评 述

三维、动态、实时数字化锅炉技术发展探讨

郑树, 周怀春*

清华大学热能工程系, 北京 100084

* E-mail: hczh@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2015-08-15; 接受日期: 2015-10-20; 网络出版日期: 2015-12-23

国家杰出青年科学基金(批准号: 51025622)和国家自然科学基金青年基金(批准号: 51406095)资助项目

摘要 锅炉作为发电厂的一个庞然大物, 是一个典型的三维空间分布系统; 而燃烧和热力过程又是一个处于外界需求不断变化、各种扰动持续影响的动态系统, 对其信息化、智能化技术的研发应建立三维、动态、实时数字化的框架思路. 三维设计技术目前仅仅用于实现火电厂高效的设计和技术移交, 其建立的电站设备和系统的三维数据库可作为三维、动态、实时火电机组技术研发平台. 炉内燃烧过程三维数值模拟研究已经发展到相当的程度, 一方面数值模拟需要研发更加精细的模型以更加准确地反映炉内实际燃烧工况, 另一方面数值模拟分析技术有待嵌入到发电机组实际运行分析和优化中. 基于辐射图像处理的炉内三维燃烧过程可视化检测技术正在从炉内三维温度场在线检测向炉内煤粉燃烧过程(煤粉浓度、燃尽度和燃烧放热量空间分布)三维全面可视化检测的阶段过渡, 为三维、动态、实时数字化锅炉技术发展奠定了良好的基础. 炉内三维燃烧过程可视化检测技术将为分析、诊断炉内燃烧过程故障和燃烧经济性, 以及锅炉受热面安全运行状况提供具有空间分辨能力的精细三维信息, 是锅炉信息化、智能化发展的一个重要方向.

关键词 电站锅炉, 三维系统, 数值模拟, 燃烧可视化, 燃烧优化, 锅炉受热面

1 引言

21 世纪人类已进入信息化时代. 各发电集团和企业已充分认识到, 大力推进信息化建设、实现生产过程高度自动化和管理现代化, 是企业持续实现安全经济生产的重要前提条件^[1]. 按照文献[1]的论述, 火电厂信息化包含两层含义, 即火电厂生产过程监控和企业管理需要的所有必要信息均应无重复地得以采集和通过数字网络共享, 信息的采集、处理和反馈应最大限度自动化; 二是采集和存储的海量信息

必须经过数据挖掘技术, 使信息浓缩和智能化, 成为有用的知识. 随着科学技术的发展, 火电厂监控系统由模拟仪表发展到了数字化、信息化系统, 使 DCS, PLC 和 SIS 等得到了广泛的应用, 并开始对现场总线、优化控制及故障预测等技术的研究及应用^[2]. 文献[3]阐述了我国在控制系统硬件和监控系统应用软件等方面取得的成果. 面对火电厂海量运行数据的增加, 数据挖掘技术可以实现模糊建模、关联分析, 实现在没有确定数学模型的前提下对机组经济运行的规则、模式进行有益的分析^[4]. 文献[5]根据当前火

引用格式: 郑树, 周怀春. 三维、动态、实时数字化锅炉技术发展探讨. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 20-35

Zheng S, Zhou H C. Discussion on the development of a 3D, dynamic and real-time digital boiler (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 20-35, doi: 10.1360/N092015-00238

电厂信息化和自动化技术的发展现状和趋势,提出了一个新的概念——火电厂厂级控制系统(plant supervisory control system, PSCS). 文献[6]提出,电厂的数字化实际上是指在电厂从建设到运行的整个生命周期过程中,实施完整的数字化设计、数字化采购、数字化工程建设以及数字化移交,同时在电厂监控系统的各个层次采用智能化、数字化的设备,在信息系统中采用相应的智能控制软件和管理软件,从而使得对整个电厂的监控和管理都是智能化、数字化和透明化的.

智能化火电站建立在高速通信网络的计算机网络基础上,通过先进的传感和测量技术、设备技术、控制方法以及决策支持系统的应用,将火电站的建设、监测、控制、优化、调度、生产、决策等智能化单元整合到一个综合的智能化体系中,从而提供全方位的安全防御措施以及资产的优化高效利用,使火电站更安全、稳定、经济的运行. 智能化电厂的构成如图 1 所示^[7]. 智能化电站实现的前提是电厂数字化,它需要数据库系统和计算机网络系统为支撑. 以关系数据库和实时数据库为基础的数据库系统是数字化电厂的基石. 智能化电站很大程度上依赖于真正数字化电厂的实现,以及先进的控制算法、通信、数据分析挖掘方法、可靠的工艺设备和众多现场标准的统一等作为强大的支撑,才能实现电站真正的智能化、数字化、透明化^[7]. 智能电站具有以下特征: (1) 智能化. 将智能控制理论如模糊控制、神经网络控制、专家控制系统、遗传算法等智能控制方法广泛应

用于火电厂自动控制,主动超前适应电网对负荷控制的要求,同时通过对机组的高精度控制,使机组能够运行在参数边界条件附近,从而达到节能降耗的目的. (2) 系统性. 智能电站应具有系统性的特征,即将发电机组、电厂及电网作为整体进行考虑和分析,构建新型一体化信息控制平台,实现电厂电气、热力系统及与电网的信息共享和数据流的双向沟通. (3) 信息化. 火电厂数字化、网络化是火电厂智能化和信息化的基础,电厂数字化是个手段,目的是为了信息化,而且信息化总是同数字化同步进行的. 火电厂数字化的广度和深度直接影响火电厂的智能化和信息化水平. (4) 经济性. 智能电站应具有运行经济性、环保电厂的特征,可以实现电厂的节能减排. 智能控制技术和现场总线技术的发展及在电厂的应用实现了过程控制中的实时监测、控制和优化运行,提高了机组运行效率^[8].

华电莱州电厂是我国第一个全寿期三维数字化智能火电厂,该电厂通过三维设计,将物理实体与数字模型完美结合,从设计到退役全生命周期均做到三维化、可视化和在线管控. 发电煤耗仅为 268.5 g/kWh, 低于全国平均水平近 30 g/kWh; 热效率达 45.59%, 供电厂用电率仅为 4.98%. 在排放方面,电厂采用封闭煤场,实现“零污染、零损耗”; 高效静电除尘器效率达 99.7%, 脱硫效率达 95% 以上,采用干除灰、干除渣技术,灰、渣及脱硫石膏全部综合利用^[9]. 这仅仅是在火电厂的设计以及运行维护方面采用三维智能技术,如果能在炉内燃烧监测以及控制优化上也采取智能化、信息化技术,经济效益将更为显著.

电站信息化、智能化技术发展的基础是获取更加丰富、全面、有效的电站生产过程的实时信息. 没有足够的基础数据,电站信息化和智能化将成为“无源之水”、“无本之末”. 本文侧重从信息获取的角度阐述一个新技术发展的理念-三维、动态、实时数字化锅炉技术.

