



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 106468446 B

(45) 授权公告日 2020.10.13

(21) 申请号 201610793434.0

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2016.08.31

F23N 5/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

审查员 陈义端

申请公布号 CN 106468446 A

(43) 申请公布日 2017.03.01

(73) 专利权人 西安艾贝尔科技发展有限公司

地址 710075 陕西省西安市丈八一路2号

SOHO同盟B座11层

专利权人 西安交通大学

(72) 发明人 崔栋刚 李瑞兔 程向龙 李金

刘文豪

(74) 专利代理机构 西安众和至成知识产权代理

事务所(普通合伙) 61249

代理人 强宏超

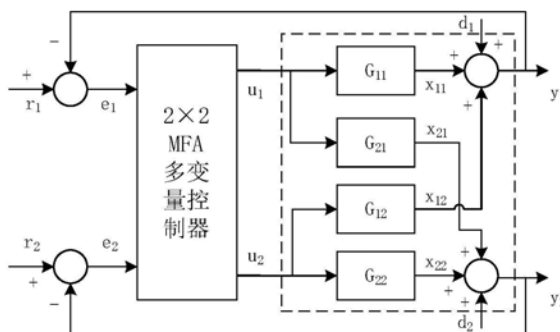
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

一种加热炉控制与燃烧优化方法

(57) 摘要

本发明公布了一种加热炉控制与燃烧优化的方法,解决了加热炉系统不易控制的难题,该方法采用先进控制算法与常规控制算法相结合的控制策略,保证了加热炉系统连续稳定运行;采用O<sub>2</sub>和CO切换控制,实现低氧燃烧;以国标简化公式为优化目标,采用自寻优算法实现烟气含氧量的实时优化,达到经济燃烧的目的。



1. 一种加热炉控制与燃烧优化方法,其特征在于:

1) 采用常规控制与先进控制相结合的控制策略,实现介质出口温度、烟气含氧量、炉膛负压的常规控制,保证加热炉控制的稳定性;实现介质出口温度、烟气含氧量、炉膛负压的先进控制,保证系统在变负荷、变工况下的快速响应与安全性;

常规控制与先进控制之间的切换通过状态判断选择实现,当常规控制在自动状态下,并且操作员选择投入时,由常规控制切换到先进控制;

针对大滞后的介质出口温度控制,采用大滞后过程无模型自适应(Anti-Delay MFA, Model-Free Adaptive)控制,使变负荷、变工况下系统依然能确保稳定性,以及快速响应特性,其过程如下:

1.1) 通过滞后预估器产生一个动态的反馈信号 $y_c(t)$ 作为反馈信号,对控制器产生一个 $e(t)$ ,针对烟气含氧量与炉膛负压属于为多变量、强耦合系统,采用多变量无模型自适应(MIMO MFA, Model-Free Adaptive)控制,使变负荷、变工况下系统依然能确保稳定性,以及快速响应特性,其过程如下:

1.1.1) MIMO MFA系统由 $2 \times 2$ MFA控制器组成,其中包含两个主控制器C11、C22和两个补偿控制器C21和C12,过程对象包括四个子过程G11、G21、G12和G22;

1.1.2) 过程检测变量烟气含氧量 $y_1$ 和炉膛负压 $y_2$ 作为两个主回路的反馈信号与烟气含氧量设定值 $r_1$ 和炉膛负压设定值 $r_2$ 比较产生偏差信号 $e_1$ 和 $e_2$ 分别输入两个控制器,两个控制器的输出分别与另一方的补偿器的输出相结合生产控制信号 $u_1$ 和 $u_2$ ,由 $2 \times 2$ 过程的本质可以看出,过程的输入 $u_1$ 和 $u_2$ 相互影响着输出 $y_1$ 和 $y_2$ ,一个输入发生变化会同时改变两个输出;

1.1.3)  $2 \times 2$ MFA控制系统的控制目标是产生输出控制信号 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 迫使过程变量 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 跟踪他们各自的设定值 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ ,实现偏差信号 $e_1(t)$ 和 $e_2(t)$ 最小;

1.2) MFA抗滞后控制器不需要精确的数学模型,仅需要一个滞后时间进行滞后预估,结合MFA强大自适应能力和鲁棒性对过程进行控制;

1.3) 为快速适应燃料量的变化对对介质出口温度的影响,采用燃料量前馈控制,实现回路的稳定、准确控制;

2) 针对加热炉多数处于富氧燃烧的燃烧特性,采用 $O_2$ 和 $CO$ 切换控制,实现低氧燃烧,降低污染物排放,提高设备安全使用寿命;

其过程如下:

