

文章编号: 1671-6612 (2020) 06-703-04

# 土壤源热泵系统运行策略及优化分析

徐卫荣 夏卓平 邱建中

(江苏省建筑设计研究院有限公司 南京 210019)

**【摘要】** 针对土壤源热泵系统供冷工况运行控制策略多样, 系统能耗受策略影响较大, 导致实际运行能耗较难达到设计目标的问题, 对系统常规运行策略能耗进行了分析。在温差控制策略的基础上, 提出基于优先采用低品位热源的原理, 对运行控制策略进行节能优化。优化结果表明: 供冷工况系统运行能耗较地埋管优先、冷却塔优先、温差控制策略下分别降低 3.89%、4.71%、0.82%。

**【关键词】** 土壤源热泵; 能耗; 运行策略; 节能优化; 空调耗电量

中图分类号 TK529 文献标识码 A

## Operation Strategy and Optimization Analysis of Ground Source Heat Pump System

Xu Weirong Xia Zhuoping Qiu Jianzhong

( Jiangsu Provincial architectural D&R Institute Ltd, Nanjing, 210019 )

**【Abstract】** According to multiple control strategy influencing energy consumption on cooling mode and inaccessibility to the design target in ground source heat pump system operating, conventional operation energy consumption of the system is analyzed. On the premise of temperature difference control, operation strategy is optimized based on the principle of low-grade heat source used in preference. The results show that cooling operation energy consumption decreased respectively 3.89%, 4.71%, 0.82% compared with buried pipe priority operation, cooling tower priority operation, temperature difference control operation.

**【Keywords】** ground source heat pump; energy consumption; operation strategy; energy saving optimizing; air conditioning power consumption

作者(通讯作者)简介: 徐卫荣(1983.7-), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: xuweirong001@163.com

收稿日期: 2020-03-27

## 0 引言

土壤源热泵系统具有较高的运行能效比, 是有效降低建筑能耗的建筑节能技术之一<sup>[1-3]</sup>。但地埋管运行时土壤温度对热泵系统运行能耗影响较大, 且地下土壤换热及温度恢复过程复杂<sup>[4,5]</sup>, 土壤源热泵系统在供冷工况下, 地埋管及冷却塔组合运行方式多样, 导致部分工程实际运行效果较差, 运行能耗偏高。因此有必要对土壤源热泵系统供冷工况的运行控制策略进行分析, 通过合理优化地埋管及

冷却塔间隙运行方案, 在系统设计条件无需做较大调整的前提下, 进一步降低土壤源热泵系统全年运行能耗, 从而为该系统的运行管理提供理论指导。

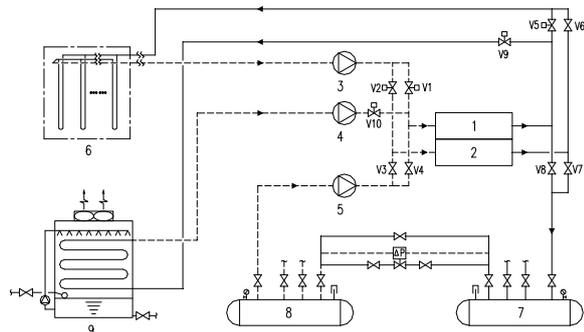
## 1 土壤源热泵系统原理与设计

### 1.1 土壤源热泵系统原理

土壤源热泵系统以土壤为环境冷热源, 向用户提供空调制冷或供热功能<sup>[6]</sup>, 该系统原理如图 1 所示。

图 1 中, 通过 V1~V10 阀门状态的切换, 实

现空调供热时通过地埋管从土壤吸热,空调制冷时通过地埋管或冷却塔向环境放热,系统另设置冷却塔辅助散热以实现土壤全年换热平衡。



- 1—热泵机组冷凝器; 2—热泵机组蒸发器;
- 3—地埋管侧循环泵; 4—冷却塔侧循环泵;
- 5—用户侧循环泵; 6—地埋管换热器; 7—分水器;
- 8—集水器; 9—闭式冷却塔

图1 土壤源热泵系统原理

Fig.1 The principle of of ground source heat pump system

### 1.2 土壤源热泵系统设计

选定采用土壤源热泵系统的某综合楼进行分析,其空调设计冷负荷为3494kW,热负荷为1777kW,另有稳定的热水需求负荷为498kW。设计地埋管深度 $H=100\text{m}$ ,共850口井。选用2台额定工况制冷量为1280kW,制热量为1410kW的地源热泵机组,和1台额定工况制冷量为1280kW的单冷冷水机组,另选用1台额定流量为 $280\text{m}^3/\text{h}$ 的闭式冷却塔进行辅助散热。冷却塔与地埋管并联管路上的阀门为电动二通阀,机组运行时间为工作日7~18时<sup>[7]</sup>。

