

# 一种基于知识图谱的锅炉智能燃烧专家系统构建方法

龙清涵, 杨 铮

(河钢数字邯郸分公司, 河北邯郸 056002)

**摘 要:** 钢铁行业的燃气锅炉由于受燃料的压力、热值、负荷变化的影响燃烧变得较为复杂, 各参数之间又有较大的关联性, 常规的控制无法实现全自动控制。为解决不同负荷切换过程中快速找到最优控制参数, 并实现稳定燃烧, 本文提出了一种基于知识图谱的锅炉智能燃烧专家系统构建方法。该方法利用了知识图谱中图结构数据高度关联的特性, 快速定位当前工况下对应负荷的历史最佳控制参数, 并通过最近邻算法和自寻优算法可以快速获得当前工况下最佳的空气流量和空燃比设定值。

**关键词:** 知识图谱; 专家系统; 自寻优; 智能燃烧

## A Construction Method of Boiler Intelligent Combustion Expert System Based on Knowledge Graph

LONG Qinghan, YANG Zheng

(HBIS Digital Cinda (Handan) Technology Co., Ltd., Handan 056002, Hebei)

**Abstract:** The combustion of gas-fired boilers in the iron and steel industry becomes more complicated due to the influence of fuel pressure, calorific value, and load changes, and there is a large correlation between each parameter. Conventional control systems cannot achieve fully automatic control. In order to quickly find the optimal control parameters in the process of switching between different loads and achieve stable combustion, this paper proposes a construction method of boiler intelligent combustion expert system based on knowledge graph. This method takes advantage of the highly correlated nature of the graph structure data in the knowledge map to quickly locate the historical best control parameters for the corresponding load under the current working conditions, and quickly obtain the best control parameters under the current working conditions through the nearest neighbor algorithm and self-optimization algorithm. Air flow and air-fuel ratio setpoints.

**Keywords:** Knowledge Map; Expert System; Self-optimization; Intelligent Combustion

### 1 引言

在燃烧控制系统中, 空气调节系统的任务是保证进入燃烧系统的燃料充分燃烧, 使其达到最高的燃烧效率。由于锅炉燃烧系统具有强耦合、非线性等特点, 导致燃烧过程的燃烧效率受诸多因素的影响, 其中空燃比就是一个重要指标。空燃比直接决定烟气中的氧含量值, 而烟气中的氧含量值能够反应系统的燃烧效率, 因此人们不断寻找空燃比的优化方法, 以提高燃烧效率, 实现经济燃烧。

钢铁行业的燃气锅炉由于受燃料的压力、热值的影响燃烧变得较为复杂, 而各参数之间又有较大的关联性, 常规的控制无法实现较理想的全自动控制, 目前国内各钢铁生产企业中有 90% 以上的燃气锅炉的燃烧操作都还处在手动操作或单回路自动控制<sup>[1]</sup>, 并且存在以下问题:

(1) 最重要的负荷控制完全手动操作, 众多的高炉煤气阀、转炉煤气阀、空气阀需要调整, 操作人员的劳动强度大;

(2) 因燃气压力的变化, 空燃比无法及时作出调整, 造成燃料消耗较高;

(3)操作不及时或大起大落,造成燃气锅炉的运行不稳定。

为解决以上问题,本文提出了一种基于知识图谱的锅炉智能燃烧方法。该方法通过构建关于锅炉负荷以及锅炉燃烧所需参数的知识图谱,来记录和关联锅炉燃烧所需参数。并通过采用自动寻优的方式来更新优化锅炉燃烧的重要参数。根据实际负荷需求匹配最优参数以实现自动控制。

## 2 专家系统

我们注意到长期从事锅炉运行的热工专家们对于解决锅炉燃烧过程中的突发事件有着丰富的经验。当他们在做决策的时候,能够根据燃料热值、压力和负荷的波动等,将锅炉运行的机理性知识和丰富的专家经验知识有效结合,综合分析后能做出恰当的判断,并选择合适的策略来实现锅炉生产的控制与管理。这种专家经验具有非机理性、非系统性、近似性、分散性等特点,但在特定条件下,又是十分宝贵、十分有效的。因此当一般的方法无法很好地表达时,使用这种专家们才具有的经验性的专家知识所构建的专家系统是最适合的方法。

