



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118286838 B

(45) 授权公告日 2024.09.03

(21) 申请号 202410384942.8

(22) 申请日 2024.04.01

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 118286838 A

(43) 申请公布日 2024.07.05

(73) 专利权人 浙江浩普智能科技有限公司

地址 310000 浙江省杭州市西湖区文三路

199号创业大厦3楼303室

专利权人 浙江大学

(72) 发明人 郑成航 高翔 李钦武 周灿

郑政杰 张涌新 赵中阳 吴卫红

翁卫国 姚龙超 张悠 刘庭宇

(74) 专利代理机构 北京国源中科知识产权代理

事务所(普通合伙) 16179

专利代理师 饶鸿雁

G06N 3/0442 (2023.01)

G06N 3/006 (2023.01)

B01D 53/75 (2006.01)

B03C 3/017 (2006.01)

B01D 53/50 (2006.01)

B01D 53/56 (2006.01)

B01D 53/90 (2006.01)

B01D 53/86 (2006.01)

B01D 53/64 (2006.01)

F23J 15/02 (2006.01)

F23J 15/04 (2006.01)

F23J 15/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 106014568 A, 2016.10.12

CN 108837699 A, 2018.11.20

审查员 何书玉

(51) Int. Cl.

B01D 53/34 (2006.01)

权利要求书5页 说明书15页 附图3页

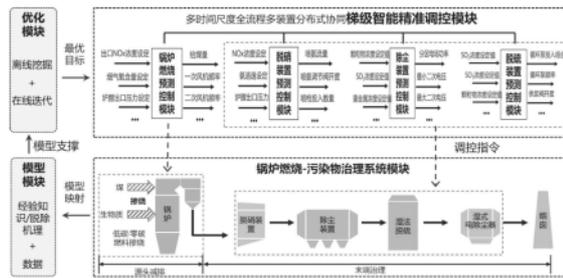
(54) 发明名称

燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法及系统

(57) 摘要

本发明公开了燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法及系统,控制方法包括:基于煤电/热电机组锅炉燃烧系统的各个被控变量的精准预测模型,提前获得被控变量的预测值,结合预测值制定锅炉燃烧系统的控制策略,提前进行燃烧系统关键设备调节,缩短调节滞后时间,降低单位蒸汽煤耗和多种污染物排放浓度,实现源头减污降碳;基于污染物脱除系统目标被控变量的精准预测模型,提前预测锅炉出口多种污染物浓度变化,结合锅炉燃烧-烟气治理过程全流程多装置关键参数梯级智能精准调控,实现多变负荷/燃料下污染物排放浓度的超高精度卡边控制,全流程降低污染物脱除装置物耗能耗,并协同实现CO<sub>2</sub>排放的有效下降。

CN 118286838 B



1. 燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法,其特征在于,所述方法包括:

基于污染物生成脱除机理,分析确定影响目标被控变量的运行参数,将所述目标被控变量的影响参数作为输入变量,以目标被控变量作为输出变量,构建锅炉燃烧-烟气治理系统的各个被控变量预测模型;

分别对各个被控变量进行预测,提前获得各个被控变量的预测值;

根据预测结果,构建目标被控变量的控制模块,制定锅炉燃烧系统和烟气治理装置的控制策略,提前调节影响目标被控变量的关键影响参数;

基于污染物治理系统中脱除设备对NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、PM、SO<sub>3</sub>和Hg污染物的协同作用,建立了以能耗-物耗-污染物排放多目标协同的锅炉燃烧-污染物脱除系统调控策略,实现锅炉燃烧和污染物脱除关键装备的关键参数实时调整优化;

所述锅炉燃烧系统被控变量包括:锅炉氧含量、炉膛出口压力、出口污染物浓度;

所述烟气治理装置被控变量包括总排口颗粒物浓度、总排口SO<sub>2</sub>浓度/脱硫装置出口SO<sub>2</sub>浓度、总排口/脱硝装置出口NO<sub>x</sub>浓度和氨逃逸浓度、总排口SO<sub>3</sub>浓度;

所述锅炉氧含量、炉膛出口压力和NO<sub>x</sub>浓度协同预测控制过程如下:

步骤Sa1、以给煤量、一次风机频率、二次风机频率作为输入变量,以氧含量作为输出变量,利用输入变量的阶跃响应向量来实时预测氧含量的变化,建立氧含量浓度预测模型;

所述氧含量浓度预测模型表达式如下:

$$Y_c^*(k) = Y_{c煤}^*(k) + Y_{c一次}^*(k) + Y_{c二次}^*(k). \quad (1)$$

$$Y_{c煤}^*(k) = A_{0煤} U_{煤}(k-1) + A_{煤} \Delta U_{煤}(k). \quad (2)$$

$$Y_{c一次}^*(k) = A_{0一次} U_{一次}(k-1) + A_{一次} \Delta U_{一次}(k). \quad (3)$$

$$Y_{c二次}^*(k) = A_{0二次} U_{二次}(k-1) + A_{二次} \Delta U_{二次}(k). \quad (4)$$

式中:  $Y_c^*(k)$  为k时刻对未来P个时域长度氧含量未修正的总预测值;  $Y_{c煤}^*(k)$ 、 $Y_{c一次}^*(k)$ 、 $Y_{c二次}^*(k)$  分别为受给煤量、一次风机频率、二次风机频率影响下P个时域长度氧含量未修正的总预测值,P为滚动优化时域长度;  $U(k-1)$  为各变量在k时刻前N个时域长度的值,N为模型时域;  $\Delta U(k)$  为各变量在k时域长度对未来M个时刻的控制增量预测值,M为控制时域长度;  $A_0$ 、 $A$  为各变量的动态矩阵,描述各个输入变量对系统响应的影响;

步骤Sa2、为校正模型失配、环境干扰所造成的误差,利用实时信息对模块预测值进行修正,反馈修正过程如下:

$$Y_c(k) = Y_c^*(k) + H[y(k) - y_c(k)]. \quad (5)$$

式中:  $Y_c(k)$  为k时刻修正后的总预测值;  $H$  为反馈修正系数;  $y(k)$ 、 $y_c(k)$  分别为k时刻当前的氧含量实测值和预测值;

步骤Sa3、将氧含量目标值与预测值的差值最小化来优化控制,k时刻优化性能指标用

向量形式表示如下:

$$J(k) = [Y_c(k) - Y_r(k)]^T Q [Y_c(k) - Y_r(k)] + \Delta U(k)^T R \Delta U(k) \quad (6)$$

式中:  $J(k)$  为优化目标函数;  $Y_r(k)$  为目标被控变量控制目标值;  $Q$ 、 $R$  分别为目标被控变量预测误差权矩阵和关键参数控制权矩阵;

令:

$$\frac{\partial J(k)}{\partial \Delta U(k)} = 0 \quad (7)$$

步骤Sa4、根据氧含量目标值确定二次风机的控制增量,实现氧含量的稳定控制,并根据氧含量的实测值进行实时反馈校正,输出优化控制增量表达式为:

$$\Delta U(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q \{Y_r(k) - A_0 U(k-1) - H[y(k) - y_c(k)]\} \quad (8)$$

步骤Sa5、将步骤S4输出的二次风机未来的频率调控指令,作为炉膛负压控制模块的输入量;动态工况下,通过建立线性回归模型分析一次风机频率变化量、二次风机频率变化量与引风机频率的关系,提前调节引风机频率;静态工况下,利用最小二乘法对PID控制器进行参数辨识,确定PID控制器初始参数值,提前给出引风机控制指令,确保炉膛负压稳定;

稳态工况下,当输出炉膛出口压力处于设定范围内,则不需要调节引风机频率,当炉膛出口压力超出设定范围,则通过PID进行修正引风机频率;修正公式如下:

$$u(k) = -0.0033e(k) + -0.0005 \sum_{i=0}^k e(i) + 0.00025 [e(k) - e(k-1)]$$

式中:  $u(k)$  为PID控制器的输出引风机频率变化量;  $e(k)$  为炉膛出口压力目标值与实测值之差;

动态工况下,通过拟合分析一次风机、二次风机、引风机频率的关系,确定引风机频率调控增量,拟合公式如下:

$$\Delta L_{引} = 0.55518 \Delta L_{一次} + 0.60237 \Delta L_{二次} + 0.00135 L_{引} + 0.01363$$

式中:  $\Delta L_{一次}$  为一次风机频率变化量;  $\Delta L_{二次}$  为二次风机频率变化量;  $L_{引}$  为引风机频率实测值;

所述脱硝装置出口NO<sub>x</sub>浓度和氨逃逸预测控制过程如下:

步骤Sb1、以锅炉负荷、给煤量、风量、烟气温度作为输入变量,以炉膛出口即脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度作为输出变量,建立基于分区分段脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度预测模型;

所述炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度预测模型表达式如下:

$$Y_N^*(k) = Y_{N煤}^*(k) + Y_{N风}^*(k) + Y_{c温度}^*(k) \quad (1)$$

$$Y_{N煤}^*(k) = A_{0煤} U_{煤}(k-1) + A_{煤} \Delta U_{煤}(k) \quad (2)$$

$$Y_{N风}^*(k) = A_{0风} U_{风}(k-1) + A_{风} \Delta U_{风}(k) \quad (3)$$

$$Y_{c温度}^*(k) = A_{0温度} U_{温度}(k-1) + A_{温度} \Delta U_{温度}(k) \quad (4)$$

式中:  $Y_N^*(k)$  为k时刻对未来P个时域长度炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度未修正的总预测值;  $Y_{N煤}^*(k)$ 、 $Y_{N风}^*(k)$ 、 $Y_{c温度}^*(k)$  分别为受给煤量、风量、烟气温度影响下P个时域长度炉膛出口

$\text{NO}_x$ 浓度未修正的预测值,  $P$ 为滚动优化时域长度;  $U(k-1)$ 为各变量在 $k$ 时刻前 $N$ 个时域长度的值,  $N$ 为模型时域;  $\Delta U(k)$ 为各变量在 $k$ 时域长度对未来 $M$ 个时刻的控制增量预测值,  $M$ 为控制时域长度;  $A_0$ 、 $A$ 为各变量的动态矩阵, 描述各个输入变量对系统响应的影响;

步骤Sb2、为校正模型失配、环境干扰所造成的误差, 利用实时信息对模块预测值进行修正, 反馈修正过程如下:

$$Y_N(k) = Y_N^*(k) + H[y(k) - y_N(k)] \quad (5)$$

式中:  $Y_N(k)$ 为 $k$ 时刻修正后的总预测值;  $H$ 为反馈修正系数;  $y(k)$ 、 $y_N(k)$ 分别为 $k$ 时刻当前炉膛出口 $\text{NO}_x$ 浓度即脱硝装置入口 $\text{NO}_x$ 浓度实测值和预测值;