建立土壤源热泵系统运行数学模型<sup>[8-13]</sup>,并根据项目现场记录数据验证了模型的准确性<sup>[8-9,14]</sup>,通过该模型对系统运行策略能耗进行分析,以下分析均以土壤全年换热平衡为前提<sup>[15]</sup>。

## 2 常规运行策略能耗分析

本工程土壤源热泵系统空调供热工况从土壤吸热量小于空调制冷工况向土壤的排热量,夏季需开启冷却塔进行辅助散热,因此运行控制策略能耗分析针对夏季地埋管和冷却塔复合运行方式。常规复合运行策略有地埋管优先运行、冷却塔优先运行、热泵机组冷却进水温度与环境湿球温度温差控制运行<sup>[16]</sup>。

### 2.1 地埋管优先运行

在空调供冷季优先运行地埋管放热,为保证土壤换热平衡,后期开启冷却塔进行辅助散热。

地埋管优先运行策略下,土壤日平均温度 $t_{GC}$ 及系统日累计运行能耗 $\Sigma E_C$ 随空调季日期 $T$ 变化曲线如图2所示。

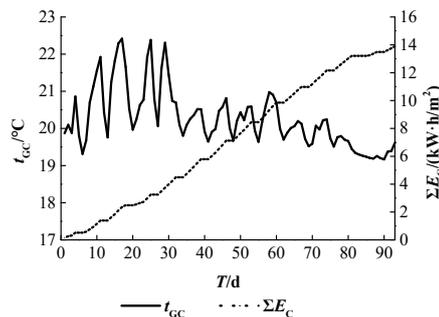


图2 地埋管优先运行策略下土壤温度及系统累计能耗曲线

Fig.2 Soil temperature and system cumulative energy consumption curve under the priority operation strategy of buried pipe

图2表明,地埋管优先运行策略下,因地埋管连续运行,在空调供冷季运行初期土壤温度较高,随着后期运行冷却塔系统进行辅助散热,以及供冷季末期空调冷负荷的减小,土壤温度逐渐降低。该策略下,空调供冷工况运行能耗为 $13.89\text{kWh}/\text{m}^2$ 。

### 2.2 冷却塔优先运行

在空调供冷季优先运行冷却塔进行平衡散热,后期开启地埋管系统向土壤放热。

冷却塔优先运行策略下,土壤日平均温度 $t_{GC}$ 及系统日累计运行能耗 $\Sigma E_C$ 随空调季日期 $T$ 变化曲线如图3所示。

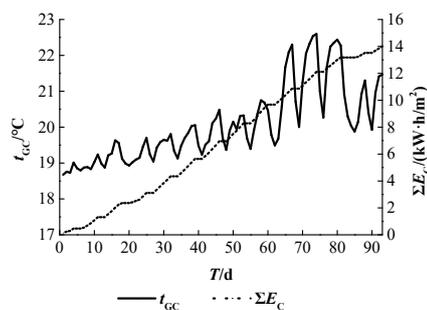


图3 冷却塔优先运行策略下土壤温度及系统累计能耗曲线

Fig.3 Soil temperature and system cumulative energy consumption curve under the priority operation strategy of cooling tower

图3表明,冷却塔优先运行策略下,因冷却塔提前开启进行辅助散热,在空调供冷季运行初期土

壤温度较低, 随着后期地埋管系统投入连续运行, 土壤温度逐渐升高, 同时由于供冷季末期空调冷负荷的减小, 土壤温度再次降低。该策略下, 空调供冷工况运行能耗为 14.01kWh/m<sup>2</sup>。

### 2.3 温差控制

温差控制通过热泵机组冷却水进水温度与当地湿球温度的差值实现运行控制。当冷却进水温度与周围空气湿球温度的温差大于某一数值时, 开启冷却塔进行辅助散热, 否则关闭冷却塔。

温差控制运行策略下, 土壤日平均温度  $t_{GC}$  及系统日累计运行能耗  $\Sigma E_C$  随空调季日期  $T$  变化曲线如图 4 所示。