2 三维、动态、实时数字化锅炉技术发展的必要性

2.1 燃烧过程三维非均匀分布特性与锅炉运行故障之间的关系

信息化、智能化发电站技术研发的目的是提高发

图 1 智能化电厂的构成^[7]

电机组运行的安全性、经济性,降低污染排放,并提高设备可靠性。锅炉炉膛空间较大,图2为某200 MW四角切圆炉内温度分布,燃烧过程存在明显的三维非均匀分布特性^[10],锅炉运行中发生影响安全运行的故障多与这种三维分布特性相关。燃煤电站锅炉结渣是影响锅炉安全经济运行的重要问题^[11],锅炉一旦出现结渣,轻则使受热面传热不良,排烟温度升高,降低锅炉效率;重则使燃烧工况恶化,迫使锅炉降负荷运行。如果遇到大块炉渣落下时,可能会砸坏水冷壁管,并影响正常出渣。锅炉的结渣特性与煤种、炉膛燃烧温度、炉内燃烧空气动力场的组织有密切关系。炉内气流携带熔渣冲刷到受热面是结渣的必要条件,这与锅炉燃烧系统的结构、喷燃器角度方位、运行调整都有关系。因此,炉内空气动力场的组织,对锅炉结渣具有重要的影响。炉内空气动力场不良,火焰偏斜,不仅燃烧不完全,而且出现局部还原性气氛、气流刷墙和局部高温等现象,极易引起受热面结渣^[11]。对超临界和超超临界锅炉而言^[12],减小沿屏宽方向的吸热偏差便成为超临界锅炉在运行中减小温度偏差的主要手段。由于过热器和再热器的温度水平高,如果同屏管间热偏差较大,即使没有达到超温爆管的程度,也会使管内氧化皮的生成速率增大。需要研究有效的燃烧调整、优化运行的措施,使锅炉在运行中始终保持小的吸热偏差,以防因过热器或再热器同屏管间热偏差过大而发生超温爆管事故。在锅炉的运行过程中,锅炉“四管”经常会出现磨损、蠕变、腐蚀、疲劳损害以及焊口的泄漏,因此,在锅炉机组的非计划停用原因中,锅炉“四管”爆漏

一直居于首位^[13]。锅炉“四管”爆漏故障一般是三维炉膛空间中二维炉壁表面局部发生的现象,具有较强的空间选择性。因此,只有具备炉内三维空间分辨能力的信息分析系统才能对锅炉“四管”爆漏故障进行有效的预防。

2.2 锅炉及发电机组运行数据分析及优化

随着电站数字化技术的广泛应用,面对这种海量数据的增加,用传统的统计分析手段已难以满足要求,这些数据从各方面、各层次和各环节详细和深入地描述了电站系统本身在各种条件和情况下的属性。如何筛选剔除大量无用或者干扰性的数据,这对于智能化电厂的真正实现非常重要,而数据挖掘技术则为解决这一问题创造了条件。

数据挖掘过程可分为4个部分:数据采集、数据预处理、数据挖掘以及结果的解释评估^[14]。数据预处理技术则是其中最重要的环节,在过去10年里该技术已经得到广泛的研究^[15],许多诸如 Infonatica 和 Data Joiner 的商业产品已经得到成功的应用。常用的有:数据清理技术(data cleaning)可以去掉数据中的噪声,纠正不一致;数据集成技术(data integration)将多个数据源合并成一致的数据存储;数据变换技术(data transformation)规范化可以改进涉及距离度量的数据挖掘算法的精度和有效性;数据归约技术(data reduction)可以通过聚集、删除冗余特性或聚类等方法来压缩数据。这些数据预处理技术在数据挖掘之前使用,可以大大提高数据挖掘模式的质量,降低实际挖掘所需要的时间。文献[16]对数据挖掘中数据预处理

图2 200 MW 四角切圆锅炉温度场分布^[10]

技术应用到电厂做了初步的尝试, 证明了将数据预处理技术用于电厂 DCS 数据分析的可行性和优越性.

有了强大的数据分析方法之后, 建立详细的数学模型优化锅炉燃烧并提高锅炉热效率则是数字化锅炉的优势体现. 锅炉热效率是反映锅炉运行经济性的一项非常重要的技术经济指标. 在电站锅炉性能鉴定、日常运行方式评价、燃烧工况调整等情况下, 都需要对电站锅炉设备进行不同运行工况的热效率试验. 通过这些试验, 可确定锅炉运行的经济性、查找锅炉的节能潜力、分析影响锅炉运行经济性的主要因素, 为电厂改进运行管理、提高能源利用率提供科学的依据^[17]. 可以这样说, 信息化、智能化火电技术必须具有完善的在线评价分析机组运行经济性的能力, 以保障机组高效经济运行.

由于锅炉设备结构庞大, 运行条件复杂, 燃料性质多变等因素, 建立电站锅炉排放特性的函数模型难度极大. 文献[18]为满足电站锅炉高效低污染燃烧优化的需要, 采用神经网络模型作为分析手段. 以入炉总煤量 1 个和入炉总空气量 1 个表示锅炉热负荷与燃烧氧量对燃烧特性的影响, 采用 6 个二次风门开度值表示 6 层二次风的影响, 2 个燃尽风开度表示投用 2 层燃尽风的影响, 二次风箱与炉膛之间的差压作为 1 个输入参数表示其对二次风和燃尽风出口速度的影响(上述 11 个输入量共同表示配风方式与局部燃烧氧量的影响), 5 台磨煤机通风量和 5 台给煤机开度对应着煤粉和一次风沿炉膛高度方向的分布(上述 10 个输入量表示炉膛燃烧分布对 NO_x 排放特性的影响). 除了煤种和其他参数外, 燃料和空气供给部分就有 21 个输入参数, 网络模型的输入层结点共 30 个, 建立的模型结构如图 3. 对这样一个多输入的燃烧系统, 对应炉内典型的分布参数过程, 这个分布参数过程实际上就是一个三维系统. 燃烧经济性分析模型和优化参数面对的将是多达上百个参数影响下的炉内过程. 燃烧优化模型研究方法众多, 实用的模型总是力图采用简单几个参数、采用简单的分析方法实现

目标, 往往效果受限, 根本上是因为多输入、大空间三维分布参数的炉内燃烧过程必须采用接近真实炉况的分析模型和方法.

3 三维、动态、实时数字化锅炉技术发展的基础

3.1 发电厂三维设计技术

按 2000 年示范电厂的“先进、实用”原则, 电厂自动化系统分为 3 个层次, 最上层(第一层)是监控、信息管理层, 第二层是过程控制层, 第三层是设备、元件层^[19]. 从现在整个电厂的管理和监控情况来看, 第二层次过程级已基本实现了智能化和数字化, 这一级着重考虑的实时性和可靠安全性. 在第一层监控、信息管理层和第三层设备、元件层数字化实现的深度、成效还很不够, 是大有文章可做的. 文献[19]提出在现阶段切实可行的是引入三维技术手段应用于设计过程、施工和运行管理过程, 给实现数字电厂提供技术保证. 目前, 三维技术应用设计工作主要在以下几方面体现其作用: ① 建立三维模型, 立体感强, 优化设计十分方便; ② 碰撞检查, 三维模型具有精确的立体坐标和属性, 能检查出所有的碰撞, 以前靠人工检查, 无法避免工程的“碰”、“漏”现象; ③ 自动生成二维图, 在其设备、管道、管件均有与三维模型中相应部分相同的属性; ④ 材料汇总功能, 由于有了属性连接, 可准确统计材料, 特别是管材和电缆长度等, 不会出现设计中少开或多开材料问题.

三维技术应用于工程施工管理和电厂运行、维护主要在以下几方面体现其作用: ① 可协助施工及安装单位制定正确的施工安装程序; ② 安装部分可使用自动配管程序进行最佳配管, 提高施工效率; ③ 有了三维模型, 电厂管理人员对全厂的设备布置更直观、更立体感, 对设备、系统管理参数化维护检修人员可使用三维功能指导, 实现对设备无碰撞检修, 更有序、更方便设备及系统管理和维护^[19]. 一般来说, 电厂三维(3D)设计系统就是利用三维设计软件与技术, 在计算机(一般在服务器)上构建电厂内的设备、管道、电气、消防、暖通, 结构件等多专业的三维实体模型, 再对所构建的全部实体模型或有选择性地 进行干涉(碰撞)检查. 三维设计技术的实际应用, 彻

图3 锅炉 NO_x 排放与效率响应特性的模型结构^[18]

