



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109270843 A

(43)申请公布日 2019.01.25

(21)申请号 201811408567.7

(22)申请日 2018.11.23

(71)申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72)发明人 曹锋 叶祖樑 王驿凯 李明佳

(74)专利代理机构 西安通大专利代理有限责任公司 61200

代理人 田洲

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

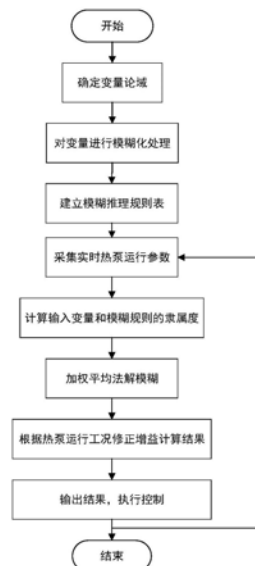
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法,包括步骤如下:第一步,确定变量及其论域;第二步,对变量进行模糊化处理,建立隶属度函数;第三步,建立模糊推理规则表;第四步,模糊推理和解模糊;第五步,根据跨临界CO2热泵系统的运行工况,修正计算结果;第六步,将最终输出结果代入PID控制中,执行控制。本发明可以在线修改PID的调节控制参数kP、kI、kD,具有控制精度高、控制稳定性强、控制效率高、控制可靠性强的优点,比普通的PID控制方法,更适合跨临界CO2热泵系统换热延迟、动态变化的控制需求。针对性的控制策略可以保证在机组运行的极端工况下控制的稳定和安全。



1. 一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

第一步,确定变量及其论域:在PID控制器中,输入参数为气体冷却器出水温度 $T_{w,out}$ 与设定出水温度 $T_{w,o}$ 的差值 ΔT ,以及其随时间的变化率 $d\Delta T/dt$;输出变量为PID参数的修正值 $\Delta k_p, \Delta k_I, \Delta k_D$;在确定变量后,给定变量的论域;

第二步,对第一步确定的变量进行模糊化处理:将输入和输出变量的论域定义为七个模糊子集:PB,PM,PS,ZO,NS,NM,NB;建立各个子集的线性隶属度函数;输入变量 ΔT 和 $d\Delta T/dt$ 模糊化为T和TC,输出变量 $\Delta k_p, \Delta k_I, \Delta k_D$ 模糊化为KP,KI和KD;PB,PM,PS,ZO,NS,NM,NB分别为正大,正中,正小,近零,负小,负中,负大;

第三步,建立模糊推理规则表;

第四步,模糊推理和解模糊:采集气体冷却器出水温度 $T_{w,out}$,并根据设定出水温度 $T_{w,o}$ 计算输入变量 ΔT 和 $d\Delta T/dt$,首先根据隶属度函数计算输入变量在各个模糊子集上的隶属度,其次根据模糊推理规则表计算所有模糊规则的隶属度,最后通过加权平均法进行解模糊操作;

第五步,根据跨临界CO₂系统的运行工况,修正计算结果:采集实时的环境温度 T_{air} ,气体冷却器进水温度 $T_{w,in}$ 和气体冷却器出水温度 $T_{w,out}$,对PID控制的增益进行计算修正;

第六步,将最终输出结果代入PID控制中,通过PID控制器控制跨临界CO₂系统机组中水路流量调节阀的开度。

2. 根据权利要求1所述的一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法,特征在于,第一步中输入参数 ΔT 的论域为 $[-10, 10]$, $d\Delta T/dt$ 的论域为 $[-5, 5]$,当 ΔT 小于-10时取为-10,当 ΔT 大于10时取为10,当 $d\Delta T/dt$ 小于-5时取为-5,当 $d\Delta T/dt$ 大于5时取为5;在模糊PID控制器中,第k个采样时间的PID参数分别为: $k_p(k) = k_{p0} + \Delta k_p(k)$, $k_I(k) = k_{I0} + \Delta k_I(k)$, $k_D(k) = k_{D0} + \Delta k_D(k)$;式中, k_{p0}, k_{I0}, k_{D0} 分别为经典PID控制器的初始参数;模糊PID控制器的输出变量为 $\Delta k_p, \Delta k_I, \Delta k_D$;它们的论域分别为: Δk_p 为 $[-10, 10]$ 、 Δk_I 为 $[-10, 10]$ 、 Δk_D 为 $[-5, 5]$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法,特征在于,第三步中所述模糊推理规则表为:

T	NB			NM			NS			ZO			PS			PM			PB		
	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD
NB	PB	NB	PS	PB	NB	PS	PM	NB	ZO	PM	NM	ZO	PS	NM	ZO	PS	ZO	PB	ZO	ZO	PB
NM	PB	NB	NS	PB	NB	NS	PM	NM	NS	PM	NM	NS	PS	NS	ZO	ZO	ZO	PS	ZO	ZO	PM
NS	PM	NM	NB	PM	NM	NB	PM	NS	NM	PS	NS	NS	ZO	ZO	ZO	NS	PS	PS	NM	PS	PM
ZO	PM	NM	NB	PS	NS	NM	PS	NS	NM	ZO	ZO	NS	NS	PS	ZO	NM	PS	PS	NM	PM	PM
PS	PS	NS	NB	PS	NS	NM	ZO	ZO	NS	NS	PS	NS	NS	PS	ZO	NM	PM	PS	NM	PM	PS
PM	ZO	ZO	NM	ZO	ZO	NS	NS	PS	NS	NM	PM	NS	NM	PM	ZO	NM	PB	PS	NB	PB	PS
PB	ZO	ZO	PS	NS	ZO	ZO	NS	PS	ZO	NM	PM	ZO	NM	PB	ZO	NB	PB	PB	NB	PB	PB

4. 根据权利要求1所述的一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法,特征在于,第四步中,计算T和TC在每一个模糊子集上的隶属度,用 $m_i(T)$ 和 $m_i(TC)$ 表示, $i = NB, NM,$

NS,ZO,PS,PM,PB;

KP的第一条模糊规则的隶属度为： $m_{KP,1} = m_{NB}(T) * m_{NB}(TC)$ ，其中*表示取小；依次类推，计算KP对于所有模糊规则的隶属度，共49条模糊规则；解模糊化采用加权平均法，计算式如下：

$$\Delta k_p = \frac{\sum_{j=1}^{49} m_{KP,j} KP_j}{\sum_{j=1}^{49} m_{KP,j}}$$

式中， Δk_p 为经过加权平均法解模糊得到并输出的增益修正值； $m_{KP,j}$ 为各条模糊推理规则的隶属度； KP_j 为各条模糊推理规则得到的模糊子集值；

按照 Δk_p 的计算方法，计算出 Δk_I 和 Δk_D 的输出结果。

5. 根据权利要求1所述的一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法，特征在于，第五步中，建立环境温度 T_{air} ，气体冷却器进水温度 $T_{w,in}$ 和气体冷却器出水温度 $T_{w,out}$ 与水流量之间的关系式，如下：

$$q = \frac{q_{max}}{2.8} (0.009T_{air} + 0.029T_{w,in} + 0.05T_{w,out} + 4)$$

式中， q 为水流量的计算值，单位 m^3/h ； q_{max} 为跨临界 CO_2 热泵系统机组的最大水流量，单位 m^3/h ；

基于水流量计算值，对 k_p 进行修正，从而减少超调，修正后增益的计算式如下，其中 $x = q/q_{max}$ ：

$$k_p(k) = [k_{p0} + \Delta k_p(k)] \left\{ \frac{1 - \text{sgn}(x-1)}{2} \frac{5}{14} + \frac{1 + \text{sgn}(x-1)}{2} \left[\frac{1 - \text{sgn}(x-2)}{2} \left(\frac{9}{14}x - \frac{2}{7} \right) + \frac{1 + \text{sgn}(x-2)}{2} \right] \right\}$$

式中， $k_p(k)$ 为最终得到的第 k 个采样时间的增益值， k_{p0} 为经典PID控制器的初始增益值， $\Delta k_p(k)$ 为模糊控制器输出的增益修正值。

6. 根据权利要求1所述的一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法，特征在于，第六步中，PID采用差分法进行控制：

$$F(k) = k_p \Delta T(k) + k_I \sum_{i=0}^n \Delta T(i) + k_D [\Delta T(k) - \Delta T(k-1)]$$
，其中 n 为运算次数。

7. 根据权利要求1所述的一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法，特征在于，第二步中， k_{p0} ， k_{I0} ， k_{D0} 根据临界比例度法或衰减曲线法进行整定。

一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于热泵技术领域,特别涉及一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法。

背景技术

[0002] 近年来,随着温室效应的不断加剧,研究机构和政府部门越来越关注环境友好性良好的制冷剂。自然工质制冷剂因此受到越来越多的关注,CO₂作为自然工质臭氧层破坏潜能值ODP为0,全球变暖潜力指数GWP为1,具有优越的环境友好性能。早在19世纪80年代,CO₂就被引入制冷空调领域,CO₂作为天然存在的无机化合物,具有良好的安全性和化学稳定性,安全无毒,不可燃,常温常压下为气态(无相变爆炸风险),不管是生产、运输还是使用,均对环境无污染。同时CO₂的单位容积制冷量是传统制冷剂的3~5倍,这意味着提供相同热泵能力所需要的压缩机排量更小,机组充注量更少,缩小了机组体积。同时CO₂绝热指数较高,跨临界制冷循环的压缩比较小,压缩机效率高。前国际制冷学会主席G.Lorentzen提出了标准跨临界CO₂循环系统,CO₂在制冷学科中再次回归到主流的研究中来。