步骤Sb3、为了修正脱硝装置入口 $\text{NO}_x$ 浓度模型预测存在的稳定偏差, 计算未来某一段脱硝装置入口 $\text{NO}_x$ 浓度预测结果与被控目标之间差值, 采用系数进行修正, 实现炉膛出口 $\text{NO}_x$ 浓度即脱硝装置入口 $\text{NO}_x$ 浓度实时精准预测;

步骤Sb4、以锅炉负荷、脱硝区域运行温度、喷氨流量和脱硝装置入口 $\text{NO}_x$ 浓度作为输入变量, 以脱硝装置出口 $\text{NO}_x$ 浓度作为输出变量, 建立基于分区分段脱硝装置出口 $\text{NO}_x$ 浓度预测控制模型;

步骤Sb5、将入口 $\text{NO}_x$ 浓度预测值即炉膛出口 $\text{NO}_x$ 预测值作为前馈预报加入脱硝装置预测控制模块, 进而输出喷氨流量的优化设定值, 喷氨调节阀开度值由喷氨流量的测量值与优化值的偏差经过智能先进控制器计算得出, 制定全工况多参数协调-串级智能先进控制策略实现脱硝出口 $\text{NO}_x$ 浓度和氨逃逸的稳定控制, 并根据脱硝出口 $\text{NO}_x$ 浓度和氨逃逸的实测值进行实时反馈校正。

2. 根据权利要求1所述的燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法, 其特征在于, 所述总排口颗粒物和 $\text{SO}_3$ 浓度预测控制过程如下:

步骤Sc1、基于颗粒物和 $\text{SO}_3$ 在锅炉燃烧过程的生成机理及在炉渣和烟气中整理和粒径分布特性, 建立烟气颗粒物和 $\text{SO}_3$ 生成浓度预测模型, 实现除尘装置入口颗粒物和 $\text{SO}_3$ 浓度以及质量分布的预测;

步骤Sc2、基于静电除尘装置内电场电晕放电机理以及颗粒物和 $\text{SO}_3$ 荷电迁移机理, 湿法脱硫装置内湍流、回流多物理场强化颗粒物和 $\text{SO}_3$ 捕集机制, 湿式静电除尘器中细颗粒和 $\text{SO}_3$ 凝结、团聚、荷电、迁移的强化机制, 构建了除尘装置、湿法脱硫装置和湿式静电除尘器进出口颗粒物和 $\text{SO}_3$ 脱除全过程浓度及质量分布预测的机理模型;

步骤Sc3、基于实际运行数据对步骤Sc1和步骤Sc2建立的颗粒物和 $\text{SO}_3$ 脱除全过程浓度及质量分布预测的机理模型进行修正, 建立工艺机理与多工况分段机器学习协同驱动的颗粒物和 $\text{SO}_3$ 浓度预测模型建立的机理模型进行修正;

数据修正模型构建方法包括基于梯度下降+粒子群算法的参数辨识方法以及基于注意力机制的长短期记忆神经网络算法;

步骤Sc4、基于上述步骤建立的工艺机理与多工况分段机器学习协同驱动的颗粒物和 $\text{SO}_3$ 浓度预测模型, 采用静电除尘器/低低温电除尘器/电袋复合除尘器和湿式静电除尘器的能耗、总排口颗粒物和 $\text{SO}_3$ 浓度作为智能调控的目标, 并构建能耗和颗粒物和 $\text{SO}_3$ 浓度排放优化问题, 再根据优化问题的特点, 采用粒子群算法或者粒子群-梯度下降算法进行求解, 从而获得不同运行工况下静电除尘器/低低温电除尘器/电袋复合除尘器和湿式静电除尘器最优二次电压设置方式, 构建了颗粒物静电脱除装置分电场分室区不同类型电源的智能

调控策略。

3. 根据权利要求1所述的燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法,其特征在在于,所述总排口SO<sub>2</sub>浓度预测控制过程如下:

步骤Sd1、基于SO<sub>2</sub>在锅炉燃烧过程的生成和脱硝装置中SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>转化机理,基于机器学习算法建立脱硫装置入口烟气SO<sub>2</sub>生成浓度预测模型;

步骤Sd2、基于脱硫装置内多吸收剂SO<sub>2</sub>脱除过程原理,构建了多吸收剂SO<sub>2</sub>脱除过程机理模型;

步骤Sd3、基于历史运行数据采用PSO算法对燃煤烟气SO<sub>2</sub>生成-脱除机理模型进行了修正参数辨识,进一步基于LSTM网络构建SO<sub>2</sub>脱除过程数据修正模型;

步骤Sd4、基于上述步骤建立的燃煤烟气SO<sub>2</sub>生成-脱除模型,采用出口SO<sub>2</sub>浓度和脱硫运行pH作为智能调控的目标,并构建优化问题,再根据优化问题的特点,采用枚举法、粒子群算法或者粒子群-梯度下降算法进行求解,从而获得不同运行工况下湿法脱硫装置最优循环泵及其频率调整策略。

4. 根据权利要求3所述的燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法,其特征在在于,在构建智能调控策略过程中,为了保证算法的稳定性与收敛性,需通过预测一段时间内的被控变量的变化趋势,从而实行滚动优化策略,此外,也需要根据现场实际的运行情况,对预测模型进行在线校正,具体步骤如下:

步骤Sc401、设置出口污染物浓度SO<sub>2</sub>的约束条件,表示如下:

$$l_{e1} = \sum_{i=1}^M r_{p,i} \cdot p(t+i) + \sum_{j=1}^P r_{e,j} \cdot \frac{\text{sgn}[w_{limit}(t+j) - \hat{y}_p(t+j)] + 1}{2}$$

其中, $r_{p,i}$ 是循环泵台数和频率权重系数; $p(t+i)$ 为各循环泵浆液量总和; $r_{e,j}$ 为超标权重系数; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $w_{limit}(t+j)$ 为出口污染物浓度SO<sub>2</sub>排放上限; $M$ 为控制时域; $P$ 为预测时域;

步骤Sc402、为保证出口污染物浓度的相对稳定,以应对工况的快速突变,在优化目标中添加参考轨迹线与预测值的误差,参考轨迹设置需小于上式中的出口浓度限值,表示如下:

$$l_{e2} = \sum_{j=1}^P q_j [w_t(t+j) - \hat{y}_p(t+j)]^2$$

其中, $q_j$ 为跟踪权重系数; $w_t(t+j)$ 为排放目标;

步骤Sc403、在步骤Sc402基础上,为保证控制过程能够收敛至目标值附近,需在优化目标中添加终端误差,因此最终的滚动优化问题可表述为如下形式:

$$\begin{aligned} \min J(t) = & \sum_{i=1}^M r_{p,i} \cdot p(t+i) + \sum_{j=1}^P r_{e,j} \cdot \frac{\text{sgn}[w_{limit}(t+j) - \hat{y}_p(t+j)] + 1}{2} \\ & + q_j [w_t(t+j) - \hat{y}_p(t+j)]^2 + V_f(x(P) - x_s, y_s) \end{aligned}$$

其中, $\min J(t)$ 为t时刻的目标函数; $q_j$ 为跟踪权重系数; $w_t(t+j)$ 为排放目标; $r_{p,i}$ 是循环

泵台数和频率权重系数; $p(t+i)$ 为各循环泵浆液量总和; $r_{e,j}$ 为超标权重系数; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $w_{\text{limit}}(t+j)$ 为出口污染物浓度 $\text{SO}_2$ 排放上限; $V_f(\cdot)$ 为终端误差函数; $\chi(P)$ 为预测时段最后 $P$ 时刻时计算得到的控制量; $\chi_s$ 为稳态优化后的控制量; $y_d$ 为稳态优化后的出口浓度。

5. 实现如权利要求1-4所述的燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳系统,其特征在于,所述系统包括:

锅炉燃烧-污染物治理系统层、知识-数据耦合建模层、模型参数识别优化层、梯级智能精准调控层;

所述锅炉燃烧-污染物治理系统层由低碳/零碳燃料掺混系统、锅炉燃烧系统、脱硝装置、静电除尘装置/低低温电除尘装置/电袋复合除尘装置、湿法脱硫装置、湿式静电除尘装置组成;

所述梯级智能精准调控层由锅炉燃烧预测控制模块、脱硝装置预测控制模块、电除尘装置预测控制模块、湿法脱硫装置预测控制模块、湿式电除尘装置预测控制模块和全流程梯级协同优化控制模块组成;

所述燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳系统流程如下,在知识-数据耦合建模层,通过基于锅炉燃烧-污染物治理系统层中全流程装置对污染物生成脱除机理,建立锅炉燃烧-污染物治理全流程多断面污染物浓度的生成和梯级脱除机理模型,结合锅炉燃烧-污染物治理系统层中历史运行数据和先进经验知识,进一步构建知识-数据融合驱动的多断面污染物浓度预测模型;

在所述模型参数识别优化层,以目标被控制变量作为智能调控的目标,并构建优化问题,再根据优化问题的特点,采用PSO算法、WOA算法、粒子群-梯度下降算法、枚举算法进行模型参数辨识和优化求解,同时通过离线挖掘和在线迭代相结合对优化求解参数进行滚动优化求解,从而建立锅炉燃烧-烟气治理过程的工艺机理与多工况分段机器学习协同驱动的关键参数预测模型;

通过梯级智能精准调控层对锅炉出口和污染物脱除系统多断面污染物浓度精准预测,通过不同工况下锅炉低碳/零碳燃料掺烧量、锅炉段风机频率、脱硝装置不同区域喷氨量、电除尘装置不同电场不同类型电源运行二次电压、湿法脱硫装置浆液不同循环泵组合及其循环泵频率和浆液pH关键调控参数对颗粒物、 $\text{SO}_3$ 、重金属多污染物沿烟气全流程梯级减排效果,获得不同污染物治理装置出口污染物排放浓度与关键调控参数对应关系,建立以能耗-物耗-污染物排放多目标协同的污染物脱除多装置控制策略,实现全流程污染物梯级优化控制并协同节能降碳。

## 燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及节能环保领域,特别是涉及了燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法及系统。

### 背景技术

[0002] 在超低排放系统中,需要投入一定量的能量与物料,以高效脱除烟气中污染物,然而这同时会导致超低排放系统的运行能耗和运行成本提高。据统计,超低排放系统的厂用电率可达到2%以上。随着可再生能源如风能和光能的大规模接入,以及零碳/低碳复杂燃料的掺烧,燃煤机组的负荷波动频繁(30%~100%),对超低排放系统运行的稳定性、经济性和可调性提出了新的要求。因此,如何实现复杂燃料掺烧、深度调峰下的燃煤机组高效稳定超低排放,并降低系统的能耗和物耗,提升超低排放系统的稳定性、经济性和可靠性是亟待解决的问题。

