

图1 1MW_{th} 链式炉试验装置

概述

英国工业领域每年用煤量约为320万t，其中大部分是由移动炉排式锅炉(炉篦式锅炉或链条炉)燃用的。由于移动炉排式锅炉具有操作简单、坚固耐用和运行可靠等特点，因而被广泛使用。令人遗憾的是，移动炉排式锅炉所用的控制系统大多以电气机械装置为基础，不足以使锅炉保持适当的空气/煤比，以达到最佳燃烧和排放性能，尤其是在负荷变化期间。这些控制系统也不能因煤质变化而调整工作条件，以达到最优性能。然而，在改进锅炉控制系统以满足上述需要方面，近年来几乎没做什么研究工作。

现代控制理论的最新进展，尤其是在人工智能领域，已经为处理不可预测的非线性变化，如煤质变化等提供了技术保证。利用这些最新进展，埃克塞特和格拉摩根大学已分别开发出了用于链式炉和移动炉排式锅炉的以人工智能为基础的控制系统，以克服传统控制系统的不足。

埃克塞特大学的研究工作以嵌于专家系统内的传统的比例加积分控制系统为基础。在控制系统中引入了有关点火拱温度(以防止逆燃)、点火损失和烟气温度的最佳闭环控制。采用这一混合式控制方法的目的在于，减少运行自校正控制器所需的计算时间和功率。

格拉摩根大学研究出的控制方法以神经网络为基础。尤其是，他们研究出了以操作者最佳实践为基础并由两套多层前馈式神经网络组成的控制方法。就负荷变动期间烟气中含氧量而言，该方法有助于锅炉保持最优性能，同时使 NO_x和CO排放量保持在较低水平。

在1MW_{th}链式炉上分别对埃克塞特大学研制出的混合式控制器和格拉摩根大学研制出的神经网络式控制器进行了测试，其结果如下：

- 锅炉运行更为稳定；
- 设备运行参数，如进风速度、进风配置和给煤速度等能自动调整，以补偿煤质方面的变化；
- 在负荷发生较大的阶跃式变化期间，能对可调变量如点火拱温度(以防止点火损失和逆燃)、烟气中含氧量等过程变量进行连续监测；
- NO_x、CO、氧气、锅炉热效率和燃烧效率等参数在负荷变化期间仍能保持最佳运行状态。

带来的效益

提高了环境性能 - 在持续运行和负荷变化期间，NO_x、CO和固体颗粒物排放量都保持在较低水平；

提高了燃烧性能-燃烧效率更高，锅炉热效率得以提高；

提高了设备的工作效率-稳定状态和瞬间操作期间的最佳煤/空气比，能减少锅炉结渣和腐蚀；

降低了运行成本-最佳热效率和燃烧效率，加上清理作业间隔延长，减少了锅炉的运行成本。

市场机会

在英国，约30台移动炉排式锅炉和74台链条锅炉能够从这种专门为这些设备开发的先进控制技术中获益。该技术在世界各国也都有市场，如新西兰、南非等发达国家和中国、印度等发展中国家。英国一流的锅炉生产企业—杰梅斯·普罗克特公司对应用以神经网络为基础的控制系统的控制系统颇感兴趣。

贸工部的支持

混合式控制器的开发成本约为42万英镑，其中贸工部出资7.5万英镑，欧洲煤炭和钢铁共同体也提供了财政支持。

神经网络控制器耗资9.5万英镑，其中7.5万英镑由欧洲煤炭和钢铁共同体及英国贸工部提供，马来西亚的英国高级专员基金也提供了部分支持。

背景

移动炉排式锅炉和链条炉广泛应用于英国工业部门。工业部门每年消耗的煤炭总量约为320万t。这些锅炉的供风方式都是分段式，因而与其他型号的锅炉相比，NO_x和一氧化二氮的排放量较低。尽管如此，但固体和气体污染物排放量及燃烧性能却主要取决于保持适当的空气/煤比(尤其是在负荷变化期间)和燃料的一致性。空气严重过量，能使燃烧中断，降低锅炉工作效率，增加固体、气体污染物排放量。供风不足，能导致一氧化碳和烟气大量排放，并加速沉淀积累使锅炉工作效率降低。锅炉一般是采用电气机械控制系统，该控制系统是在稳态运行条件下设定的，其最佳性能至多也不过是以热量和质量平衡为基础，一般可仅凭目测评估烟气排放和测定烟气中的含氧量。结果，锅炉性能不仅在负荷变动期间降低，而且随着时间的推移，锅炉的运行会偏离最佳设定条件，其性能也会降低。