2.1) 首先,新增激光分析仪,实时监测燃烧过程中的 $O_2$ 和 $CO/CH_4$ 在线测量,基于激光 $CO$ 在线测量,用于不完全燃烧的衡量,同时,弥补低氧状态下的 $O_2$ 测量的不灵敏性,为低氧燃烧提供可靠测量依据;

2.2) 其次,在低氧状态下采用 $CO$ 控制策略,在设定的 $CO$ 控制点内富氧状态下采用氧量控制方式,两种方式通过燃烧状态的判断切换,最终达到低氧燃烧的控制目标;

2.3) 最后,控制方案中通过交叉控制逻辑,实现变负荷时燃料量受空气量限制,空气量始终大于燃料量的燃烧状态,确保燃烧的稳定;

3) 采用国标简化公式,构建加热炉效率优化函数,通过燃烧效率自寻优算法,对锅炉燃烧过程中的烟气含氧量进行实时优化,确保系统运行在最佳燃烧区。

2. 根据权利要求1所述的加热炉控制与燃烧优化方法,其特征在于:所述步骤1)中介质

温度控制过程中,采用串级控制,外环采用介质出口温度控制回路作为主控制回路,内环采用燃料流量控制回路作为副控制回路,当介质温度增加则减小燃料量,介质温度降低则增大燃料量;

所述烟气含氧量控制过程中,采用单回路控制,通过氧量设定值与过程值的偏差,进入控制器中进行PID控制运算,得到送风挡板指令,同时,引入燃气压力补偿器作为控制前馈量,避免燃料因负荷突然变化而变化燃烧状况却因进风风量变化慢而变得不佳的情况,提高了送风系统的快速响应特性;

在炉膛负压控制过程中,采用单回路控制,通过炉膛负压设定值与过程值的偏差,进入控制器中进行PID控制运算,得到挡板控制指令,由于负压值易受到送风量的影响,因而对于可预知的扰动采用前馈控制策略,引入送风流量前馈,提前消除送风干扰,使炉膛负压能够快速稳定的稳定下来。

3. 根据权利要求1所述的加热炉控制与燃烧优化方法,其特征在于:所述步骤3) 过程如下:

1) 进行燃烧系统判稳,燃烧系统稳定时记录当前锅炉优化目标函数值,以及烟气含氧量;

2) 使烟气含氧量给定增加一个预置烟气含氧量步长值0.2~0.5,待系统稳定后,分为以下两种情况:

第一种情况,如果目标函数值增加,则下步继续增加一个烟气含氧量步长值,直至目标函数值减小时,说明此时的锅炉系统已经在最佳燃烧区,结束本次优化,等待工况改变进行下次优化;

第二种情况,如果目标函数值减小,则进行优化步长反向,减小一个烟气含氧量步长,待系统稳定后,如果目标函数值增加,则下步继续减小一个烟气含氧量步长值;直至目标函数值减小时,说明此时的锅炉系统已经在最佳燃烧区,结束本次优化,等待工况改变进行下次优化。

## 一种加热炉控制与燃烧优化方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及工业自动控制技术领域,具体涉及一种加热炉控制与燃烧优化方法。

### 背景技术

[0002] 加热炉是石化炼油厂及化工生产厂的主要设备中的一种,是经常使用的一种火力加热设备。而加热炉最重要的任务,主要是把原料油加热到比较高的温度(有时能达到上1000℃)来达到后序生产流程(分馏或反应等过程)的要求。加热炉不仅耗能巨大,而且是二氧化碳、氮氧化物等污染物排放的主要来源之一。

[0003] 影响加热炉热效率的主要因素是排烟热损失、气体未完全燃烧热损失,而影响这两个主要因素的可调参量就是过量空气系数,过剩空气系数是决定加热炉性能、尤其是这个加热炉的热效率的重要指标之一,因此在设计加热炉以及操作加热炉过程中,过剩空气系数都是我们参考的重要指标数。过量空气系数过小能产生不完全燃烧,加大了不完全燃烧热损失,使炉子的热效率下降;数值过大时,过剩的空气排出炉外,进入大气带走很多热量同时也对环境带来了热污染,带来了排烟热损失的增加造成了炉子的热效率下降;而且,数值的大小左右着烟气阻力的大小;因为烟气中过剩空气带来的含氧量过大能导致炉内构件的氧化加剧,并且过量氧气也导致炉管表面氧化加剧,直接影响了炉管使用期限。再者,过量的氧也能加大 $\text{SO}_2$ 向 $\text{SO}_3$ 转化,使得烟气发生低温露点腐蚀机会加大。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种加热炉控制与燃烧优化方法,以安全经济运行为目标,针对加热炉系统的运行特点,采用先进控制算法与常规控制算法相结合的控制策略,并采用 $\text{O}_2$ 和 $\text{CO}$ 切换控制,实现低氧燃烧,通过燃烧效率自寻优算法,对烟气含氧量进行实时优化,进一步提高燃烧效率、降低污染物排放,提高设备安全使用寿命。

