

基于事例推理技术的锅炉运行实时目标工况模型

洪 军, 司凤琪, 毕小龙, 徐治皋

(东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 为了提高电站运行经济性, 提出采用机组综合成本煤耗作为锅炉运行的综合评价标准, 同时对锅炉运行目标工况进行了定义。通过对锅炉原始运行工况数据库进行稳态判定过滤掉非稳态运行工况, 在此基础上通过相似度计算将锅炉稳定运行工况划分到不同的工况组中, 以机组综合成本煤耗作为衡量标准获得各工况组中的最优运行工况, 建立锅炉运行目标工况数据库作为事例库, 采用基于事例的推理技术检索锅炉当前实际工况对应的目标工况。实际应用表明该模型能够自动跟踪锅炉运行特性变化, 目标工况的检索精度和效率满足运行优化的实时性要求, 为电站锅炉的运行优化提供了一种重要的手段。

关 键 词: 锅炉; 目标工况; 事例推理; 模糊匹配

中图分类号: TK212.4; O227 文献标识码: A

引 言

作为故障诊断和操作指导的基础, 锅炉运行目标工况的确定是从性能监测向运行优化转变的关键环节, 直接关系到对锅炉运行水平的评价。目前锅炉运行目标工况定义的模糊与实现手段的不完善是存在于几乎所有运行优化系统中的普遍问题, 有必要进行深入研究。

因此, 本文从提高电站的综合效益出发提出了锅炉运行工况的综合评价标准, 并对锅炉运行目标工况的定义和研究方法进行了阐述。运用数据挖掘技术在锅炉原始运行工况数据库的基础上建立起锅炉运行目标工况数据库, 并采用基于事例推理技术(Case-Based Reasoning, CBR)实时检索适合当前运行工况的目标工况。实际应用表明, 该方法能够实时反馈当前实际工况所对应的目标工况, 督促运行人员及时进行优化调整, 达到节能降耗的目的。

1 锅炉运行工况的综合评价标准

长期以来, 电站一直采用锅炉效率作为锅炉经济性评价的综合性指标。随着电站环保压力的增大

和成本意识的加强, 单纯考虑锅炉效率已经不能满足发展需要, 有必要寻找更加全面的评价标准。

当前电站面对日益严格的污染排放标准, 在实际运行中如果片面追求提高锅炉效率会使得氮氧化物及二氧化硫排放量增加, 因此应在保证污染物排放不超标的前提下, 追求尽可能高的经济效益。

锅炉作为电站发电的核心部分之一, 在进行经济性评价时必须纳入全厂的大环境综合考虑。锅炉在消耗煤的同时其辅机设备也在消耗厂用电。传统的锅炉效率计算并未考虑到厂用电量价值比煤高的特点, 具有明显的局限性。

因此, 评价锅炉运行工况必须从全厂角度出发, 在达到环保标准的前提下兼顾节电和省煤, 才能实现电站综合效益的最大化。本文采用机组综合成本煤耗作为锅炉工况的综合评价标准^[1], 定义如下:

$$b_{zh} = b + \eta_{cy} \times r_d / r_m \times 10^6$$

式中: b_{zh} —机组综合成本煤耗, g/(kWh); b —机组发电标准煤耗, g/(kWh); η_{cy} —机组综合厂用电率, %; r_d —平均上网电价, 元/(kWh); r_m —平均标煤单价, 元/t;

由于采用机组综合成本煤耗作为衡量锅炉运行综合效益的指标, 必须权衡锅炉效率与锅炉辅机设备消耗的厂用电之间的关系, 除常规影响锅炉效率的运行因素外, 上网电价和煤炭价格的变动会对锅炉的综合发电成本造成比较大的影响。

2 锅炉运行目标工况的定义与研究方法

锅炉的稳定运行工况可以定义为以一系列运行状态参数构成的特征空间, 这一系列状态参数的综合单值性决定了锅炉运行状态。锅炉每一个可能的稳定运行状态都对应着该特征空间中的一个点。

对这些锅炉稳定工况点进行综合评价必定有一个工况点优于其它工况点, 可称之为绝对最优工况,

它只决定于锅炉自身的特性,具有空间唯一性,理论上可作为所有其它工况点的目标工况。但是由于在这一系列状态参数中存在环境特性、燃料特性、负荷特性和热力设备特性等若干运行不可控制因素,绝对最优工况对于运行人员缺乏实际指导意义。

对运行人员而言,如何在运行不可控因素的约束下将锅炉稳定运行在相对最优工况,具备更加现实的指导意义,因此可以将运行不可控因素视为约束条件,将约束条件下的相对最优工况定义为运行最优工况。