现代控制理论的最新进展，尤其是在人工智能领域，已经为处理这种与燃料质量变化有关的不可预测的非线性变化提供了技术支持。人工智能系统能将一个有经验的操作者的知识融入一个基于规则的框架。该框架能自动就采取某一特定控制操作作出判定。埃克塞特和格拉摩根大学为链条炉和移动炉排式锅炉开发出了以人工智能为基础的各自独立的控制系统，这些控制系统克服了传统控制系统的许多不足之处。

控制系统说明

混合式控制器

埃克塞特大学开发出的用于复合式锅炉装置和移动炉排式锅炉的混合式控制系统，以嵌于专家系统内的传统的比例加积分控制系统为基础，在控制系统中引入了点火拱温度(防止逆燃)、点火损失和烟气温度的最佳闭环控制。

采用这一混合式控制方法的目的在于，减少运行自校正神经网络控制器所需的计算时间和功率。采用比例加积分控制方式，需要一个一次风流循环数值表，并能在任意输出水平下对它进行访问。这一功能是通过使用增益列表式 PI 控制器实现的。查对表中的数据是通过使用一台功率为 1MW_{th} 的链条炉试验装置(图 1)获得的，该装置位于切尔滕纳姆的 CRE 集团有限公司。该实验装置之所以能列入开发项目计划是因为：

- 从小型锅炉和大型锅炉得到的数据的对比结果表明小型锅炉的燃烧条件足以代表大型锅炉的燃烧条件；
- 该试验锅炉配有一个全分布式前端数字控制系统，这一控制系统能够与运行此种新式控制系统的另一台个人计算机(PC机)顺利联结；
- 由于没有工艺上的要求、所以该锅炉对负荷变化也没有限制条件；
- 可以改变煤质和煤种，而无须考虑对锅炉工作效率的影响。

运行中，控制器调整空气输向火床的速率和方位、以确保能够保持最优过剩空气量和最佳锅炉燃烧效率。当锅炉功率增大时，风流控制器自动改变设定值，直至达到所需的功率值。然后，对燃烧条件进行自动监测，并根据煤质变化进行调整。控制系统结构图如图2所示。

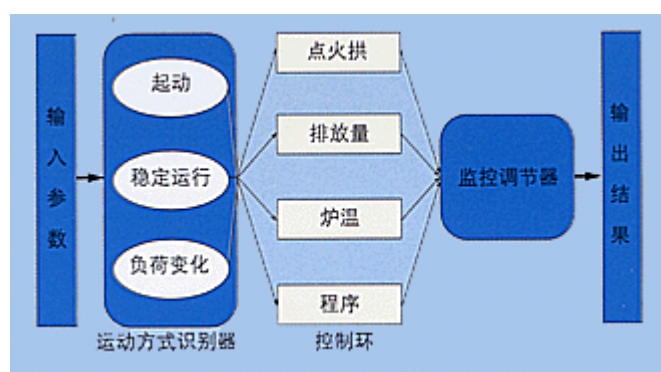


图2 混合式控制器的结构

神经网络控制器

格拉摩根大学采用的控制方法以神经网络的应用为基础，并主要是为功率在 $3 \sim 10 \text{MW}_{\text{th}}$ 范围内的链条炉开发的应用。该神经网络控制器的体系结构以两个多层前馈式神经网络为基础。对这两个神经网络进行“训练”，以模拟一个有实践经验的操作员的动作。神经网络的初始输入参数是烟气中的含氧量。运转过程中，控制器调整通向火床的气流速度，以使锅炉废气中的含氧量保持在最佳水平(6%)，同时降低CO和NO_x的排放量。开发和“训练”神经网络所需数据是从用于开发混合式控制系统的同一锅炉试验设备得到的。