[0005] 为达到上述目的,本发明采用的技术方案是:

[0006] 1) 采用常规控制与先进控制相结合的控制策略,实现介质出口温度、烟气含氧量、炉膛负压的常规自动控制,保证加热炉控制的稳定性;实现介质出口温度、烟气含氧量、炉膛负压的先进控制,保证系统在变负荷、变工况下的快速响应与安全性;

[0007] 2) 针对加热炉多数处于富氧燃烧的燃烧特性,采用 $\text{O}_2$ 和 $\text{CO}$ 切换控制,实现低氧燃烧,降低污染物排放,提高设备安全使用寿命;

[0008] 3) 采用国标简化公式,构建加热炉效率优化函数,通过燃烧效率自寻优算法,对锅炉燃烧过程中的烟气含氧量进行实时优化,确保系统运行在最佳燃烧区。

[0009] 采用常规控制与先进控制相结合的控制策略,实现介质出口温度、烟气含氧量、炉膛负压的自动控制,保证加热炉控制的稳定性。常规控制算法在过程控制站实现,保证了控制的安全性及稳定性。

[0010] 所述介质温度控制过程中,采用串级控制。外环采用介质出口温度控制回路作为主控制回路,内环采用燃料流量控制回路作为副控制回路。当介质温度增加则减小燃料量,

介质温度降低则增大燃料量；

[0011] 所述烟气的含氧量控制过程中,采用单回路控制。通过氧量设定值与过程值的偏差,进入控制器中进行PID控制运算,得到送风挡板指令,同时,引入燃气压力(流量)补偿器作为控制前馈量,能够避免燃料因负荷突然变化而变化燃烧状况却因进风风量变化慢而变得不佳的情况,提高了送风系统的快速响应特性；

[0012] 所述在炉膛负压控制过程中,采用单回路控制。通过炉膛负压设定值与过程值得偏差,进入控制器中进行PID控制运算,得到挡板控制指令,由于负压值易受到送风量的影响,因而对于可预知的扰动采用前馈控制策略,引入送风流量前馈,提前消除送风干扰,使炉膛负压能够快速的稳定下来。

[0013] 采用常规控制与先进控制相结合的控制策略,实现介质出口温度、烟气含氧量、炉膛负压的先进控制,保证系统在变负荷、变工况下的快速响应与安全性。其特征在於：

[0014] 1) 常规控制与先进控制之间的切换主要通过状态判断选择实现,当常规控制在自动状态下,并且操作员选择投入时,由常规控制切换到先进控制；

[0015] 2) 针对大滞后的介质出口温度控制,采用大滞后过程无模型自适应(Anti-Delay MFA, Model-Free Adaptive)控制,使变负荷、变工况下系统依然能确保稳定性,以及快速响应特性,其特征如下：

[0016] 2-1) 通过滞后预估器产生一个动态的反馈信号 $y_c(t)$ 作为反馈信号,对控制器而言产生一个 $e(t)$ ；

[0017] 2-2) MFA抗滞后控制器不需要精确的数学模型,仅需要一个滞后时间进行滞后预估,结合MFA强大自适应能力和鲁棒性对过程进行控制；

[0018] 2-3) 为快速适应燃料量的变化对对介质出口温度的影响,采用燃料量前馈控制,实现回路的稳定、准确控制。

[0019] 3) 针对烟气含氧量与炉膛负压属于为多变量、强耦合系统,采用多变量无模型自适应(MIMO MFA, Model-Free Adaptive)控制,使变负荷、变工况下系统依然能确保稳定性,以及快速响应特性,其特征如下：

[0020] 3-1) MIMO MFA系统由 $2 \times 2$ MFA控制器组成,其中包含两个主控制器C11、C22和两个补偿控制器C21和C12,过程对象包括四个子过程G11、G21、G12和G22；

[0021] 3-2) 过程检测变量烟气含氧量 $y_1$ 和炉膛负压 $y_2$ 作为两个主回路的反馈信号与烟气含氧量设定值 $r_1$ 和炉膛负压设定值 $r_2$ 比较产生偏差信号 $e_1$ 和 $e_2$ 分别输入两个控制器,两个控制器的输出分别与另一方的补偿器的输出相结合生产控制信号 $u_1$ 和 $u_2$ ,由 $2 \times 2$ 过程的本质可以看出,过程的输入 $u_1$ 和 $u_2$ 相互影响着输出 $y_1$ 和 $y_2$ ,一个输入发生变化会同时改变两个输出。

[0022] 3-3)  $2 \times 2$ MFA控制系统的控制目标是产生输出控制信号 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 迫使过程变量 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 跟踪他们各自的设定值 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ ,实现偏差信号 $e_1(t)$ 和 $e_2(t)$ 最小。