[0003] 然而,现有锅炉燃烧和污染物治理系统常规减污降碳控制方式一般通过DCS系统控制,以人工控制为辅,运行工况变化后,难以做到及时调整和响应,变负荷/燃料工况下污染物浓度波动大,容易产生较大的能耗物耗。通过运行人员人工调整,反应速度慢、调节滞后,对运行人员要求高(如系统熟悉程度、操作运行经验等);且控制参数具有强耦合性,工况变化后,其他参数没有相应的进行优化调整,未考虑锅炉运行全局变化,容易造成能源浪费和污染物排放超标;同时污染物脱除装备的运行参数和出口浓度受负荷波动和煤质变化影响,人工操控水平有限,有时为达到超低排放要求,在装备运行时过量投入物料或加大运行功率,致使投入成本过高,易造成资源浪费和二次污染。

[0004] 为此,本发明构建了涵盖锅炉-超低排放系统的运行监控及其数据库,并建立了包括锅炉燃烧-污染物治理系统层、知识-数据耦合建模层、模型参数识别优化层、梯级智能精准调控层的4层结构的智能调控系统,提出了“模型构建-全局优化-先进控制”的碳污源头减排-超低排放系统智能调控方法,构建了燃烧-烟气污染物脱除全流程多种污染物协同脱除智能调控系统综合平台,在实现烟气污染物高效稳定脱除的同时,降低了系统的能耗和物耗。

### 发明内容

[0005] 本发明提供了燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法及系统,基于锅炉燃烧-烟气治理过程全流程多系统多装置梯级智能精准调控的思路,提出了“模型构建-全局优化-先进控制”的碳污源头减排-超低排放系统智能调控方法,实现锅炉燃烧系统和烟气多污染物脱除系统目标被控变量提前精准预测-关键参数精准控制及全流程减污降碳协同优化。其中基于锅炉燃烧系统的各个被控变量的精准预测模型,提前获得被控变量的预测值,结合预测值制定锅炉燃烧系统的控制策略,提前进行燃烧系统关键设备调节,缩短调节滞后时间,降低单位蒸汽煤耗、降低污染物排放浓度,实现源头减污降碳;基于污染物脱除系统目标被控变量的精准预测模型,提前预测锅炉出口污染物浓度变化,结合锅炉燃烧-

烟气治理过程全流程多装置关键参数梯级智能精准调控,实现多变负荷/燃料下污染物排放浓度的超高精度卡边控制,全流程降低污染物脱除装置物耗能耗,并协同实现CO<sub>2</sub>排放的有效下降。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供了如下方案:

[0007] 燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳系统,所述系统包括:锅炉燃烧-污染物治理系统层、知识-数据耦合建模层、模型参数识别优化层、梯级智能精准调控层;

[0008] 所述燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳系统流程如下,在知识-数据耦合建模层,通过基于锅炉燃烧-污染物治理系统层中全流程装置对污染物生成脱除机理,建立锅炉燃烧-污染物治理全流程多断面污染物浓度的生成和梯级脱除机理模型,结合锅炉燃烧-污染物治理系统层中历史运行数据和系统运行先验知识,进一步构建知识-数据融合驱动的多断面污染物浓度预测模型;

[0009] 在所述模型参数识别优化层,以目标被控制变量作为智能调控的目标,并构建优化问题,再根据优化问题的特点,采用PSO算法、WOA算法、粒子群-梯度下降算法、枚举算法进行模型参数辨识和优化求解,同时通过离线挖掘和在线迭代相结合对优化求解参数进行滚动优化求解,从而建立锅炉燃烧-烟气治理过程的工艺机理与多工况分段机器学习协同驱动的关键参数预测模型;

[0010] 通过梯级智能精准调控层对锅炉出口和污染物脱除系统多断面污染物浓度精准预测,通过不同工况下锅炉低碳/零碳燃料掺烧量、锅炉段风机(一次风机、二次风机、引风机)频率、脱硝装置不同区域喷氨量、电除尘装置不同电场不同类型电源运行二次电压、湿法脱硫装置浆液不同循环泵组合及其循环泵频率和浆液pH关键调控参数对颗粒物、SO<sub>3</sub>、重金属多污染物沿烟气全流程梯级减排效果,获得不同污染物治理装置出口污染物排放浓度与关键调控参数对应关系,建立以能耗-物耗-污染物排放多目标协同的污染物脱除多装置控制策略,实现全流程污染物梯级优化控制并协同节能降碳。

[0011] 优选地,所述锅炉燃烧-污染物治理系统层由低碳/零碳燃料掺混系统、锅炉燃烧系统、脱硝装置、静电除尘装置/低低温电除尘装置/电袋复合除尘装置、湿法脱硫装置、湿式静电除尘装置组成;

[0012] 优选地,所述梯级智能精准调控层由锅炉燃烧预测控制模块、脱硝装置预测控制模块、电除尘装置预测控制模块、湿法脱硫装置预测控制模块、湿式电除尘装置预测控制模块和全流程梯级协同优化控制模块组成;

[0013] 优选地,所述锅炉燃烧系统被控变量包括:锅炉氧含量、炉膛出口压力和出口污染物浓度,所述烟气治理装置被控变量包括总排口颗粒物浓度、总排口SO<sub>2</sub>浓度/脱硫装置出口SO<sub>2</sub>浓度、总排口/脱硝装置出口NO<sub>x</sub>浓度和氨逃逸浓度、总排口SO<sub>3</sub>浓度。

[0014] 燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法,所述方法包括:

[0015] 基于污染物生成脱除机理,分析确定影响目标被控变量的运行参数,将所述目标被控变量的影响参数作为输入变量,以目标被控变量作为输出变量,构建锅炉燃烧-烟气治理系统的各个被控变量预测模型,分别对各个被控变量进行预测,提前获得各个被控变量的预测值,根据预测结果,构建目标被控变量的控制模块,制定锅炉燃烧系统和烟气治理装置的控制策略,提前调节影响目标被控变量的关键影响参数,实现目标被控变量的精准稳定控制的同时,全流程减污降碳。

[0016] 优选地,所述锅炉氧含量、炉膛出口压力和NO<sub>x</sub>浓度协同预测控制过程如下:

[0017] 步骤Sa1、以给煤量、一次风机频率、二次风机频率作为输入变量,以氧含量作为输出变量,利用输入变量的阶跃响应向量来实时预测氧含量的变化,建立氧含量浓度预测模型;

[0018] 所述氧含量浓度预测模型表达式如下:

$$[0019] \quad Y_c^*(k) = Y_{c煤}^*(k) + Y_{c一次}^*(k) + Y_{c二次}^*(k)$$

$$[0020] \quad Y_{c煤}^*(k) = A_{0煤} U_{煤}(k-1) + A_{煤} \Delta U_{煤}(k)$$

$$[0021] \quad Y_{c一次}^*(k) = A_{0一次} U_{一次}(k-1) + A_{一次} \Delta U_{一次}(k)$$

$$[0022] \quad Y_{c二次}^*(k) = A_{0二次} U_{二次}(k-1) + A_{二次} \Delta U_{二次}(k)$$

[0023] 式中:  $Y_c^*(k)$  为k时刻对未来P个时域长度氧含量未修正的总预测值;  $Y_{c煤}^*(k)$ 、 $Y_{c一次}^*(k)$ 、 $Y_{c二次}^*(k)$  分别为受给煤量、一次风机频率、二次风机频率影响下P个时域长度氧含量未修正的总预测值,P为滚动优化时域长度;  $U(k-1)$  为各变量在k时刻前N个时域长度的值,N为模型时域;  $\Delta U(k)$  为各变量在k时域长度对未来M个时刻的控制增量预测值,M为控制时域长度;  $A_0$ 、 $A$  为各变量的动态矩阵,描述各个输入变量对系统响应的影响。

[0024] 步骤Sa2、为校正模型失配、环境干扰所造成的误差,利用实时信息对模块预测值进行修正,反馈修正过程如下:

$$[0025] \quad Y_c(k) = Y_c^*(k) + H[y(k) - y_c(k)]$$

[0026] 式中:  $Y_c(k)$  为k时刻修正后的总预测值;  $H$  为反馈修正系数;  $y(k)$ 、 $y_c(k)$  分别为k时刻当前的氧含量实测值和预测值。

[0027] 步骤Sa3、将氧含量目标值与预测值的差值最小化来优化控制,k时刻优化性能指标用向量形式表示如下:

$$[0028] \quad J(k) = [Y_c(k) - Y_r(k)]^T Q [Y_c(k) - Y_r(k)] + \Delta U(k)^T R \Delta U(k)$$

[0029] 式中:  $J(k)$  为优化目标函数;  $Y_r(k)$  为目标被控变量控制目标值;  $Q$ 、 $R$  分别为目标被控变量预测误差权矩阵和关键参数控制权矩阵。

[0030] 令:

$$[0031] \quad \frac{\partial J(k)}{\partial \Delta U(k)} = 0$$

[0032] 步骤Sa4、根据氧含量目标值确定二次风机的控制增量,实现氧含量的稳定控制,并根据氧含量的实测值进行实时反馈校正,输出优化控制增量表达式为:

$$[0033] \quad \Delta U(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q \{Y_r(k) - A_0 U(k-1) - H[y(k) - y_c(k)]\}$$

[0034] 步骤Sa5,将步骤S4输出的二次风机未来的频率调控指令,作为炉膛负压控制模块的输入量;动态工况下,通过建立线性回归模型分析一次风机频率变化量、二次风机频率变化量与引风机频率的关系,提前调节引风机频率;静态工况下,利用最小二乘法对PID控制器进行参数辨识,确定PID控制器初始参数值,提前给出引风机控制指令,确保炉膛负压稳定。

[0035] 进一步优选,采用PSO或WOA优化算法确定预测控制模块阶跃响应参数进行辨识。

[0036] 优选地,所述脱硝出口NO<sub>x</sub>浓度和氨逃逸浓度预测控制过程如下:

[0037] 步骤Sb1、以锅炉负荷、给煤量、风量、烟气温度作为输入变量,以炉膛出口即脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度作为输出变量,建立基于分区分段脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度预测模型;