控制系统开发

混合式控制器

为了对各种控制方法进行评述，并对炉篦上发生的物理和化学变化有一个了解，研制了一个过程控制模型。该模型是在PC机上完成的；商业软件包MATLAB连接到gPROMS这一先进的过程仿真工具软件上。利用该模型得到的预测结果，通过确保向燃料床供足够的风以使燃料在排出炉篦前燃尽其固定碳成份，来优化燃烧效率。利用由锅炉试验装置得到的数据，来验证预测结果。在控制循环条件输入控制系统之前，也用该模型对它们进行优化。然后，确定适用的控制方法，在锅炉试验装置上进行实践、鉴定，并加以改进。

神经网络控制器

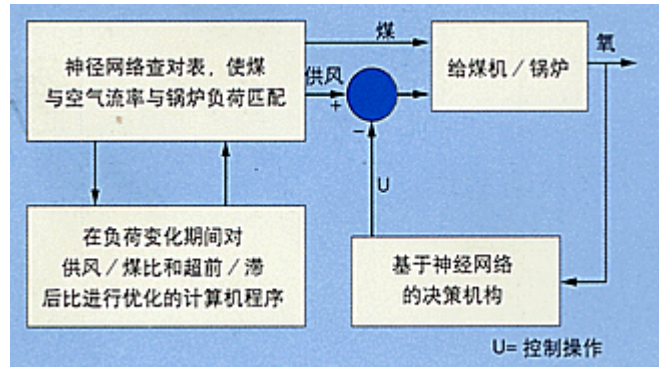


图3 基于神经网络的控制结构

将如图3所示的神经网络控制系统，设计成模拟有实践经验操作者的逻辑决策路径。由“设置网络”根据锅炉的负荷给出对应的煤种和供风速率。这一特殊的网络是由一系列基准试验中收集的设备数据建立并“训练”而成的。在这些试验中，对最优状态下的NO_x、一氧化碳、氧气等气体排放量，以及灰渣中碳含量、点火面位置、炉膛面、废气和点火拱温度等进行连续监测。“设置网络”与某一计算机程序相耦合，该程序能为任一特定的负荷变化确定最佳响应方案。尤其是，在锅炉负荷增大时，在给煤速度增加前加大供风速度。在基准试验期间，该方法避免了点火面前移，减少了瞬间一氧化碳排放。

负荷变化后，对锅炉运行条件进行精调，所需的精调量由一个多层前馈式神经网络来确定。设置和精调神经网络以及整个控制系统都在一个基于windows平台的软件包MATLAB中进行了编码处理。由该软件包与设备的数控系统相连。

控制系统的试验

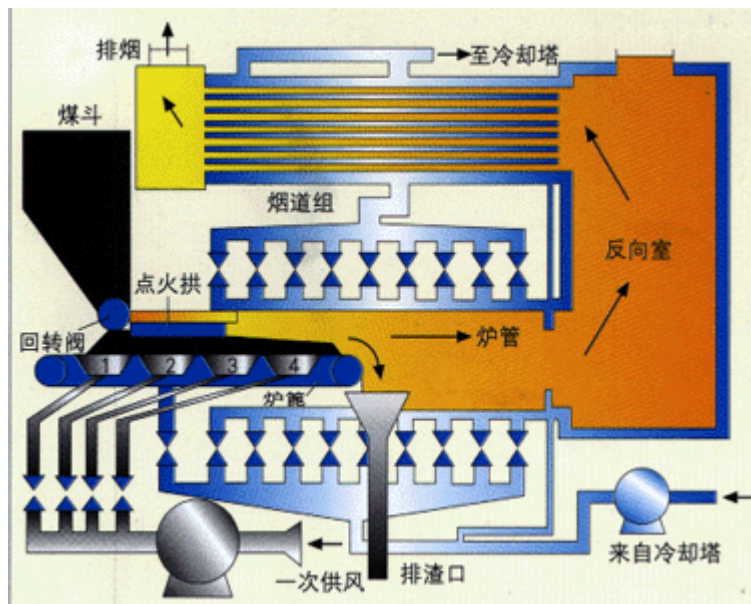


图4 锅炉试验装置示意图

开发出的这两个控制系统都在功率为1MW_{th}的锅炉试验装置上(图1)进行了试验。该装置的基本构造特征如图4所示。煤(洗后单粒级煤或洗末煤)以重力给料方式经回转阀(为减少逆燃危险)从中间贮料仓输送到炉膛上，炉膛以连续链条炉排的形式绕过前端的传动链轮。移动炉排将煤带入锅炉燃烧室，残余灰渣和熔渣卸入炉排另一头的清除装置。为了保持在煤床顶面点火，装备了一个有耐火材料衬里的拱形架。当该拱形架进入燃烧室时，将热幅射到煤层顶面。点火面逐渐下移，直至到达煤床底层为止。炉排上煤的厚度由回转阀的速度控制。为了精确模拟移动炉排上的燃烧状态，将送风室分成4部分(参见图4中的1~4分区)。每部分的供风量都能独立调控。