[0003] 现代家庭为满足热水需求所消耗的能源已达到生活总能源消耗量的20%~30%,传统的生活热水制取方式包括燃烧热能(化石燃料、生物燃料)直接加热、电热转换、太阳能集热等方式。这些传统的生活热水制取方式不仅能源利用率低而且会造成一定程度上的环境污染。采用跨临界CO₂热泵技术,可以直接一次性提供高于65℃以上的热水。同时,还可以利用废热供应热源,大量节约一次能源消耗,减少环境污染指标。利用跨临界CO₂热泵提供65℃的热水,全年系统可以节约至少64%能源消耗。因此,无论是在民用还是在商用领域,跨临界CO₂热泵系统均具有其他制热方式所不能够比拟的节能和环保优势。

[0004] 在跨临界CO₂热泵热水器中,水路系统是整个机组中非常重要的一部分,其不仅和机组的生产热水需求有关,同时也影响着系统的正常工作。跨临界CO₂热泵系统的水路一般由管路,水泵,水路电磁阀,流量调节阀(或变频器),靶流开关等部件组成,其中流量调节阀是水路系统中起到控制水流量的关键部件。因为跨临界CO₂热泵系统有别于传统热泵系统的超临界区放热温度滑移现象,其出水温度范围较传统热泵热水器大大增加,可以实现55℃~90℃的大范围出水,因此可以实现对目标出水温度的选择,这就对水路控制提出了要求。而且,由于水路的流速、流量直接影响系统的气体冷却器侧的换热情况,进一步将影响系统的排气压力,如若水路控制不佳,将会导致系统高压侧压力波动剧烈,排气压力过高等安全隐患,这就对水路控制的速度和稳定性也提出了要求。

[0005] 由上述可见,针对跨临界CO₂热泵系统中的水路控制,提出精度高、稳定性好、效率高、可靠性强的控制方法,对其高效安全运行具有重大意义。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法,以解决现有跨临界二氧化碳热泵系统控制中存在的问题;本发明能有效地控制跨临界二氧化碳

热泵系统的水路流量,出水温度范围大且能够实现精度高、稳定性好、效率高、可靠性强的水路控制。

[0007] 为达到上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0008] 一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法,包括以下步骤:

[0009] 第一步,确定变量及其论域:在PID控制器中,输入参数为气体冷却器出水温度 $T_{w,out}$ 与设定出水温度 $T_{w,o}$ 的差值 ΔT ,以及其随时间的变化率 $d\Delta T/dt$;输出变量为PID参数的修正值 $\Delta k_p, \Delta k_I, \Delta k_D$;在确定变量后,给定变量的论域;

[0010] 第二步,对第一步确定的变量进行模糊化处理:将输入和输出变量的论域定义为七个模糊子集:PB,PM,PS,ZO,NS,NM,NB;建立各个子集的线性隶属度函数;输入变量 ΔT 和 $d\Delta T/dt$ 模糊化为T和TC,输出变量 $\Delta k_p, \Delta k_I, \Delta k_D$ 模糊化为KP,KI和KD;PB,PM,PS,ZO,NS,NM,NB分别为正大,正中,正小,近零,负小,负中,负大;

[0011] 第三步,建立模糊推理规则表;

[0012] 第四步,模糊推理和解模糊:采集气体冷却器出水温度 $T_{w,out}$,并根据设定出水温度 $T_{w,o}$ 计算输入变量 ΔT 和 $d\Delta T/dt$,首先根据隶属度函数计算输入变量在各个模糊子集上的隶属度,其次根据模糊推理规则表计算所有模糊规则的隶属度,最后通过加权平均法进行解模糊操作;

[0013] 第五步,根据跨临界CO₂热泵系统的运行工况,修正计算结果:采集实时的环境温度 T_{air} ,气体冷却器进水温度 $T_{w,in}$ 和气体冷却器出水温度 $T_{w,out}$,对PID控制的增益进行修正;

[0014] 第六步,将最终输出结果代入PID控制中,通过PID控制器控制跨临界CO₂热泵系统机组中水路流量调节阀的开度。

[0015] 进一步的,第一步中输入参数 ΔT 的论域为 $[-10, 10]$, $d\Delta T/dt$ 的论域为 $[-5, 5]$,当 ΔT 小于-10时取为-10,当 ΔT 大于10时取为10,当 $d\Delta T/dt$ 小于-5时取为-5,当 $d\Delta T/dt$ 大于5时取为5;在模糊PID控制器中,第k个采样时间的PID参数分别为: $k_p(k) = k_{p0} + \Delta k_p(k)$, $k_I(k) = k_{I0} + \Delta k_I(k)$, $k_D(k) = k_{D0} + \Delta k_D(k)$;式中, k_{p0}, k_{I0}, k_{D0} 分别为经典PID控制器的初始参数;模糊PID控制器的输出变量为 $\Delta k_p, \Delta k_I, \Delta k_D$;它们的论域分别为: Δk_p 为 $[-10, 10]$ 、 Δk_I 为 $[-10, 10]$ 、 Δk_D 为 $[-5, 5]$ 。

[0016] 进一步的,第三步中所述模糊推理规则表为:

[0017]

