

文章编号: 1671-6612 (2019) 04-399-06

地埋管地源热泵空调冷热源系统的 自控设计及应用

李 凤¹ 杜付昌² 曲彦成²

(1. 青岛滨海学院 青岛 266100; 2. 青岛高校信息产业股份有限公司 青岛 266000)

【摘 要】 地埋管地源热泵空调系统是一个系统工程, 地埋管换热器的顺利实施为系统安全运行提供了保障, 而自控系统的设计及应用对于整个地源热泵系统能否实现节能高效、无人值守运行起着至关重要的作用。以某办公楼地源热泵系统工程为例, 进行了地埋管地源热泵冷热源系统的自控设计及应用分析, 通过设置合理的自控系统架构, 以 POL 可编程控制器为基础, 确保整个自控系统的安全、高效、经济、可靠运行。同时, 对系统中各自控策略进行了阐述, 通过一系列自控策略的实施, 使得整个地源热泵系统能效始终处于最优化配置运行状态, 实现系统的节能高效运行。

【关键词】 自控; 地埋管地源热泵; 冷热源; 可编程控制器; 能效比
中图分类号 TU831 文献标识码 A

Automatic Control Design and Application in Ground-Coupled Heat Pump Air-conditioning Cooling/Heating Source System

Li Feng¹ Du Fuchang² Qu Yancheng²

(1. Qingdao Binhai University, Qingdao, 266555; 2. Qingdao GAOXIN Industry Co., Ltd., Qingdao, 266100)

【Abstract】 Ground-coupled heat pump air conditioning system is a systematic project. The smooth implementation of the buried pipe heat exchanger provides a guarantee for the safe operation of the system, and the automatic control system design and application play an important role in the energy efficient and unattended operation of the whole ground source heat pump system. Taking the ground source heat pump system of an office building as an example, the automatic control design and application of the ground source heat pump cooling/heating source system was analysed. By setting up a reasonable control system architecture, based on the POL programmable controller, it ensures the safety, efficiency, economy and reliable operation of the whole automatic control system. At the same time, each control strategy in the system is expounded. Through the implementation of a series of self-control strategies, the energy efficiency of the whole ground source heat pump system is always in the optimal configuration running state, and the energy saving and efficient operation of the system is realized.

【Keywords】 Automatic; Ground-coupled heat pump; cooling/heating source; programmable controller; energy efficiency ratio

0 引言

地埋管地源热泵系统是一种利用地下浅层的低品质能源, 通过输入少量高品质电能, 对建筑物

进行空调、供暖以及生活热水供应的技术。整个系统由三部分组成: 室外地埋管换热系统、热泵机组、建筑物内系统^[1]。室外地埋管换热器中的传热介质

基金项目: 2019KY05

作者简介: 李 凤 (1981.10-), 女, 硕士研究生, 工程师, E-mail: squirrel_red@126.com

通讯作者: 杜付昌 (1982.11-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, E-mail: dfc1996@126.com

收稿日期: 2018-08-15

通过地埋管换热器与岩土体进行热交换。并由热泵机组制取冷热水，输送给建筑物内系统。

目前，地源热泵系统因其低污染，高效率得到广泛应用^[2]。我国颁布的相关节能政策，明确规定鼓励推广浅层地热能开发利用。而随着这种技术的普及，其暴露的问题也日益凸显。除了地埋管换热器关键工序施工问题外，自控系统在整个地源热泵系统中的应用，对系统是否能够实现节能运行起着非常关键的作用。本文从系统控制设计角度出发，以某办公楼地源热泵系统为例，分析空调自控在地源热泵系统中的设计和应用，以期最大限度地实现整个地源热泵系统的节能运行。

1 工程概况

表1 主要设备参数表

Table 1 The main device parameter table

序号	设备名称	规格参数	数量	单位	备注
1	磁悬浮离心式热泵机组	型号: BSMW-HP-0350, 制冷量/功率: 385/63.5kW, 制热量/制热功率: 475/88.9kW, 制冷剂: R134a	2	台	
2	负荷侧循环水泵	型号: TP80-330/2, 流量 70m ³ /h, 扬程 25m, 功率 11kW, 转速 2900r/min	2	台	变频控制
3	地源侧循环水泵	型号: TP80-330/2, 流量 86m ³ /h, 扬程 26m, 功率 11kW, 转速 2900r/min	2	台	变频控制