专家系统<sup>[2]</sup>通常由知识库、控制规则集、推理机构及信息获取与处理 4 个部分组成:

知识库:由事实和经验数据库、经验公式等构成。

控制规则集:它集中地反映了专家及熟练的操作者在某领域控制过程中的专门知识与经验。

推理机构:一般采用前向推理机制,对于控制规则由前向后逐条匹配,直到搜索到目标。

信息获取与处理:专家控制系统的信息获取主要是通过其闭环控制的反馈信息以及系统的输入信息,对于这些信息的处理可以获得控制系统的误差以及误差变化量等对控制有用的信息。

专家系统自身存在着一些难以克服的缺点,如知识获取困难。为了构建专家系统,研究人员需要和领域专家坐下来共同探讨对于给定的领域,哪些规则适用,哪些不适用。规则,也即专家系统要存储的知识,是很难明确揭示的。领域专家不能明确的将他所用到的规则罗列出来。另外,专家们往往也很难确切的表达出他们用到的真正有效的知识。基于这些原因,知识获取成为构建传统专家系统的瓶颈。为提高专家系统知识获取的能力,本文通过自动寻优的方式来更新知识库和规则集。

其次,专家系统不是鲁棒系统。如果专家系统对于一个问题找不到任何匹配的规则,系统无法给出任何结论。系统的知识库局限于存储的规则,因此如果没有规则可以应用,系统也无法给出备用选项。因此,专家系统是脆弱的。为提高专家系统的鲁棒性,我们引入了知识图谱的概念。

## 3 知识图谱

知识图谱可以定义为由实体(节点)和关系(边)组成的多关系的图形知识库<sup>[3]</sup>。在知识图谱中,知识以三元组(实体-关系-实体或者实体-属性-值)的形式存储。按照知识领域和应用范围的不同,知识图谱可以分为通用知识图谱和领域知识图谱。通用知识图谱涉及知识范围广,知识量大,且多位常识知识,已经有 DBpedia<sup>[4]</sup>、Freebase<sup>[5]</sup>、YAGO<sup>[6]</sup>、NELL<sup>[7]</sup>等代表性的工作;在领域知识图谱上,出现了一批针对医疗、教育、金融和社会研究领域知识图谱构建和应用的工作。

知识图谱作为一种关系型知识的有利表达形式,有望提升控制系统的知识自动化的程度<sup>[8]</sup>。一方面,知识图谱可以作为信息继承平台,对各生产要素及其关系进行统一的表达,从而成为解决生产过程的信息感知集成和人机物协同问题的基础资源之一;另一方面,知识图谱能够实现知识存储、检索和推理,能为操作人员提供知识查询服务。

在控制系统领域,已经有一些成熟的应用使用了知识图谱技术。比如, Mao S 等人<sup>[9]</sup>针对延迟焦化生产过程中的风险分析和安全控制问题,构建了过程安全知识图谱; ChenZY 等人<sup>[10]</sup>针对冷滚轧生产过程的钢带断裂问题,提取了相关特征并构建了知识图谱,实现了钢带断裂的建模;然而,在锅炉燃烧控制领域,并没有较为成熟的应用。因此本文基于以上出发点,对锅炉智能燃烧系统的结构特点和任务要求进行分析,从而构建出基于知识图谱的锅炉智能燃烧系统。

## 4 基于知识图谱的锅炉智能燃烧系统构建

大多数工业锅炉都存在能耗高、浪费大、环境污染等问题,与燃烧效率有直接关系。从各种燃烧装置

的实际运行都可知道：如果空气量不足，燃烧不充分，则燃烧效率低；但如果空气过多，也会使排烟带走的热量增加，热损失增加，同样也是不经济的。要想实现燃烧的经济性，必须确保燃烧系统处于最佳的燃烧状态，同时尽可能降低热损失。为达到上述要求，就需要构建智能燃烧系统，通过自动控制方式使空燃比保持在适当的数值。空燃比和热效率曲线<sup>[11]</sup>变化如下所示：