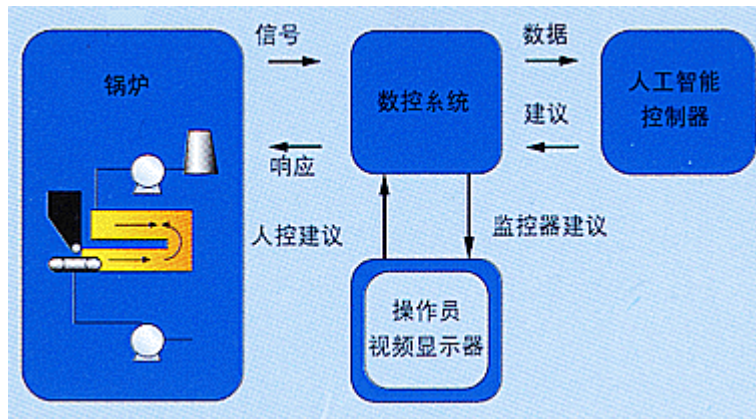


图5 智能控制器与设备数控系统连接示意图

每套控制系统都是分两步完成。首先，将各新开发出的控制系统连接到现有数控系统上(图5)，获得设备各项参数，如烟气中CO、NOx和氧气的含量，以及一次供风流速、锅炉负荷等。在第一阶段试验中，模型给出的控制器设定值由人工设定(即开环控制)，并由人工对结果进行评定(由锅炉工进行评定)。当控制器整体性能达到充分可靠时，在闭环系统中进行第二阶段的试验，即推荐的的控制参数设定值直接输入数控系统的前端控制器，以进行自动操作。

用混合式控制器和神经控制器进行的试验都获得了成功。安装混合式控制器的试验结果表明：

- 锅炉运行更为稳定· 烟气中的氧含量在负荷变化期间接近最佳水平(图6)，且NOx和CO排放量都在大型燃烧设备的法定限额内；
- 在煤的组分改变时，便自动调整设备的运行条件，以对这种变化作出补偿；
- 对诸如点火拱温度等可调变量的连续监测，确保了在负荷发生大的阶跃式变化时，点火面保持在同一位置。

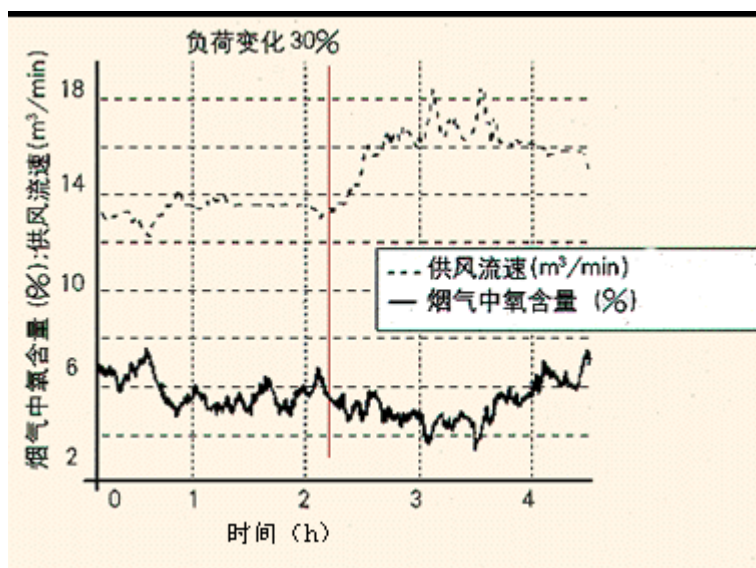


图6 负荷变化期间混合式控制器的供风速率合烟气中氧含量的响应情况

基于神经网络的控制器的工作性能比操作员优越，并能够在锅炉功率发生大的阶跃式变化期间保持最优燃烧状态，这种变化最高可达50%。在功率发生小的阶跃式变化(增高或降低)期间，烟气中的含氧量一般是保持在5%—7%的带宽范围内，如图7所示。相应的NOx和CO排放量变化范围分别是160~200每百万体积单位(vppm)和65~110vppm(所谓的NOx排放量是指以氧含量为6%的干燥烟气计算出的排放量)。已确定的其它优点包括：