[0038] 进一步优选,所述炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度即脱硝预测模型表达式如下:

$$[0039] \quad Y_N^*(k) = Y_{N煤}^*(k) + Y_{N风}^*(k) + Y_{c温度}^*(k)$$

$$[0040] \quad Y_{N煤}^*(k) = A_{0煤} U_{煤}(k-1) + A_{煤} \Delta U_{煤}(k)$$

$$[0041] \quad Y_{N风}^*(k) = A_{0风} U_{风}(k-1) + A_{风} \Delta U_{风}(k)$$

$$[0042] \quad Y_{c温度}^*(k) = A_{0温度} U_{温度}(k-1) + A_{温度} \Delta U_{温度}(k)$$

[0043] 式中: $Y_N^*(k)$ 为k时刻对未来P个时域长度炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度未修正的总预测值; $Y_{N煤}^*(k)$ 、 $Y_{N风}^*(k)$ 、 $Y_{c温度}^*(k)$ 分别为受给煤量、风量、烟气温度影响下P个时域长度炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度未修正的预测值,P为滚动优化时域长度; $U(k-1)$ 为各变量在k时刻前N个时域长度的值,N为模型时域; $\Delta U(k)$ 为各变量在k时域长度对未来M个时刻的控制增量预测值,M为控制时域长度; $A_0$ 、 $A$ 为各变量的动态矩阵,描述各个输入变量对系统响应的影响。

[0044] 步骤Sb2,为校正模型失配、环境干扰所造成的误差,利用实时信息对模块预测值进行修正,反馈修正过程如下:

$$[0045] \quad Y_N(k) = Y_N^*(k) + H[y(k) - y_N(k)]$$

[0046] 式中: $Y_N(k)$ 为k时刻修正后的总预测值;H为反馈修正系数; $y(k)$ 、 $y_N(k)$ 分别为k时刻当前炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度即脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度实测值和预测值。

[0047] 步骤Sb3、为了修正脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度模型预测存在的稳定偏差,计算未来某一段脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度预测结果与被控目标之间差值,采用特定系数进行修正,实现炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度即脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度实时精准预测;

[0048] 步骤Sb4、以锅炉负荷、脱硝区域运行温度、喷氨流量和脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度作为输入变量,以脱硝装置出口NO<sub>x</sub>浓度作为输出变量,建立基于分区分段脱硝装置出口NO<sub>x</sub>浓度预测控制模型;

[0049] 步骤Sb5、将入口NO<sub>x</sub>浓度预测值即炉膛出口NO<sub>x</sub>预测值作为前馈预报加入全工况多参数脱硝装置预测控制模块,进而输出喷氨流量的优化设定值,喷氨调节阀开度值由喷氨流量的测量值与优化值的偏差经过智能先进控制器计算得出,制定全工况多参数协调-串级智能先进控制策略实现脱硝出口NO<sub>x</sub>浓度和氨逃逸的稳定控制,并根据脱硝出口NO<sub>x</sub>浓度和氨逃逸的实测值进行实时反馈校正。

[0050] 优选地,所述总排口颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度预测控制过程如下:

[0051] 步骤Sc1,基于颗粒物和SO<sub>3</sub>在锅炉燃烧过程的生成机理及在炉渣和烟气中整理和粒径分布特性,建立烟气颗粒物和SO<sub>3</sub>生成浓度预测模型,实现除尘装置入口颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度以及质量分布的预测;

[0052] 步骤Sc2、基于静电除尘装置内电场电晕放电机理以及颗粒物和SO<sub>3</sub>荷电迁移机理,湿法脱硫装置内湍流、回流多物理场强化颗粒物和SO<sub>3</sub>捕集机制,湿式静电除尘器中细颗粒和SO<sub>3</sub>凝结、团聚、荷电、迁移的强化机制,构建了除尘装置、湿法脱硫装置和湿式静电

除尘器进出口颗粒物和SO<sub>3</sub>脱除全过程浓度及质量分布预测的机理模型；

[0053] 步骤Sc3、基于实际运行数据对步骤Sc1和步骤Sc2建立的颗粒物和SO<sub>3</sub>脱除全过程浓度及质量分布预测的机理模型进行修正,建立工艺机理与多工况分段机器学习协同驱动的颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度预测模型建立的机理模型进行修正；

[0054] 优选地,数据修正模型构建方法包括基于梯度下降+粒子群算法的参数辨识方法以及基于注意力机制的长短期记忆神经网络算法；

[0055] 步骤Sc4、基于上述步骤建立的工艺机理与多工况分段机器学习协同驱动的颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度预测模型,采用静电除尘器/低低温电除尘器/电袋复合除尘器和湿式静电除尘器的能耗、总排口颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度作为智能调控的目标,并构建能耗和颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度排放优化问题,再根据优化问题的特点,采用粒子群算法或者粒子群-梯度下降算法进行求解,从而获得不同运行工况下静电除尘器/低低温电除尘器/电袋复合除尘器和湿式静电除尘器最优二次电压设置方式,构建了颗粒物静电脱除装置分电场分室区不同类型电源的智能调控策略。

[0056] 进一步优选,所述燃煤烟气颗粒物/SO<sub>3</sub>生成-脱除模型涉及脱硝装置、电除尘装置/低低温电除尘装置/电袋复合除尘装置、湿式静电除尘器、湿法脱硫协同除尘装置；

[0057] 进一步优选,所述能耗优化问题表述如下：

$$[0058] \quad \min \left( \sum_{f=1}^n W_{f+} + \sum_{i=1}^m W_i \right)$$

$$[0059] \quad \text{s. t.} \begin{cases} \hat{c}_{out} \leq c_{limit} \\ U_{f,min} \leq U_f \leq U_{f,max}; U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max} \end{cases}$$

[0060] 式中,n为静电除尘器/低低温电除尘器/电袋复合除尘器的电场总数;W<sub>f</sub>为第f个电场的功率;m为湿式静电除尘器电场总数;W<sub>i</sub>为第i个电场的功率; $\hat{c}_{out}$ 及c<sub>limit</sub>为总排口颗粒物/SO<sub>3</sub>排放浓度预测值及限值;U<sub>f,min</sub>及U<sub>f,max</sub>为第f个电场的最小二次电压及最大二次电压;U<sub>i,min</sub>及U<sub>i,max</sub>为第i个电场的最小二次电压及最大二次电压。

[0061] 进一步优选,在构建智能调控策略过程中,为了保证算法的稳定性与收敛性,需通过预测一段时间内的被控变量的变化趋势,从而实行滚动优化策略,此外,也需要根据现场实际的运行情况,对预测模型进行在线校正,具体步骤如下：

[0062] 步骤Sc401、设置出口污染物浓度颗粒物/SO<sub>3</sub>的约束条件；

[0063] 步骤Sc402、为保证出口污染物浓度的相对稳定,以应对工况的快速突变,在优化目标中添加参考轨迹线与预测值的误差,参考轨迹设置需小于上式中的出口浓度限值；

[0064] 步骤Sc403、在步骤Sc402基础上,为保证控制过程能够收敛至目标值附近,需在优化目标中添加终端误差；

[0065] 步骤Sc404、在常规模型预测控制的反馈校正模块中,通常会通过下一时刻测量到的出口颗粒物浓度的实际值作为模型的误差对模型进行修正。在本文中,由于出口污染物浓度标记测量值本身具有一定的噪声,因此采用滑动平均误差作为模型的误差,其中滑动平均的窗口长度与预测时域相同。

[0066] 优选地,所述总排口SO<sub>2</sub>浓度预测控制过程如下：

[0067] 步骤Sd1、基于SO<sub>2</sub>在锅炉燃烧过程的生成和脱硝装置中SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>转化机理,基于机

器学习算法建立脱硫装置入口烟气SO<sub>2</sub>生成浓度预测模型;

[0068] 步骤Sd2、基于脱硫装置内多吸收剂SO<sub>2</sub>脱除过程原理,构建了多吸收剂SO<sub>2</sub>脱除过程机理模型;

[0069] 步骤Sd3、基于历史运行数据采用PSO算法对燃煤烟气SO<sub>2</sub>生成-脱除机理模型进行了修正参数辨识,进一步基于LSTM网络构建SO<sub>2</sub>脱除过程数据修正模型;

[0070] 步骤Sd4、基于上述步骤建立的燃煤烟气SO<sub>2</sub>生成-脱除模型,采用出口SO<sub>2</sub>浓度和脱硫运行pH作为智能调控的目标,并构建优化问题,再根据优化问题的特点,采用枚举法、粒子群算法或者粒子群-梯度下降算法进行求解,从而获得不同运行工况下湿法脱硫装置最优循环泵及其频率调整策略;

[0071] 进一步优选,所述脱硫装置优化问题表述如下:

$$[0072] \quad \min \text{cost}(s_A, s_B, s_C, s_D \dots s_n) = s_A p_A + s_B p_B + s_C p_C + s_D p_D + \dots + s_n p_n$$

$$[0073] \quad \text{s. t.} \begin{cases} s_A, s_B, s_C, s_D \dots s_n \in \{0,1\} \\ c_{\text{outlet}} < c_{\text{outlet,target}} \end{cases}$$

[0074] 其中, $s_A, s_B, s_C, s_D \dots s_n$ 为循环泵A、B、C、D、n的运行状态,当循环泵开启时,运行状态为1;当循环泵关闭时,运行状态为0。 $p_A, p_B, p_C, p_D \dots p_n$ 为循环泵A、B、C、D...n的额定功率。 $c_{\text{outlet}}$ 为实际出口SO<sub>2</sub>浓度, $c_{\text{outlet,target}}$ 为目标出口SO<sub>2</sub>浓度。

[0075] 进一步优选,在构建智能调控策略过程中,为了保证算法的稳定性与收敛性,需通过预测一段时间内的被控变量的变化趋势,从而实行滚动优化策略,此外,也需要根据现场实际的运行情况,对预测模型进行在线校正,具体步骤如下:

[0076] 步骤Sc401、设置出口污染物浓度SO<sub>2</sub>的约束条件,表示如下:

$$[0077] \quad \ell_{e1} = \sum_{i=1}^M r_{p,i} \cdot p(t+i) + \sum_{j=1}^P r_{e,j} \cdot \frac{\text{sgn}[w_{\text{limit}}(t+j) - \hat{y}_p(t+j)] + 1}{2}$$

[0078] 其中, $r_{p,i}$ 是循环泵台数和频率权重系数; $p(t+i)$ 为各循环泵浆液量总和; $r_{e,j}$ 为超标权重系数; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $w_{\text{limit}}(t+j)$ 为出口污染物浓度SO<sub>2</sub>排放上限; $M$ 为控制时域; $P$ 为预测时域;

[0079] 步骤Sc402、为保证出口污染物浓度的相对稳定,以应对工况的快速突变,在优化目标中添加参考轨迹线与预测值的误差,参考轨迹设置需小于上式中的出口浓度限值,表示如下:

$$[0080] \quad \ell_{e2} = \sum_{j=1}^P q_j [w_t(t+j) - \hat{y}_p(t+j)]^2$$

[0081] 其中, $q_j$ 为跟踪权重系数; $w_t(t+j)$ 为排放目标;