[0023] 针对加热炉多数处于富氧燃烧的燃烧特性,采用 $O_2$ 和 $CO$ 切换控制,实现低氧燃料,降低污染物排放,提高设备安全使用寿命,其特征在於：

[0024] 1) 首先,新增激光分析仪,实时监测燃烧过程中的 $O_2$ 和 $CO/CH_4$ 在线测量。基于激光 $CO$ 在线测量,可用于不完全燃烧的衡量,同时,能弥补低氧状态下的 $O_2$ 测量的不灵敏性,为低氧燃烧提供可靠测量依据；

[0025] 2) 其次,完善DCS控制逻辑,实现氧量和CO切换控制,在低氧状态下采用CO控制策略,在设定的CO控制点内采用氧量控制方式,两种方式通过燃烧状态的判断自动切换,最终达到低氧燃烧的控制目标;

[0026] 3) 最后,控制方案中通过交叉控制逻辑,实现变负荷时燃料量受空气量限制,空气量始终大于燃料量的燃烧状态,确保燃烧的稳定性。

[0027] 采用国标简化公式,构建加热炉效率优化函数,通过燃烧效率自寻优算法,对锅炉燃烧过程中的烟气含氧量进行实时优化,确保系统运行在最佳燃烧区。主要特征如下:

[0028] 1) 进行燃烧系统判稳,燃烧系统稳定时记录当前锅炉优化目标函数值,以及烟气含氧量;

[0029] 2) 使烟气含氧量给定增加一个预置烟气含氧量步长值(范围0.2~0.5),待系统稳定后,分为以下两种情况:

[0030] 3) 第一种情况,如果目标函数值增加,则下步继续增加一个烟气含氧量步长值,直至目标函数值减小时,说明此时的锅炉系统已经在最佳燃烧区,结束本次优化,等待工况改变进行下次优化;

[0031] 4) 第二种情况,如果目标函数值减小,则进行优化步长反向,减小一个烟气含氧量步长,待系统稳定后,如果目标函数值增加,则下步继续减小一个烟气含氧量步长值;直至目标函数值减小时,说明此时的锅炉系统已经在最佳燃烧区,结束本次优化,等待工况改变进行下次优化。

[0032] 本发明与现有技术相比,具有安全稳定,操作方便,节能降耗的优点。一方面能够保证加热炉控制系统的连续、稳定、安全、经济运行;另一方面能够提高锅炉效率,同时降低污染物的排放;本发明的应用还能减轻运行人员劳动强度,提高了自动投入率,因而具有显著的经济效益和良好的社会效益。

[0033] 本发明具有以下特点:

[0034] 安全和稳定性

[0035] 加热炉尾气中产生大量的二氧化碳,使得不可能仅通过氧气控制来确定最佳的空气量。通过在线测量O<sub>2</sub>和CO/CH<sub>4</sub>以及空气的快速流量控制,才能保证加热炉的安全和稳定燃烧。

[0036] 延长寿命

[0037] 过量空气对加热炉的寿命有重要影响。过量空气稀释烟气中CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O浓度,降低辐射传热,其结果是加热器需要更多的燃料以保持COT(炉管出口温度)。这就需要在对流段增加更多的热量,使得屏蔽段温度(在对流和辐射段中间)可能会超过设计温度,影响管焦化和加热炉的寿命。通过改善燃烧测量和控制后,这一问题将会得到彻底解决。

[0038] 提高效率

[0039] 通过对加热炉实施燃烧优化,在保持安全燃烧条件下,减少过量空气,进一步提高能源效率;同时,最小过量空气通过废气来减少热量损失,并通过避免二氧化碳和水蒸汽在废气被稀释来保持辐射传热,达到节约燃料目标。

[0040] 降低排放

[0041] 加热炉是氮氧化物和二氧化碳排放量的主要来源,采用更合理的送风量实现优化燃烧,能减少污染物的排放。

## 附图说明

- [0042] 图1介质出口温度控制框图；
- [0043] 图2烟气含氧量控制框图；
- [0044] 图3炉膛负压控制框图；
- [0045] 图4 Anti-Delay MFA系统框图；
- [0046] 图5 MIMO MFA系统框图；
- [0047] 图6 O<sub>2</sub>和CO切换控制算法逻辑图；
- [0048] 图7自寻优算法逻辑图。

