

基于声学原理的炉膛内场监测系统原理与设计

Principle and Design of Furnace Internal Field Monitoring System Based on Acoustic Principle

赵瑞¹ 李志强¹ 刘柏林¹ 李振² 邱洪保²

Rui Zhao¹ Zhiqiang Li¹ Bolin Liu¹ Zhen Li² Hongbao Qiu²

1. 山西大唐国际云冈热电有限责任公司 中国·山西 大同 037000

2. 陕西岱南新能源工程有限公司 中国·陕西 西安 710000

1. Shanxi Datang International Yungang Thermal Power Co., Ltd., Datong, Shanxi, 037000, China

2. Shaanxi Dainan New Energy Engineering Co., Ltd., Shaanxi, Xi'an, 710000, China

摘要: 锅炉燃烧优化本质上是一个多目标优化问题。在保证污染排放不超标的前提下,追求尽可能高的锅炉效率;或者在保证锅炉效率一定的前提下,采用尽可能低的污染排放控制策略;或者在锅炉效率和污染排放之间达到最佳折中,使综合成本最低。基于声学原理的炉膛温度场和速度场的燃烧优化闭环控制系统能够有效提高机组运行效率,降低发电成本,显著降低锅炉污染物的排放,并能够保障深度调峰运行条件下锅炉安全运行。

Abstract: Boiler combustion optimization is essentially a multi-objective optimization problem. Under the premise of ensuring that the pollution emission does not exceed the standard, the highest possible boiler efficiency is pursued; Or under the premise of ensuring a certain efficiency of the boiler, adopt the lowest possible pollution emission control strategy; Or achieve the best compromise between boiler efficiency and pollutant emissions, resulting in the lowest overall cost. The combustion optimization closed-loop control system based on the acoustic principle of furnace temperature field and speed field can effectively improve the operating efficiency of the unit, reduce the power generation cost, significantly reduce the emission of boiler pollutants, and ensure the safe operation of the boiler under the condition of deep peak shaving.

关键词: 燃烧优化; 温度场; 动力场; 声波测温

Keywords: combustion optimization; temperature field; velocity field; sonic temperature measurement

DOI: 10.12346/peti.v5i1.7523

1 概述

在火力发电成本中,燃料费用一般要占 70% 以上,基于声学原理的炉膛温度场和速度场的燃烧优化闭环控制系统能够有效提高机组运行效率,降低发电成本,显著降低锅炉污染物的排放,并能够保障深度调峰运行条件下锅炉安全运行。

锅炉效率与污染排放之间的矛盾,锅炉排烟热损失和机械未完全燃烧热损失之间的矛盾,是目前电站锅炉燃烧系统存在的两对主要矛盾。如果要提高锅炉效率,使煤粉在炉内充分燃烧,则需提高炉内燃烧温度,使用较高的过量空气系数,结果会增加污染的排放。反之,则难以保证较高的锅炉

效率。同时,提高炉内燃烧温度以及使用较高的过量空气系数,可以降低机械未完全燃烧热损失,但是排烟热损失则会随之增加。此外,电厂入炉煤质变化频繁,也会显著增加系统燃烧系统调节的难度。

目前,电厂锅炉控制主要通过运行人员观察各控制仪表反馈数据,结合自己经验,人为控制燃烧的各个因素。燃烧系统是一个非线性的、多变量严重耦合的、复杂的问题,对一个目标的调节会矛盾地影响到其他目标的实现,属于多目标的优化问题。采用人工调节的方法,难以做到系统控制的标准化、最优化。

基于声学原理的炉膛温度场和速度场的燃烧优化闭环控

【作者简介】赵瑞(1985-),男,中国内蒙古通辽人,本科,高级工程师,从事电厂锅炉研究。

制系统通过系统工程的方法，积极、主动、科学地平衡燃烧的各个因素，使上述两对矛盾达到一个最优的平衡状态。

为保证系统的固有可靠性和稳定性，在设计时采取如下措施。

1.1 降额设计

电路组件在选用元器件时考虑其工作温度，应满足实际使用环境条件，分立元器件及集成电路按 0.5 降额因子设计，功率器件电源模块按 0.3 降额因子设计。

尽量选用了已成熟的模块或技术，主要包括结构部件、电气部件和软件模块等方面的内容。选用技术状态成熟的插件和元器件，提高系统可靠性，减少维修的可能性。各模块功能均高度集成，采用通用模块化设计，以模块组件的形式进行安装和维修。