[0082] 步骤Sc403、在步骤Sc402基础上,为保证控制过程的能够收敛至目标值附近,需在优化目标中添加终端误差,因此最终的滚动优化问题可表述为如下形式:

$$\begin{aligned}
 [0083] \quad \min J(t) = & \sum_{i=1}^M r_{p,i} \cdot p(t+i) + \sum_{j=1}^P (r_{e,j} \cdot \frac{\text{sgn}[w_{limit}(t+j) - \hat{y}_p(t+j)] + 1}{2} \\
 & + q_j [w_t(t+j) - \hat{y}_p(t+j)]^2) + V_f(x(P) - x_s, y_s)
 \end{aligned}$$

[0084] 其中,  $\min J(t)$  为  $t$  时刻的目标函数;  $q_j$  为跟踪权重系数;  $w_t(t+j)$  为排放目标;  $r_{p,i}$  是循环泵台数和频率权重系数;  $p(t+i)$  为各循环泵浆液量总和;  $r_{e,j}$  为超标权重系数;  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数;  $w_{limit}(t+j)$  为出口污染物浓度  $\text{SO}_2$  排放上限;  $V_f(\cdot)$  为终端误差函数;  $\chi(P)$  为预测时域最后  $P$  时刻时计算得到的控制量;  $\chi_s$  为稳态优化后的控制量;  $y_s$  为稳态优化后的出口浓度。

[0085] 根据本发明提供的具体实施例, 本发明公开了以下技术效果:

[0086] (1) 基于锅炉燃烧系统的各个被控变量的精准预测模型, 提前获得被控变量的预测值, 结合预测值制定锅炉燃烧系统的控制策略, 提前进行燃烧系统关键设备调节, 缩短调节滞后时间, 降低单位发电量/蒸汽煤耗实现源头减污降碳; 基于污染物脱除系统目标被控变量的精准预测模型, 提前预测锅炉出口污染物浓度变化, 结合锅炉燃烧-烟气治理过程全流程多装置关键参数梯级智能精准调控, 实现多变负荷/燃料下污染物排放浓度的超高精度卡边控制, 全流程降低污染物脱除装置物耗能耗, 并协同实现  $\text{CO}_2$  排放的有效下降。

[0087] (2) 本发明通过锅炉燃烧系统关键参数调控耦合污染物脱除装置关键参数调控全流程降低单位蒸汽煤耗、污染物排放量, 实现单位蒸汽/度电煤耗降低 1.5% 以上, 总排口颗粒物浓度波动  $\leq \pm 0.2 \text{mg}/\text{m}^3$ 、 $\text{SO}_2$  浓度波动  $\leq \pm 0.5 \text{mg}/\text{m}^3$ 、 $\text{NO}_x$  浓度波动  $\leq \pm 0.5 \text{mg}/\text{m}^3$ , 实现了变负荷和变燃料工况条件下污染物排放浓度的超高精度卡边控制, 协同实现  $\text{SO}_3$  排放浓度  $\leq 1 \text{mg}/\text{m}^3$ 、汞/砷/铅/镉/铬五种重金属总排放浓度  $< 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 同时烟气治理系统整体电耗降低 20% 以上并协同节能降碳, 氨水耗量降低 20% 以上, 石灰石耗量降低 5% 以上, 实现  $\text{CO}_2$  排放的有效下降, 实现全流程的梯级减污降碳协同优化。

## 附图说明

[0088] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案, 下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍, 显而易见地, 下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动性的前提下, 还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0089] 图1为本发明实施例提供的燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳系统流程示意图;

[0090] 图2为本发明实施例提供的锅炉-超低排放系统多污染物协同脱除全局优化示意图;

[0091] 图3为本发明实施例提供的锅炉氧含量和炉膛出口压力被控变量协同控制逻辑图;

[0092] 图4为本发明实施例提供的协同控制模型与原有控制的实际运行效果对比;

[0093] 图5为本发明实施例提供的脱硝装置全工况多参数协调预测控制策略示意图。

## 具体实施方式

[0094] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0095] 本发明的目的是提供燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法及系统,通过各个被控变量的预测模型分别对各个被控变量进行预测,制定锅炉燃烧系统的控制策略,提前进行设备调节,缩短了调节滞后时间,起到了节能减排的效果。

[0096] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0097] 实施例一

[0098] 如图1-图2所示,本发明提供了燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳系统,所述系统包括:锅炉燃烧-污染物治理系统层、知识-数据耦合建模层、模型参数识别优化层、梯级智能精准调控层;

[0099] 所述燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳系统流程如下,在知识-数据耦合建模层,通过基于锅炉燃烧-污染物治理系统层中全流程装置对污染物生成脱除机理,建立锅炉燃烧-污染物治理全流程多断面污染物浓度的生成和梯级脱除机理模型,结合锅炉燃烧-污染物治理系统层中历史运行数据和先进经验知识,进一步构建知识-数据融合驱动的多断面污染物浓度预测模型;

[0100] 在所述模型参数识别优化层,以目标被控制变量作为智能调控的目标,并构建优化问题,再根据优化问题的特点,采用PSO算法、WOA算法、粒子群-梯度下降算法、枚举算法进行模型参数辨识和优化求解,同时通过离线挖掘和在线迭代相结合对优化求解参数进行滚动优化求解,从而建立锅炉燃烧-烟气治理过程的工艺机理与多工况分段机器学习协同驱动的关键参数预测模型;

[0101] 通过梯级智能精准调控层对锅炉出口和污染物脱除系统多断面污染物浓度精准预测,通过分析不同工况(高负荷、中负荷、低负荷、突变升负荷、突变降负荷等)下锅炉低碳/零碳燃料掺烧量、锅炉段风机(一次风机、二次风机、引风机)频率、脱硝装置不同区域喷氨量、电除尘装置不同电场不同类型电源运行二次电压、湿法脱硫装置浆液不同循环泵组合及其循环泵频率和浆液pH关键调控参数对颗粒物、SO<sub>3</sub>、重金属多污染物沿烟气全流程梯级减排效果,获得不同污染物治理装置出口污染物排放浓度与关键调控参数对应关系,建立以能耗-物耗-污染物排放多目标协同的污染物脱除多装置控制策略,实现全流程污染物梯级优化控制并协同节能降碳。

[0102] 所述锅炉燃烧-污染物治理系统层由低碳/零碳燃料掺混系统、锅炉燃烧系统、脱硝装置、静电除尘装置/低低温电除尘装置/电袋复合除尘装置、湿法脱硫装置、湿式静电除尘装置组成;

[0103] 所述梯级智能精准调控层由锅炉燃烧预测控制模块、脱硝装置预测控制模块、电除尘装置预测控制模块、湿法脱硫装置预测控制模块、湿式电除尘装置预测控制模块和全流程梯级协同优化控制模块组成;

[0104] 所述锅炉燃烧系统被控变量包括:锅炉氧含量、炉膛出口压力和NO<sub>x</sub>浓度,所述烟

气治理装置被控变量包括总排口颗粒物浓度、总排口SO<sub>2</sub>浓度即脱硫装置出口SO<sub>2</sub>浓度、总排口即脱硝装置出口NO<sub>x</sub>浓度和氨逃逸浓度、总排口SO<sub>3</sub>浓度。

[0105] 实施例二

[0106] 本发明还提供了燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳方法,所述方法包括:

[0107] 基于污染物生成脱除机理,分析确定影响目标被控变量的运行参数,将所述目标被控变量的影响参数作为输入变量,以目标被控变量作为输出变量,构建锅炉燃烧-烟气治理系统的各个被控变量预测模型;分别对各个被控变量进行预测,提前获得各个被控变量的预测值,根据预测结果,构建目标被控变量的控制模块,制定锅炉燃烧系统和烟气治理装置的控制策略,提前调节影响目标被控变量的关键影响参数,实现目标被控变量的精准稳定控制。同时燃煤电厂超低排放系统通常包括锅炉燃烧系统、催化脱硝装置SCR、静电除尘器ESP、湿法脱硫装置WFGD及湿式静电除尘器WESP脱除设备。在运行过程中,每个系统针对NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、PM、SO<sub>3</sub>和Hg污染物都具有不同程度的协同作用,因此,在考虑协同脱除作用的基础上,建立了以能耗-物耗-污染物排放多目标协同的锅炉燃烧-污染物脱除系统调控策略,实现对超低排放系统运行全流程的统筹优化,为锅炉燃烧和污染物脱除关键装备的关键参数运行提供指导。

[0108] 如图2所示,作为一种优选地实施方式,针对某循环流化床锅炉氧含量、炉膛出口压力和NO<sub>x</sub>预测控制实施过程如下:

[0109] 步骤Sa1、以给煤量、一次风机频率、二次风机频率作为输入变量,以锅炉氧含量作为输出变量,利用输入变量的阶跃响应向量来实时预测氧含量的变化,建立氧含量浓度预测模型;

[0110] 所述氧含量浓度预测模型表达式如下:

$$[0111] \quad Y_c^*(k) = Y_{c煤}^*(k) + Y_{c一次}^*(k) + Y_{c二次}^*(k). \quad (1)$$

$$[0112] \quad Y_{c煤}^*(k) = A_{0煤} U_{煤}(k-1) + A_{煤} \Delta U_{煤}(k). \quad (2)$$

$$[0113] \quad Y_{c一次}^*(k) = A_{0一次} U_{一次}(k-1) + A_{一次} \Delta U_{一次}(k). \quad (3)$$

$$[0114] \quad Y_{c二次}^*(k) = A_{0二次} U_{二次}(k-1) + A_{二次} \Delta U_{二次}(k). \quad (4)$$

[0115] 式中:  $Y_c^*(k)$  为k时刻对未来P个时域长度氧含量未修正的总预测值;

$Y_{c煤}^*(k)$ 、 $Y_{c一次}^*(k)$ 、 $Y_{c二次}^*(k)$  分别为受给煤量、一次风机频率、二次风机频率影响下P个时域长度氧含量未修正的总预测值,P为滚动优化时域长度;U(k-1)为各变量在k时刻前N个时域长度的值,N为模型时域; $\Delta U(k)$ 为各变量在k时域长度对未来M个时刻的控制增量预测值,M为控制时域长度; $A_0$ 、A为各变量的动态矩阵,描述各个输入变量对系统响应的影响。

[0116] 步骤Sa2,为校正模型失配、环境干扰所造成的误差,利用实时信息对模块预测值进行修正,反馈修正过程如下:

$$[0117] \quad Y_c(k) = Y_c^*(k) + H[y(k) - y_c(k)]. \quad (5)$$

[0118] 式中: $Y_c(k)$ 为k时刻修正后的总预测值;H为反馈修正系数;y(k)、 $y_c(k)$ 分别为k时刻当前的氧含量实测值和预测值。

[0119] 步骤Sa3,将氧含量目标值与预测值的差值最小化来优化控制,k时刻优化性能指标用向量形式表示如下:

$$[0120] \quad J(k) = [Y_c(k) - Y_r(k)]^T Q [Y_c(k) - Y_r(k)] + \Delta U(k)^T R \Delta U(k) \quad (6)$$

