

# 精锻件余热回收冷却系统温度控制研究

陈辉,白春晖,马启成

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究汽车连杆锻造工艺过程,分析余热回收系统冷却水循环路径,得出余热回收系统中热泵随温度变化的工作规律,提出能实现热泵自动按顺序启停和整个系统自动控制的方案. 方法 分析连杆锻造工艺、冷却循环水系统工作过程及余热回收系统工艺流程,得出系统控制与温度变化间的逻辑控制关系;通过 VB 程序模拟冷却循环系统的温度控制,验证各控制元件在控制过程中响应节点信号的正确性. 结果 确定了余热回收冷却系统温度控制的逻辑关系,得到了由温度变化来控制电动阀以及热泵启停的自动控制系统. 经过 VB 程序模拟热泵、电动阀的开启、运行与时间的关系,证明该控制方案可行. 结论 实现了余热回收冷却循环系统中冷却循环水和余热回收系统的自动控制,在满足工艺水要求的同时,不断利用回收的余热为车间持续供暖.

**关键词** 余热回收;温度控制;热泵;逻辑控制

中图分类号 TK11 文献标志码 A

## The Temperature Control Analysis of the Cooling System in the Forging Waste Heat Recovery System

CHEN Hui, BAI Chunhui, MA Qicheng

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to realize the automation start-stop order of the three heat pump and the automatic control of the whole system as the temperature changed, the part of the cooling circulation system in waste heat recovery system and the connecting rod forging process were investigated in this paper. The temperature logic control relationship of the system was deduced through analyzing the forging production process and the cooling circulating water system and the process of waste heat recovery system; the correctness of the response of the electric valve and the heat pump in the control process was analyzed and verified through the VB program to simulate the cooling circulation system. The logical relation of the system temperature control was determined, and the automatic control system of the electric valve and the heat pump start-stop as the temperature change was obtained, it proves the feasibility of the control scheme through VB simulation of heat pump and time relationship. According to the temperature change, the automatic cycle of cooling circulating water in the waste heat recovery system can be realized, it can achieve the best results through

收稿日期:2016-11-18

基金项目:国家十二五科技支撑计划项目(2011BAJ02B03)

作者简介:陈辉(1963—),男,教授,博士,主要从事节能技术方面研究.

the waste heat recovery system.

**Key words:** waste heat recovery; temperature control; heat pump; logic control

目前,锻件生产主要是利用中频感应炉对锻造坯件进行加热,而中频电炉自身温度也随之升高,因此需要冷却过程来确保锻件的正常生产.锻造车间一般设有地下冷却池对中频电炉进行冷却,随着对中频炉冷却的进行,水池中水温不断提高,还需要对水池进行冷却.大多数工厂利用冷却塔对其进行冷却降温,将大量的工艺余热排放到空气中,这样不仅造成热能浪费而且从环保角度上来说也是一种热污染.目前,我国的能源利用率约为33%,工业生产中55%以上的输入能量被散失到空气中,不仅造成了严重的资源浪费,更对环境造成了热污染<sup>[1-2]</sup>.因此如何高效地将工业余热回收再利用,成为了当前的研究热点.在能源危机和环境恶化的压力下,热泵技术成为了各国关注的焦点.

目前国内采用的热泵绝大部分为单独使用制冷或制热的功能,在锻造工业工艺生产中使用热泵技术进行余热回收方面的研究尚在发展中,利用热泵技术来回收低品位热能是最好的节能、环保方式之一<sup>[3-5]</sup>.把热泵两端供热功能、制冷功能联合在一起,使用匹配合适的冷热端热效率,将会大大提高热泵的利用率<sup>[6-9]</sup>.白城中一精锻车间利用此技术构建的余热回收系统将热量回收用来供暖洗浴,既满足了工艺设备冷却又达到了回收余热供暖的目的.整个余热回收系统可以根据实况对液位、温度、压力自动做出相应调整,而如何实现系统中电动阀的开启顺序来保障系统的自动控制是设计重点和难点.基于此,笔者基于热泵技术的余热回收系统的控制进行研究,设计出一种随温度变化,电动阀热泵自动启停的系统控制方案,使整个控制系统中的水资源得到循环使用,热量得到回收与再次利用.

