换热器环路、水-水式地源热泵机组以及用户末端。

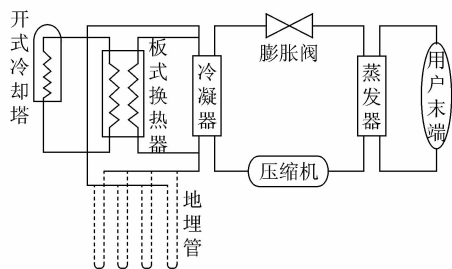


图 1 冷却塔辅助地源热泵系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of ground source heat pump system with cooling tower

## 2 控制系统模型建立与控制器参数整定

响应曲线法是一种简单的工程整定方法,根据控制对象的反应曲线确定所需的参数,不需要反复试凑,整定时间短,适用于已知的系统,控制图如图 2 所示,故本文采用此方法进行参数整定。

图 2 中  $R(s)$  是输入信号,  $E(s)$  为误差,  $G_c(s)$  表示控制器,  $G_v(s)$  为执行器,  $G_o(s)$  为作用对象,  $Y(s)$  为输出信号。

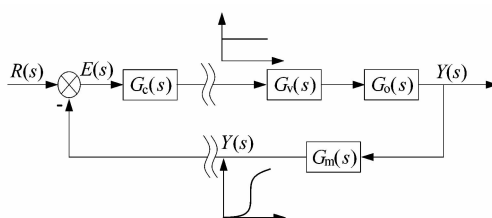


图 2 响应曲线实验的控制系统图

Figure 2 Control system diagram of response curve experiment

操作步骤如下:

- 1) 将系统置于开环状态;
- 2) 在调节阀  $G_v(s)$  的输入端施加一个阶跃信号,记录下测量变送环节  $G_m(s)$  的输出响应曲线  $y(t)$ ;
- 3) 根据阶跃响应曲线,得到广义对象的传递函数;
- 4) 根据近似经验公式计算控制器参数。

齐格勒(Ziegler)-尼科尔斯(Nichols)在 1942 年提出的参数整定的方法,具体过程如表 1 所示。

表 1 Z-N 法控制器参数整定

Table 1 Parameter tuning of controller for Z-N

| 控制规律 | 整定参数                  |                    |                  |
|------|-----------------------|--------------------|------------------|
|      | $K_p$                 | $T_i$              | $T_d$            |
| P    | $\frac{T}{K\tau}$     | $\infty$           | 0                |
| PI   | $\frac{0.97T}{K\tau}$ | $\frac{\tau}{0.3}$ | 0                |
| PID  | $\frac{0.97T}{K\tau}$ | $2\tau$            | $\frac{\tau}{2}$ |

表 1 中  $K_p$ ,  $T_i$  和  $T_d$  分别表示比例系、积分时间常数和微分时间常数;  $K$  为比例系数;  $T$  表示采样周期;  $\tau$  为滞后时间。

### 2.1 地埋管单独运行

对冷冻水泵进行变频,辨识过程曲线如图 3 所示,水泵频率  $M$  由最初的 27 Hz 增加至 35 Hz,负荷侧流量由  $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$  变化至  $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,记录机组负荷侧输出温度值信号,用软件处理获得特征参数  $K = Y(\infty)/M = -0.1990$ ,  $T = 880 \text{ s}$ ,  $\tau = 80 \text{ s}$ ,其中  $Y(\infty)$  表示出水温度的变化量。通过 Z-N 整定方法求出可以接受的 PID 控制器参数值  $K_p$ ,  $T_i$  和  $T_d$  分别为 -66.33, 160 和 40。

得到地源热泵系统传递函数为:

$$G_D(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} = \frac{0.199}{880s + 1} e^{-80s}。$$

### 2.2 冷却塔单独运行

冷却塔单独运行,与地埋管单独运行参数整定办

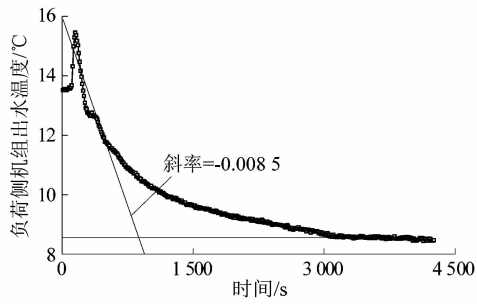


图3 地埋管单独运行实验响应曲线

Figure 3 Experimental response curve of ground buried pipe separate operation

法相同,响应曲线如图4所示。

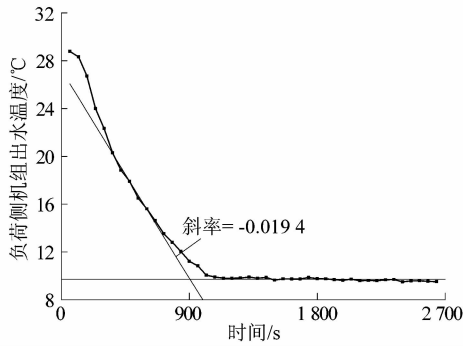


图4 冷却塔单独运行实验响应曲线

Figure 4 Experimental response curve of cooling tower separate operation

得特征参数: $K=Y(\infty)/M=-0.5770$ ,  $T=900$  s,  $\tau=90$  s。计算求得  $K_p$ ,  $T_i$  和  $T_d$  分别为  $-20.79$ ,  $180$  和  $45$ 。