## 具体实施方式

- [0049] 下面结合附图和实施例对发明内容作进一步说明。
- [0050] 参照图1所示,为介质出口温度控制回路框图,具体步骤为:
- [0051] 首先,介质温度控制过程中,采用串级控制。
- [0052] 其次,外环采用介质出口温度控制回路作为主控制回路,内环采用燃料流量控制回路作为副控制回路。
- [0053] 最后,当介质温度增加则减小燃料量,介质温度降低则增大燃料量。针对介质出口温度的大滞后特性,采用抗滞后性MFA控制策略,并通过状态判断条件实现控制上的无扰切换。
- [0054] 参照图2所示,为烟气含氧量温度控制回路框图,具体步骤为:
- [0055] 首先,烟气的含氧量控制过程中,采用单回路控制。
- [0056] 其次,通过氧量设定值与过程值的偏差,进入控制器中进行PID控制运算,得到送风挡板指令;
- [0057] 最后,引入燃气压力(流量)补偿器作为控制前馈量,能够避免燃料因负荷突然变化而变化燃烧状况却因进风风量变化慢而变得不佳的情况,提高了送风系统的快速响应特性。
- [0058] 参照图3所示,为炉膛负压控制回路框图,具体步骤为:
- [0059] 首先,在炉膛负压控制过程中,采用单回路控制。
- [0060] 其次,通过炉膛负压设定值与过程值得偏差,进入控制器中进行PID控制运算,得到挡板控制指令;
- [0061] 最后,由于负压值易受到送风量的影响,因而对于可预知的扰动采用前馈控制策略,引入送风流量前馈,提前消除送风干扰,使炉膛负压能够快速稳定的稳定下来。
- [0062] 参照图4所示,为Anti-Delay MFA系统框图,具体步骤为:
- [0063] 首先,通过滞后预估器产生一个动态的反馈信号 $y_c(t)$ 作为反馈信号,对控制器而言产生一个 $e(t)$ ;
- [0064] 其次,MFA抗滞后控制器不需要精确的数学模型,仅需要一个滞后时间进行滞后预估,结合MFA强大自适应能力和鲁棒性对过程进行控制;
- [0065] 最后,为快速适应燃料量的变化对对介质出口温度的影响,采用燃料量前馈控制,实现回路的稳定、准确控制。
- [0066] 参照图5所示,为MIMO MFA控制系统结构框图,具体步骤为:

[0067] 首先,构成MIMO MFA系统,其中包含两个主控制器 $C_{11}$ 、 $C_{22}$ 和两个补偿控制器 $C_{21}$ 和 $C_{12}$ ,过程对象包括四个子过程 $G_{11}$ 、 $G_{21}$ 、 $G_{12}$ 和 $G_{22}$ ;

[0068] 其次,过程检测变量烟气含氧量 $y_1$ 和炉膛负压 $y_2$ 作为两个主回路的反馈信号与含氧量设定值 $r_1$ 和负压设定值 $r_2$ 比较产生偏差信号 $e_1$ 和 $e_2$ 分别输入两个控制器,两个控制器的输出分别与另一方的补偿器的输出相结合生产控制信号 $u_1$ 和 $u_2$ ,由 $2 \times 2$ 过程的本质可以看出,过程的输入 $u_1$ 和 $u_2$ 相互影响着输出 $y_1$ 和 $y_2$ ,一个输入发生变化会同时改变两个输出。

[0069] 再次, $2 \times 2$ MFA控制系统的控制目标是产生输出控制信号 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 迫使过程变量 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 跟踪他们各自的设定值 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ ,实现偏差信号 $e_1(t)$ 和 $e_2(t)$ 最小:

[0070] 参照图6所示,为 $O_2$ 和 $CO$ 切换控制算法逻辑图,具体步骤为:

[0071] 首先,新增激光分析仪,实时监测燃烧过程中的 $O_2$ 和 $CO/CH_4$ 在线测量。基于激光 $CO$ 在线测量,可用于不完全燃烧的衡量,同时,能弥补低氧状态下的 $O_2$ 测量的不灵敏性,为低氧燃烧提供可靠测量依据;

[0072] 其次,完善DCS控制逻辑,实现氧量和 $CO$ 切换控制,在低氧状态下采用 $CO$ 控制策略,在设定的 $CO$ 控制点内采用氧量控制方式,两种方式通过燃烧状态的判断自动切换,最终达到低氧燃烧的控制目标;

[0073] 最后,控制方案中通过交叉控制逻辑,实现变负荷时燃料量受空气量限制,空气量始终大于燃料量的燃烧状态,确保燃烧的稳定性。

[0074] 参照图7所示,为自寻优燃烧优化算法逻辑,优化参数为氧量设定值为例,具体步骤为:

[0075] 1) 参数初始化,获取优化参数基础值与边界值;

[0076] 2) 计算优化目标函数值 $J$ ,并对其进行单位时间内的均值滤波处理;

[0077] 3) 判断是否在优化死区范围内,如果在 $D$ 范围内,则不进行优化运算,否则继续进行下一步;

[0078] 4) 判断燃烧系统是否稳定,并且运行人员是否允许燃烧优化,条件满足则进行下一步,否则不运算;