2.2 地埋管设计选型及参数

本项目设计室外地埋管换热器系统采用双U 竖直埋管形式，管材采用 PE100 材质，竖直地埋管规格为 4×De32，承压 1.60MPa。根据岩土热物性测试及模拟计算结果，本项目室外地埋管换热器设计竖直地埋孔 120 口，孔径 150mm，单孔深度 100m，水平地埋管每 6 孔一个联箱环路，每个联箱环路分别同程敷设并接入室外 PE 材质集分水器。室外地埋管换热器共分为 2 个环路接入机房。机房地埋侧集分水器管路设置电动蝶阀，并与地埋侧循环水泵联动控制启闭。

2.3 室内末端系统

室内空调系统末端采用风机盘管和新风系统形式，风机盘管承担室内房间全部冷热负荷及新风负荷。新风系统采用全热回收新风机组，采用分散送风，走廊集中回风形式。其中，负荷侧水系统采用一次泵变流量异程式系统，风机盘管回水管设置三线制电动球阀。室内气流组织为下送下回，新风直接送入房间空调区域。室内空调设计温度冬季为

该项目为青岛地区一栋办公建筑，总建筑面积 8000m²，采用地埋管地源热泵系统为建筑提供冷热源，空调冷负荷为 720kW，空调热负荷为 540kW。

2 地源热泵系统设计介绍

2.1 设备选型

根据计算冷热负荷要求，选择 2 台磁悬浮地源热泵机组，负荷侧和地埋侧循环水泵各选择 2 台，系统设计软化水、定压补水装置及相应附属管道设备。制冷工况下，地源侧设计进出水温度为 30/25℃，负荷侧进出水温度为 7/12℃；制热工况下，地源侧进出水温度 10/5℃，负荷侧进出水温度 45/40℃，地埋侧和负荷侧循环水泵均采用变频控制，主要设备性能参数如表 1 所示。

18℃，夏季为 26℃。

2.4 机房系统流程图

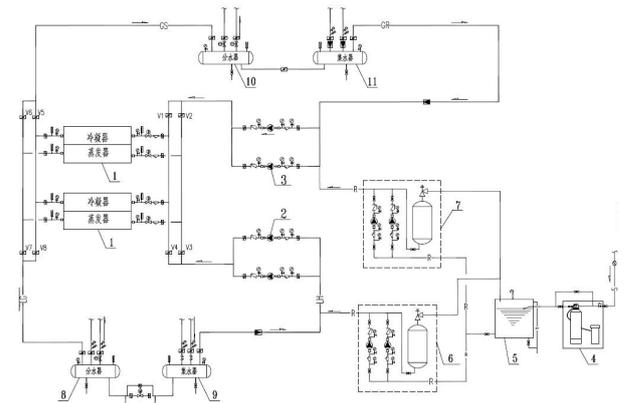


图1 地源热泵机房系统流程图

Fig.1 The flow chart of ground source heat pump room system

- 1—热泵机组；2—负荷侧水泵；3—地埋侧水泵；
- 4—软水器；5—软化水箱；6—负荷侧定压补水装置；
- 7—地埋侧定压补水装置；8—负荷侧分水器；9—负荷侧集水器；
- 10—地埋侧分水器；11—地埋侧集水器

3 地源热泵自控系统设计

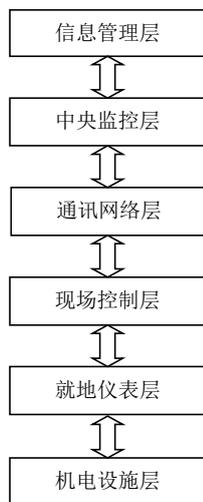


图 2 自控系统架构图

Fig.2 The architecture diagram of control system

机房冷热源自控系统现场采用 POL 可编程控制器, 实时记录显示机电设备层及管路上的传感器采集信号, POL 可编程控制器通过内置程序对整个系统发出控制指令, 并通过网络通讯层向中央监控层上传数据。中央监控层配置 1 台上位机, 利用光纤与现场控制层进行实时网络数据传输, 并记录运行参数。通过信息管理层, 完成全网调度指挥、事故报警处理, 实现科学管理, 提高效益, 信息管理层实际上是一个计算机信息网络系统。

3.1 系统自控架构设计

整个自控系统架构如图 2 所示。整个自控架构分为 6 个层面, 分别为: 机电设施、就地仪表、现场控制、通讯网络、中央监控、信息管理层等^[3]。整个自控系统形成一个闭环有机的整体。其中, 就地仪表层和机电设施层均位于现场, POL 楼宇专用控制器位于现场控制层, 现场控制层设置自控柜, 放置于热泵机房配电室。