假设运行不可控因素对应了总共 n 个运行状态参数中的 m 个参数,这就意味着即使约束条件保持不变,由于运行人员调整操作的差别,锅炉可以稳定运行在不同的工况下。这样根据约束条件的不同,可以将特征空间中的稳定运行工况点划分到不同的工况组中。从运行优化的角度分析,同一工况组中的工况具备相同或相似的约束条件,因而对应相同的运行最优工况。运行优化必须寻求当前约束条件下的运行最优工况作为锅炉运行的目标工况。

经过调研发现,目前国内外对于锅炉运行最优工况的界定还没有形成统一认识,因而在实际确定的过程中出现了多种替代方案。锅炉运行最优工况反映在具体的性能指标上就是该指标的目标值。目前国内外多采用设计值、试验值、计算值或经验值作为目标值^[3],这些替代方案在理论支持与技术实现上都不同程度的存在一定缺陷。

本文采用“实际可达最优工况”作为锅炉当前工况的目标工况,即选取与当前工况约束条件近似的运行最优历史工况作为目标工况。虽然“实际可达最优工况”与理论上的锅炉运行最优工况可能还存在一定差距,但是它代表了在相似约束条件下实际出现过的锅炉最佳运行水平,具备相对完善的理论基础和实现手段,对运行人员具有积极指导作用。

3 基于事例推理技术

基于事例推理技术通过模拟人脑的思维过程^[3],运用类比和联想来获得当前相似问题的求解策略。与传统的基于规则推理不同的是,基于事例的推理不依赖于求解问题领域的规则,而是依赖于以前的经验及其解决方案的描述,非常适用于理论模型缺乏和领域知识不完全的决策环境。

影响锅炉运行工况的因素众多,且彼此耦合高度非线性,很难用精确的理论模型描述。运行人员往往是根据经验对锅炉进行运行调整,与 CBR 方法

的指导思想吻合,因而 CBR 方法可以用于确定当前锅炉运行工况所对应的“实际可达最优工况”。

采用 CBR 方法的思路非常直接,通过将以前的历史运行工况按一定存储方式组织成事例库,针对当前工况按一定的检索机制进行遍历,检索出最为相似的一组工况,从中选择运行最优的工况作为当前工况的目标工况。

目前电站普遍通过集散控制系统(DCS)或数据采集系统(DAS)从现场实时采集高密度、大容量的过程数据并保存在数据库中,锅炉在不同外部约束条件下的最优运行工况均记录在锅炉的原始运行工况数据库中。在实际开发中发现,锅炉原始运行工况数据库中的运行工况记录数据量巨大,实时增长,且其中混杂着大量非稳定运行工况,直接采用 CBR 方法进行检索,需要遍历数据库同时进行稳态判定和工况寻优,检索速度和效率难以满足运行优化实时性的要求。因此有必要先对锅炉原始运行工况数据库进行稳态判定和工况寻优,建立起锅炉运行目标工况数据库,在此基础上运用 CBR 方法进行目标工况的实时检索,以提高检索效率和精度,建模流程如图 1 所示。

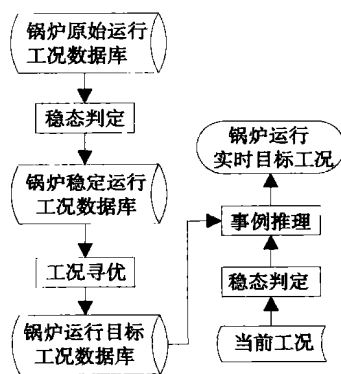


图 1 锅炉运行目标工况建模流程图

4 建立锅炉运行目标工况数据库

4.1 锅炉历史运行工况稳态判定

由于自身的热惯性和容积惯性,锅炉在外部约束条件变化以及各种内部扰动作用下,常常处于暂态不稳定工况^[4],为了确保模型反映锅炉的稳态运行特性,有必要对原始运行工况数据库中的工况记录进行稳态判定过滤掉非稳态工况记录。