[0079] 5) 判断是否为首次进入优化程序,如果是则进行第(6)步,否则跳转(11)步

[0080] 6) 增加氧量设定值增量(正向);

[0081] 7) 调用优化算法,计算边界条件下的 $J$ 以及最佳氧量设定,并对 $J$ 本、 $J$ 上进行比较运算;

[0082] 8) 判断是否 $J$ 本 $<$  $J$ 上,如果不是则跳转(9),如果是则跳转(10);

[0083] 9) 复位优化正方向标志位,并继续判稳;

[0084] 10) 置位优化正方向标志位(反向优化),并继续判稳;

[0085] 11) 判断是否为正向运算过程,如果是则跳转(13),如果否则跳转(12);

[0086] 12) 减小氧量设定值步长;

[0087] 13) 增加氧量设定值步长;

[0088] 14) 调用优化算法,计算边界条件下的 $J$ 以及最佳氧量设定;

[0089] 15) 对 $J$ 本、 $J$ 上进行比较运算;

[0090] 16) 单次优化结束,置位结束状态,复位首次优化等相关状态;

[0091] 17) 结束本次运算。



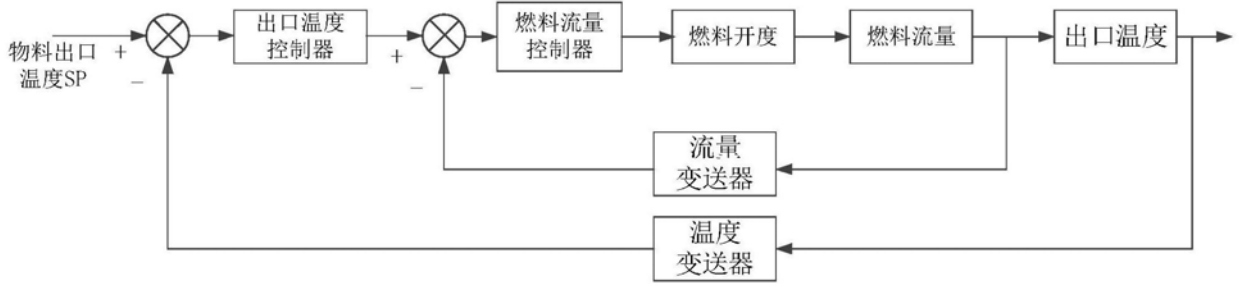


图1