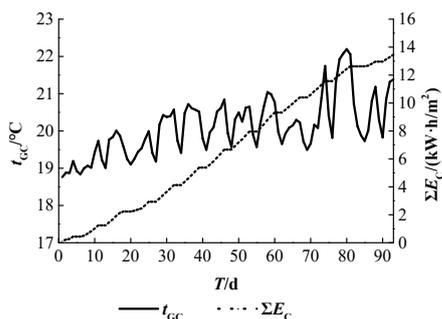


图 4 温差控制运行策略下土壤温度及系统累计能耗曲线

Fig.4 Soil temperature and system cumulative energy consumption curve under the operation strategy of temperature difference control

图 4 表明, 温差控制运行策略下, 冷却塔和地埋管系统实现间隙运行, 土壤温度在空调供冷季运行初期较低, 随着系统空调冷负荷的增大及环境湿球温度的提高, 地埋管系统投入连续运行, 土壤温度逐渐升高, 同时供冷季末期空调系统冷负荷的减小, 土壤温度再次降低。该策略下, 空调供冷工况运行能耗为 13.46kWh/m<sup>2</sup>。

## 3 节能运行控制策略优化

由常规运行策略能耗分析可知, 土壤源热泵系统夏季地埋管和冷却塔复合运行方式, 不同的运行控制策略产生的运行能耗结果相差较大, 因此有必要对系统运行控制策略进行优化, 从而在不改热泵机组设计容量的前提下, 进一步降低土壤源热泵系统运行能耗。

### 3.1 节能运行优化原理

空调供冷季内, 优先采用低品位热源。在环境湿球温度较低时, 优先开启冷却塔辅助散热, 减少

土壤热量存储, 使土壤温度保持于低位状态, 在环境湿球温度较高的时段优先开启地埋管系统, 同时结合温差控制, 使热泵机组冷却水温度处于较低状态, 从而提高机组制冷性能系数。

### 3.2 节能运行优化条件及流程

节能运行优化需交替运行地埋管及冷却塔系统, 为避免冷却塔系统循环水污染地埋管系统, 保证地埋管系统水质, 设计需选用闭式冷却塔, 同时冷却塔水系统管路同地埋管系统并联, 通过电动二通阀门实现系统切换。土壤源热泵系统控制策略优化运行流程如图 5 所示。

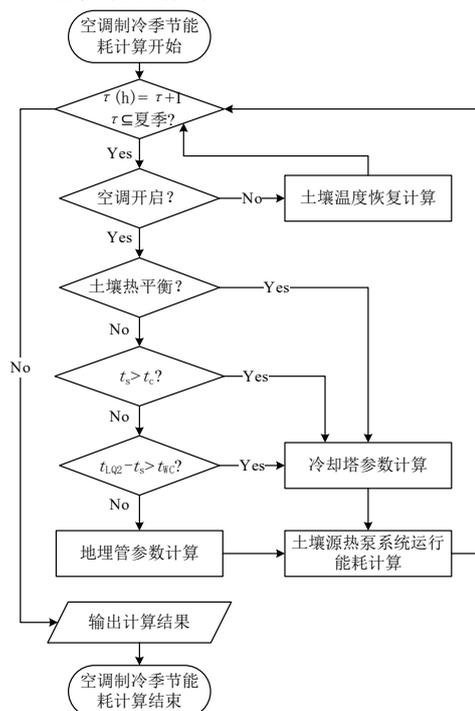


图 5 节能运行优化流程图

Fig.5 Flow chart for optimization of energy-saving operation

图中  $\tau$  为运行时刻,  $h$ ;  $t_s$  为室外空气湿球温度, °C;  $t_c$  为冷却塔优先运行控制温度, °C;  $t_{LQ2}$  为冷却水平均温度, °C;  $t_{WC}$  为控制冷却塔运行的湿球温差, °C。

## 4 优化运行能耗分析

### 4.1 系统运行能耗

控制策略节能运行优化后, 土壤日平均温度  $t_{GC}$  及系统日累计运行能耗  $\Sigma E_C$  随空调季日期  $T$  变化曲线如图 6 所示。

图 6 表明, 节能优化运行后, 因冷却塔系统和

地埋管系统实现间隙运行，土壤温度保持在稳定的低位区间内波动，且土壤最高温度低于常规运行控制策略，日累计运行能耗 $\Sigma E_C$ 增幅较缓。节能优化策略下，空调供冷工况运行能耗为13.35kWh/m<sup>2</sup>。