底改变了以 CAD 技术为主的传统平面二维图设计模式, 使现有的设计理念、方法、以及计算程序、设计组织管理等设计全过程都发生了较大的变革^[20]。

国内涉足电厂三维模型设计最早的是广东电力设计院, 该院 1994 年与美国 GEC-A 公司合作, 在广东岭澳核电站就选用了美国 Intergraph 公司的 PDS 软件进行三维模型设计。1999 年 5 月全国六大直属院和山东、浙江、河北等 9 个设计院在通过几年的考察和酝酿后采用集体选择、分别购置的方式引进了美国 Intergraph 公司 PDS 软件新版本, 浙江电力设计院在体现 2000 年示范厂设计思路的长兴发电厂技改工程进行了实际应用, 收到了满意的效果。此外, 湖南省电力设计院通过由湖南电力集团公司总工带队组织的国外考察, 经过综合比较后, 于 2000 年 12 月份引进了英国 Cadcentre 公司的 PDMS 软件^[21]。2001 年 5 月新疆电力设计院引进了英国 AVEVA 公司开发的 PDMS 系统(plant design management system)^[22]。目前国际上普遍认为功能相对较强、应用较广泛、技术服务相对较好的工厂三维设计系统软件共有 4 家, 除上述国内电力设计单位引进的 2 家外, 还有美国 Benily 公司的 Plantspace 和美国 Autodesk 公司的 Autoplant 软件产品^[21]。

随着计算机技术的发展, 使工程设计信息集成系统变得可行。目前, 利用电厂三维(3D)设计系统的三维设计是整个电力工程设计信息系统构建的发展趋势。如果把三维设计技术和其它专业数据库及专业软件集成起来, 几乎可以使所有的电厂设计信息化, 实现数据资源在工程设计中的充分共享, 是数字化电厂概念的一个重要部分^[20]。三维设计技术的应用为研发三维、动态、实时数字化锅炉技术奠定了良好的基础。

3.2 电站锅炉炉内三维燃烧过程建模分析技术

电站锅炉炉内煤粉燃烧是一个复杂的物理、化学过程, 涉及到多相流动、传热传质和燃烧等多个学科, 对该过程进行严格的数学描述和理论解析十分困难, 而对这一过程的详细认知对发展适用于电站锅炉的高效低 NO_x 燃烧技术有重要意义。目前实际工业现场主要通过冷热态试验对锅炉燃烧特性和优化调整方法进行研究^[23~26]。随着数值模拟技术的迅猛发展, 近年来它已经成为一种重要的燃烧过程的研究方法和辅助工具, 被广泛应用于电站锅炉的辅助设计和

优化中。燃烧过程的数值模拟科学和技术的发展, 不仅加深了人们对燃烧过程的认识, 也使得人们对燃烧过程控制的技术得到不断的提高, 使得该技术在燃烧的工程应用中发挥着越来越重要的作用^[27,28]。燃烧过程的数值模拟技术已经被广泛的应用于半工业实验炉^[29~32]、切圆燃烧锅炉^[33~35]、墙式燃烧锅炉^[36,37]煤粉燃烧过程的模拟和优化中, 甚至在煤的流化床燃烧和富氧燃烧以及煤气化和液化等领域的研究中也发挥十分重要的作用^[38~42]。

文献[43]采用 FLUENT 6.3.26 对一台 200 MW 多燃料切圆燃烧锅炉过程建立了计算流体动力学(CFD)模型。该锅炉为 WGZ670/13.7-8 型超高压中间再热、自然循环汽包炉, 以烧煤为主, 掺烧焦炉煤气 COG 和高炉煤气 BFG, 采用中间储仓式热风送粉, 设计煤种为晋东南贫煤。炉膛深 10.8 m, 宽 11.92 m, 汽包中心标高为 55.5 m, 燃烧器采用四角布置, 双切圆燃烧。用气相燃烧的涡耗散模型模拟三燃料燃烧系统的煤粉、高炉煤气(BFG)和焦炉煤气(COG)燃烧系统。采用的离散网格单元数在 400000~1000000, 图 4 给出了 3 个不同截面处网格划分明细。这意味着数值模拟能够离线给出炉内几十万、几百万个离散单元的燃烧工况参数的详细分布, 相当于几百万组炉内分布参数。以这样的空间分辨率的参数分布描述方法, 才有可能对锅炉燃烧过程的细节进行接近真实工况的描述, 这样的信息系统才能对炉内燃烧工况分析和诊断给出切合实际的技术支持。

在电站锅炉煤粉燃烧过程的数值模拟中包含了 很多模型(比如挥发分双平行竞争反应模型、煤焦燃烧动力扩散反应模型、颗粒跟踪 DPM 随机轨道模型、气固耦合模型、氮氧化物模型等), 这些模型涉及到很多经验参数的取值, 只有当参数选取在经验范围内

图 4 不同截面处的网格划分

(a) $y=5.96\text{ m}$; (b) $z=10.4\text{ m}$; (c) $z=22.3\text{ m}$ ^[43]

才有效,而每一个参数的取值都会对模拟的最终结果产生影响.那么怎么验证模拟结果的正确性呢?第一就是网格无关性的验证,排除网格对计算结果的影响.图 5 针对这台 200 MW 电站锅炉进行了 4 种网格数(452010, 658884, 809868 和 948972)的模拟计算,沿炉膛两个高度方向($z=10.34$ m 和 $z=7.77$ m)对比了烟气的温度值和速度值,结果表明网格数 809868 和 948972 相似度最高,因此 809868 网格数适用于该炉膛的模拟.除了网格无关性的验证,还需要进行同等条件下模拟计算值与现场实测值的误差计算,以此验证模型的准确性.图 6 在 3 个工况沿炉膛高度方向下对比验证了模拟计算的温度值与实测值,结果表明最大误差为 5.46%.此外,文献[43]还验证了出口氧含量、氮氧化物以及飞灰含碳量,证明了所用模型中各个参数选取的合理性.

3.3 炉内燃烧三维可视化检测技术

3.3.1 三维燃烧可视化的研究现状

很多工作采用基于视频的方法监视实际火焰,其结果已经验证了工业应用的可行性^[46].由于火焰

图像是成像方向路径上的热辐射传递信息的累积效应,图像信息的解读如果不和热物理量场分布的重建分析相结合,火焰图像信息用于燃烧过程检测研究的深度就很有限.为了挖掘辐射图像中包含的热物理量场(温度、辐射特性等)空间分布的信息,很多研究工作采用光学层析重建技术估计工业炉膛中的空间温度分布^[10,47-50],图 7 为双炉膛内安装的三维温度场可视化检测系统^[44].低成本、高空间分辨率 CCD 成像技术和数据处理技术促进了这项技术在实际火焰诊断中的应用.发射层析技术仅仅需要探测火焰自身发射的热辐射信息,避免了外加辐射源,因此技术使用的局限减小到了最低程度,其应用领域明显扩大了.Zhou 等人^[51]通过蒙特卡洛方法建立辐射图像和炉内温度场之间的关联模型,将 Tikhonov 正则化方法引入三维温度场重建算法中,模拟结果证实其具有良好的抗测量误差和模型误差的干扰的能力^[52],随后开展了燃煤电站锅炉炉内二维、三维温度场可视化的实验研究^[10,53],文献[54]描述了基于图像处理的炉内三维温度场检测方法的基本原理.在一个复杂三维系统的辐射特性参数已知的条件下,从三维辐射

图 5 网格无关性测试

(a) 烟气速度分布; (b) 烟气速度分布; (c) 烟气温度分布沿线 1 ($x=0\sim 10.8$ m, $y=5.96$ m, $z=10.34$ m); (d) 烟气温度分布沿线 2 ($x=0\sim 10.8$ m, $y=5.96$ m, $z=7.77$ m)^[43]

图6 沿炉膛高度方向平均温度的对比^[43]

系统的边界出射辐射强度信息中, Liu 等人^[55]利用共轭梯度法模拟重建出了系统的三维温度分布。这个

阶段的工作基本上是在炉内介质辐射特性参数分布已知(或用先验的平均值给定)的条件下重建温度场,将辐射强度图像的变化归结为炉内温度水平及其分布的变化。很显然,忽略炉内辐射特性(主要由炉内燃烧介质的温度、成分和其浓度决定)的变化与炉内实际燃烧过程相差较大,也带来了温度场重建结果的误差。