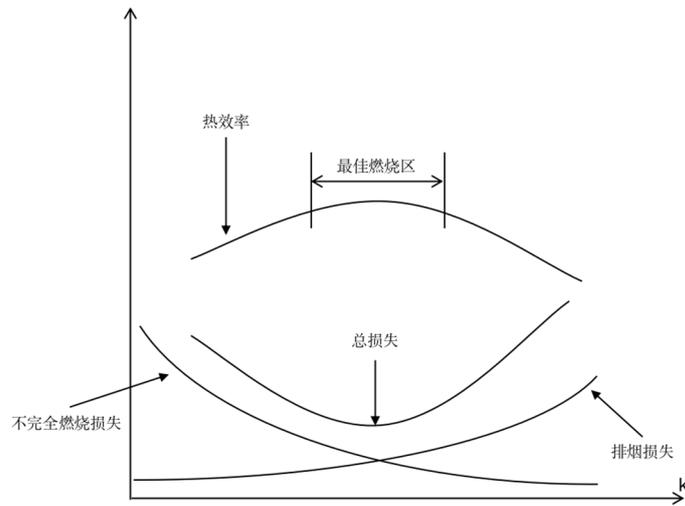


图8 燃烧热效率曲线

在空燃比k为最佳值时，排烟损失与不完全燃烧热损之和最小，燃烧效率达到最大。通过控制燃气调节阀和风机挡板，实现对燃气量和空气量的比例调节控制，维持空燃比处于最佳数值，保证燃气锅炉的燃烧过程始终处于最佳燃烧状态。

传统专家系统的知识管理采用文件和关系型数据库管理为主，专家知识之间没有建立起相互关联的专家知识关系网。随着信息化和智能化技术不断进步，专家知识管理方法不断创新，本文依托钢铁厂燃气锅炉智能燃烧系统，研发了基于知识图谱的锅炉智能燃烧专家系统。系统利用知识图谱创建一种基于图数据结构，将不同负荷前提下的锅炉燃烧控制的专家经验知识关联了起来，形成了一个锅炉燃烧专家知识网络体系。其构造步骤如下所示：

**步骤一：划分不同的负荷区间，并根据历史数据构建各负荷范围的属性图**

不同负荷范围的属性分别包括：送风流量、煤气流量、炉膛负压、煤气总管压力、蒸汽温度、蒸汽压力、氧含量以及热效率。属性图形式如下图所示：

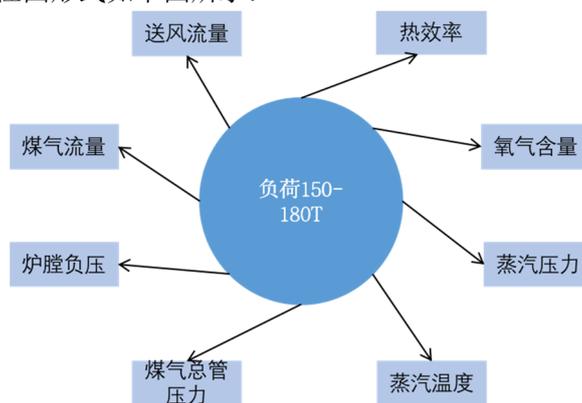


图9 各负荷范围的属性图

其中热效率用来评估锅炉的运行状态，热效率越高，锅炉运行状态越好。热效率通过正平衡法进行计算，其计算公式为：

$$\eta = \frac{Q_{\text{过热}} \times (H_{\text{过热}} - H_{\text{给水}}) + Q_{\text{排污}} \times (H_{\text{饱和}} - H_{\text{给水}}) + Q_{\text{再热}} \times (H_{\text{再热蒸汽出口}} - H_{\text{再热蒸汽入口}})}{M \times q}$$

其中 $\eta$ 表示热效率， $Q$ 代表蒸汽量， $H$ 代表焓值， $M$ 代表燃料消耗量， $q$ 代表燃料热值。

## 步骤二：通过属性图，构建知识图谱

将每个负荷区间当作知识图谱的一个节点，节点和节点之间的欧氏距离代表边的权重，其中欧式距离的计算方式如下：

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i^1 - x_j^1)^2 + \dots + (x_i^8 - x_j^8)^2}$$

其中 $x^k$ 代表第 $k$ 个属性值， $x_j$ 代表第 $j$ 个节点。通过三元组的形式构成知识图谱 $G(\text{node}_i, \text{edge}_{ij}, \text{node}_j)$ ，示意图如下所示：