## 1 精锻余热回收工艺控制流程

在精锻车间中利用热泵提取工艺生产余热供暖技术属我国能源再利用典型技术.原工艺中频感应电炉的冷却依靠厂房原有体积为90 m<sup>3</sup>的地下循环水池,当水池温度达到20℃以上冷却效果明显下降,此时冷却塔开启对90 m<sup>3</sup>的地下循环水池进行冷却降温,大量热量排放到空气中造成热能浪费.而应用热泵特有性质,替代原来的冷却塔既可以用来冷却中频炉保障生产又可以提取工艺余热用来冬季供暖,加热洗浴及生活用水.精锻车间改进后的工艺流程如图1所示.

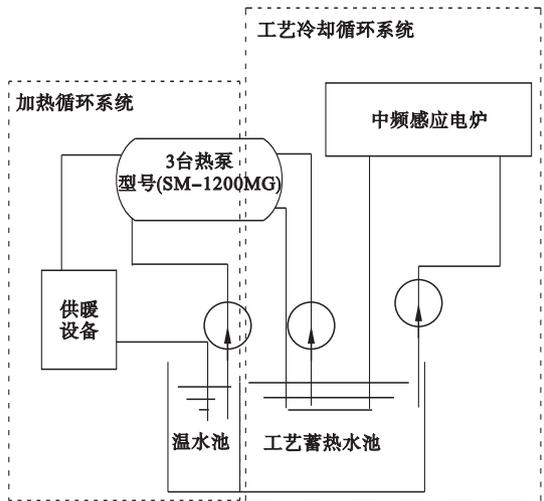


图1 工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram

该工艺是利用水泵将冷水送到每个需要冷却设备中,水作为介质将大量热带回蓄热水池的同时对设备进行冷却降温.蓄热水池温度不断升高,同时连接热泵机组的水泵将带有高温的蓄热水池中的水送到热泵机组冷端,热泵机组蒸发器工作吸收热量,通过热泵介质将热量输送到热泵机组热端.连接热

泵热端的水泵将生活用水和暖气用水泵送到热端吸取热量,完成一次热量转化,从而达到供暖以及加热洗浴用水的效果。

整个余热回收系统可以划分为两个子系统组成:一是由中频电炉等需冷却设备、蓄热水池以及热泵机组冷端所组成的冷却循环系统;二是由生活用水、供暖设备、蓄热水池以及热泵机组热端所组成的供热循环系统。在两个系统中介质水温的高低直接影响到中频炉冷却效果,关系到精锻连杆件的正常生产以及供热系统水泵的性能,因此在该余热回收系统中精准地控制水温至关重要。

## 2 控制系统分析设计

### 2.1 冷却循环系统组成

根据原工艺需求设计的冷却循环系统主要由循环水池、中频循环水泵(三用一备)、电控阀、温度计冷水设备及管道六大部分构成。C11、C12、C13、C2 为电动阀,C2 为与三台热泵相对应的阀,包括从 C21、C22、C23 在逻辑流程图中为了方便统称 C2n;L1、L2、L3 为水泵;T1、T2、T3 为三台热泵;X1J 为进水管,X1H 为回水管;W1、W2 为温度表。冷却循环原理如图 2 所示。

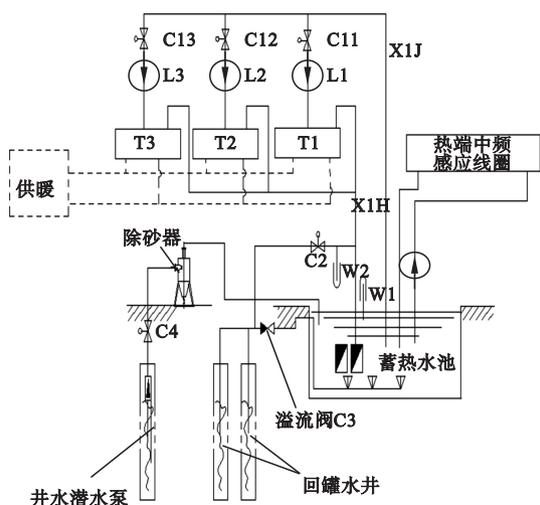


图 2 冷却循环原理图

Fig. 2 The principle diagram of the cooling cycle

### 2.2 冷却循环系统温度控制

冷却循环系统启动之前,所有的电动阀都应该处于关闭状态,整个系统反馈完整无误,等待系统的运行。当工艺设备需要冷却时,冷却循环系统首先启动,电动阀开启,冷却循环水泵逐台开启。随着工艺冷却循环水的运行,蓄热水池温度不断提升,安装在水池中的温度计随时发出电信号反馈到系统控制级,经过控制级的处理,发出控制信号控制整个电路的开关,最终实现热泵的启停,由此提取蓄热水池的热量。