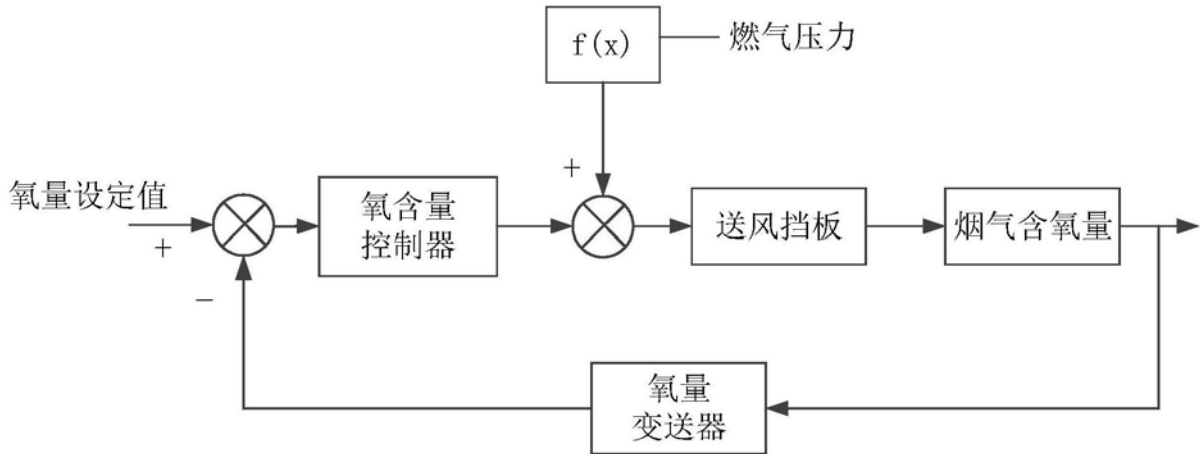


图2

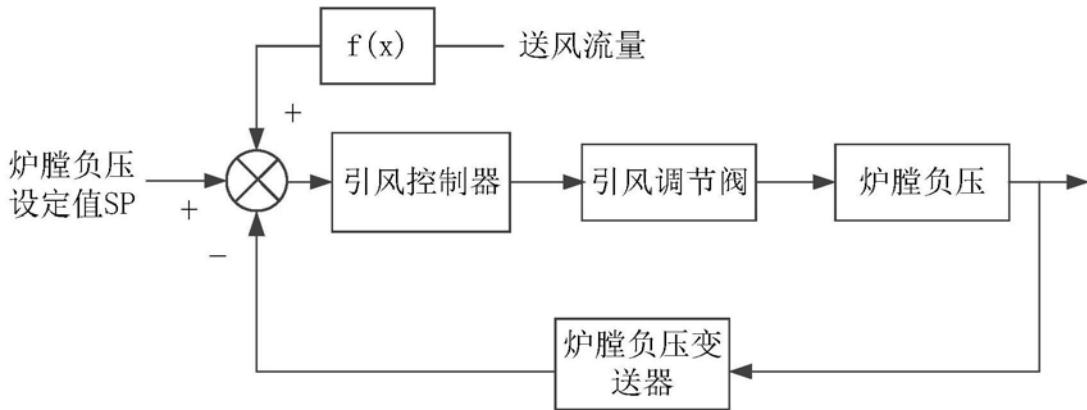


图3

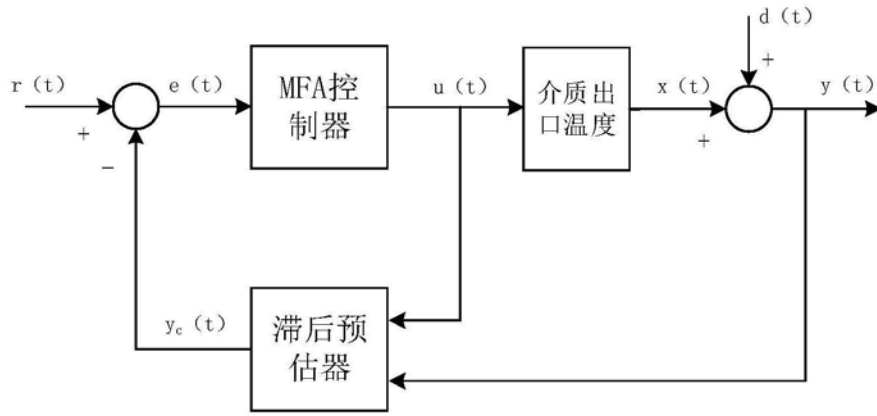


图4

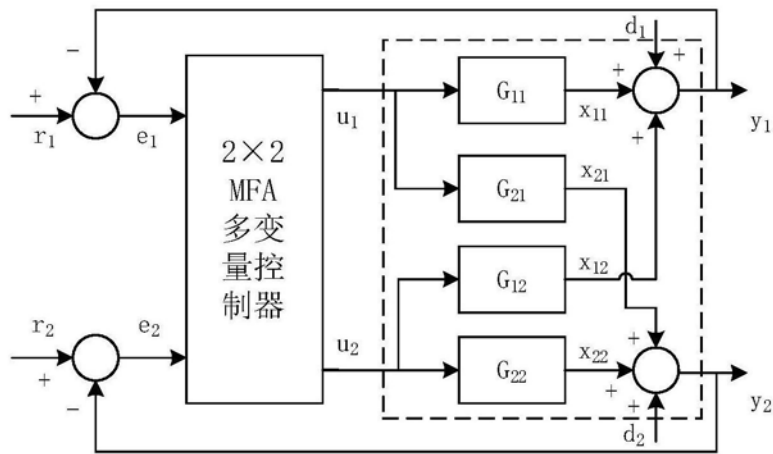


图5

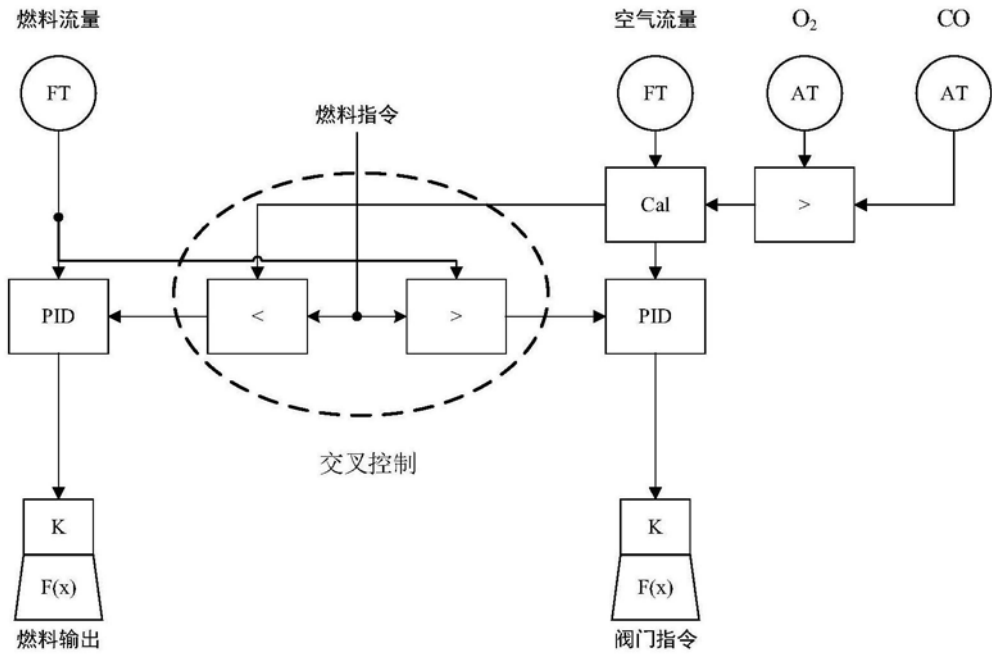


图6

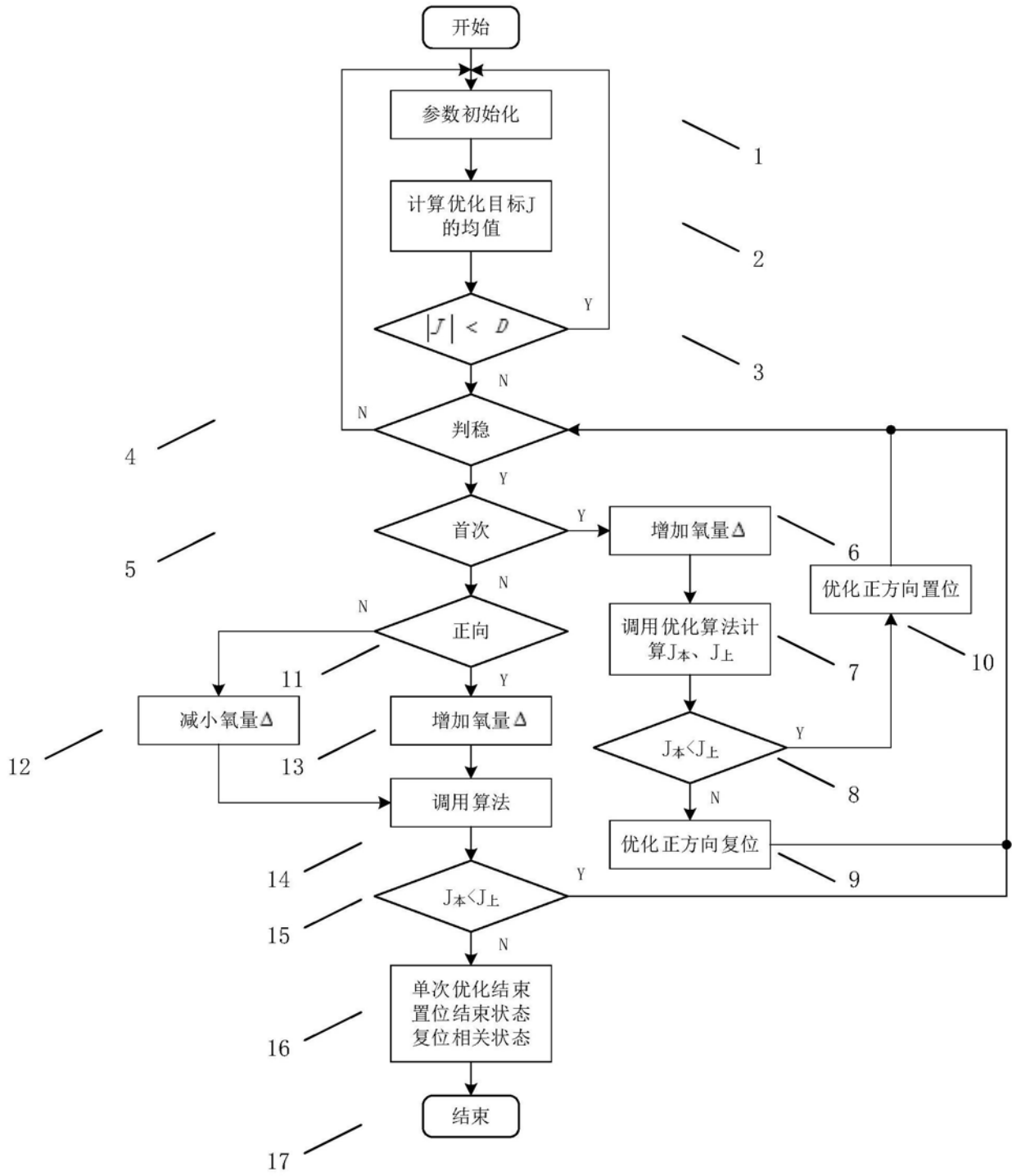


图7