基于火焰辐射图像处理的温度场与辐射特性参数同时重建问题从本质上属于辐射传递逆问题的一种^[56],其难点在于如何实现温度场与辐射特性参数的解耦。目前常用的解耦方法为最优化方法,即通过优化边界辐射信息的计算值和测量值,使两者之间的误差达到最小来获得对温度场及辐射特性参数的最佳逼近。Wang 等人^[57]采用代数迭代重建算法从火焰图像提取的单色辐射强度分布中同时求解二维炉膛截面温度和烟黑浓度分布。Zhou 等人^[45,58,59]通过增加边界辐射温度信息作为检测量输入,弥补了单一检测量在同时重建问题上的不足。通过利用边界辐射温度信息重建炉膛温度场,利用边界辐射强度信息重建炉膛辐射参数,两者交叉迭代,实现了对二维截面温度场及介质吸收系数、散射系数、壁面发射率的同时重建,如图8所示。Liu 等人^[60,61]利用共轭梯度

图7 炉膛火焰检测装置^[44]

图8 二维截面温度场及辐射参数的同时重建

(a) 二维炉膛网格划分; (b) 4个角获取的温度分布^[45]

法与一维搜索法相结合的混合方法, 根据边界表面的出射辐射强度计算吸收、发射、非散射、灰性一维半透明厚平板的非均匀温度分布与均匀的吸收系数。

3.3.2 炉内燃烧三维分布同时重建的难点

精确的热辐射传递方程是三维空间通往二维图像的桥梁, 作者所在团队提出 DRESOR 法, 通过对 READ 法进行改进, 采用蒙特卡洛法计算了介质和壁面发射的被介质散射和壁面反射的能量分布, 实现了炉内复杂辐射传递方程的精确求解^[62]。但是因为实际检测条件的限制而不能从多维分布参数对象中获得足够多的低维投影信息, 且从低维信息中重建高维分布信息的问题本身就是一个具有挑战性的理论问题。物理空间的多维信息分布本身具有某种平滑性, 这是各种正则化方法构造的物理基础。处理有限观察投影的不适定问题, 大多数研究工作集中在先进的具有理想性能的图像重建算法, 包括吉洪诺夫型正则化 (TR)^[63-65]、最小交叉熵 (MCE)^[64]、反投影 (BP)^[66,67]、代数重建 (AR)^[68]、全变差 (TV)^[69,70]、极大熵 (ME)^[71] 和极大似然 (ML)^[72] 重建算法。本文作者团队提出了一种非相关虚拟投影信息构造方法, 从而有效增加了检测信息的数量, 提高了从低维信息中重建高维分布信息的能力, 图 9 给出了该方法的重建效果并对比了源项分布。这项成果对一般反问题求解都有借鉴作用^[73,74]。

温度场重建的精确度依赖于辐射参数的逼近程度, 两者的相互耦合决定了同时重建问题的复杂性。

利用炉膛边界处的单色辐射强度重建温度场和辐射特性参数的方法中, 温度分布与辐射参数的变化均能够引起边界单色辐射强度的改变。在边界上的检测信息可以包含不同颜色或辐射波长下的辐射强度, 如果同时引入两个波长下的单色辐射强度图像, 结合正则化方法和最优化方法, 就能够得到一种温度场与辐射特性参数的同时解耦重建方法。

3.3.3 三维燃烧可视化的未来发展

实际炉膛内部辐射特性参数是非均匀分布, 炉内燃烧火焰是由多个颗粒组成的弥散系, 颗粒群中颗粒的几何特性和光学常数直接影响颗粒群的辐射特性, 由于不同燃烧过程产生的颗粒物组成、粒径分布和其形状的不同, 造成燃烧系统三维空间中辐射特性参数分布不均匀, 因此重建辐射参数的空间非均匀分布对描述、甚至理解流动、燃烧的特性有重要作用。

对煤粉燃烧过程而言, 燃烧介质的辐射参数正比于煤粉浓度, 辐射特性参数的空间分布相当于煤粉浓度在空间的三维分布, 也就是煤粉燃烧过程和燃尽度在空间的三维分布。这是燃烧三维可视化检测目前正在努力能够达到的程度。炉内燃烧三维可视化检测技术是一种将锅炉三维设计技术与燃烧过程三维数值模拟技术相结合的一个重要桥梁, 是实现三维、动态、实时数字化锅炉技术的关键。

3.4 基于三维燃烧检测的优化控制

传统的火电机组协调控制中, 从燃料入炉到实

图9 重建结果对比

(a)辐射源项分布; (b)不加虚拟像素的重建结果; (c)非相关虚拟投影信息重建结果; (d)误差对比^[73,74]

发功率, 是典型的“快-慢-快”的过程^[75]. 现有的火电机组缺乏充分考虑炉内燃烧及水冷壁和过热器/再热器传热过程特性的机组负荷控制新技术. 目前先进的机组协调控制策略——直接能量平衡(direct energy balance, DEB)^[76]——仅仅考虑锅炉出口、汽机进口蒸汽携带的能量和机组发电负荷需求之间的平衡, 没有充分考虑燃烧过程放热和将其传递给汽水系统阶段的时间延迟, 导致机组负荷控制性能难以进一步提高. 由于火电机组是一个多级能量转换系统, 主要包括从燃料进入炉膛到释放出辐射能量(快)、通过导热、对流等方式将辐射能量进一步传递到锅炉出口蒸汽(慢)、蒸汽进入汽轮机并带动发电机发出电力(快)的过程, 可看作是两头快、中间慢的过程. 现行的机组负荷控制策略还没有有效的办法克服中间慢的过程的影响, 导致机组变负荷运行能力和机组运行热经济性的提高受到制约^[54].

从燃料量变化到蒸汽压力响应是一个纯延迟、大滞后的对象^[77], 虽然试图通过热量信号(蒸汽流量和汽包压力随时间变化率的加权和)来快速反映入炉燃料量的变化^[78], 但热量信号本质上仍然属于锅炉汽水侧的参数, 其滞后特性并没有根本变化, 实际检测结果也说明汽包压力和主汽压力几乎同时变化^[79]. 因此热量信号并不能作为快速消除燃料侧扰动的有

效手段. 已有研究将动态矩阵预估控制方法^[80]、大林算法^[81]、模型参考适应算法^[82]、 H^∞ 控制^[83]、神经网络^[84]、智能控制^[85]、鲁棒控制^[86]、自主控制^[87]、基于模糊模型的控制^[88]、预见控制^[89]等应用到锅炉汽轮发电机组及锅炉燃烧控制系统中, 但始终没有也无法回避纯延迟、大滞后特性的存在.

燃料在炉内燃烧时立即释放出能量, 这个过程是很快的, 例如, 煤粉炉内煤粉在炉膛内的停留时间一般在 2 s 左右^[90], 因此, 我们曾提出采用锅炉炉膛断面辐射能量来控制燃烧的思想^[91], 并以现场测试的对象模型为基础, 仿真研究了以辐射能信号为中间被调量的燃料控制策略^[92], 结果已显示出这种方式对锅炉燃烧控制的意义. 而且, 燃烧优化控制不仅仅局限于单纯提高燃烧经济性, 污染物排放控制, 特别是氮氧化物减排的控制, 也是燃烧优化控制的重要目标之一^[93]. 对于燃烧优化控制, 我们认为, 必须从机组负荷控制的角度考虑燃烧控制问题^[94], 不能“头痛医头”; 其次, 必须从全炉膛三维燃烧工况优化分布的角度考虑燃烧优化控制, 不能仅仅考虑燃料总量、风量总量及其配比的优化控制. 因为大型电站锅炉炉内燃料是分被多个燃烧器、从不同位置和角度送入的, 一旦炉内燃烧工况组织得不好, 炉内温度场发生严重偏斜, 导致火焰刷墙、甚至发生严重事故,

引起停炉检修,经济性的损失是显而易见的;全炉膛三维燃烧温度分布的优化控制对于抑制氮氧化物的排放的作用也是明显的。

利用辐射图像计算机处理技术、辐射传热理论、先进求解策略,实时实现炉膛三维燃烧温度场、壁面辐射热流分布等的可视化监视的原理和技术,炉内燃烧从一个近似黑箱系统变为一个基本可视的系统,为快速、有效地诊断燃烧工况异常现象、指导燃烧调整和控制、减少锅炉燃烧异常带来的运行故障和事故、提高锅炉运行的安全性和经济性,奠定了良好的基础。