结构设计时应尽量采用标准化、规格化、系列化的零件，减少结构零件种类，设备在安装时均为不同接口，防止设备连接安装时发生差错。

1.2 简化设计

尽量减少硬件，在设计中充分发挥软件的功能，电路设计中采用简化设计减少元器件数量，提高系统的可靠性，结构设计中充分利用标准化器件和已被定型的产品证明可靠的成熟的结构形式等。

2 系统原理

基于声学原理的炉膛温度场和速度场的燃烧优化闭环控制系统的模型如图 1 所示，系统采用在线动态自适应燃烧系统模型进行控制。图中输入端上部为存储于 DCS 中的机组运行数据。下部为炉内温度场、氧气浓度、速度场的实时监测数据。基于声学原理的炉膛温度场和速度场的燃烧优化闭环控制系统通过机组运行数据及炉内实时监测数据，实时调节输入端左侧各指标，对锅炉效率、排放氮氧化物浓度、再热气温等指标进行优化。根据需要，系统可工作在排放优先、效率优先、综合优先等工况。



图 1 基于声学原理的炉膛温度场和速度场的燃烧优化闭环控制系统原理图

该系统包括主机、可编程声波发射装置、声波发射滤波装置、功放装置、大功率高音声头、声波导、基准声波采样装置、高灵敏度麦克风、声波接收采样装置。其中，大功率高音声头、声波导、基准声波采样装置、高灵敏度麦克风、声波接收采样装置的数量，可根据现场及设备精度要求布置。每一个声波通道声波飞度时间的测量，均在接收端完成。每一个测温通道，首尾两端均同时布置声波发射装置及声波接收装置，以便完成正、反向声波飞度时间的采集。基准声波采样装置、声波接收采样装置采用 CAN 总线连接，可显著提高系统的可扩展能力，现场可根据需要，任意扩展采样通道的路数，而不用增加上位机硬件开销。可编程声波发射装置，可根据需要，编程输出 PWM 信号，工控机配合产生随机序列，控制声波发射装置 PWM 信号的通断，形成调幅调频声波信号，显著提升声波信号的互相关性能，进而提升检波精度，有利于提高声波飞度时间的测量精度。同一测温通道，首尾两端的声波发射装置同时发声，接收装置同时完成接收，两者发声频率不同，通过基准声波采样装置及声波接收采样装置中的带通滤波器完成区分，因炉膛空气动力场近似为恒定场，同时采样可在一定程度上提高空气动力场还原精度。炉内温度场监控系统采用声波测温系统，声波测温原理是基于声音的传播速度直接随介质温度而变化。

其原理如图 2 所示。

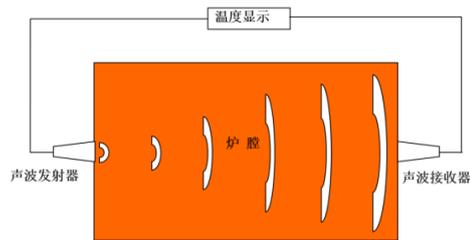


图 2 声波测温系统原理图

由热力学中气体方程和声学中的声波波动方程推导出声波传播速度和介质温度的关系：

$$C = \sqrt{KRT/M}$$

其中，C 为声音在介质中的传播速度；R 为气体常数；k 为气体的绝热指数；M 为气体分子量；T 为气体温度。

由上述波动方程，由于 R、k、M 均为常数，知道气体传播速度后，可求出气体温度。声波发生器发声后，在声波发生器近端及锅炉壁对侧远端安装的声波接收器采集到声波后，根据声波传输的时延及声波传输的距离，可以求出声波的传输速度，代入公式即可求出炉内空气温度。

为了还原炉内温度场，需设计多个声波发生器及接收器，当然，一个声波发生器发出的声音，可以被多个接收器接收，从而得出多条测温线^[1]。多通道声波测量装置布置图及现场安装图如图 2 所示。将锅炉内温度平面划分为若干个等温块，如图 3 左绿线所示，假定每个小区间内温度相等，编号为 w_{ij} ，其中， $(i, j) = (1, 1) \sim (m, n)$ 。则有：

$$\begin{pmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & \cdots & w_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_m \end{pmatrix}$$