T	NB			NM			NS			ZO			PS			PM			PB		
	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD
NB	PB	NB	PS	PB	NB	PS	PM	NB	ZO	PM	NM	ZO	PS	NM	ZO	PS	ZO	PB	ZO	ZO	PB
NM	PB	NB	NS	PB	NB	NS	PM	NM	NS	PM	NM	NS	PS	NS	ZO	ZO	ZO	PS	ZO	ZO	PM
NS	PM	NM	NB	PM	NM	NB	PM	NS	NM	PS	NS	NS	ZO	ZO	ZO	NS	PS	PS	NM	PS	PM
ZO	PM	NM	NB	PS	NS	NM	PS	NS	NM	ZO	ZO	NS	NS	PS	ZO	NM	PS	PS	NM	PM	PM
PS	PS	NS	NB	PS	NS	NM	ZO	ZO	NS	NS	PS	NS	NS	PS	ZO	NM	PM	PS	NM	PM	PS
PM	ZO	ZO	NM	ZO	ZO	NS	NS	PS	NS	NM	PM	NS	NM	PM	ZO	NM	PB	PS	NB	PB	PS
PB	ZO	ZO	PS	NS	ZO	ZO	NS	PS	ZO	NM	PM	ZO	NM	PB	ZO	NB	PB	PB	NB	PB	PB

[0018] 进一步的,第四步中,计算T和TC在每一个模糊子集上的隶属度,用 $m_i(T)$ 和 $m_i(TC)$ 表示, $i=NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB$;

[0019] KP的第一条模糊规则的隶属度为: $m_{KP,1}=m_{NB}(T)*m_{NB}(TC)$,其中*表示取小;依次类推,计算KP对于所有模糊规则的隶属度,共49条模糊规则;解模糊化采用加权平均法,计算式如下:

$$[0020] \quad \Delta k_p = \frac{\sum_{j=1}^{49} m_{KP,j} KP_j}{\sum_{j=1}^{49} m_{KP,j}}$$

[0021] 式中, Δk_p 为经过加权平均法解模糊得到并输出的增益修正值; $m_{KP,j}$ 为各条模糊推理规则的隶属度; KP_j 为各条模糊推理规则得到的模糊子集值,例如,模糊推理规则表中第一行第一列 KP_1 为PB,第一行第七列 KP_7 为ZO,第三行第四列 KP_{18} 为PS; Δk_p 的论域为 $[-10, 10]$,模糊化后的模糊集合为 $\{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}$,即集合 $\{10, 20/3, 10/3, 0, -10/3, -20/3, -10\}$ 。按照 Δk_p 的计算方法,计算出 Δk_I 和 Δk_D 的输出结果。

[0022] 进一步的,第五步中,建立环境温度 T_{air} ,气体冷却器进水温度 $T_{w,in}$ 和气体冷却器出水温度 $T_{w,out}$ 与水流量之间的关系式,如下:

$$[0023] \quad q = \frac{q_{max}}{2.8} (0.009T_{air} + 0.029T_{w,in} + 0.05T_{w,out} + 4)$$

[0024] 式中, q 为水流量的计算值,单位 m^3/h ; q_{max} 为跨临界 CO_2 热泵系统机组的最大水流量,单位 m^3/h ;

[0025] 基于水流量计算值,对 k_p 进行修正,从而减少超调,修正后增益的计算式如下,其中 $x=q/q_{max}$:

[0026]

$$k_p(i) = [k_{p0} + \Delta k_p(i)] \left\{ \frac{1 - \operatorname{sgn}(x-1)}{2} \frac{5}{14} + \frac{1 + \operatorname{sgn}(x-1)}{2} \left[\frac{1 - \operatorname{sgn}(x-2)}{2} \left(\frac{9}{14}x - \frac{2}{7} \right) + \frac{1 + \operatorname{sgn}(x-2)}{2} \right] \right\}$$

[0027] 式中, $k_p(k)$ 为最终得到的第 k 个采样时间的增益值, k_{p0} 为经典PID控制器的初始增益值, $\Delta k_p(k)$ 为模糊控制器输出的增益修正值。

[0028] 进一步的,第六步中,PID采用差分法进行控制:

$$[0029] \quad F(k) = k_p \Delta T(k) + k_I \sum_{i=0}^n \Delta T(i) + k_D [\Delta T(k) - \Delta T(k-1)], \text{其中} n \text{为运算次数。}$$

[0030] 和现有技术相比,本发明具有以下优点:

[0031] 1、本发明采用了模糊PID控制的方法控制跨临界 CO_2 热泵系统的水路,在不同的机组运行工况条件下,在线修改PID的调节控制参数 k_p 、 k_I 、 k_D ,具有控制精度高、控制稳定性强、控制效率高、控制可靠性强的优点。本发明的控制方法比普通的PID控制方法,更适合跨临界 CO_2 热泵系统换热延迟、动态变化的控制需求。

[0032] 2、本发明根据跨临界 CO_2 热泵的实际运行工况参数对最终输出的PID增益进行修正,更好地体现了热泵实际运行中的控制需求。针对性的控制策略可以保证在机组运行的极端工况,如低环境温度、高出水温度下,减少控制边界的超调,从而保证控制的稳定和安全。