循环水池中的水(水温为  $20 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )经由水泵泵入到中频炉冷却系统来实现对设备的冷却降温。中频感应器冷却水进口水温约  $25 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,出口水平均温升  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在冷却的过程中将部分余热转移到循环水中,使得循环水温度升高。蓄热水池内设有温度电接点温度表 W1,其读数值为  $t$ ,正常工作范围为  $10 \sim 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,利用它的反馈信号来控制整个电路,实现热泵的自动启停。当循环水温度大于  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,应降低循环水温度,热泵启动,将循环水的热量提取出来,降温后的水回到蓄热水池。在热泵启动  $30 \text{ min}$  内,温度仍没有降到  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时增加热泵的启动数量;当水温低于  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时不启动热泵,仅进行工艺设备冷却水不间断循环;温度低于  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,为了冬季供暖效果,水源井潜水泵开启向蓄热水池提供热源水。水温达到  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时热泵停机,溢流阀开启,高温水排放到回灌井。在热泵出口端有温度表 W2,在出口端水温高于  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时直接流入到回灌井。为了延长热泵使用寿命,热泵不宜频繁启动,因此需设定启停时间间隔为  $30 \text{ min}$ 。冷却循环系统温度逻辑控制流程图如图 3 所示。

### 2.3 电气控制方案

电接点双金属温度计是利用温度变化时带动触点变化,当其与上下限触点接触或断开的同时,使电路中的继电器动作,从而自动控制及报警<sup>[10-12]</sup>。根据冷却工艺温度要求来

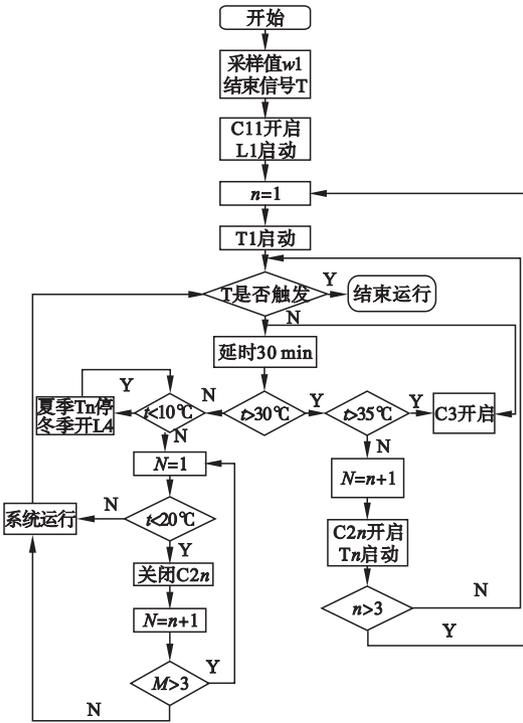


图3 温度逻辑控制流程图

Fig. 3 Temperature logic control flow chart

调节电接点温度计的上、下限接点指示针位置,由此能够准确的测量其范围的给定值<sup>[13]</sup>.电接点温度计中的动接点能够随着冷却水温变化而移动,达到相应的温度时,相应的动接点与下限接点(或者上限接点)相接触,此时电接点温度计就会发出电讯号输入系统的控制级,通过控制级的运算与处理,输出控制信号来控制整个电路的开启与关闭,最终实现电动阀的开启与关闭,从而将所需温度的循环水送到热泵或者冷却系统来实现整个系统的自动控制<sup>[14-16]</sup>.

精锻连杆余热回收系统中的冷却循环系统电气控制使用电接点温度计来实现热泵启停的温度自动控制<sup>[17-21]</sup>.冷却循环系统温度控制电气图如图4所示.图4中热泵T1、T2、T3所对应的电动机分别为N1、N2、N3,潜水井所对应的电动机为N4.继电器KM1、KM2、KM3、KM4常开主触点分别对应图3中电动阀C11、C12、C13、C4.