当锅炉的运行状态参数在一定时间范围内波动比较平缓,就可以认为锅炉处于稳定运行工况。针对电站锅炉运行特点,选取以下状态参数作为工况

稳态判定的特征变量:主蒸汽流量、主蒸汽压力、主蒸汽温度、炉膛温度、排烟温度、给粉机转速、送风压力以及炉膛负压^[5]。

采用模糊匹配方法判断锅炉是否运行在稳定工况下^[9],及各运行参数是否在正常范围之内(不能接近超限),给出稳态判定算法具体步骤。

4.1.1 确定各特征变量的隶属度函数

设锅炉原始运行工况数据库中的第 k 个工况为待判定工况, m 为进行工况稳态判定的特征变量个数。对各特征变量的隶属度函数定义如下:

$$\mu_{ij} = \exp\left[-\left(\frac{p_i(j) - p_i(k)}{\sigma_i}\right)^2\right]$$

式中: $i = 1, \dots, m; j = k - l, k - l + 1, \dots, k - 1, k + 1, \dots, k + l - 1, k + l; \mu_{ij}$ —稳态判定区间内第 j 个工况 $p_i(j)$ 的第 i 个特征变量对应于待判定工况 $p_i(k)$ 的第 i 个特征变量的隶属度; σ_i —类似随机变量的标准方差,它决定了隶属度函数值的大小(由经验给定的可调参数)。当 $p_i(j) = p_i(k)$ 时, $\mu_{ij} = 1$,说明两种工况的第 i 个特征变量完全相同;当 $|p_i(j) - p_i(k)| \geq 3\sigma_i, \mu_{ij} \leq 0.05$,可近似认为 $\mu_{ij} = 0$,说明两种工况的第 i 个特征变量完全不同; l 为稳态半区间长度,它是锅炉稳定运行的一个时间定义量,取值取决于锅炉原始运行工况数据库的记录存储间隔。

4.1.2 隶属度的加权处理

由于不同特征变量对锅炉运行工况平稳性状的影响程度不同,需要给各个特征变量赋予不同的权值,加权后的隶属度如下所示:

$$M_{ij} = \mu_{ij} \times \lambda_i$$

式中: M_{ij} —加权后稳态判定区间内的第 j 个工况的第 i 个特征变量的隶属度函数; λ_i —第 i 个特征变量的权重系数, $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1, 0 \leq \lambda_i \leq 1$ 。

4.1.3 工况总相似度计算

对第 j 个工况的各个 M_{ij} 做线性加和,便可得到稳态判定区间内的第 j 个工况与待判定工况总的模糊相似度:

$$R_j = \sum_{i=1}^m M_{ij}$$

式中: R_j —稳态判定区间内第 j 个工况与待查工况的总相似度。

4.1.4 工况稳态判定

根据经验取定一个匹配水平阈值 $\delta, 0 \leq \delta \leq 1$ 。 δ 值越接近于 1,则稳态水平要求越高。稳态判别标准如下:当所有 $R_j \geq \delta$ 时运行工况处于稳态,当任意 $R_j < \delta$ 时运行工况处于非稳态。

经过稳态判定后,对于处于稳态区间的原始运行工况记录,就可筛选到稳定运行工况数据库中。

4.2 锅炉稳定运行工况寻优

通过将环境参数、煤质参数、负荷参数组合在一起作为特征向量,将锅炉稳定运行工况特征空间中所有的历史工况点通过相似度计算划分到不同的工况组中。对各工况组中工况的机组综合成本煤耗进行排序,将最优运行工况筛选进锅炉运行目标工况数据库。组内工况寻优排除了非运行可调因素的干扰,单一体现了运行调整水平对电站综合效益的影响。工况划分寻优算法如图 2 所示, $p(k)$ 表示锅炉稳定运行工况数据库中的第 k 个工况。

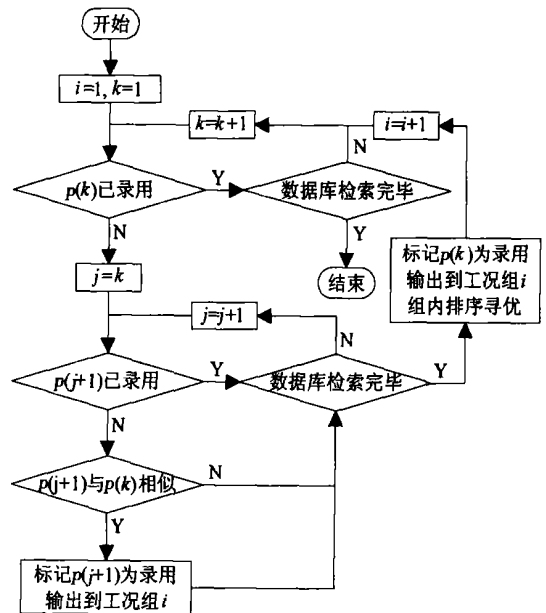


图 2 锅炉稳定工况分组寻优算法框图

5 锅炉运行目标工况实时检索

事例检索是 CBR 技术的中心环节,其目标在于按照一定标准高效准确的在事例库中找到与当前事例最相似的事例。将锅炉当前稳定运行工况的外部约束条件看作当前事例,该事例可以用由环境参数、负荷参数、燃料特性参数等特征变量组成的特征向量来描述。将锅炉运行目标工况数据库作为事例库,根据当前事例遍历事例库,采用变权值的最近相邻检索策略进行检索,事例之间的相似性是各特征变量之间相似性的加权求和,具体的计算步骤与工况稳态判定中计算工况相似度类似。对当前事例与数据库中各运行最优工况事例的相似度进行比较,选择相似度最高的历史工况即可作为锅炉当前运行工况的目标工况。