得到冷却塔单独运行系统传递函数为:

$$G_L(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} = \frac{-0.577}{900s+1} e^{-90s}。$$

### 2.3 二者联合运行

冷却塔和地埋管以 1:1 流量比联合运行,与地埋管单独运行参数整定办法相同,响应曲线如图5所示。

处理可得参数  $K=Y(\infty)/M=-0.2466$ ,  $T=790$  s,  $\tau=60$  s;  $K_p$ ,  $T_i$  和  $T_d$  分别为  $-64.07$ ,  $120$  和  $30$ 。

同样可得二者联合运行传递函数为:

$$G_J(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} = \frac{-0.2466}{790s+1} e^{-60s}。$$

### 3 系统仿真及结果分析

本文应用 Simulink 软件分别建立地埋管单独运行控制模型、冷却塔单独运行控制模型、地埋管和冷却塔耦合运行控制模型,并将 PID 控制算法、Smith-PID 预估控制算法和模糊 PID 控制算法分别应用于以上 3 个

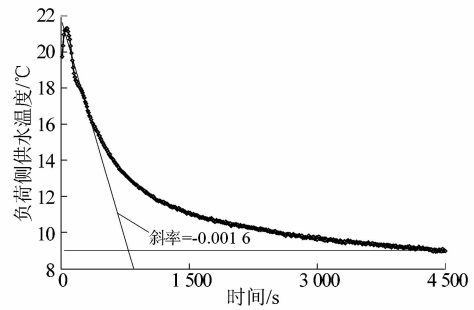


图5 耦合运行实验响应曲线

Figure 5 Experimental response curve of coupling operation

模型中进行仿真对比,测试控制的性能。控制如图6所示,在此只显示地埋管单独运行的控制框图,其它两个运行模式的控制原理与此一致,只需要更换其中的传递函数,并通过调试确定相关控制参数即可。

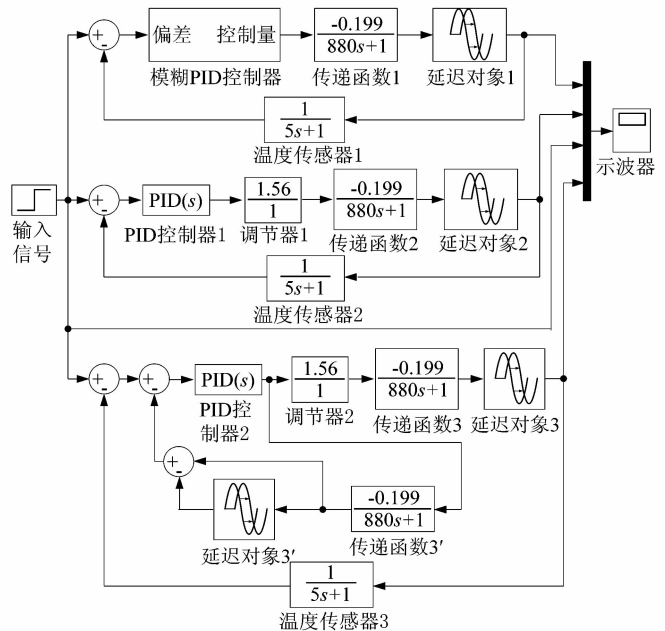


图6 系统仿真控制图

Figure 6 Simulation control chart of system

为了便于分析比较,将每个工况的比较内容放在同一个坐标系中。仿真时间设置为 5 000 s,仿真曲线如图7~9所示。

图7为地埋管单独运行时在 PID 控制、模糊 PID 控制及 Smith 预估 PID 控制下的仿真结果。由图可以看出,在传统 PID 控制时控制系统不稳定,有较大的震荡,调节时间为 1 200 s,最大超调量为 57%;在模糊 PID 控制时系统调节时间为 1 500 s,最大超调量为 44%,相比于前者系统的稳定性有所改善,但是调节速度不是很理想;在 Smith 预估 PID 控制时系统的稳定

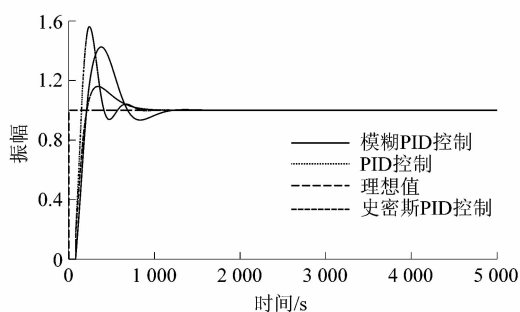


图7 地埋管单独运行不同控制方式仿真曲线图

Figure 7 Simulation curve of different control methods for separate operation of buried pipe