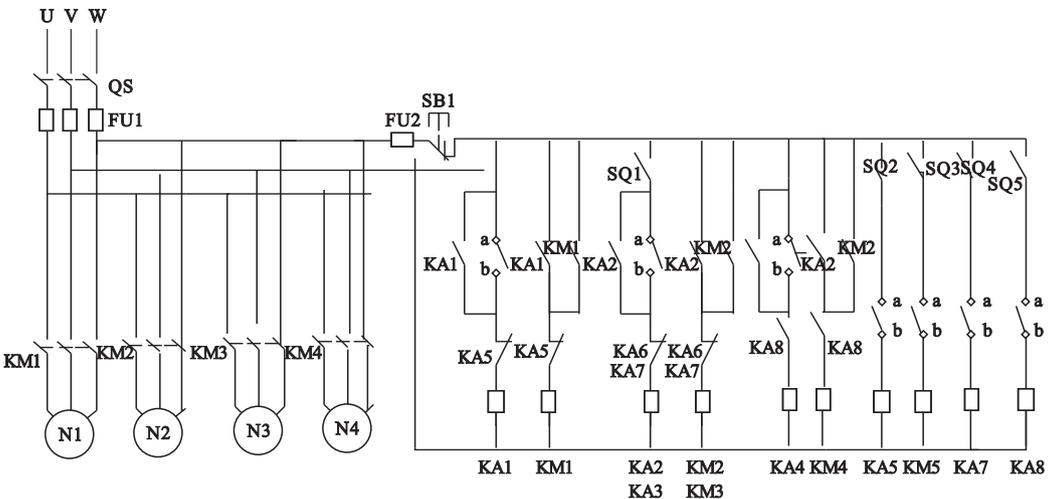


图4 系统温度控制电气图

Fig. 4 Temperature control system of electric diagram

冷却循环系统电气控制过程如下:

(1)当冷却循环水温度大于 $20^{\circ}\text{C}$ 时,电接点温度表的活动触点a与b接通,继电器KA1得电并自锁,其常开触点闭合驱动线圈KM1得电并自锁,KM1常开触点闭合,电动机N1得电,热泵T1启动.

(2)热泵T1运行30min后,信号SQ1闭合,当冷却循环水温度大于 $20^{\circ}\text{C}$ 时,电接点温度表的活动触点a与b接通,继电器KA2得电自锁,其常开触点闭合驱动KM2得电并自锁,KM2常开触点闭合,热泵T2启动.

(3)电动机 N2 运行 30 min 后, SQ3 闭合, KM3 重复 KM2 动作, 即 N3 运行热泵 T3 启动.

(4)热泵 T3 运行 30 min 后, 信号 SQ2 闭合, 当循环水温小于 20 ℃时, 电接点温度表的活动触点 a 与 b 接通, 继电器 KA5 得电, 其常闭触点断开, 切断 KA1、KM1 的供电, 常开触点 KM1 断开, 热泵 T1 关闭.

(5)电机 N2, N3 运行 30 min 后, SQ3, SQ4 闭合, KM2, KM3 重复 KM1 动作.

(6)热泵停止运行 30 min 后, 信号 SQ5 闭合, 当冷却循环水温度小于 10 ℃时, 电接点温度表的活动触点 a 与 b 接通, 继电器 KA8 得电, 其常开触点闭合, 联通 KA4、KM4 的供电, 常开触点 KM4 闭合, 潜水泵电机工作.

(7)按下 SB1 停止按钮, 程序运行结束.