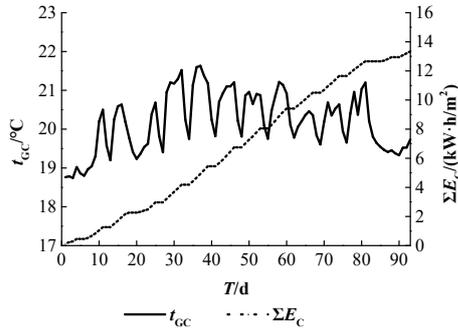


图6 优化运行策略下土壤温度及系统累计能耗曲线

Fig.6 Soil temperature and system cumulative energy consumption curve under optimized operation strategy

#### 4.2 运行节能优化效果

不同运行控制策略下土壤最高日平均温度分析如表1所示。

表1 不同运行策略下土壤最高日平均温度分布表

Table 1 Distribution table of soil maximum daily mean temperature under different operation strategies

最高日平均温度	地埋管优先 <sup>°C</sup>	冷却塔优先 <sup>°C</sup>	温差控制 <sup>°C</sup>	策略优化 <sup>°C</sup>
$t_{max1}$	22.42	22.60	22.20	21.63
$t_{max2}$	22.38	22.54	22.07	21.60
$t_{max3}$	22.31	22.44	22.06	21.52
$t_{max4}$	22.29	22.35	21.92	21.37
$t_{max5}$	21.92	22.32	21.74	21.29

注： $t_{max1}$ 、 $t_{max2}$ 、 $t_{max3}$ 、 $t_{max4}$ 、 $t_{max5}$ 为土壤最高日平均温度前5个值

表1表明，运行策略优化后土壤最高温度低于地埋管优先运行、冷却塔优先运行及温差控制运行策略。不同运行控制策略下能耗分析如图7。

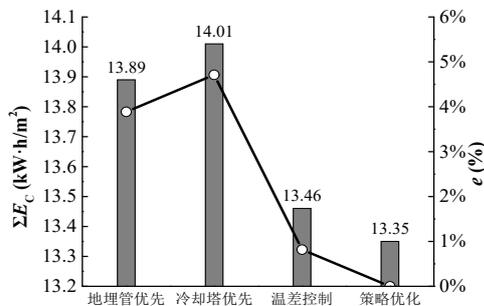


图7 不同运行策略下能耗结果

#### Fig.7 Energy consumption results under different operating strategies

节能运行优化后，系统运行能耗较地埋管优先策略降低3.89%，较冷却塔优先策略降低4.71%，较温差控制策略降低0.82%。

### 5 结论

根据建立的土壤源热泵系统数学模型，选定某综合楼对该系统常规运行控制策略进行分析，地埋管优先运行、冷却塔优先运行、温差控制策略下，空调供冷工况运行能耗分别为13.89kWh/m<sup>2</sup>、14.01kWh/m<sup>2</sup>、13.46kWh/m<sup>2</sup>。针对不同的运行控制策略产生的运行能耗结果相差较大的问题，基于优先采用低品位热源的原理，对运行控制策略进行节能优化。优化后，系统供冷工况运行能耗较地埋管优先、冷却塔优先、温差控制策略下分别降低3.89%、4.71%、0.82%。

#### 参考文献:

- [1] 王永鏢,李炳熙,姜宝成.地源热泵运行经济性分析[J].热能动力工程,2002,17(6):565-567.
- [2] 高青,于鸣.效率高、环保效能好的供热制冷装置-地源热泵的开发与利用[J].吉林工业大学自然科学学报,2001,31(2):96-102.
- [3] 李新国,赵军,朱强.地源热泵供暖空调的经济性[J].太阳能学报,2001,22(4):418-421.
- [4] 丁力行,陈季芬,彭梦珑.土壤源热泵垂直埋管换热特性影响因素研究[J].流体机械,2002,30(3):47-49.
- [5] 王景刚,马一太,张子平,等.地源热泵的运行特性模拟研究[J].工程热物理学报,2003,24(3):361-366.
- [6] Chargui R, Sammouda H, Farhat A. Numerical simulation of a cooling tower coupled with heat pump system associated with single house using TRNSYS[J]. Energy Conversion and Management, 2013,75(11):105-117.
- [7] GB 50189-2015,公共建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2015:46-52.
- [8] 黄伙军.间歇运行工况下的土壤源热泵的运行性能研究[D].南京:南京理工大学,2009:13-15.
- [9] 赵利君.恒热流下地埋管周围土壤温度恢复特性的研究[D].武汉:武汉理工大学,2011:23-24.
- [10] 茅新丰,李超峰,李永,等.地埋管换热系统中土壤温度恢复特性分析[J].暖通空调,2015,45(11):86-90.

(下转第 718 页)