3.2 自控系统设备

该项目自控系统设计采用楼宇专用控制器 POL638 及专用扩展模块 POL955 进行设计。该控制器预置标准程序, 并可根据实际情况自由编程, 具备如下特点:

(1) 模块化的系统软件和硬件设计, 满足不同系统需要, 使自控系统设计更加经济合理;

(2) 可通过通讯读出仪表和变频器数据, 有效地帮助操作及进行诊断;

(3) 开放的、灵活的通讯功能可以适应监控中心不同的通讯方式, 并可接入不同的类型的现场仪表和各种传感器;

(4) 不依赖上位机的离线数据存储功能, 完整地记录系统运行历史数据。支持远程或本地服务的以太网端口, 可使用标准浏览器。

(5) 扩展 IO 模块使应用配置灵活, 远程连接的 IO 模块为分布式控制柜设计提供可能, 便于设计和安装。

(6) 供电电源为 AC 24V 或 DC 24V, 8 个通用 I/O (对模拟或数字信号输入/输出可配置), 板载 DC 24V 电源为有源传感器供电, 5 个数字输入 (无源输入), 2 个模拟输出, 6 个继电器输出 (常开触点), 板载 RS-485 接口支持 Modbus RTU 模式, 全模式 modem RS-232 端口用于远程服务, 过程总线支持温控器和远程 HMI。

3.3 系统自控运行策略

3.3.1 热泵机组台数控制

实时记录每台热泵机组累计运行时间, 根据每台机组的累计运行时间并监测室外温度对负荷的影响, 系统在初期运行阶段, 考虑门窗、墙体、屋面等围护结构所产生的冷热负荷, 通过公式 1 进行负荷预测初步判定机组运行台数, 当运行 1 台机组满足预测负荷值时, 优先启动运行时间少的热泵机组。

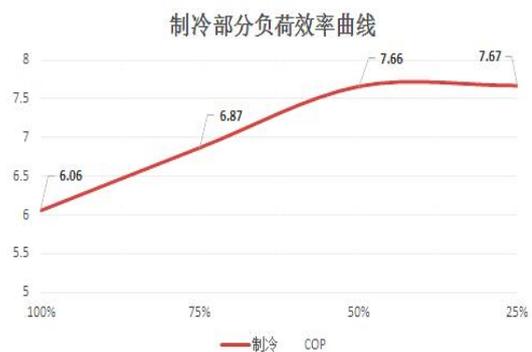


图 3 热泵机组部分负荷制冷 COP 效率曲线图

Fig.3 The COP diagram of partial load refrigeration for heat pump units

图 3 显示磁悬浮热泵机组的部分负荷效率曲线图, 当系统部分负荷率处于 30%~50% 时, 机组能效比 COP 约为 7.66, 处于最大值; 而满负荷运行时的机组能效比 COP 最低, 其值为 6.06。综合考虑系统能效比, 本项目自控系统设定当预测负荷

值 Q_1 大于单台热泵机组输出负荷 Q_2 的 80% 时 (此时, 机组制冷工况能效比约为 6.6), 按顺序启动 2 台热泵机组, 每台热泵机组处于 40% 的负荷输出状态, 机组设备能效比可达到 7.66, 此时, 开启 2 台机组系统总用电功率略小于单台热泵机组开启时的系统总用电功率。反之, 则在初始运行时设置启动 1 台热泵机组。

$$Q_1 = r \times \frac{(T_0 - T_1)}{(T_2 - T_1)} \times Q_{总} \quad (1)$$

其中, r 为同时使用系数, 初始设定值为 0.8; T_0 为室外实测温度; T_1 为空调室内设计温度, T_2 为空调室外计算温度。

3.3.2 循环水泵控制

空调水泵变频节能的依据是: 空调系统在部分负荷下运行时, 通过拉大供回水温差 (通常为 5°C), 减少水流量, 同时维持空调系统负荷不变, 来节约水泵的电能^[4]。该系统循环水泵均为变频控制, 负荷侧设置电动旁通阀, 并根据末端系统设计阻力计算电动旁通阀门 KV 值^[5], 所选阀门口径须确保最小单台热泵机组流量满足 $\geq 50\%$ 要求。变频频率根据支管路供回水温差设定实时调整, 同时监测供回水管路流量, 设定水泵最小频率值, 确保满足热泵机组最小流量安全运行要求。