附图说明

[0033] 图1为本发明的水路控制方法适用的跨临界CO₂热泵系统流程图。

[0034] 图2为本发明的模糊控制器输入输出变量隶属度函数示意图;其中图2(a)为输入变量T与输出变量KP、KI的隶属度函数示意图,图2(b)为输入变量TC和输出变量KD隶属度函数示意图。

[0035] 图3为本发明的水路模糊PID控制方法原理图。

[0036] 图4为本发明的跨临界二氧化碳热泵系统水路模糊PID控制工作流程。

[0037] 图5为本发明控制方法与现有控制方法的效果对比图。

具体实施方式

[0038] 请参阅图3所示,本发明一种跨临界二氧化碳系统的水路模糊PID控制方法,适用于图1所示的跨临界CO₂热泵系统,该跨临界CO₂热泵系统包括压缩机1,压缩机1的出口和入口之间依次连接气体冷却器6、电子膨胀阀5、蒸发器3和气液分离器2;蒸发器3上设有风机4;蒸发器3的出口连接气液分离器2的入口,气液分离器2的气体出口连接压缩机1的入口。水泵8的出口通过水流量调节阀7连接气体冷却器6的进水口,气体冷却器6的出水口连接用户热水管道。气体冷却器6的工质入口连接压缩机1的出口,气体冷却器6的工质出口连接电子膨胀阀5。工质和水在气体冷却器6中换热,加热形成用户需求的热水。本发明控制方法的输入为热泵的气体冷却器进水温度、气体冷却器出水温度、环境温度和设定出水温度,控制方法的输出为PID控制所需的增益系数、积分系数和微分系数,最终控制水路流量调节阀的开度,控制方法包括以下步骤:

[0039] 第一步,确定变量及其论域:在PID控制器中,输入参数为气体冷却器出水温度 $T_{w,out}$ 与设定出水温度 $T_{w,o}$ 的差值 ΔT ,以及差值随时间的变化率 $d\Delta T/dt$;输入参数 ΔT 的论域为 $[-10,10]$, $d\Delta T/dt$ 的论域为 $[-5,5]$,当 ΔT 小于-10时取为-10,当 ΔT 大于10时取为10,当 $d\Delta T/dt$ 小于-5时取为-5,当 $d\Delta T/dt$ 大于5时取为5。

[0040] 在模糊PID控制器中,第k个采样时间的PID参数分别为: $k_p(k) = k_{p0} + \Delta k_p(k)$, $k_I(k) = k_{I0} + \Delta k_I(k)$, $k_D(k) = k_{D0} + \Delta k_D(k)$ 。式中, k_{p0} , k_{I0} , k_{D0} 分别为经典PID控制器的初始参数,可根据临界比例度法、衰减曲线法等方法进行整定。模糊PID控制器的输出变量为 Δk_p , Δk_I , Δk_D 。它们的论域分别为: Δk_p 为 $[-10,10]$ 、 Δk_I 为 $[-10,10]$ 、 Δk_D 为 $[-5,5]$ 。

[0041] 第二步,对第一步确定的变量进行模糊化处理:将输入和输出变量的论域都定义为七个模糊子集,分别为:正大(PB),正中(PM),正小(PS),近零(ZO),负小(NS),负中(NM),负大(NB);各参数的论域对应的模糊子集的隶属度函数采用线性函数。输入变量 ΔT 和 $d\Delta T/dt$ 模糊化为T和TC,输出变量 Δk_p , Δk_I , Δk_D 模糊化为KP,KI和KD;各隶属度函数示意图如附图2所示。

[0042] 第三步,建立模糊推理规则表:根据实验经验和PID参数调节原则,得到模糊PID控制器的推理规则表。建立的模糊推理规则表如表1所示。

[0043] 表1模糊推理规则表

[0044]

T TC	NB			NM			NS			ZO			PS			PM			PB		
	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD	KP	KI	KD
NB	PB	NB	PS	PB	NB	PS	PM	NB	ZO	PM	NM	ZO	PS	NM	ZO	PS	ZO	PB	ZO	ZO	PB
NM	PB	NB	NS	PB	NB	NS	PM	NM	NS	PM	NM	NS	PS	NS	ZO	ZO	ZO	PS	ZO	ZO	PM
NS	PM	NM	NB	PM	NM	NB	PM	NS	NM	PS	NS	NS	ZO	ZO	ZO	NS	PS	PS	NM	PS	PM
ZO	PM	NM	NB	PS	NS	NM	PS	NS	NM	ZO	ZO	NS	NS	PS	ZO	NM	PS	PS	NM	PM	PM
PS	PS	NS	NB	PS	NS	NM	ZO	ZO	NS	NS	PS	NS	NS	PS	ZO	NM	PM	PS	NM	PM	PS
PM	ZO	ZO	NM	ZO	ZO	NS	NS	PS	NS	NM	PM	NS	NM	PM	ZO	NM	PB	PS	NB	PB	PS
PB	ZO	ZO	PS	NS	ZO	ZO	NS	PS	ZO	NM	PM	ZO	NM	PB	ZO	NB	PB	PB	NB	PB	PB