锅炉燃烧效率主要取决于风/煤比,最佳风/煤比的实质内涵就是合理的炉膛氧量。在给煤量一定的情况下,从能量守恒的角度看,炉膛辐射能与燃烧效率是一一对应的,也即与炉内氧量是一一对应的。基于上述分析,在输入热值相等的情况下,氧量变化对辐射能信号的形状如图 8 所示。可以看出,存在一个最佳的氧量,使辐射能最高。对于控制系统,合理地调整炉内氧量,可起到增加辐射能的作用。炉膛辐射能对应最佳氧量(MO_2),这就为以辐射作为调节变量,间接调节 O_2 ,从而提高燃烧经济性提供了理论依据。

寻优的前提是首先必须保证辐射能足以维持燃烧过程继续进行,即风/煤比不能超出燃烧稳定界,否则在工况恶化时将导致炉膛熄火。因此,对于任意一台特定的锅炉,存在一个保证锅炉安全燃烧的炉膛辐射能下界(E_{min})。如图 10 所示, E_s 线为锅炉经济运行的等辐射能线,工作在此线以上的具有较好的经济性。ACB 曲线段,以最佳氧量 MO_2 为界,可划分为富煤段 AC 和富氧段 CB^[95]。在富煤段,随着送风由 A 点的值开始增加,部分未燃烬的煤得以燃烧,炉膛辐射能逐渐增加;至 MO_2 燃烧状态最优,炉膛辐射能在 C 点达到最大值 E_{max} ;若送风继续增加,则进入富氧段,大量热量用于加热一、二次风,炉膛辐射能下降,至 B 点回复到与 A 点相同的炉膛辐射能 E_s 。当辐射能偏离最佳氧量时,有两种变化方向:辐射能及氧量同时减小或辐射能和氧量同时增加时,自动修正最佳风、煤比,增加最佳氧量值,使最佳氧量适当加大,直至维持稳定的辐射能和氧量值;相反,出现辐射能减小而氧量增加,或辐射能增加而氧量减小的情况时,将修正氧量,使氧量负向偏移,即减少总风量,从而维持最佳氧量。

一定的热值输入条件下,稳定燃烧时有一最佳

氧量值,而当燃料品质变化时,通过辐射能信号的快速检测,及时调整配风,以维持最佳风/煤比,可能保证经济运行。由于引进辐射能信号后,锅炉控制是建立在负荷-辐射能控制的基础上,所以最佳燃烧控制方案是在保证安全运行的同时,追求最大辐射能。为此,氧量寻优的设计原则是:建立以辐射能信号的最佳风煤比的燃烧优化控制回路,研究最佳氧量及负荷在辐射能信号控制下的规律,优化燃烧控制的品质。

图 11 为 240 MW 的氧量寻优过程,从图 9 中可以看出,将氧量寻优算法投入到氧量和风量自动控制回路,负荷设定 240 MW,总燃料量不变(5-Sumcoal)。寻优运行时,总风量(4-Total Wind)和氧量(6-Oxygen)减小,辐射能增大(1-E),主蒸汽压力(2-Steam Pressure)略有上升,实发功率(3-Load)平均增加 3 MW。从图 9 还可以看出,氧量寻优调节过程完成后,能够在寻到的最优点稳定运行,此时各参数基本上维持在同一水平。这充分表明,在总燃料量不变的情况下,引入的辐射能信号能够实时监测炉内的燃烧状况,通过寻优算法合理地调整风/煤比,可以得到最佳氧量和辐射能。

利用三维燃烧温度场可视化信息,归纳炉膛燃烧总辐射能信号,实时反映炉膛燃烧率的变化,参与机组负荷控制,将直接能量平衡的概念提前到燃烧过程释放的能量和机组负荷平衡,可望提高机组负荷响应速度和锅炉汽轮机热力参数的稳定性,提高机组负荷调节的能力。

3.5 电站锅炉受热面二维分布建模分析技术

建立锅炉数学模型,进行仿真研究,是获得机组特性的一个很有效的手段。通过建立数学模型来判

图 10 辐射能-氧量关系曲线^[96]

图 11 240 MW 工况氧量寻优时的实时值^[96]

断机组动态特性的优劣, 然后分析锅炉结构参数的改变对机组动态特性的影响, 接着设计合理的控制系统, 进行有效的仿真研究. 超临界直流锅炉蒸发受热面和炉膛火焰直接作用, 热负荷高且分布不均匀; 变压运行时, 工质的压力要经历高压、超高压、亚临界到超临界的大范围变化; 汽水相变过程以及超临界压力下工质的大比热区都处于受热面内; 蒸发受热面是运行环境中最恶劣、工质状态变化最剧烈的承压部件, 受热面的工质流动和传热的研究, 对于降低流动阻力、防止传热恶化和避免受热面的工质不稳定流动都具有十分重要的意义.

水冷壁管壁温的准确计算直接影响到管子的安全性设计. 壁温的计算存在 2 个方面的问题, 一是如何确定管壁的边界条件, 即对流换热系数和壁面热流; 二是解算模型本身. 目前, 国内外学者对管壁边界条件中的热流密度和壁温之间的关系做了很多研究. 在实际运行中, 如果直接测量热流密度是十分困难的. 因此多是对水冷壁部分进行分区段热力计算, 如图 12 所示, 计算思路是从最大放热区段开始, 根据能量方程求出最大放热区出口处的烟气温度, 然后沿着炉膛高度方向应用能量方程依次求出其余各段的进、出口烟温, 接着就可以求出各个区段的辐射受热面平均热负荷^[97]. 在二维导热微分方程的基础上, 范谨等人^[98]对水冷壁温度场进行了解析求解, 得出了管壁温度、轴向热应力以及周向热应力沿高度的变化曲线. 盛春红和陈听宽^[99,100]认为炉膛的辐射热流在一定工况下是一定的, 对矩形鳍片水冷壁的辐射角系数进行了求解, 通过计算得到鳍片上和管壁上的热流密度分布函数. 华永明等人^[101]采用有

图 12 直流锅炉汽水流动及工质参数变化图

限单元法计算了沿水冷壁高度方向上、中、下 3 个辐射区的壁温分布, 结算结果表明水冷壁有 2 个壁温峰值区, 一个在下辐射热负荷较高的地方, 另一个在上辐射区中线出口处. 浙江大学程乐鸣等人^[102]计算了带有竖直和横向鳍片的水冷壁管上的温度与热流分布, 结果显示热流分布在竖直鳍片端部最高, 接着慢慢下降, 在横向鳍片处的根部又会上升, 该文还对管横截面上的一些测点的温度进行了对比. 李志宏等人^[103]采用有限差分方法对矩形鳍片和焊角鳍片膜式水冷壁进行了壁温分布的数值计算, 分析了在这两种情况下的鳍片尺寸、热流、对流换热系数、阻力系数对壁温的影响以及管间节距与安全壁温的关系. 张志正等人^[104]采用数值模拟方法计算了几个工况下的水冷壁管截面温度分布, 根据模拟结果拟合出背火面特征点温度差值与向火面危险点温度的函数关系式, 然后监测水冷壁背火侧特征点温度, 根据关系式计算即可间接在线得到向火侧危险点温度. 王洪跃等人^[105]也采用数值模拟的方法计算了壁温分布, 但是他考虑到了对流换热系数随着热负荷的不同而变化. 张志正等人^[106]、范谨^[98]和李志宏等人^[103]在实验和计算过程中均将壁面热流和工质对流换热系数看成定值, 因此得到的管壁温计算结果是不能完全适用于实际运行的需要. 在现场壁面热流非均匀分布且随着负荷变化而不断地改变, 工质对流换热系数也会随着工质的物性而不断变化, 这样就会导致管壁温度也会不断波动, 管壁出现热应力, 在热应力的长期作用下就会发生爆管泄露, 危害机组的正常安全运行. 因此有必要采用新的适用于分布参数模型的壁温计算模型, 掌握在锅炉实际运行过程中水冷壁的温度状态及其变化规律, 从而知道管壁的运行状态, 找出壁温最高、温度变化最集中的部位, 保

证锅炉的正常安全运行.