3.3.3 气候补偿温度控制

气候补偿器通过实时采集室外温度, 结合 PID 控制方法与模糊控制理论, 根据用户不同条件下对室内要求, 智能的计算当前室外温度情况下的理论供水温度^[6]。研究分析表明, 冷凝温度每降低 1°C 或蒸发温度每升高 1°C , 耗功量均可降低约 2~3%^[7]。本系统设置室外气象参数传感器、负荷侧和地埋侧主管道、支管道供回水管温度和流量传感器、智能数据采集装置等, 进行室外温度、地埋侧及负荷侧流量等测量。当室外气温变化时, 自动调整热泵机组设定出水温度, 进一步提高机组能效比 COP。为了做到既经济运行又保证空调供暖质量, 自控系统采用经验调节方式即气候补偿法分别控制冬夏季机组设定出水温度。控制器程序内置气候补偿曲线, 根据本地区的气象情况, 分段设定机组回水温度和供回水温差。

3.3.4 联动控制

联动控制运行包括两个方面: 循环水泵和机组的联动控制, 电动阀门和水泵之间的联动控制。热

泵机组和循环水泵一一对应, 机房地埋侧集分水器每个环路回水管设置电动蝶阀, 当单台热泵机组运行时, 相应 1 台负荷侧和 1 台地埋侧水泵运行。此时, 联动关闭水系统对应的电动蝶阀, 确保循环水在通过热泵机组时不出现短路, 进而影响系统出水温度。同时, 保证变频水泵安全运行, 水泵运行效率曲线始终处于高效区。

当机组回水达到设定温度 $\pm 2^\circ\text{C}$ (温度可调, 夏季为负值, 冬季为正值) 时, 联动关闭地埋侧水泵, 同时保持负荷侧水泵变频运行。该部分由机组自带配电箱内置自控程序完成。对室内重点房间采用风机盘管和主机的联动控制运行, 提供定时控制信号, 调节风机盘管的设定温度, 实现定时开关机和集中管理。并能通过中央监控层合理控制房间温度, 自动控制设备启停, 杜绝出现下班后不关机的现象, 节约能源^[8]。

3.3.5 数据监测

自控系统对各供回水管路压力、温度、流量进行实时监测、记录。并通过机组开放的 MODBUS 协议端口, 实现机组设备运行数据的实时传输。中央监控系统采用通讯设备, 通过路由器和交换机, 采集空调系统的负荷侧供回水参数、地埋侧供回水参数、变频器参数、电动调节阀参数、补水量参数、室外温度、水泵状态、热量表参数、用电设备电压、电流及输入功率等信号。通过内置程序, 实时计算系统 COP, 通过模拟计算, 确保系统 COP 始终处于最优化状态。负荷侧环路的电动旁通调节阀则通过负荷侧水泵变频运行调节开度, 并实时反馈, 保证供回水温差在设定值范围内。

通过对换热孔的地温监测, 可以了解换热孔周围岩土体冷热堆积情况, 判断地下换热器全年总释热量与总吸热量是否平衡, 并对系统长期运行造成的换热孔区域地温持续上升或下降趋势进行合理预测, 对存在问题的地源热泵系统提出合理建议, 以保证系统后期持续稳定运行^[9]。本通过地埋侧热量表实时记录制冷期地埋管换热器向地下的排热量和采暖期的地埋管吸热量, 同时, 设置地埋侧地温监测孔, 实时监测地埋孔不同深度的温度场变化, 为后期的节能运行提供参考依据, 及时调整运行策略。

3.3.6 系统高压保护控制

系统补水采用定压补水装置自带控制程序, 不纳入整个自控系统, 只采集系统补水量参数, 当监

测系统压力大于设定压力值时, 安全阀开启, 系统水自动泄压至补水箱。

热泵机组自带排气过温保护、三相过流、过电压保护、高低温保护、变频器电机腔过温、高低压保护、电机绕组高温保护、电机电流过高和缺相、转子被锁、水流开关、防冻等, 确保机组始终处于安全、可靠运行状态。

3.3.7 分时段及防冻运行控制

自控系统根据使用要求, 设定运行时间段, 可实现定时、分时段分温运行, 实现无人值守运行。

在冬季夜间及节假日, 在设定时间段内, 设定较低的室内温度和热泵机组回水温度, 实现防冻运行。

总之, 通过以上一系列控制策略, 实现机房群控无人值守运行, 远程监控整个系统的运行状态, 确保整个系统始终处于最优化配置, 做到整个系统的安全可靠、节能高效运行。