当采用精确检索方案进行事例检索时, 由于锅炉变工况运行的情况十分复杂, 受存储锅炉运行目标工况的事例库的完备性限制, 并不是每次都能在事例库中检索到精确匹配当前运行工况的目标工况, 因此采用模糊检索方案^[7]。模糊检索是在精确检索基础上针对不同类型的特征变量弱化了匹配条件, 从而降低了对事例库完备性的要求, 比前者适应性更广, 从而提高了事例检索的成功率。

6 应用实例与分析

针对某电站一台 300 MW 四角切圆煤粉燃烧锅炉进行研究。选用 Microsoft SQL Server 关系型数据库存储锅炉运行目标工况事例, 用特征空间结构映射事例库结构: 每个特征变量对应一个字段, 每个工况对应一条记录。

某一时刻机组负荷为 212.09 MW, 环境温度为 16.5℃。锅炉当前实际运行工况通过稳态判定后, 选择环境温度、锅炉负荷以及燃料特性的 8 个参数(低位发热量、挥发分、水分、灰分以及收到基碳、氢、氧、氮)总共 10 个参数组成特征向量作为当前事例, 在锅炉运行目标工况数据库中检索获得对应的运行目标工况, 实际工况与目标工况主要指标的对比结果如表 1 所示。

表 1 锅炉实际工况与目标工况主要指标对比

运行工况参数	实际工况	目标工况
主蒸汽压力/MPa	15.07	13.21
主蒸汽温度/℃	531.78	536.39
再热蒸汽温度/℃	528.45	535.16
排烟温度/℃	140.41	137.22
给水温度/℃	255.13	263.39
厂用电率/%	4.17	3.72
锅炉效率/%	92.25	93.78
机组发电标准煤耗/ $g \cdot (kWh)^{-1}$	328.76	320.21
机组综合成本煤耗/ $g \cdot (kWh)^{-1}$	368.08	355.28

由于锅炉在长期运行过程中会产生运行磨损, 造成运行特性改变, 加上燃烧煤种的多变性, 为了保证事例库的准确有效和检索效率, 锅炉稳定运行工况数据库和运行目标工况数据库均设置有固定的容量并实时更新, 新工况记录不断替换掉最老的工况记录。

在建立事例库的过程中, 锅炉运行工况的评价标准决定了目标工况事例的定位, 事例库的容量、事例的存储方式、检索方案和算法决定了事例检索的效率和结果的有效性。在实际应用时需要根据电站实际需求与现场服务器的工作负荷, 对稳态匹配水

平阈值、稳态判定区间的大小、工况分组匹配水平阈值、事例库的容量以及事例检索匹配水平阈值等参数进行设置和修改, 以获得最佳的应用效果。

7 结 论

(1) 锅炉运行实时目标工况模型采用兼顾环保、节电和省煤的综合评判标准对锅炉运行工况进行评价, 避免了单一采用锅炉效率衡量运行工况的局限性, 符合当前电站利益。

(2) 作为事例库的锅炉运行目标工况数据库建立在锅炉原始运行工况的基础上, 从而使得事例库中的事例覆盖了锅炉日常运行的各种工况条件, 真实反映锅炉的实际运行特性。

(3) 锅炉运行实时目标工况模型选择锅炉运行目标工况数据库作为事例库, 不但排除了非稳态数据的干扰, 而且减少了事例检索的计算量, 提高了事例检索的效率和准确性。

(4) 锅炉运行实时目标工况模型针对当前工况实时检索输出锅炉的运行目标工况, 促使运行人员通过操作调整不断缩小与目标工况的差距, 提高了锅炉运行水平。

(5) 锅炉运行实时目标工况模型的事例库实时更新, 及时跟踪反映锅炉的运行特性变化, 具备了自调节(Self-tuning)功能, 从而能够满足运行优化的实时性要求。

综上所述, 基于事例推理技术的锅炉运行实时目标工况模型, 具有建模原理清晰、工况适应范围广、预测精度高、实时性好、自调节能力强等优点, 为获得锅炉实时目标工况提供了一种重要的手段。

参考文献:

[1] 陈国年, 曹炳元. 基于能量价值分析的锅炉最佳运行方式研究[J]. 锅炉技术, 2004, 35(3): 55-58.