[0121] 式中: $J(k)$ 为优化目标函数; $Y_r(k)$ 为目标被控变量控制目标值; $Q$ 、 $R$ 分别为目标被控变量预测误差权矩阵和关键参数控制权矩阵。

[0122] 令:

$$[0123] \quad \frac{\partial J(k)}{\partial \Delta U(k)} = 0 \quad (7)$$

[0124] 步骤Sa4,根据氧含量目标值确定二次风机的控制增量,实现氧含量的稳定控制,并根据氧含量的实测值进行实时反馈校正,输出优化控制增量表达式为:

$$[0125] \quad \Delta U(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q \{Y_r(k) - A_0 U(k-1) - H[y(k) - y_c(k)]\} \quad (8)$$

[0126] 步骤Sa5,将步骤S4输出的二次风机未来的频率调控指令,作为炉膛负压控制模块的输入量;动态工况下,通过建立线性回归模型分析一次风机频率变化量、二次风机频率变化量与引风机频率的关系,提前调节引风机频率;静态工况下,利用最小二乘法对PID控制器进行参数辨识,确定PID控制器初始参数值,提前给出引风机控制指令,确保炉膛负压稳定。

[0127] 稳态工况下,当输出炉膛出口压力处于设定范围内,则不需要调节引风机频率,当炉膛出口压力超出设定范围,则通过PID进行修正引风机频率。修正公式如下:

$$[0128] \quad u(k) = -0.0033e(k) + -0.0005 \sum_{i=0}^k e(i) + 0.00025 [e(k) - e(k-1)]$$

[0129] 式中: $u(k)$ 为PID控制器的输出引风机频率变化量; $e(k)$ 为炉膛出口压力目标值与实测值之差。

[0130] 动态工况下,通过拟合分析一次风机、二次风机、引风机频率的关系,确定引风机频率调控增量。拟合公式如下:

$$[0131] \quad \Delta L_{引} = 0.55518 \Delta L_{一次} + 0.60237 \Delta L_{二次} - 0.00135 L_{引} + 0.01363$$

[0132] 式中: $\Delta L_{一次}$ 为一次风机频率变化量; $\Delta L_{二次}$ 为二次风机频率变化量; $L_{引}$ 为引风机频率实测值。

[0133] 如图3所示,为基于氧含量和炉膛出口压力的协同控制与原有控制的实际运行效果对比图。原有控制下,烟气氧含量的波动范围为1.8%~3.0%,分布较为离散;本发明协同预测控制下,氧含量波动范围为2.3%~2.8%,分布更为集中,氧含量实测值与设定目标值之间的偏差均在±0.25%范围内。

[0134] 利用锅炉预测控制模块预测未来即将输出的二次风机频率调控量,结合锅炉运行的实际工况,提前实现对引风机频率的协同控制。原有控制下,炉膛出口压力波动范围为-180Pa~+105Pa,标准差为44.61Pa;本发明协同预测控制下,炉膛出口压力波动范围为-110Pa~-10Pa,标准差为12.86Pa,其中99%的炉膛出口压力实测值在设定目标值±45Pa范围内。相比于原有控制,协同控制下,二次风机和引风机均具有小幅度多频次的调节特点,调节较为及时,氧含量和炉膛出口压力波动幅度均减小,还可以避免风机大幅调节导致的电流冲高问题;协同控制下进一步降低了炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度、SO<sub>2</sub>、颗粒物浓度、重金属污染

物浓度的原始含量。

[0135] 与原有控制相比,协同控制下,锅炉单位产汽量耗煤节约了1.6%以上,单位产汽量风机耗电减少了2%以上。

[0136] 如图4所示,作为一种优选地实施方式,所述脱硝出口NO<sub>x</sub>浓度和氨逃逸被控变量预测控制过程如下:

[0137] 步骤Sb1、以锅炉负荷、给煤量、风量、烟气温度作为输入变量,以炉膛出口即脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度作为输出变量,建立基于分区分段脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度预测模型;

[0138] 所述炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度预测模型表达式如下:

$$[0139] \quad Y_N^*(k) = Y_{N煤}^*(k) + Y_{N风}^*(k) + Y_{c温度}^*(k) \quad (1)$$

$$[0140] \quad Y_{N煤}^*(k) = A_{0煤} U_{煤}(k-1) + A_{煤} \Delta U_{煤}(k) \quad (2)$$

$$[0141] \quad Y_{N风}^*(k) = A_{0风} U_{风}(k-1) + A_{风} \Delta U_{风}(k) \quad (3)$$

$$[0142] \quad Y_{c温度}^*(k) = A_{0温度} U_{温度}(k-1) + A_{温度} \Delta U_{温度}(k) \quad (4)$$

[0143] 式中:  $Y_N^*(k)$  为k时刻对未来P个时域长度炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度未修正的总预测值;  $Y_{N煤}^*(k)$ 、 $Y_{N风}^*(k)$ 、 $Y_{c温度}^*(k)$  分别为受给煤量、风量、烟气温度影响下P个时域长度炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度未修正的预测值,P为滚动优化时域长度;U(k-1)为各变量在k时刻前N个时域长度的值,N为模型时域;ΔU(k)为各变量在k时域长度对未来M个时刻的控制增量预测值,M为控制时域长度;A<sub>0</sub>、A为各变量的动态矩阵,描述各个输入变量对系统响应的影响。

[0144] 步骤Sb2,利用实时信息对模块预测值进行修正,反馈修正过程如下:

$$[0145] \quad Y_N(k) = Y_N^*(k) + H[y(k) - y_N(k)] \quad (5)$$

[0146] 式中:  $Y_N(k)$  为k时刻修正后的总预测值;H为反馈修正系数;y(k)、 $y_N(k)$  分别为k时刻当前炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度即脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度实测值和预测值。

[0147] 步骤Sb3、为了修正脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度模型预测存在的稳定偏差,计算未来某一段脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度预测结果与被控目标之间差值,采用特定系数进行修正,实现炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度即脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度实时精准预测。

[0148] 步骤Sb4、以锅炉负荷、脱硝区域运行温度、喷氨流量和脱硝装置入口NO<sub>x</sub>浓度作为输入变量,以脱硝装置出口NO<sub>x</sub>浓度作为输出变量,建立基于分区分段脱硝装置出口NO<sub>x</sub>浓度预测控制模型。

[0149] 步骤Sb5、将入口NO<sub>x</sub>浓度预测值作为前馈预报加入脱硝装置预测控制模块,输出喷氨流量的优化设定值,喷氨调节阀开度值由喷氨流量的测量值与优化值的偏差经过先进控制器计算得出,制定全工况多参数协调-串级先进控制策略实现脱硝出口NO<sub>x</sub>浓度和氨逃逸的稳定控制,并根据脱硝出口NO<sub>x</sub>浓度和氨逃逸的实测值进行实时反馈校正。

[0150] 作为一种优选地实施方式,所述总排口颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度预测控制过程如下:

[0151] 步骤Sc1、基于颗粒物和SO<sub>3</sub>在锅炉燃烧过程的生成机理及在炉渣和烟气中整理和粒径分布特性,建立烟气颗粒物和SO<sub>3</sub>生成浓度预测模型,实现除尘装置入口颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度以及质量分布的预测;

[0152] 步骤Sc2、基于静电除尘装置内电场电晕放电机理以及颗粒物和SO<sub>3</sub>荷电迁移机理,湿法脱硫装置内湍流、回流多物理场强化颗粒物和SO<sub>3</sub>捕集机制,湿式静电除尘器中细

颗粒和SO<sub>3</sub>凝结、团聚、荷电、迁移的强化机制,构建了除尘装置、湿法脱硫装置和湿式静电除尘器进出口颗粒物和SO<sub>3</sub>脱除全过程浓度及质量分布预测的机理模型;

[0153] 步骤Sc3、基于实际运行数据对步骤Sc1和步骤Sc2建立的颗粒物和SO<sub>3</sub>脱除全过程浓度及质量分布预测的机理模型进行修正,建立工艺机理与多工况分段机器学习协同驱动的颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度预测模型;

[0154] 数据修正模型构建方法包括基于梯度下降+粒子群算法的参数辨识方法以及基于注意力机制的长短期记忆神经网络算法;

[0155] 步骤Sc4、基于上述步骤建立的工艺机理与多工况分段机器学习协同驱动的颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度预测模型,采用静电除尘器/低低温电除尘器/电袋复合除尘器和湿式静电除尘器的能耗、总排口颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度作为智能调控的目标,并构建能耗和颗粒物和SO<sub>3</sub>浓度排放优化问题,再根据优化问题的特点,采用粒子群算法或者粒子群-梯度下降算法进行求解,从而获得不同运行工况下静电除尘器/低低温电除尘器/电袋复合除尘器和湿式静电除尘器最优二次电压设置方式,构建了颗粒物静电脱除装置分电场分室区不同类型电源的智能调控策略;

[0156] 所述能耗优化问题表述如下:

$$[0157] \quad \min \left( \sum_{f=1}^n W_f + \sum_{i=1}^m W_i \right)$$

$$[0158] \quad \text{s.t.} \begin{cases} \hat{c}_{out} \leq c_{limit} \\ U_{f,min} \leq U_f \leq U_{f,max}; U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max} \end{cases}$$

[0159] 式中,n为静电除尘器/低低温电除尘器/电袋复合除尘器的电场总数;W<sub>f</sub>为第f个电场的功率;m为湿式静电除尘器电场总数;W<sub>i</sub>为第i个电场的功率; $\hat{c}_{out}$ 及c<sub>limit</sub>为总排口颗粒物/SO<sub>3</sub>排放浓度预测值及限值;U<sub>f,min</sub>及U<sub>f,max</sub>为第f个电场的最小二次电压及最大二次电压;U<sub>i,min</sub>及U<sub>i,max</sub>为第i个电场的最小二次电压及最大二次电压。

[0160] 在构建智能调控策略过程中,为了保证算法的稳定性与收敛性,需通过预测一段时间内的被控变量的变化趋势,从而实行滚动优化策略,此外,也需要根据现场实际的运行情况,对预测模型进行在线校正。