3.4 自控系统控制点表

根据以上控制策略及系统流程图, 统计自控系统控制点表如下表 2 所示。

表 2 自控系统点位统计表

Table 2 The point statistics table of automatic control system

序号	设备名称	数量	监控内容	点类型				
				DI	AI	DO	AO	modbus
1			机组运行状态					
2			机组故障报警					
3	磁悬浮热泵机组	2	机组手自动					
4			机组启停					
5			modbus RTU 通讯					2
6			水泵运行状态	2				
7			水泵故障报警	2				
8	地源侧水循环泵	2	水泵手自动	2				
9			水泵启停控制			2		
10			水泵变频控制频率和电流反馈		4		2	
11			切换电动蝶阀	4		4		
12			水泵运行状态	2				
13			水泵故障报警	2				
14	用户侧水循环泵	2	水泵手自动	2				
15			水泵启停控制			2		
16			水泵变频控制频率和电流反馈		4		2	
17			切换电动蝶阀	4		4		
18			压差旁通压差检测		1			
19			压差旁通阀		1		1	
20			用户侧分水器电动调节阀		1		1	
21	水系统	1	地源侧分水器电动蝶阀	2		2		
22			地温监测孔		6			
23			用户侧供回水总温度		2			
24			用户侧回水分支温度		2			
25			地源热泵侧供回水总温度		2			

续表2 自控系统点位统计表

序号	设备名称	数量	监控内容	点类型				
				DI	AI	DO	AO	modbus
26			地源热泵侧回水分支温度		2			
27			用户侧供回水总压力		2			
28			用户侧回水分支压力		2			
29			地源热泵侧供回水总压力		2			
30			地源热泵侧回水分支压力		2			
31			用户侧流量监测(modus 通讯)					1
32			地源侧流量检测(modus 通讯)					1
33			室外温湿度		2			
34			风机盘管联动监测		1			
35	总计		总计	22	36	14	6	4

4 结语

自控系统是整个地源热泵系统的神经中枢,其设计及应用须结合工艺系统流程的设计现状,建筑用能特点,热泵机组及其他设备的性能进行。通过有的放矢,设计一系列经济合理、安全可靠的控制策略,方可在满足室内设计参数和使用的基础上,实现预期的节能目标,进而实现节能运行效益的最大化。本文通过一系列自控策略阐述,得出以下结论:

(1) 选择合适的可编程控制器,并设置合理的自控系统架构,不仅可做到自控系统设计的简单可靠性,同时可兼顾经济合理性。

(2) 自控系统设计须综合考虑建筑用能特征,制定合理的系统节能运行策略,并结合热泵机组设备自带控制箱因地制宜的进行合理配置。

(3) 通过一系列的自控措施,实现了整个地源热泵系统的无人值守节能运行,同时,自控系统是一个开放的系统,它使得建筑用能始终处于动态化的自适应状态中,并结合历史运行数据,分析、判定系统是否处于高效运行状态,以系统 COP 最优为控制目标,实时调整自控运行策略,实现整个地源热泵系统的节能运行。

参考文献:

- [1] GB50366-2005,地源热泵系统工程技术规范(2009年版)[S].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [2] 杨爱,刘圣春.我国地源热泵的研究现状及展望[J].制冷与空调,2009,9(1):1-6.
- [3] 李凤,曲彦成,杜付昌.高校集中供热系统节能改造设计及实施[J].工程技术,2017(10):200-203.
- [4] 祁永智.空调系统水泵变频运行的节能分析[J].山西建筑,2006,32(12):152.
- [5] 中国建筑标准设计研究院等.全国民用建筑工程设计技术措施暖通空调·动力[M].北京:中国计划出版社,2009:269-270.
- [6] 李晓鹏,周海琨.某高校气候补偿供暖节能改造分析[J].节能,2015,(4):58-61.
- [7] 白雪莲,刘宁毅,林真国.水源热泵综合节能技术的工程应用分析[J].制冷与空调,2012,2(1):12-17.
- [8] 梁晓东.BSCE新工厂暖通空调系统节能与自控改造[J].暖通空调,2014,44(5):85-86.
- [9] 姚木申,袁小飞,卢宝.地源热泵系统地下温度场变化及其对系统 COP 的影响[J].制冷与空调,2016,8(8):85-89.