- 能保持稳定的点火面；
- 能保持最佳热效率和燃烧效率。？

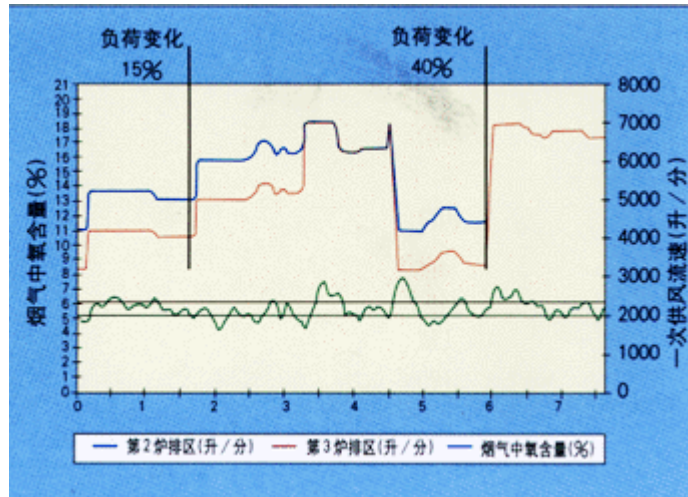


图7 负荷变化期间神经网络控制器的供风速率合烟气中氧含量的响应情况

现状

基于神经网络的控制器的研究工作仍在进行，工作重点是改善控制器对煤种变化和用新型点火面位置监控器求得的积分值的变化响应的响应。该监控器克服了有关拱温测定的难题，尤其是由于耐火拱表面沉积物造成的热电偶灵敏度降低问题。

走向商业化的第一步，即工业化锅炉示范工作进展良好。格拉摩根大学正与杰姆斯·普罗克特有限公司进行密切合作，将基于神经网络的控制器安装在一台功率为 $3.7 \text{ MW}_{\text{th}}$ 的链条炉上，该链条炉位于普雷其顿附近的菜兰，属于HMP·加恩公司。

埃克塞特大学正在探索混合式控制器的商业化可能。

结论

为链条炉和移动炉排式锅炉研制出的控制系统具有以下功能：

- 优化锅炉热效率、燃烧效率以及 NOX、CO排放量等锅炉性能；
- 对煤料组分变化作出补偿；
- 对可调变量如点火拱温度等进行连续监测，以确保点火面的稳定性，尤其是在大的负荷变化期间；
- 既能用作开环控制的顾问装置，也能用作闭环控制器。

杰梅斯·普罗克特有限公司的评价

杰梅斯·普罗克特有限公司的技术主管安德鲁·普罗克特先生称，继续对这种有可能减少污染物排放、降低运行成本和提高锅炉可靠性及工作效率的技术进行开发，对于煤炭发展前景来说极为重要，尤其是在工业领域。在CRE集团有限公司的锅炉试验装置上进行的试验，其结果非常振奋人心，这表示链式炉控制向前迈了一大步。

技术开发的组织方式

目前，杰梅斯·普罗克特有限公司正与格拉摩根大学进行密切合作，以对在商业化给煤机上应用这种基于神经网络的

控制器进行示范。欲获取更多的信息，请联系：Professor J Ward / Dr S J Wilcox

School of Design and Advanced Technology

The University of Glamorgan

Pontypridd

CF37 1DL

Tel: 01443 480480

Fax : 01443 482231

Mr Andrew Proctor

Technical Director

James Proctor Ltd

Bumley

BB11 1 LJ

Tel : 01282 453816

Fax : 01282 416178

欲获取有关混合式控制器的更多信息，请联系：

Professor D Owens

Centre for System and Control Engineering

University of Exeter

Exeter

Ex4 4QF

Tel : 01392 263263

Fax : 01392 217965

专题研究

004

1998年10月

The logo for the Department of Trade and Industry (dti) consists of the lowercase letters 'dti' in a bold, sans-serif font. The 'd' and 't' are connected, and the 'i' has a dot.

Department of Trade and Industry

专题研究

004

英国贸工部