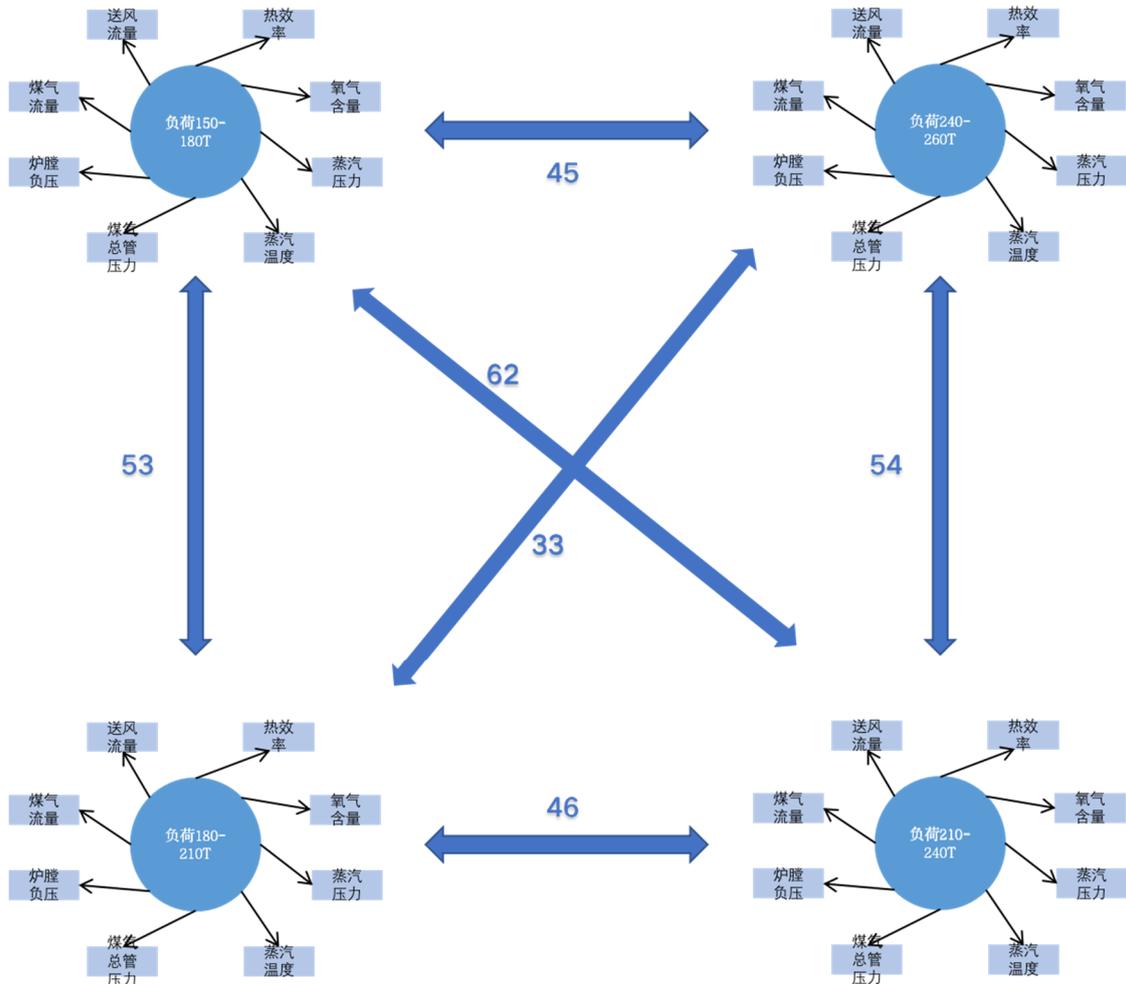


图 10 知识图谱示意图

## 步骤三：通过索引定位知识图谱中的相应节点

在生产过程中，需要确定锅炉的生产负荷，计算所属的负荷区间以定位其在知识图谱中属于哪个节点。然后获取该节点所对应的属性参数，当作相应的控制程序的设定值。

## 步骤四：判断当前工况是否稳定

首先根据专家经验设定工况稳定性参数范围，以 260T 锅炉为例，其具体参数范围如下所示：

炉膛负压 (-150~-90Pa)、氧含量 (2~5%)、蒸汽温度 (530~540 度)、蒸汽压力(8.6~9.2MPa)