式中, w_{ij} 表示每条测温线在第 (i, j) 个小区域内的长度, $(i, j) = (1, 1) \sim (m, n)$; f 表示声波在第 (i, j) 个小区域内的传播速度; τ_i 表示第 i 条测温线传输时延。

因测温线数目大于温度区间数, 方程组 2 为超定方程, 由最小二乘法, 可求得其最优解, 即可得到炉内给区域温度。使用温度场还原算法, 可得炉内温度场分布, 如图 3 所示, 温度场分布可在 DCS 系统显示。

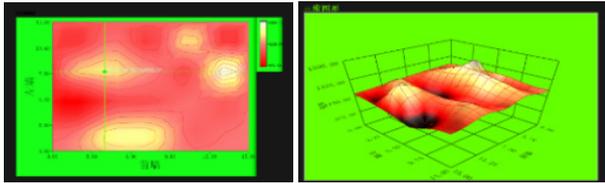


图 3 炉内温度场分布二维及三维还原图

炉内速度场监控系统原理如下:

由第 i 条测温通道正向飞度时间 τ_{i+} 和反向飞度时间 τ_{i-} , 由于炉膛内声场可近似为定常场, 故可求出第 i 条通道声源与接收器方向气体流动造成的声传播时间差, $\tau_v = |\tau_{i+} - \tau_{i-}|$, 如果 $\tau_{i+} < \tau_{i-}$, 则速度为正向, 反之为反向。该时差消除了声音传播速度本身的影响, 只有炉膛内空气速度的影响, 根据该时间差及声源与传感器距离, 可求出该方向上气体运动速度^[2]。

对于一般锅炉炉膛结构, 可用简化的四角切圆模型模拟炉膛内空气动力场状态^[2]。此时, 只要计算出四角切圆的圆心、长短轴长度、边缘速度几个量, 就可以还原二维空气动力场模型。通过层析还原法, 可还原三维空气动力场模型。

对于第 i 条测温通道, 传感器连接线方向由炉膛内空气流动引起的声波飞度时间差为 $\tau_i = |\tau_{i+} - \tau_{i-}|/2$; 其方向为声音传播速度较快的方向。

对于四角切圆锅炉还原平面内速度场, 需要知道如下 6 个参数, 即切圆圆心 (x_0, y_0) , 切圆长轴 a , 短轴 b , 切圆内外侧速度变换率 α 、 α' ; 假设炉膛几何中心为二维速度场几何中心, 以几何中心建立直角坐标系, 还原平面内二维速度场。假定 x 轴上一维速度函数曲线为折线, 则其速度值在 $x=0$ 时为 0, 在 $x=a$ 处达到最大, 折线内外两侧速度变化率分别为 α 、 α' , 则折线顶点处速度最大值为 $v_{\max} = \alpha\alpha$ 。

速度折线的函数表达式为:

$$v = \alpha x, |x| \leq a;$$

$$v = \alpha' x + a(\alpha - \alpha'), |x| > a;$$

切圆为椭圆, 方程为:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

该椭圆绕通过圆心的轴旋转形成的锥面即为二维速度曲面。

由于切圆速度场是由上述椭圆旋转而成, 所以场内各点的速度均与速度椭圆相切, 对方程求导数, 有:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{b^2 x}{a^2 y}$$

假设 θ 为速度矢量与 x 轴夹角, 则有:

$$\cos \theta = \frac{-a^2 y}{\sqrt{b^4 x^2 + a^4 y^2}}, \sin \theta = \frac{b^2 x}{\sqrt{b^4 x^2 + a^4 y^2}},$$

确定了速度场各点的速度大小和方向, 则有:

$$v_{\text{内}} = \alpha \sqrt{x^2 + \frac{a^2}{b^2} y^2}$$

$$v_{\text{外}} = \alpha' \sqrt{x^2 + \frac{a^2}{b^2} y^2} + a(\alpha - \alpha')$$

$$\cos \theta = \frac{-a^2 y}{\sqrt{b^4 x^2 + a^4 y^2}}, \sin \theta = \frac{b^2 x}{\sqrt{b^4 x^2 + a^4 y^2}},$$