[2] 任浩仁, 李蔚, 盛德仁, 等. 火电机组变工况下运行指标应达值的分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 50-52.

[3] FINNIE G, SUN Z. R5 model for case-based reasoning[J]. Knowledge-Based Systems, 2003, 16(1): 59-65.

[4] 刘福国. 基于统计分析的电站锅炉性能建模与优化[J]. 动力工程, 2004, 24(4): 478-494.

[5] 卢勇, 徐向东. 锅炉变工况运行优化监控系统的实现[J]. 动力工程, 2003, 23(2): 2325-2328.

[6] NAVARRO G, BAEZA YATES R, SUTINEN E, et al. Indexing methods for approximate string matching[J]. IEEE Data Engineering Bulletin, 2001, 24(4): 19-27.

[7] JUELL P, PAULSON P. Case-based systems[J]. Intelligent Systems, 2003, 18(4): 60-67.

(何静芳 编辑)

teristics of combustion data under the conditions of wide-range fluctuations in boiler fuel heating value, the authors have presented a hybrid model composed of a correlation information algorithm and a non-linear mapping network. By making use of the above model, a calculation and analysis has been conducted of the on-site combustion data of a 300 MW utility boiler in China. As a result, obtained was certain diagnostic knowledge governing the change in fuel heating values, which can lead to a better prediction of the change in fuel heating values and an optimized operation by operating personnel. The method can be used conveniently with a low input of outlays. Moreover, it lends itself to be seamlessly integrated into an existing SIS platform to improve the real-time performance diagnostic module of a boiler system and expand the space for the secondary development of a SIS system. **Key words:** utility boiler, data mining, combustion optimization, intelligent diagnosis, neural network, low heating value

基于事例推理技术的锅炉运行实时目标工况模型 = Real-time Target Operating-condition Model for Boiler Operation Based on Instance-and-case Reasoning Techniques [刊, 汉] / HONG Jun, SI Feng-qi, BI Xiao-long, et al (College of Energy Sources and Environment under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 29 ~ 32

To enhance the operational cost-effectiveness of a power plant, the authors have proposed to adopt a plant synthetic cost-based coal consumption to serve as a comprehensive evaluation criterion for boiler operation. Meanwhile, a definition was given for the target operating-condition of a boiler. By making a steady-state judgement of the original operating condition database of a boiler non-steady-state operating conditions have been filtered out. On this basis through a similitude calculation, the steady-state operating conditions of the boiler can be classified into different groups of operating conditions to obtain the optimal ones in various operating condition groups by assuming the synthetic cost-based coal consumption of the boiler unit as a judgement criterion. With the establishment of a boiler-operation target operating condition database, which serves as a case-and-instance database, retrieved was the target operating condition corresponding to the current practical one by using the instance and case-based reasoning techniques. Practical applications show that the model can automatically track the changes in boiler operation characteristics. The accuracy and efficiency in retrieving the target operating condition can meet the real-time requirements for operation optimization, providing an important means for operation optimization of utility boilers. **Key words:** boiler, target operating condition, instance and case-based reasoning, fuzzy matching

基于雨流计数法的锅炉汽包寿命实时监测 = Boiler Drum Life Real-time Monitoring Based on a Rain-flow Counting Method [刊, 汉] / WANG Zhang-qi, JIANG Wen-qiang, AN Li-qiang (College of Mechanical Engineering under the North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 33 ~ 37

A model for monitoring the temperature and stress profiles of boiler drums has been established. Based on the start-up data of a boiler drum acquired from the DCS (distributed control system) of a power plant, the hazardous point on the boiler drum can be determined from a finite element analysis and the stress concentration factor at that point also corrected. An implicit difference method to calculate the transient temperature profile of the boiler drum and the equivalent stress calculation formula of the hazardous point were given, thereby improving the rain-flow counting method. Proposed is a criterion for judging the completion of boiler drum startup and shutdown process by adopting a stress stabilization principle. The number of different stress amplitude cycles at each startup and shutdown process was added up and on this basis the life wastage of the boiler drum determined. By analyzing the data acquired from a cold startup of the boiler drum, the authors have verified the effectiveness of the method under discussion and thereby developed a real-time system for monitoring the service life of boiler drums. The boiler drum monitoring operation of a 600 MW turbo-generator boiler drum shows the effectiveness of the method in achieving the aim of performing a real-time monitoring of boiler drum life wastage and of providing guidance for their operation. **Key words:** boiler drum, fatigue life, rain-flow counting method, cold-state start-up, real-time monitoring