如果实际工况不符合上述情况，则需要按照步骤三所定位的参数为设定值进行调节；当工况稳定后进行下一步操作。

## 步骤五：以热效率为目标，对锅炉送风流量进行寻优

首先基于知识图谱通过最近邻算法，检索出当前节点最近邻的两个节点及其参数，如下所示：

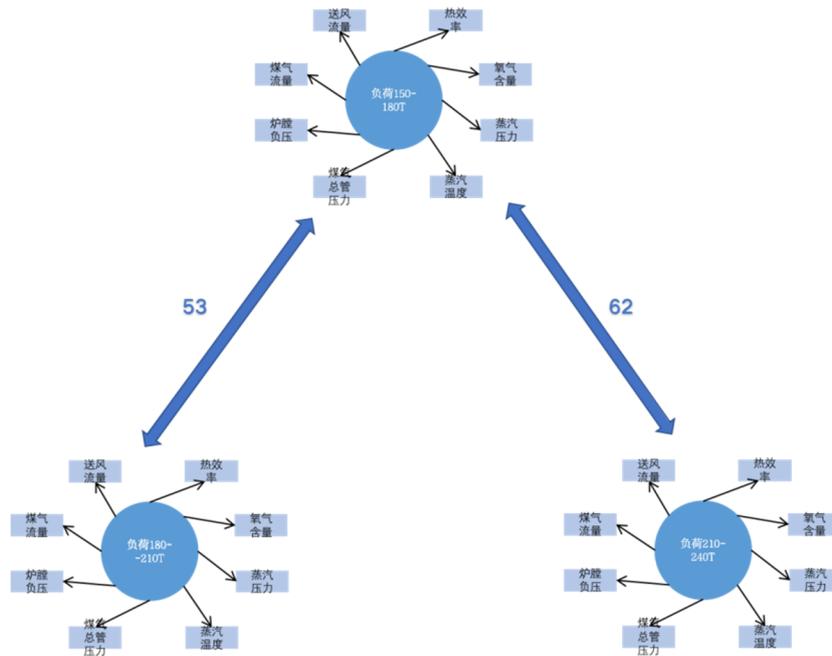


图 11 最近邻节点

设定当前节点为 $node_i$ ，近邻节点分别为 $node_{i-1}, node_{i+1}$ ，则当前节点和临近节点的空气流量和煤气流量历史参数分别为 $\{KQ_i, KQ_{i-1}, KQ_{i+1}\}$ 、 $\{MQ_i, MQ_{i-1}, MQ_{i+1}\}$ ，首先通过比较当前节点和相邻节点对应热效率数值，选择热效率最高的一组数据为空气流量的设定值。然后计算对应的空燃比寻优范围为 $[K_{min}, K_{max}]$ ，其计算公式为：

$$\begin{cases} K_{min} = \text{Min}(KQ_{i-1}/MQ_{i-1}, KQ_i/MQ_i, KQ_{i+1}/MQ_{i+1}) \\ K_{max} = \text{Max}(KQ_{i-1}/MQ_{i-1}, KQ_i/MQ_i, KQ_{i+1}/MQ_{i+1}) \end{cases}$$

然后以 $K_{min}$ 为起点 $K_{max}$ 为终点，进行自寻优。以寻优后的锅炉热效率为评判标准，找到热效率最高的参数。

由图 1 可知，热效率 $\eta$ 是空燃比  $k$  的单峰函数，这是智能燃烧系统进行优化控制的基础，可记为 $\eta = f(k)$ ，其中 $K_{min} \leq k \leq K_{max}$ 。则由改进的极值搜索法设计的自寻优算法模型的计算过程如下所示：