文献[107]提出用非均匀辐射热流分布参数的处理方法对上升管的蒸发过程进行模拟分析. 在炉内三维温度非均匀分布的情况下, 辐射热流在水冷壁表面是非均匀分布的. 为此, 把上升管沿宽度和高度方向分别进行分区模拟. 采用非均匀辐射热流分布参数的处理方法, 分析上升管内蒸发过程沿高度的变化情况, 其结果比采用集总参数法和均匀辐射热流分布参数的处理方法更加合理. 用该处理方法得到的结果判断可能会发生局部传热恶化和倒流的异常管, 对于锅炉安全、经济运行分析具有重要意义. 文献[108]进一步利用炉内三维燃烧工况实时可视化检测系统获得的炉内烟气三维温度分布及炉膛辐射能信号, 计算炉内水冷壁二维表面非均匀辐射热流分布. 以此作为边界条件, 建立锅炉蒸发系统分布参数动态模型, 反映壁面热流密度、壁面温度、质量含汽率、质量流速等热力参数在蒸发受热面上的动态分布, 以及汽包压力、水位、出口蒸汽流量的动态变化. 文献[109]基于图像处理的温度检测信息, 对超临界 W 型直流锅炉蒸发系统进行分布参数建模. 建立的模型同时考虑了炉内热负荷分布和锅内工质物性分布的不均匀性, 以预测对应工况下的壁面热流分布和壁温分布, 图 13 所示. 仿真结果表明各热力参数在水冷壁上呈现明显的分布参数特性, 并且其分布特性随着工况的变化而变化. 发现 W 型火焰锅炉前墙存在 3 个高热流区, 左墙最高壁温为 459.85°C , 且最大壁面温差为 94°C . 同时, 数值计算结果与现场实测值进行了对比, 理论推算与电厂实际运行结果相一致. 模型既可用于在线预测, 也可用于离线分析

计算, 对超临界 W 型锅炉的研究有一定的指导意义.

超临界机组锅炉的关键技术是水冷壁, 因此关于蒸发受热面的研究是超临界锅炉中一个非常重要的课题. 在实际运行中, 水冷壁受到的壁面热负荷很高, 而且分布不均匀, 同时, 超临界机组直流锅炉的运行参数比亚临界汽包锅炉复杂, 工质的热物理特性参数变化更为复杂. 尤其在大比热区, 水冷壁管内的工质(压力、温度等参数)改变时, 其比容、黏度和导热系数发生剧烈变化, 而且超临界压力下工质的热物理特性显著地影响着直流锅炉水动力的稳定性和下辐射区水冷壁出口工质的温度, 进而影响到自动调节性能. 由于水冷壁、过热器壁温分布与炉内及对流受热面热负荷分布及锅内工质物性分布强烈耦合, 掌握水冷壁管及过热器管的温度场分布和工质物性分布对于保证直流锅炉水冷壁和换热器的长期安全运行非常重要, 因此开展基于炉内三维燃烧在线检测技术的超临界直流锅炉管壁二维(温度、热流等)分布参数建模具有重要的实用价值和理论意义, 是开展三维、动态、实时数字化锅炉技术研发的一个重要内容.

4 小结

(1) 锅炉作为发电厂的一个庞然大物, 是一个典型的三维空间分布系统; 而燃烧和热力过程又是一个处于外界需求不断变化、各种扰动持续影响的动态系统, 对其信息化、智能化技术的研发应建立三维、动态、实时数字化的框架思路.

(2) 三维设计技术目前仅仅用于实现火电厂高

图 13 满负荷下左墙水冷壁的热流和壁温分布^[109]

(a) 热流分布(kW/m^2); (b) 壁温分布($^{\circ}\text{C}$)

效的设计和技术移交,其建立的电站设备和系统的三维数据库有待于在火电机组运行过程中作为三维、动态、实时火电机组技术研发平台。

(3) 炉内燃烧过程三维数值模拟研究已经发展到相当的程度,一方面数值模拟需要研发更加精细的模型以更加准确地反映炉内实际燃烧工况,另一方面数值模拟分析技术有待嵌入到发电机组实际运行分析和优化中。

(4) 基于辐射图像处理的炉内三维燃烧过程可

视化检测技术正在从炉内三维温度场在线检测向炉内煤粉燃烧过程(煤粉浓度、燃尽度和燃烧放热量空间分布)三维全面可视化检测的阶段过渡,为三维、动态、实时数字化锅炉技术发展奠定了良好的基础。

(5) 炉内三维燃烧过程可视化检测技术和燃烧过程数值模拟技术为分析、诊断炉内燃烧过程故障、燃烧经济性,和锅炉受热面安全运行状况提供了具有空间分辨能力的精细三维信息,是锅炉信息化、智能化发展的一个重要方向。

参考文献

- 1 侯子良,潘钢.建设数字化电厂示范工程加快火电厂信息化进程.中国电力,2005,38:78-80
- 2 杨新民,肖勇,陈丰.火电厂监控系统现状及发展.热力发电,2014,43:15-18
- 3 肖伯乐.我国火电厂自动化与信息化技术的进展.动力工程学报,2011,31:611-618
- 4 翟淑伟,石奇光,杨燕玲,等.火电厂运行状态监测数据挖掘技术综述.华东电力,2012,40:292-295
- 5 侯子良.火电厂厂级控制系统概念探讨.中国电力,2011,44:20-21,25
- 6 危元华,任晓东,李智,等.数字化电厂的概念及方案研究.电力建设,2013,34:51-54
- 7 陈进发,高伟,刘军辉.智能化火电站建设现状、发展方向与展望.见:智能化电站技术发展研讨暨电站自动化2013年会,2013.7-12
- 8 陈世和.智能电站发展现状及展望.见:智能化电站技术发展研讨暨电站自动化2013年会,2013.30-40
- 9 王继强,赵长青.火电厂三维数字化系统在山东莱州电厂的应用.上海电力学院学报,2014,30:443-450
- 10 Zhou H C, Lou C, Cheng Q, et al. Experimental investigations on visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale pulverized-coal-fired boiler furnace. Proc Combust Inst, 2005, 30: 1699-1706
- 11 高小涛.燃煤锅炉结渣原因分析及预防对策.电力安全技术,2009,11:12-15
- 12 王孟浩,王衡,郑民牛,等.超临界和超超临界锅炉运行中的几个问题.热力发电,2010,39:14-17,68
- 13 周林,赵宗花.锅炉常见故障处理办法.云南电力技术,2011,39:84-85
- 14 方洪鹰.数据挖掘中数据预处理的方法研究.硕士学位论文.重庆:西南大学,2009
- 15 Pyle D. Data Preparation for Data Mining. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1999
- 16 王丽平.数据预处理技术在电厂中的应用.硕士学位论文.保定:华北电力大学,2004
- 17 沈芳平.锅炉热效率计算方法研究与软件开发.硕士学位论文.南京:东南大学,2004
- 18 周昊,茅建波,池作和,等.燃煤锅炉低氮氧化物燃烧特性的神经网络预报.环境科学,2002,23:18-24
- 19 刘宇穗.全面数字化电厂构想.电力勘测设计,2008,3:63-67
- 20 张艺馨.电厂三维设计PDMS软件中互提资料的实现与研究.硕士学位论文.成都:电子科技大学,2013
- 21 周兴东.电厂三维设计系统的应用分析.云南电力技术,2001,29:42-44
- 22 李向东.三维设计技术在电厂设计中应用的探讨.新疆电力,2004,53-54
- 23 苗长信,王卫东,王建伟.MBEL“W”火焰锅炉燃烧特性试验研究.山东电力技术,2004,1:6-12
- 24 王军.东方W型火焰锅炉燃烧调整方法.热力发电,2004,33:37-40
- 25 车刚,徐通模,惠世恩.W型火焰锅炉空气动力场的研究.山东电力技术,2007,1:20-25
- 26 马晓伟,杜云华,王勇等.金竹山600MW“W”型火焰锅炉调试及性能试验研究.东方电气评论,2009,23:20-26
- 27 赵坚行.燃烧的数值模拟.北京:科学出版社,2002
- 28 Smoot L D. A decade of combustion research. Prog Energ Combust Sci, 1997, 23: 203-232
- 29 Stephenson P L. Mathematical modelling of semi-anthracite combustion in a single burner furnace. Fuel, 2003, 82: 2069-2073
- 30 Shim H S, Valentine J R, Davis K, et al. Development of fireside waterwall corrosion correlations using pilot-scale test furnace. Fuel, 2008, 87: 3353-3361
- 31 Vamvuka D, Woodburn E T, Senior P R. Modelling of an entrained flow coal gasifier. 1. Development of the model and general predictions. Fuel, 1995, 74: 1452-1460
- 32 Sheng C, Moghtaderi B, Gupta R, et al. A computational fluid dynamics based study of the combustion characteristics of coal blends in