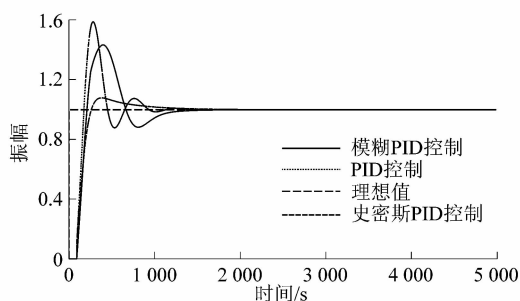


图8 冷却塔单独运行不同控制方式仿真曲线图

Figure 8 Simulation curve of different control methods for separate operation of cooling tower

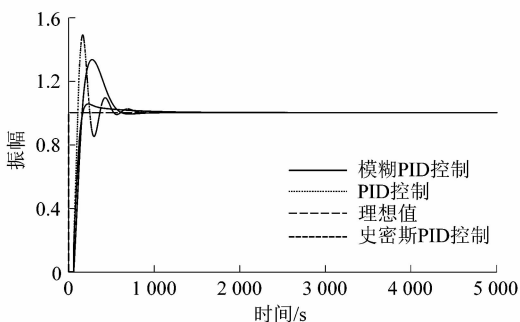


图9 耦合运行不同控制方式仿真曲线图

Figure 9 Simulation curve of different control methods for coupling operation

性和调节速度都比前两者控制效果好,调节时间缩短为1 000 s,最大超调量为17%。图8为冷却塔单独运行时在3种控制方法下的仿真结果。PID控制、模糊PID控制和Smith预估PID控制算法的调节时间分别是2 200,1 700和1 900 s。超调量分别是13%,42%和54%。PID控制系统很不稳定,震荡明显;模糊PID控制系统稳定性比前者好,但是响应较慢;Smith预估PID控制在系统的稳定性和响应速度上都要比较好。

图9所示为冷却塔和地埋管耦合运行分别控制方式下的控制效果仿真曲线图。3种控制算法所用调节时间基本一样,其超调量分别为49%,33%和5%。PID控制系统不稳定,有震荡。模糊PID控制改善了系统的稳定性,但相比于Smith-PID预估控制,后者响应速度快,系统稳定,超调量更小,很好地实现了控制效果。

#### 4 结语

在冷却塔辅助地源热泵系统中,传统的PID控制无法克服系统的不稳定性,控制效果不理想。在改进的模糊PID控制中,系统的稳定性等有所改善,但是存在响应速度慢,调节时间久的问题。而Smith预估PID控制中,在冷却塔单独运行、地埋管单独运行及两者耦合运行中控制效果都是非常理想的,系统稳定,超调量小,调节时间也是位于前两种控制方法之间。冷却塔辅助地源热泵系统在实际工程中运行的策略多样,同一个系统无法实现不同运行策略所对应的控制方法,因此寻求一种适合所有运行策略的控制方法是非常必要的。不管系统的运行策略是什么,但是运行模式不外乎文中叙述的这3种,而在控制仿真中Smith预估PID控制可以同时实现3种运行模式的良好控制。

#### 参考文献:

- [1] 王三元. 串级控制系统在复合地源热泵系统中的应用[J]. 电气自动化, 2012, 32(4): 35-38.
- [2] 贾宇. 重庆市冷却塔复合式地埋管地源热泵系统优化及控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011: 87-99.
- [3] 禹添. 基于人工神经网络的辅冷式地源热泵系统的控制策略研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 37-48.
- [4] 刚文杰. 复合地源热泵系统模型预测控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 44-54.
- [5] 祝立萍, 石玉洋, 张希帧, 等. 不同入住率下住宅小区复合式地源热泵系统运行策略的研究[J]. 流体机械, 2016, 44(3): 76-79.
- [6] HU Bin, LI Yaoyu, MU Baojie, et al. Extremum seeking control for efficient operation of hybrid ground source heat pump system[J]. Renewable energy, 2016, 82: 332-346.
- [7] 李中彩, 程武山. 模糊PID控制算法在地源热泵空调控制中的应用[J]. 上海工程技术大学学报, 2012, 26(3): 215-218.
- [8] GANG Wenjie, WANG Jinbo, WANG Shengwei. Performance analysis of hybrid ground source heat pump systems based on ANN predictive control[J]. Applied energy, 2014, 136: 1138-1144.
- [9] WANG Shaojie, LIU Xiaobing, GATES S. Comparative study of control strategies for hybrid GSHP system in the cooling dominated climate[J]. Energy and buildings, 2015, 89: 222-230.
- [10] 张春辉, 张九根. 基于改进LMBP神经网络的地源热泵空调控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(8): 2444-2446.