### 3 Visual Basic 程序模拟控制

通过余热回收系统在不同温度下, 供暖冷却系统在不同运行时间的各类情况应用 Visual Basic (VB) 程序对热泵的开启进行了温度控制模拟, VB 是由微软公司研发的一种兼具结构、模块的可视化程序设计语言, 同时它还是一种以协助开发环境的事件驱动为机制的程序设计语言. 温度控制运行程序如下.

```
Private Sub Command1_Click()  
Dim a As Single, b As Single  
a = Val( Text1. Text)  
b = Val( Text2. Text)  
If a > 35 Then  
Label3 = "C3 开启, 潜水井输泵开启"  
Else  
If a > 20 Then  
Label3 = "T1 开启"  
If b > 30 Then  
Label3 = "T1 开启, T2 开启"  
If b > 60 Then
```

```
Label3 = "T1 开启, T2 开启, T3 开启"  
Else  
Label3 = "T1 开启, T2 开启"  
End If  
Else  
Label3 = "T1 开启"  
End If  
Else  
If a < 10 Then  
Label3 = "夏季热泵关闭, 冬季潜水泵开  
启 C3 开启"  
Else  
If a < 20 Then  
Label3 = "T1 关闭"  
If b > 30 Then  
Label3 = "T1, T2 关闭"  
End If  
If b > 60 Then  
Label3 = "T1, T2, T3 关闭"  
End If  
Else  
Label3 = "热泵开启"  
End If  
End If  
End If  
End If  
End Sub  
Private Sub Command2_Click()  
End  
End Sub
```

VB 仿真软件的温度控制界面如图 5 所示.

在循环水池中电接点温度表控制范围 10 ~ 35 ℃, 当循环水池温度低于 10 ℃时, 不需要提取水池中的热量, 此时开启潜水井泵利用 10.8 ℃地下水提取热量; 当温度高于 35 ℃降温功率不足时, 影响到热泵提取热量效率, 需打开溢流阀将高温水排出到回灌井, 同时打开潜水泵对循环水池进行降温. 为了减少热泵频繁启动带来的危害, 需要有一定

时间间隔,所以在满足工艺温度的前提下,间断开启时间设定为 20 min 再启动。



图5 温度控制界面

Fig. 5 The temperature control interface

## 4 结 论

(1) 笔者设计的电气控制方案实现了系统的温度控制要求:将温度信号转换为标准电信号来控制水泵,热泵随外界物理信号的变化而自动启停,使用行程开关来控制水泵和热泵的顺序开启并实现延时运行。

(2) 利用 VB 程序对温度控制的电气控制方案进行仿真模拟,能够实现不同温度下相应电动阀以及热泵的启停。VB 模拟操作性强,可以适用于随着温度变化自动启停不同设备的控制系统。

## 参考文献

- [1] 龙少波,陈璋,黄林. 中国能源消耗与经济增长之间的关系再研究:基于线性与非线性 Granger 因果关系检验[J]. 北京交通大学学报(社会科学版),2015,14(1):36-44.  
(LONG Shaobo, CHEN Zhang, HUANG Lin. The relationship between energy consumption and economic growth in China: a reexamination based on linear and nonlinear Granger causality test [J]. Journal of Beijing jiaotong university (social science edition), 2015, 14(1): 36-44.)
- [2] LAW R, HARVEY A, REAY D. A knowledge-based system for low-grade waste heat recovery

in the process industries [J]. Applied thermal engineering, 2016, 94: 590-599.

- [3] 彭金梅,罗会龙,崔国民,等. 热泵技术应用现状及发展动向[J]. 昆明理工大学学报自然科学版,2012(5):54-59.  
(PENG Jinmei, LUO Huilong, CUI Guomin, et al. Application status and development trends of heat pump technology [J]. Journal of Kunming university of science and technology (natural science edition), 2012(5): 54-59.)
- [4] 张绍杰,冀永曼. 汽车连杆加工工艺的设计[J]. 湖南农机,2012,39(7):50-51.  
(ZHANG Shaojie, JI Yongman. The design of the car connecting rod processing [J]. Hunan agricultural machinery, 2012, 39(7): 50-51.)
- [5] 杨树丽. 乏汽余热回收利用电气工程的可行性探究[J]. 电子测试,2013(7):273-274.  
(YANG Shuli. Recycling of waste steam heat to explore the feasibility of electrical engineering [J]. Electronic test, 2013(7): 273-274.)
- [6] SHARMA G, RAO S, SURENDRA B, et al. Process-based tolerance assessment of connecting rod machining process [J]. Journal of industrial engineering international, 2016, 12(2): 1-10.
- [7] 张忠坚,陶权,刘昌亮. 基于 4C 技术的糖厂锅炉烟道气余热回收控制系统设计[J]. 食品工业,2015(4):218-220.  
(ZHANG Zhongjian, TAO Quan, LIU Changliang. Sugar refinery boiler flue gas waste heat recovery control system design based on 4C tech-