- pulverised coal-fired furnace. *Fuel*, 2004, 83: 1543–1552
- 33 Zhou Y, Xu T, Hui S, et al. Experimental and numerical study on the flow fields in upper furnace for large scale tangentially fired boilers. *Appl Therm Eng*, 2009, 29: 732–739
- 34 Yin C, Rosendahl L, Condra T J. Further study of the gas temperature deviation in large-scale tangentially coal-fired boilers. *Fuel*, 2003, 82: 1127–1137
- 35 Fan J, Qian L, Ma Y, et al. Computational modeling of pulverized coal combustion processes in tangentially fired furnaces. *Chem Eng J*, 2001, 81: 261–269
- 36 Xu M, Azevedo J L T, Carvalho M G. Modeling of a front wall fired utility boiler for different operating conditions. *Comput Method Appl M*, 2001, 190: 3581–3590
- 37 Vuthaluru R, Vuthaluru H B. Modelling of a wall fired furnace for different operating conditions using fluent. *Fuel Process Technol*, 2006, 87: 633–639
- 38 Tan Y, Chui E, Douglas M, et al. Oxy-fuel coal burner design: From CFD modeling to pilot scale testing. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Edinburgh, Scotland. 2005. 1791–1795
- 39 Skodras G, Kaldis S P, Sakellariopoulos G P, et al. Simulation of a molten bath gasifier by using a CFD code. *Fuel*, 2003, 82: 2033–2044
- 40 Chen C, Horio M, Kojima T. Numerical simulation of entrained flow coal gasifiers. Part ii: Effects of operating conditions on gasifier performance. *Chem Eng Sci*, 2000, 55: 3875–3883
- 41 Chen C, Horio M, Kojima T. Numerical simulation of entrained flow coal gasifiers. Part i: Modeling of coal gasification in an entrained flow gasifier. *Chem Eng Sci*, 2000, 55: 3861–3874
- 42 Cooper S, Coronella C J. CFD simulations of particle mixing in a binary fluidized bed. *Powder Technol*, 2005, 151: 27–36
- 43 Fang Q, Musa A A B, Wei Y, et al. Numerical simulation of multifuel combustion in a 200 MW tangentially fired utility boiler. *Energy Fuels*, 2012, 26: 313–323
- 44 Zheng S, Luo Z, Zhang X, et al. Distributed parameters modeling for evaporation system in a once-through coal-fired twin-furnace boiler. *Int J Therm Sci*, 2011, 50: 2496–2505
- 45 Zhou H C, Hou Y B, Chen D L, et al. An inverse radiative transfer problem of simultaneously estimating profiles of temperature and radiative parameters from boundary intensity and temperature measurements. *J Quant Spectrosc Ra*, 2002, 74: 605–620
- 46 Ballester J, García-Armingol T. Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames. *Prog Energ Combust Sci*, 2010, 36: 375–411
- 47 Lou C, Zhou H. Deduction of the two-dimensional distribution of temperature in a cross section of a boiler furnace from images of flame radiation. *Combust Flame*, 2005, 143: 97–105
- 48 Leipertz A, Obertacke R, Wintrich F. Industrial combustion control using UV emission tomography. *Proc Combust Inst*, 1996, 26: 2869–2875
- 49 Correia D P, Ferrao P, Caldeira-Pires A. Flame three-dimensional tomography sensor for in-furnace diagnostics. *Proc Combust Inst*, 2000, 28: 431–438
- 50 Zhou B, Zhang J, Wang S. Reconstruction of flame temperature field with optical sectioning method. *IET Image Process*, 2011, 5: 382–393
- 51 Zhou H C, Han S D, Lou C, et al. A new model of radiative image formation used in visualization of 3D temperature distributions in large-scale furnaces. *Numer Heat Tr B-Fund*, 2002, 42: 243–258
- 52 Zhou H C, Han S D, Sheng F, et al. Visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale furnace via regularized reconstruction from radiative energy images: Numerical studies. *J Quant Spectrosc Ra*, 2002, 72: 361–383
- 53 Lou C, Zhou H C. Deduction of the two-dimensional distribution of temperature in a cross section of a boiler furnace from images of flame radiation. *Combust Flame*, 2005, 143: 97–105
- 54 周怀春. 炉内火焰可视化检测原理与技术. 北京: 科学出版社, 2005
- 55 Liu L H, Tan H P. Inverse radiation problem in three-dimensional complicated geometric systems with opaque boundaries. *J Quant Spectrosc Ra*, 2001, 68: 559–573
- 56 McCormick N J. Inverse radiative-transfer problems: A review. *Nucl Sci Eng*, 1992, 112: 185–198
- 57 Wang F, Yan J, Cen K, et al. Simultaneous measurements of two-dimensional temperature and particle concentration distribution from the image of the pulverized-coal flame. *Fuel*, 2010, 89: 202–211
- 58 Zhou H C, Yuan P, Sheng F, et al. Simultaneous estimation of the profiles of the temperature and the scattering albedo in an absorbing, emitting, and isotropically scattering medium by inverse analysis. *Int J Heat Mass Transf*, 2000, 43: 4361–4364
- 59 Zhou H C, Han S D. Simultaneous reconstruction of temperature distribution, absorptivity of wall surface and absorption coefficient of