[0045] 第四步,模糊推理和解模糊:采集气体冷却器出水温度 $T_{w,out}$,并根据设定出水温度 $T_{w,o}$ 计算输入变量 ΔT 和 $d\Delta T/dt$,根据图2中的隶属度函数曲线,计算T和TC在每一个模糊子集上的隶属度,用 $m_i(T)$ 和 $m_i(TC)$ 表示, $i=NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB$ 。例如,当 $\Delta T=5$ 时, $m_{NB}(T)=m_{NM}(T)=m_{NS}(T)=m_{ZO}(T)=m_{PB}(T)=0$, $m_{PS}(T)=m_{PM}(T)=0.5$;当 $d\Delta T/dt=5$ 时, $m_{NB}(T)=m_{NM}(T)=m_{NS}(T)=m_{ZO}(T)=m_{PS}(T)=m_{PM}(T)=0$, $m_{PB}(T)=1$ 。

[0046] KP的第一条模糊规则的隶属度为: $m_{KP,1}=m_{NB}(T)*m_{NB}(TC)$,其中“*”表示取小。依次类推,计算KP对于所有模糊规则的隶属度,共49条模糊规则。解模糊化采用加权平均法,计算式如下:

$$[0047] \quad \Delta k_p = \frac{\sum_{j=1}^{49} m_{KP,j} KP_j}{\sum_{j=1}^{49} m_{KP,j}}$$

[0048] 式中, Δk_p 为经过加权平均法解模糊得到并输出的增益修正值; $m_{KP,j}$ 为各条模糊推理规则的隶属度; KP_j 为各条模糊推理规则得到的模糊子集值,例如,模糊推理规则表中第一行第一列 KP_1 为PB,第一行第七列 KP_7 为ZO,第三行第四列 KP_{18} 为PS; Δk_p 的论域为 $[-10,10]$,模糊化后的模糊集合为 $\{PB,PM,PS,ZO,NS,NM,NB\}$,即集合 $\{10,20/3,10/3,0,-10/3,-20/3,-10\}$ 。

[0049] 类似的,按照上述内容可以计算出 Δk_I 和 Δk_D 的输出结果。

[0050] 第五步,根据跨临界CO₂热泵系统的运行工况,修正计算结果:基于大量实验得到的数据,建立环境温度 T_{air} ,气体冷却器进水温度 $T_{w,in}$ 和气体冷却器出水温度 $T_{w,out}$ 与水流量之间的关系式,如下:

$$[0051] \quad q = \frac{q_{max}}{2.8} (0.009T_{air} + 0.029T_{w,in} + 0.05T_{w,out} + 4)$$

[0052] 式中,q为水流量的计算值,单位 m^3/h ; q_{max} 为跨临界CO₂热泵系统机组的最大水流量,单位 m^3/h 。

[0053] 根据跨临界CO₂热泵机组的运行情况,当水流量较小时,气体冷却器的进出水温差较大,往往出水温度较高,在此时,需要对出水温度控制的超调量进行限制,否则会导致机组排气压力超限、报警停机等问题。基于水流量计算值,对 k_p 进行修正,从而减少超调,修正

后增益的计算式如下,其中 $x=q/q_{\max}$:

[0054]

$$k_p(k) = [k_{p0} + \Delta k_p(k)] \left\{ \frac{1 - \operatorname{sgn}(x-1)}{2} \frac{5}{14} + \frac{1 + \operatorname{sgn}(x-1)}{2} \left[\frac{1 - \operatorname{sgn}(x-2)}{2} \left(\frac{9}{14}x - \frac{2}{7} \right) + \frac{1 + \operatorname{sgn}(x-2)}{2} \right] \right\}$$

[0055] 式中, $k_p(k)$ 为最终得到的第 k 个采样时间的增益值, k_{p0} 为经典PID控制器的初始增益值, $\Delta k_p(k)$ 为模糊控制器输出的增益修正值。

[0056] 第六步,将最终输出结果代入PID控制器中,通过PID控制器控制跨临界 CO_2 热泵系统机组中水路流量调节阀的开度,执行控制。

[0057] PID部分计算公式:

$$[0058] \quad F(t) = k_p \Delta T(t) + k_i \int \Delta T(t) dt + k_D \frac{d\Delta T(t)}{dt}$$

[0059] $F(t)$ 为水路流量调节阀的开度, ΔT 为气体冷却器出水温度和设定出水温度的差值。考虑到系统换热的延迟性,在实际中PID采用的是差分法进行控制。

[0060] $F(k) = k_p \Delta T(k) + k_i \sum_{i=0}^n \Delta T(i) + k_D [\Delta T(k) - \Delta T(k-1)]$,其中 n 为运算次数。 $F(t)$ 是连续的时间上的计算; $F(k)$ 是采用差分法之后的离散时刻上的计算结果。