通过该方程, 即可还原二维速度场。

重复上述步骤, 采用 CT 层析法, 即可还原三维速度场。

3 硬件设计

硬件开发的基本过程应遵循硬件开发流程规范文件执行, 不仅如此, 硬件开发涉及技术的应用、器件的选择等, 必须遵照相应的规范化措施才能达到质量保障的要求。这主要表现在, 技术的采用要经过项目组的评审, 器件和厂家的选择要参照物料认证的相关要求和规范, 开发过程完成相应的规定文档, 另外, 常用的硬件电路要采用通用的标准设计^[3]。

炉内温度场检测系统采样端采用 STM32G407 芯片, 完成调频声波发声、接收端声信号采集、组网通信等功能, 系统设计过程中, 考虑现场高温、高粉尘工作环境, 进行针对性设计。

显控模块包括显示窗口和操控按键组。显示窗口用于显示相关参数, 操控按键组用于设置工作模式和相关参数。电路组件主要包括电源管理单元和系统控制模块。电源管理模块用于接收外部供电并转换为各部分所需的电源类型。设备开机或指令可触发自检工作模式, 自检时间小于等于 15s。自检工作模式主要对设备内的供电、通讯、温控等进行检测, 系统结构采用一体化集成设计, 将主机内部各组件集成至同一壳体内, 并通过气密性设计, 实现检测仪主机充氮密封, 密封气压为 0.035MPa。为有效控制系统总体尺寸和重量, 实现便携性, 系统采用的方案通过无热化设计, 结构材料采用合金铝材料, 由于是对称结构, 因而在温度变化的情况下, 可以保持系统热胀的均匀性及对称性。系统电源输入为 12~36V, 为人体安全电压范围, 系统电源单元进行了过压和防反接保护设计, 维修时出现高压、反接会自动保护。各电气单机都进行了自检及故障诊断设计, 软件设计时充分考虑误操作可能性, 防止按键等误操作指令产生的不良影响,

同时具备不当操作的容错能力，误操作时不会对设备产生不良影响。所有电气单元、电缆、连接器等均有识别标记。接插件采取了防误插措施，保证维修过程顺畅^[4]。

在设计中尽量使用了不同大小的电气接插件，便于操作人员区分。在必须选用相同大小的接插件时，一方面通过采用不同的防差错键位来区分，另一方面通过插头、插座正反安装的方式来区别。

4 软件实现

产品上的软件、算法等均为自主研发，大量成熟产品的软件均经过软件测评中心测评，并获批大量的软件著作权，其中，在系统操控、补偿算法等方面，作者自主研发了各类测试软件，并进行了成熟的应用。

基于声学原理的炉膛温度场和速度场的燃烧优化闭环控制系统软件框图如图4所示。

5 结论

燃烧优化系统应用神经网络技术，根据锅炉燃烧过程历史数据，通过成熟的产品设计，实现对燃烧状况的有效优化，既可以提高系统的燃烧稳定性，又可以有效降低单位发电量的热耗值，实现节能减排的目的，具有显著的经济效益。

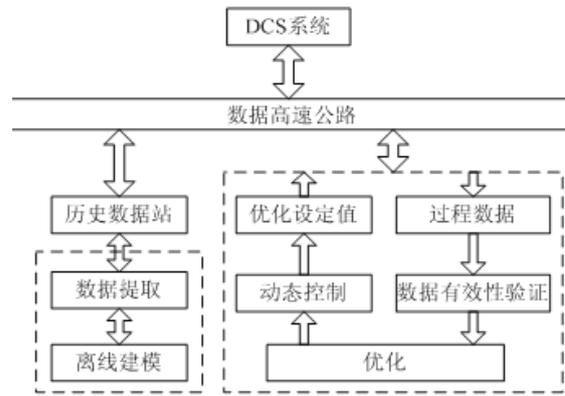


图4 锅炉燃烧优化软件流程框图

参考文献

- [1] 张力,赵亮宇.基于证据理论的炉膛火焰中心高度判别[J].电站系统工程,2014,30(3):21-23.
- [2] 龚和,刘安堂,方晓东,等.600MW超临界机组锅炉燃烧优化调整方法[J].华东电力,2010,38(9):1463-1465.
- [3] 费洪晓,黄勤径,戴弋,等.基于SVM与遗传算法的燃煤锅炉燃烧多目标优化系统[J].计算机应用研究,2008,25(3):811-813.
- [4] 朱晓莉.电站锅炉炉膛温度场重建算法研究[D].杭州:中国计量学院,2012.