- medium in a 2D furnace system. *Int J Heat Mass Transf*, 2003, 46: 2645–2653
- 60 Liu L H, Tan H P, Yu Q Z. Inverse radiation problem of sources and emissivities in one-dimensional semitransparent media. *Int J Heat Mass Transf*, 2001, 44: 63–72
- 61 Liu L H. Simultaneous identification of temperature profile and absorption coefficient in one-dimensional semitransparent medium by inverse radiation analysis. *Int Commun Heat Mass*, 2000, 27: 635–643
- 62 Zhou H C, Chen D L, Cheng Q. A new way to calculate radiative intensity and solve radiative transfer equation through using the monte carlo method. *J Quant Spectrosc Ra*, 2004, 83: 459–481
- 63 Craciunescu T, Bonheure G, Kiptily V, et al. A comparison of four reconstruction methods for jet neutron and gamma tomography. *Nucl Instrum Meth A*, 2009, 605: 374–383
- 64 Wang Q, Wang H X, Yan Y. Fast reconstruction of computerized tomography images based on the cross-entropy method. *Flow Meas Instrum*, 2011, 22: 295–302
- 65 Tsai K W, Nummenmaa A, Witzel T, et al. Multi-projection magnetic resonance inverse imaging of the human visuomotor system. *NeuroImage*, 2012, 61: 304–313
- 66 Herman G T. *Image Reconstruction from Projections: The Fundamentals of Computerized Tomography*. Pittsburgh: Academic Press, 1980
- 67 Zhu N, Jiang Y, Kato S. Ultrasonic computerized tomography (CT) for temperature measurements with limited projection data based on extrapolated filtered back projection (FBP) method. *Energy*, 2005, 30: 509–522
- 68 Andersen A H. Algebraic reconstruction in ct from limited views. *IEEE T Med Imaging*, 1989, 8: 50–55
- 69 Persson M, Bone D, Elmqvist H. Total variation norm for three-dimensional iterative reconstruction in limited view angle tomography. *Phys Med Biol*, 2001, 46: 853–866
- 70 Lu X Q, Sun Y, Yuan Y A. Image reconstruction by an alternating minimisation. *Neurocomputing*, 2011, 74: 661–670
- 71 Reis M L, Roberty N C. Maximum-entropy algorithms for image-reconstruction from projections. *Inverse Probl*, 1992, 8: 623–644
- 72 De Man B, Nuyts J, Dupont P, et al. An iterative maximum-likelihood polychromatic algorithm for CT. *IEEE T Med Imaging*, 2001, 20: 999–1008
- 73 Liu H W, Zheng S, Zhou H C. An iterative virtual projection method to improve the reconstruction performance for ill-posed emission tomographic problems. *Chin Phys B*, 2015, 24: 104201–104213
- 74 Liu H W, Lv W, Zhou H C. Fabrication of independent virtual lines for reconstruction of 2D source distribution with high spatial resolution equal to that of limited projections. In: *Imaging Systems and Techniques (IST), 2013 IEEE International Conference on IEEE*. 321–326
- 75 罗自学. 引入辐射能信号的锅炉燃烧检测及优化控制. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2007
- 76 郑昶, 曹在基. DEB 协调控制系统. *动力工程*, 1989, 4: 1–9
- 77 顾晓栋, 徐耀文. 电厂热工或称自动调节. 北京: 水利电力出版社, 1983
- 78 南京工学院, 西安交通大学热能动力教研室. 电厂锅炉原理. 北京: 电力工业出版社, 1982
- 79 周怀春. 基于火焰图象处理的煤粉炉内燃烧过程研究. 博士后研究报告. 武汉: 华中科技大学, 1996
- 80 潘祖明, 张正方, 韩才元. 动态矩阵控制算法及其在锅炉控制中的应用. *华中科技大学学报*, 1990, 18: 101–105
- 81 陈家琪. Dahlin 算法及最优控制的研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 1989
- 82 Mabius LE. Model reference control and its application to the gromy electric generating plant model. In: *Proc Joint Automatic Control Conference*, 1981, doi: 10.1109/JACC.1981.4232272
- 83 Pellegrinetti G, Bentsman J. H-infinite controller design for boilers. *Int J Robust Nonlinear Control*, 1994, 4: 645–671
- 84 Prasad G, Swidenbank E, Hogg B W. A neural net model-based multivariable long-term predictive control strategy applied in thermal power plant control. *IEEE T Energy Conver*, 1998, 13: 176–182
- 85 Lee K Y, Perakis M, Sevcik D R, et al. Intelligent distribution simulation and control of power plants. *IEEE T Energy Conver*, 2000, 15: 116–123
- 86 Zhao H, Li W, Taft C, et al. Robust controller design for simultaneous control of throttle pressure and megawatt output in a power plant unit. *Int J Robust Nonlinear Control*, 1999, 9: 425–446
- 87 Ben-Abdenmour A, Lee K Y. An autonomous control system for boiler-turbine units. *IEEE T Energy Conver*, 1996, 11: 401–406
- 88 Cheng C M, Rees N W. Fuzzy model based control of steam generation in drum-boiler power plant. *Control Power Plants Power Syst*, 1997, 143–149
- 89 沈炯, 金林, 陈来九. 火电单元机组负荷最优预见控制系统仿真研究. *中国电机工程学报*, 1999, 19: 14–17
- 90 章臣樾. 过路动态特性及其数学模型. 北京: 水利电力出版社, 1997
- 91 周怀春, 韩才元. 电站燃煤锅炉燃烧计算机控制问题探讨. *热能动力工程*, 1994, 9: 111–116

- 92 周怀春, 姜新生, 尹鹤龄, 等. 采用辐射能信号的电站锅炉燃料调节对象建模及控制仿真研究. 中国电机工程学报, 1996, 16: 226–229
- 93 Lyter F G, Gino J V, Lowery S D, et al. Demonstrations of advanced model-based control applications for improved efficiency, emissions, and availability for utility fossil-fired boilers. In: International Exhibition & Conference for the Power Generation Industries-POWER-GEN, 1997. 201
- 94 张师帅, 周怀春, 黄勇理, 等. 采用辐射能反馈信号的火电机组负荷控制系统仿真研究. 中国电机工程学报, 2001, 21: 85–88
- 95 王耀青, 刘微. 在线调节风/煤比实现经济燃烧控制. 中国电力, 1997, 30: 14–19
- 96 罗自学, 梁培露, 周怀春, 等. 引入辐射能信号的锅炉氧量寻优控制研究. 中国电机工程学报, 2006, 23: 100–104
- 97 阎维平, 欧宗现. 电站炉膛分区段改进热力计算方法. 锅炉技术, 2007, 38: 11–14
- 98 范谨, 贾鸿祥, 陈听宽. 膜式水冷壁温度场解析. 热力发电, 1996, 3: 10–17
- 99 盛春红, 陈听宽. 矩形鳍片膜式水冷壁辐射角系数的求解. 锅炉技术, 1997, 8: 8–11
- 100 盛春红, 陈听宽. 膜式水冷壁温度分布的数值计算. 热能动力工程, 1998, 13: 61–65
- 101 华永明, 周强泰, 丁昭, 等. 1025 t/h 直流锅炉水冷壁壁温特性理论研究. 锅炉技术, 1999, 30: 8–13
- 102 程乐鸣, 施正伦, 骆仲洪, 等. 循环流化床锅炉膜式水冷壁管与鳍片上的温度分布. 动力工程, 2002, 22: 1674–1680
- 103 李志宏, 刘文铁, 刘石. 膜式水冷壁壁温影响因素的数值分析. 热能动力工程, 2003, 18: 173–176
- 104 张志正, 孙保民, 郭永红, 等. 超(超)临界压力锅炉膜式水冷壁危险点壁温在线监测方法研究. 中国电机工程学报, 2005, 25: 130–134
- 105 王洪跃, 毕小龙, 司凤琪, 等. USC 直流炉水冷壁壁温监测有限元分析. 热能动力工程, 2006, 21: 303–306
- 106 张志正, 孙保民, 徐鸿, 等. 膜式水冷壁特定点温度相关性的研究. 动力工程, 2005, 25: 805–808
- 107 朱志武, 周怀春. 考虑辐射热流非均匀分布的蒸发过程模拟分析. 热力发电, 2003, 32: 53–57
- 108 初云涛, 周怀春. 基于炉内三维燃烧检测的蒸发系统分布参数建模. 中国电机工程学报, 2006, 26: 20–24
- 109 郑树, 罗自学, 周怀春. 超临界 W 型锅炉蒸发系统的分布参数建模研究. 中国电机工程学报, 2013, 33: 8–14

Discussion on the development of a 3D, dynamic and real-time digital boiler

ZHENG Shu & ZHOU HuaiChun

Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Boiler is a typical 3D distribution system in the power plant. The combustion and thermal process is a dynamic changing process with the change of load in the furnace, and the development of information and intelligent should be focus on the 3D, dynamic and real-time digital research for boiler. The 3D technology has been used for design drawing, and the 3D, dynamic and real-time technology can be developed based on detailed database in the power plant. In recent years, many researchers have used a CFD method to simulate the 3D combustion and heat transfer of the furnace. However, the refined model is needed for reflect accurately the state of combustion in the furnace, and the CFD method is difficult to be applied in the unit operation. Flame image processing techniques have been successfully applied to temperature reconstruction in pc-fired boilers, and the soot volume fraction reconstruction is the next research direction of the flame image processing techniques. The digital boiler can be realized based on the 3D temperature and soot volume fraction distribution. The 3D visualization of the fault diagnosis, combustion economization and safe operation in the boiler can be obtained by 3D combustion monitoring systems. This 3D, dynamic and real-time technology is helpful for the development of information and intelligent of the power plant.

power plant, 3D system, numerical simulation, combustion visualization, combustion optimization, boiler heating surface

doi: 10.1360/N092015-00238