- nology[J]. Food industry, 2015(4):218-220.)
- [ 8 ] 赵东亮, 杨群泰, 费良. 气态悬浮焙烧炉烟气余热利用[J]. 有色冶金节能, 2016, 32(4): 59-63.  
(ZHAO Dongliang, YANG Quntai, FEI Liang. Flue gas waste heat utilization of gas suspension baking furnace[J]. Energy saving of non-ferrous metallurgy, 2016, 32(4): 59-63.)
- [ 9 ] 张理论, 赵金辉, 张力隽. 电厂冷凝水余热回收系统设计与应用[J]. 节能, 2013, 32(3): 38-41.  
(ZHANG Lilun, ZHAO Jinhui, ZHANG Lijun. The design and application of waste heat recovery from cooling water system in power plant[J]. Energy conservation, 2013, 32(3): 38-41.)
- [ 10 ] OLVLEYE G, JOBSON M, SMITH R, et al. Evaluating the potential of process sites for waste heat recovery[J]. Chemical engineering transactions, 2015, 39: 627-646.
- [ 11 ] 徐祥根, 齐晓辉, 韩宝升, 等. 升温型热泵的扩展应用研究[J]. 机电信息, 2016, 25: 85-88.  
(XU Xianggen, QI Xiaohui, HAN Baosheng, et al. The extended application of the temperature rising heat pump[J]. Mechanical and electrical information, 2016, 25: 85-88.)
- [ 12 ] 黄瑞, 方奕栋, 樊之鹏, 等. 基于冷却水余热利用的气动/燃油混合动力试验研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(4): 101-106.  
(HUANG Rui, FANG Yidong, FAN Zhipeng, et al. Study on the dynamic test of the gas / fuel mixture based on the waste heat of cooling water [J]. Internal combustion engineering, 2016, 37(4): 101-106.)
- [ 13 ] 谢学海. 水源热泵空调系统及其废热利用[J]. 中国科技信息, 2016, 10: 31-32.  
(XIE Xuehai. Water source heat pump air conditioning system and waste heat utilization[J]. Chinese science and technology information, 2016, 10: 31-32.)
- [ 14 ] DONG Fujiang, LIU Fengguo, LI Xianting, et al. Exploring heating performance of gas engine heat pump with heat recovery[J]. Journal of central south university, 2016, 8: 1931-1936.
- [ 15 ] JOUNG W, KIM Y G, LEE J. Transient characteristics of a loop heat pipe - based hydraulic temperature control technique[J]. International journal of heat and mass transfer, 2016, 103(1): 125-132.
- [ 16 ] 罗晓晔, 丁学恭, 胡美君, 等. 中频感应加热炉的研制[J]. 机电工程, 2007, 24(8): 101-103.  
(LUO Xiaoye, DING Xuegong, HU Meijun, et al. Research of medium-frequency induction heating furnace[J]. Journal of mechanical & electrical engineering, 2007, 24(8): 101-103.)
- [ 17 ] FAN H, SHAO S, TIAN C. Performance investigation on a multi-unit heat pump for simultaneous temperature and humidity control [J]. Applied energy, 2014, 113(6): 883-890.
- [ 18 ] 韩瑞华. PLC 在温室温度控制系统中的应用[J]. 昆明理工大学学报自然科学版, 2004, 29(2): 114-117.  
(HAN Ruihua. Application of PLC to temperature control system of greenhouse [J]. Journal of Kunming university of science and technology (science and technology), 2004, 29(2): 114-117.)
- [ 19 ] GU Q, ZHENG F L, LIU B, et al. Application of a new smith fuzzy PID in electric boiler temperature control system [J]. Applied mechanics and materials, 2015, 727/728: 633-636.
- [ 20 ] ALHASHME M, ASHGRIZ N. A virtual thermostat for local temperature control [J]. Energy and buildings, 2016, 126: 323-339.
- [ 21 ] 张朋飞, 付昶, 王伟锋, 等. 热泵-循环水余热利用的焓效率分析[J]. 热力发电, 2015, 44(6): 106-110.  
(ZHAGN Pengfei, FU Xu, WANG Weifeng, et al. Exergy efficiency analysis of heat pump heating system recycling waste heat from circulating water [J]. Thermal power generation, 2015, 44(6): 106-110.)