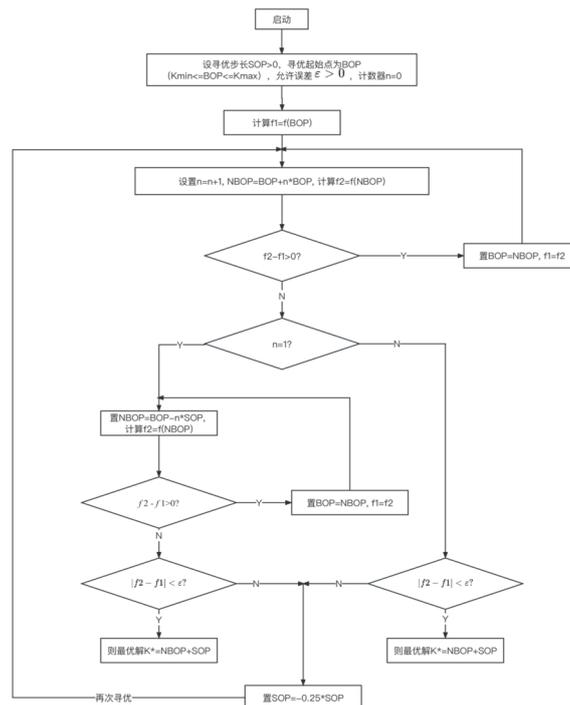


图 12 自寻优算法流程图

其中寻优步长为 SOP；计数器为 n。通过自寻优算法找到最佳空燃比，从而确定燃气流量的设定值。

#### 步骤六：动态识别最优工况，并更新知识图谱

首先，系统根据当前 DCS 实时采集的参数通过步骤四进行工况稳定性判断；如果工况稳定则将步骤五所得到的燃烧参数作为当前工况最优参数更新知识图谱中对应节点的属性图。如果工况并不稳定，则重复步骤四和步骤五的操作直到找到最优结果后更新知识图谱对应节点的属性图。

## 5 总结

通过构建基于知识图谱的智能燃烧专家系统，可以快速找到当前工况下的最优控制参数。一方面能够充分应用丰富的专家经验；另一方面通过自寻优算法可以进一步优化专家系统的知识库。基于知识图谱的专家系统，不仅弥补了传统专家系统灵活性差的问题，也充分利用了图结构数据的相关关系。

#### 参考文献：

- [1] 霍广平,杨铮. 燃气锅炉智能燃烧系统的研发与应用[C]//中国金属学会.第十三届中国钢铁年会论文集——11. 冶金自动化与智能化. 冶金工业出版社 ( Metallurgical Industry Press) ,2022:7.DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.017439.
- [2] 高岩. 基于专家系统的锅炉燃烧系统优化控制[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(5):27-29.DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2005.05.007.
- [3] WANG Q, MAO Z D, WANG B, et al. Knowledge graph embedding: a survey of approaches and applications[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2017, 29(12): 2724-2743.
- [4] LEHMANN J, ISELE R, JAKOB M, et al. DBpedia-a large-scale, multilingual knowledge base extracted from Wikipedia[J]. Semantic Web, 2015, 6(2): 167-195.
- [5] BOLLACKER K, EVANS C, PARITOSH P, et al. Freebase: a collaboratively created graph database for structuring human knowledge[C]// Proceedings of 2008 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York: ACM Press, 2008: 1247-1250.
- [6] SUCHANEK F M, KASNECI G, WEIKUM G. YAGO: a core of semantic knowledge[C]//Proceedings of the 16th international conference on World Wide Web. [S.l.:s.n.], 2007: 697-706.
- [7] MITCHELL T, FREDKIN E. Never-ending language learning[C]// Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Big Data. Piscataway: IEEE Press, 2014.
- [8] LI X Y, LYU M T, WANG Z X, et al. Exploiting knowledge graphs in industrial products and services: a survey of key aspects, challenges, and future perspectives[J]. Computers in Industry, 2021, 129: 103449.
- [9] MAO S, ZHAO Y M, CHEN J H, et al. Development of process safety knowledge graph: a case study on delayed coking process[J]. Computers & Chemical Engineering, 2020, 143: 107094.
- [10] CHEN Z Y, LIU Y, VALERA-MEDINA A, et al. Multi-sourced modelling for strip breakage using knowledge graph embeddings[J]. Procedia CIRP, 2021, 104: 1884-1889.
- [11] 杨长亮.基于模糊 PID 控制的燃气热水锅炉燃烧控制系统的研究[D].成都:电子科技大学检测技术与自动化装置学科硕士毕业论文, 2010.5.