[0161] 本发明在静电除尘装置上应用前后对比结果表明:在人工控制时,为了保证出口浓度的稳定达标,各电场基本都以最高的运行电压运行。此时各电场的电压电流均受到闪络控制。此时,不仅静电除尘装置能耗整体偏高,同时闪络的频繁发生也会对除尘器运行安全产生非常大的危害,严重的会导致阳极板损坏。此外由于闪络发生时常面临着瞬时的电压下降与电流上升,也会导致出口颗粒物浓度不稳定。在人工控制时,除尘装置出口浓度波动可达±5mg/m<sup>3</sup>。采用本发明智能调控方式后,除尘装置的能耗显著下降,在类似的工况下,能耗降至200-800kW。同时,由于运行电压距离闪络电压距离较远,在智能调控下,各电场的闪络次数降为0。同时,也意味着各电场的电压电流更加稳定,因此出口浓度也更为稳定,仅有±2mg/m<sup>3</sup>。

[0162] 进一步应用本发明的全流程梯级协同优化控制模块,优化前后的功率对比效果显示,总排口颗粒物和二氧化硫排放总浓度低于1mg/m<sup>3</sup>,且颗粒物和二氧化硫排放浓度波动≤±0.2mg/m<sup>3</sup>,同时对对比经验本发明应用后运行能耗可降低20%,对比最大功率运行可降

低42.0%；由于运行电压距离闪络电压距离较远，在智能调控下，各电场的闪络次数降为0，也意味着各电场的电压电流更加稳定。

[0163] 作为一种优选地实施方式，所述总排口SO<sub>2</sub>浓度被控变量预测控制过程如下：

[0164] 步骤Sd1、基于SO<sub>2</sub>在锅炉燃烧过程的生成和脱硝装置中SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>转化机理，基于机器学习算法建立脱硫装置入口烟气SO<sub>2</sub>生成浓度预测模型；

[0165] 步骤Sd2、基于脱硫装置内多吸收剂SO<sub>2</sub>脱除过程原理，构建了多吸收剂SO<sub>2</sub>脱除过程机理模型；

[0166] 步骤Sd3、基于历史运行数据采用PSO算法对燃煤烟气SO<sub>2</sub>生成-脱除机理模型进行了修正参数辨识，进一步基于LSTM网络构建SO<sub>2</sub>脱除过程数据修正模型；

[0167] 步骤Sd4、基于上述步骤建立的燃煤烟气SO<sub>2</sub>生成-脱除模型，采用出口SO<sub>2</sub>浓度和脱硫运行pH作为智能调控的目标，并构建优化问题，再根据优化问题的特点，采用枚举法、粒子群算法或者粒子群-梯度下降算法进行求解，从而获得不同运行工况下湿法脱硫装置最优循环泵及其频率调整策略；

[0168] 进一步优选，所述脱硫装置优化问题表述如下：

$$[0169] \quad \min \text{cost}(s_A, s_B, s_C, s_D \dots s_n) = s_A p_A + s_B p_B + s_C p_C + s_D p_D + \dots + s_n p_n$$

$$[0170] \quad s. t. \begin{cases} s_A, s_B, s_C, s_D \dots s_n \in \{0, 1\} \\ c_{\text{outlet}} < c_{\text{outlet, target}} \end{cases}$$

[0171] 其中，s<sub>A</sub>、s<sub>B</sub>、s<sub>C</sub>、s<sub>D</sub>...s<sub>E</sub>为循环泵A、B、C、D、n的运行状态，当循环泵开启时，运行状态为1；当循环泵关闭时，运行状态为0。p<sub>A</sub>、p<sub>B</sub>、p<sub>C</sub>、p<sub>D</sub>...p<sub>n</sub>为循环泵A、B、C、D...n的额定功率。c<sub>outlet</sub>为实际出口SO<sub>2</sub>浓度，c<sub>outlet, target</sub>为目标出口SO<sub>2</sub>浓度。

[0172] 在构建智能调控策略过程中，为了保证算法的稳定性与收敛性，需通过预测一段时间内的被控变量的变化趋势，从而实行滚动优化策略，此外，也需要根据现场实际的运行情况，对预测模型进行在线校正，具体步骤如下：

[0173] 步骤Sc401、设置出口污染物浓度SO<sub>2</sub>的约束条件，表示如下：

$$[0174] \quad \ell_{e1} = \sum_{i=1}^M r_{p,i} \cdot p(t+i) + \sum_{j=1}^P r_{e,j} \cdot \frac{\text{sgn}[w_{\text{limit}}(t+j) - \hat{y}_p(t+j)] + 1}{2}$$

[0175] 其中，r<sub>p,i</sub>是循环泵台数和频率权重系数；p(t+i)为各循环泵浆液量总和；r<sub>e,j</sub>为超标权重系数；sgn(·)为符号函数；w<sub>limit</sub>(t+kj)为出口污染物浓度SO<sub>2</sub>排放上限；M为控制时域；P为预测时域；

[0176] 步骤Sc402、为保证出口污染物浓度的相对稳定，以应对工况的快速突变，在优化目标中添加参考轨迹线与预测值的误差，参考轨迹设置需小于上式中的出口浓度限值，表示如下：

$$[0177] \quad \ell_{e2} = \sum_{j=1}^P q_j [w_t(t+j) - \hat{y}_p(t+j)]^2$$

[0178] 其中，q<sub>j</sub>为跟踪权重系数；w<sub>t</sub>(t+j)为排放目标；

[0179] 步骤Sc403、在步骤Sc402基础上，为保证控制过程能够收敛至目标值附近，需在优

化目标中添加终端误差,因此最终的滚动优化问题可表述为如下形式:

$$[0180] \quad \min J(t) = \sum_{i=1}^M r_{p,i} \cdot p(t+i) + \sum_{j=1}^P (r_{e,j} \cdot \frac{\text{sgn}[w_{limit}(t+j) - \hat{y}_p(t+j)] + 1}{2} + q_j [w_t(t+j) - \hat{y}_p(t+j)]^2) + V_f(x(P) - x_s, y_s)$$

[0181] 其中,  $\min J(t)$  为  $t$  时刻的目标函数;  $q_j$  为跟踪权重系数;  $w_t(t+j)$  为排放目标;  $r_{p,i}$  是循环泵台数和频率权重系数;  $p(t+i)$  为各循环泵浆液量总和;  $r_{e,j}$  为超标权重系数;  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数;  $w_{limit}(t+j)$  为出口污染物浓度  $\text{SO}_2$  排放上限;  $V_f(\cdot)$  为终端误差函数;  $\chi(P)$  为预测时域最后  $P$  时刻时计算得到的控制量;  $\chi_s$  为稳态优化后的控制量;  $y_s$  为稳态优化后的出口浓度。

[0182] 本发明应用后,在出口  $\text{SO}_2$  浓度目标设置为  $35\text{mg}/\text{m}^3$  时,相比于优化前,能耗可下降约  $40\%$ ,  $\text{SO}_2$  浓度稳定满足目标设定值且波动  $\leq \pm 0.5\text{mg}/\text{m}^3$ , 石灰石耗量降低  $5\%$  以上。

[0183] 作为一种优选地实施方式,基于锅炉燃烧-烟气治理过程全流程多装置梯级智能精准调控的思路,进一步构建了锅炉燃烧-多污染物脱除系统的梯级协同优化与变工况精准方法,获得了各断面污染物浓度分布和关键装置污染物脱除效率分配,进而沿着烟气流程分段提前给定脱硝装置氨水/尿素喷枪调阀控制指令、静电除尘装置多场多通道多类电源控制指令、脱硫装置石灰石浆液循环泵控制指令、湿式静电除尘装置多场多通道多类电源控制指令,通过锅炉燃烧系统关键参数调控耦合污染物脱除装置关键参数调控,全流程降低单位蒸汽煤耗、污染物排放量,实现了变负荷和变燃料工况条件下污染物排放浓度的高精度卡边控制,协同实现  $\text{SO}_3$  排放浓度  $\leq 1\text{mg}/\text{m}^3$ 、汞/砷/铅/镉/铬五种重金属总排放浓度  $< 20\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 同时烟气治理系统整体电耗降低  $20\%$  以上并协同节能降碳,氨水耗量降低  $20\%$  以上,石灰石耗量降低  $5\%$  以上,实现  $\text{CO}_2$  排放的有效下降,实现全流程的梯级减污降碳协同优化。

[0184] 实施例三

[0185] 为验证本发明成果的有效性,以某  $220\text{t}/\text{h}$  热电机组为对象,开展了燃烧-污染物治理全流程智能调控减污降碳系统的应用工业验证研究。对比分别使用原有控制和本发明成果的运行效果。本发明成果应用后,与原有控制相比,本发明成果应用后锅炉单位产汽量耗煤节约了  $0.38\text{t}/\text{h}$ , 单位产汽量风机(一次风机、二次风机、锅炉段的引风机)耗电减少了  $17.73\text{kWh}$ ; 氮氧化物脱除装置节省氨水耗量约  $0.043\text{t}/\text{h}$ , 空气阻力降低约  $200\text{Pa}$ , 折算成引风机电耗节约  $24\text{kWh}/\text{h}$ ; 颗粒物脱除装置节约电耗约  $26\text{kW}$ ; 硫氧化物脱除装置循环泵节约电耗约  $70\text{kW}$ , 氧化风机节约电耗约  $18\text{kW}$ , 系统阻力降低约  $200\text{Pa}$ , 折算引风机节省电耗  $24\text{kW}$ 。通过对使用本发明成果后一年的运行数据进行统计,与原有控制相比,锅炉单位产汽量耗煤节约了  $1.6\%$  以上,单位产汽量风机耗电减少了  $2\%$  以上,脱硝氨水平均消耗量减小  $40\%$  左右,电袋除尘系统能耗下降  $35\%$  左右,脱硫循环泵能耗下降  $25\%$  左右,氧化风机能耗下降  $30\%$  左右,测算单套超低排放智能调控系统每年可节约直接运行成本约  $380.88$  万元。

[0186] 表1本发明成果在某  $220\text{t}/\text{h}$  应用年节约成本测算表

装置	项目	年节能降耗量	单价	节约成本 (万元/年)
[0187] 锅炉燃烧系统	耗煤量	2280t	1000 元/t	228
	风机电耗	1100000 kWh	0.5 元/kWh	55
氮氧化物脱除装置	氨水耗量	361.6t	1200 元/t	43.39
	引风机(空预器段)电耗	237240.8kWh	0.5 元/kWh	11.86
颗粒物脱除装置	电耗	174519.8kWh		8.73
硫氧化物脱除装置	电耗	678237.6		33.9
总计				380.88