[0061] 跨临界 CO_2 热泵系统机组运行的恶劣工况包括环境温度较低或出水温度较高,因此在低环境温度高出水温度的工况下,将本发明的水路控制方法应用热泵系统中,实验得到的结果如图5所示。在进水温度固定为 10°C ,设定出水温度为 90°C 的情况下开机并进行调节,传统的PID调节方法出现了出水温度曲线2反复波动和出水温度曲线3超调引发排压超限报警的情况,这是由于水路的PID调节与机组的排压、排温控制相互耦合影响。出水温度曲线1为应用了本发明的控制方法后的结果,实现了快速升温,安全可靠和高精度控制。

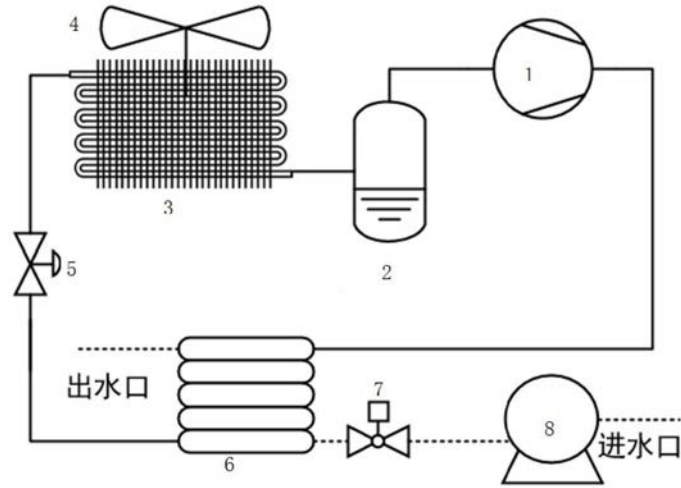


图1

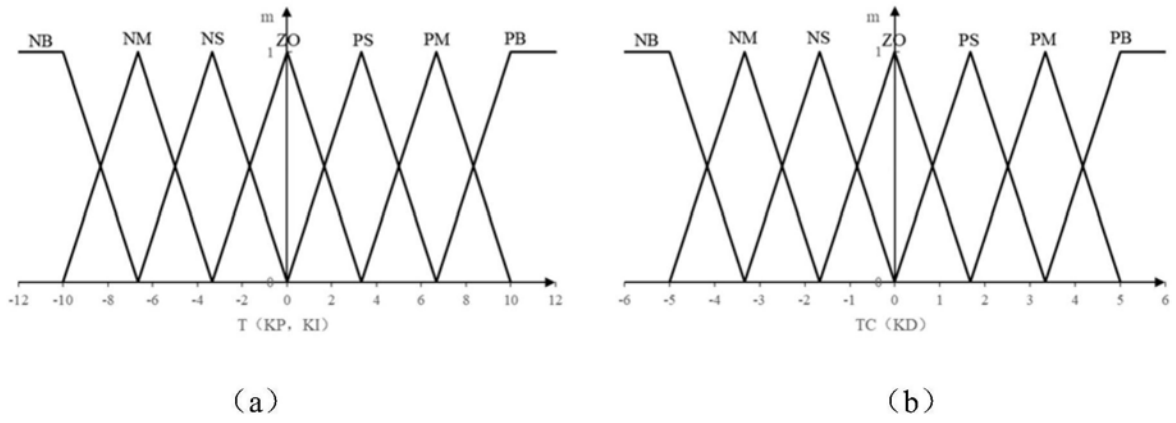


图2

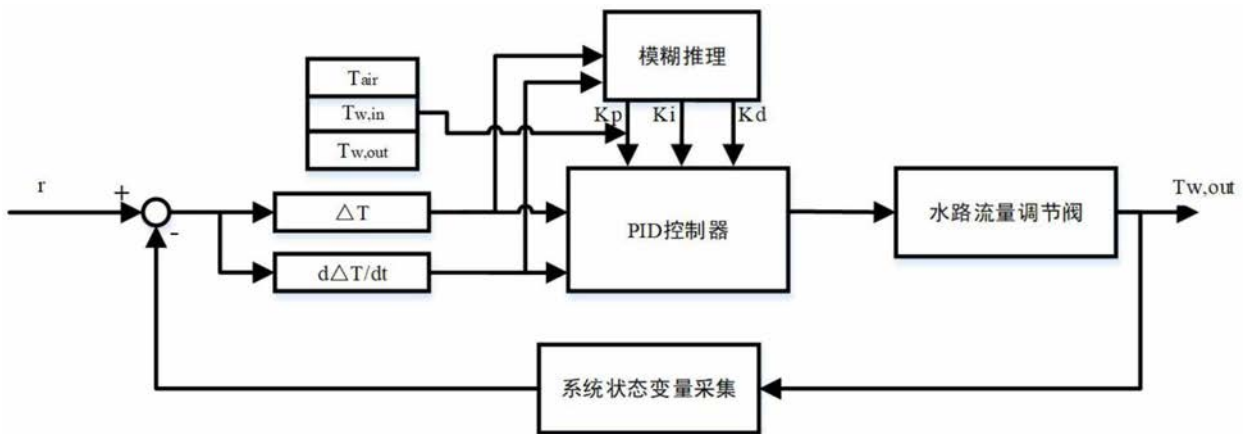


图3

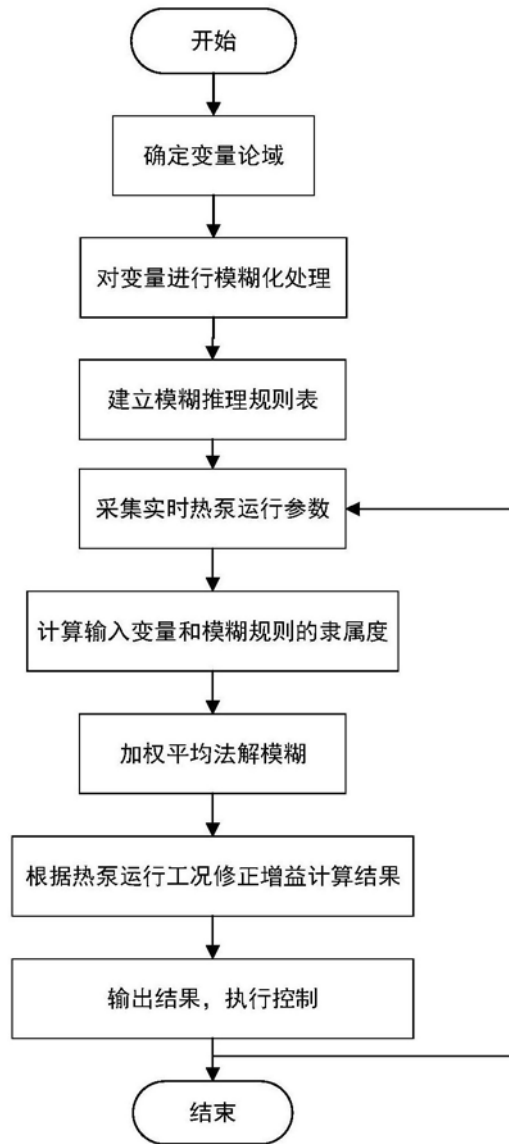


图4

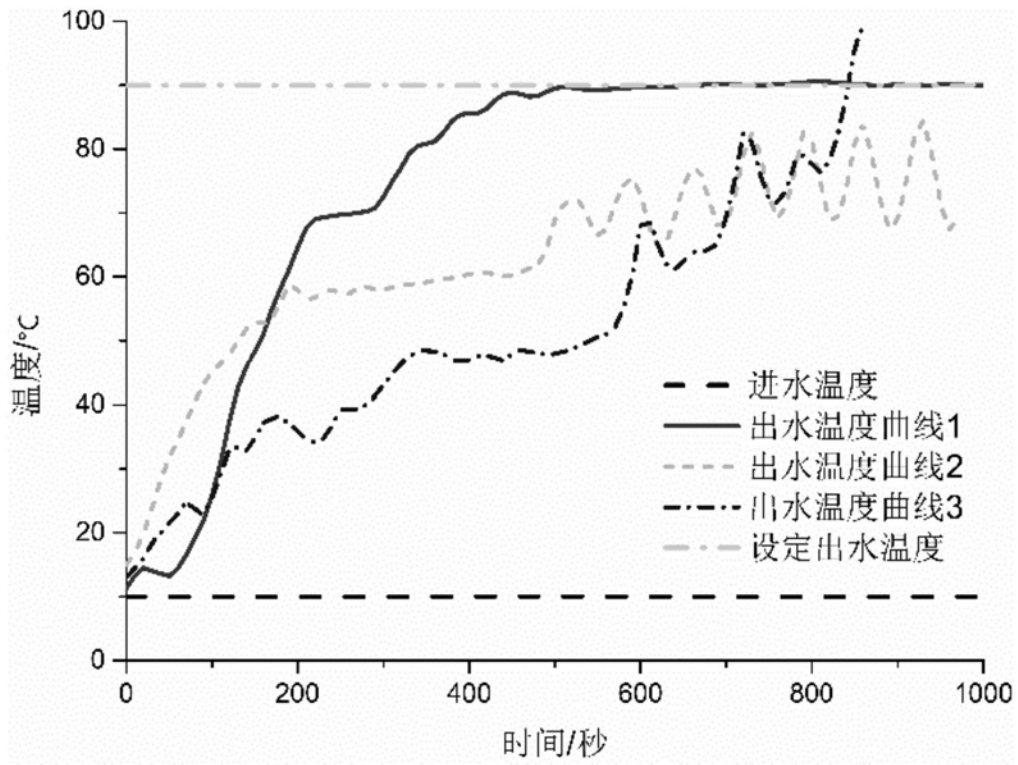


图5