[0188] 在环境效益方面,本发明成果在保证NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、颗粒物排放浓度全时段稳定达到超低排放要求的同时,实现大幅削减物耗能耗,达到了节能、降耗和减排的目的。经长期运行验证,主要污染物稳定超低排放,出口污染物浓度波动幅度显著降低,氮氧化物脱除装置出口NO<sub>x</sub>浓度波动和硫氧化物脱除装置出口SO<sub>2</sub>浓度波动范围均减小70%以上。单套220t/h锅炉燃烧系统和污染物治理系统年可节省标煤约2923t(按照0.302gce/MWh折节标煤系数计算),测算年可减少二氧化碳量约8221t,在显著提高了锅炉燃烧系统和污染物治理系统运行稳定性、可调性,降低了运行成本的同时,实现了二氧化碳的协同减排。

[0189] 本说明书中各个实施例采用递进的方式描述,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处,各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。对于实施例公开方法的而言,由于其与实施例公开的系统相对应,所以描述的比较简单,相关之处参见方法部分说明即可。

[0190] 本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

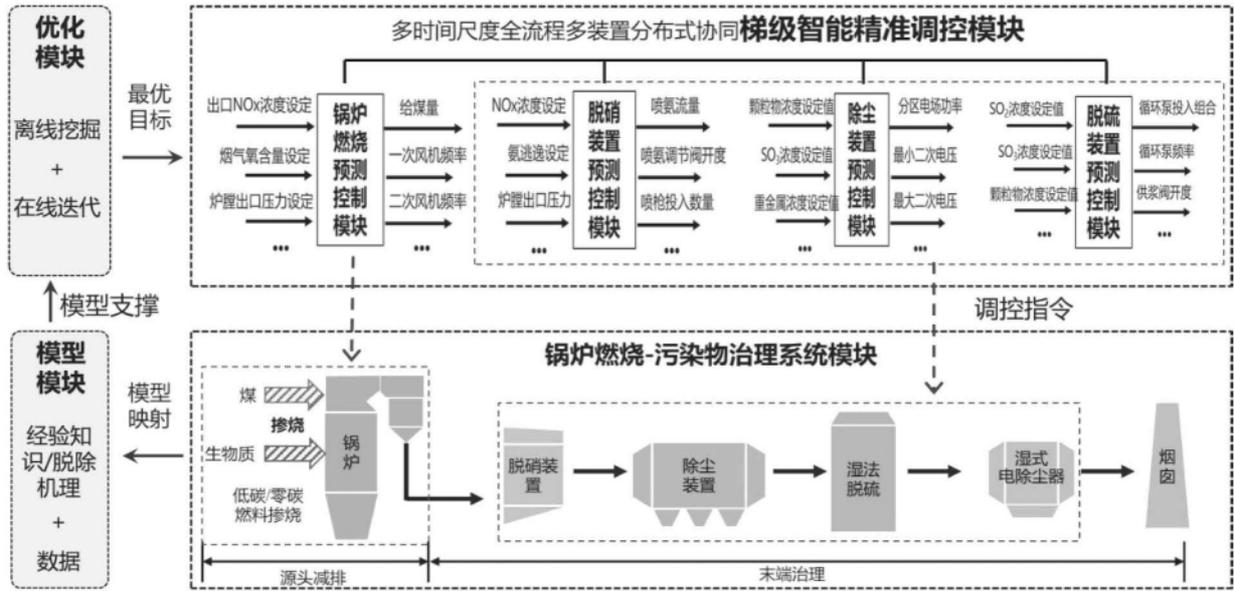


图1

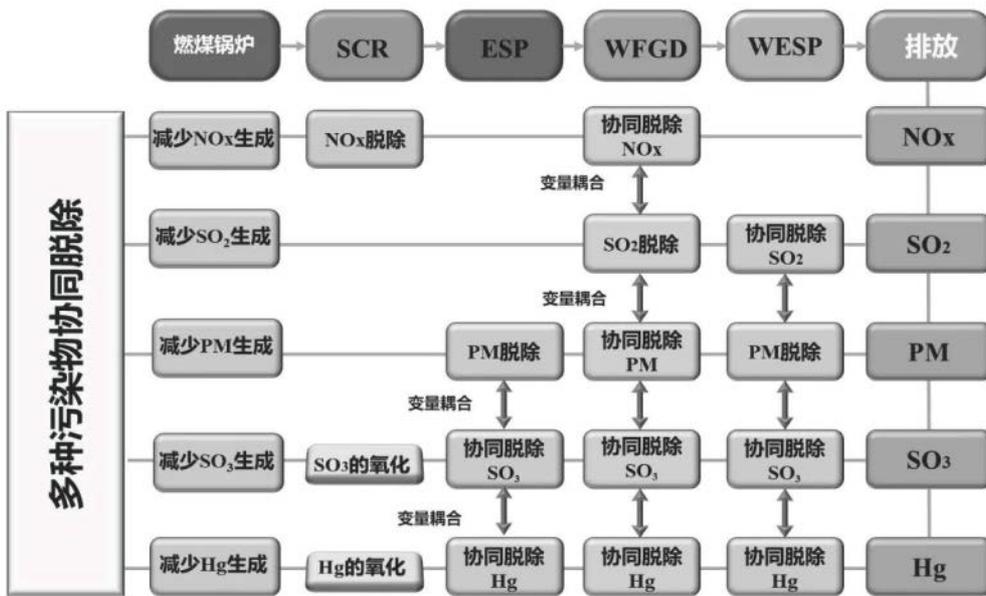


图2

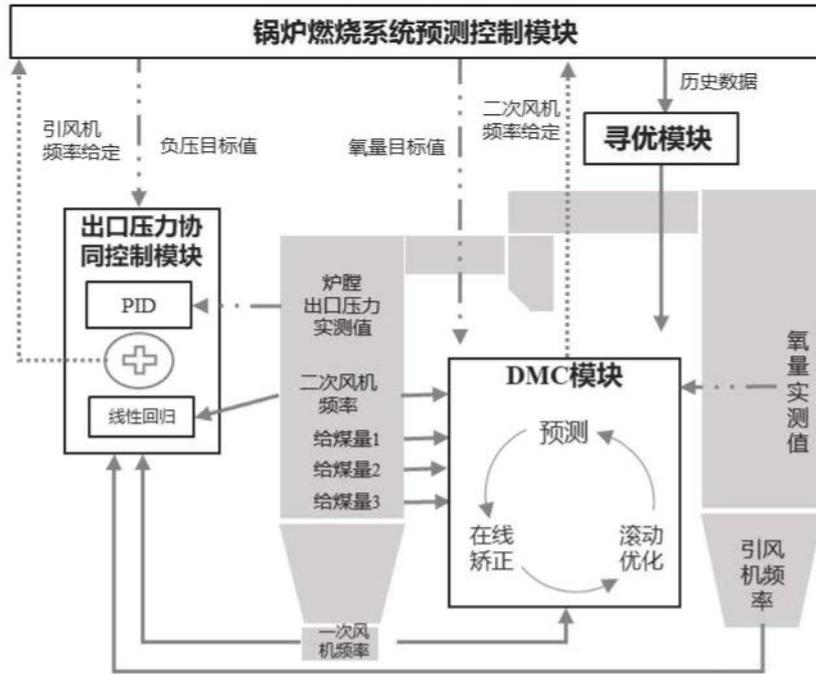


图3

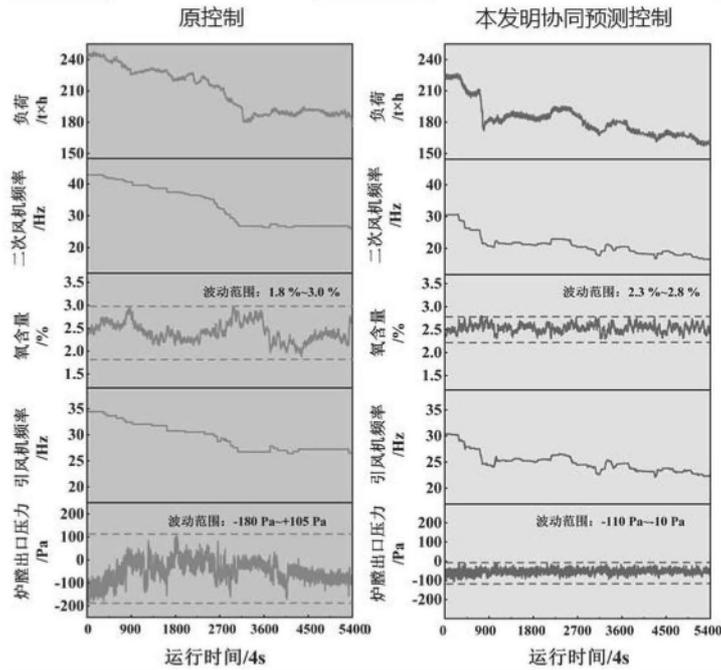


图4

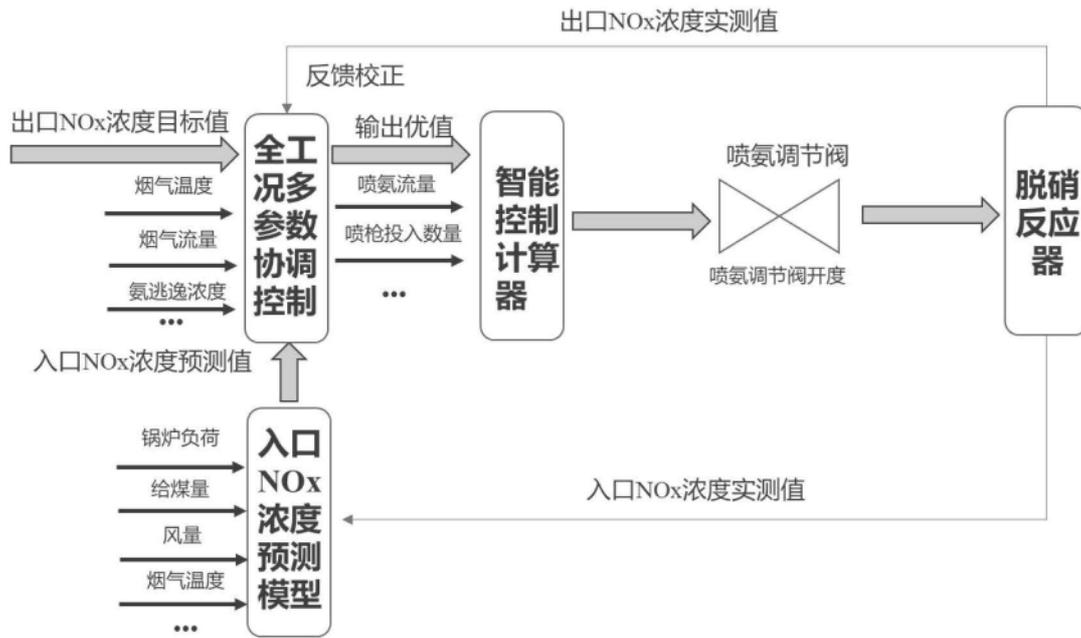


图5