

燃煤发电机组灵活运行控制技术研究进展

孙源¹, 张启超¹, 张忠孝¹, 郭欣维^{1,2}, 孔成栋¹, 徐嘉叶¹,
叶妮娜¹, 黄林鹏¹, 乌晓江¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 华北水利水电大学 乌拉尔学院, 郑州 450045)

摘要: 加快构建新型电力系统是助推“双碳”目标实现的核心关键。风、光可再生能源的大比例接入给电力系统的安全稳定运行带来了新的挑战, 对燃煤机组的安全、深度、灵活调峰控制也提出了更高要求。依据煤电机组智能灵活调峰控制技术的发展历程, 从被控对象建模和灵活运行控制方法两个层面进行梳理与分析, 研究结果表明, 辅以机器学习和其他智能系统辨识方法的混合建模方式, 以及融合预测控制、自适应控制、多目标智能寻优等先进控制技术更加适合未来煤电机组灵活智能控制的需要, 是未来煤电机组灵活、智能控制技术发展的主要方向。

关键词: 燃煤机组; 灵活调峰; 建模方法; 运行控制; 协调控制系统

中图分类号: TM 621 **文献标志码:** A

Progress of flexible operational control technology for coal-fired units

SUN Yuan¹, ZHANG Qichao¹, ZHANG Zhongxiao¹, GUO Xinwei^{1,2}, KONG Chengdong¹, XU Jiaye¹, YE Nina¹,
HUANG Linpeng¹, WU Xiaojiang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Ural Institute, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Speeding up the construction of a new power system is the key to promoting the realization of the "dual carbon" target. The connection of a large proportion of intermittent wind and solar renewable energy has brought new challenges to the safe and stable operation of the power system, and has also put forward higher requirements for the fast, deep and flexible operation capabilities of coal-fired units. In this paper, the modeling methodology and flexible operational control technology for coal-fired units were described and analyzed based on the the development history of intelligent and flexible peak-shaving control technology. The analysis results show that the hybrid modeling method supplemented by machine learning and other intelligent system identification methods, as well as the integration of predictive control, adaptive control, multi-objective intelligent optimization, etc. are more suitable for the needs of flexible and intelligent control of future coal-fired units, and are the main direction for the development of flexible and intelligent control technology for coal-fired units.

收稿日期: 2023-08-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB2403200)

第一作者: 孙源 (2000-), 女, 博士研究生。研究方向: 燃煤电站灵活控制优化技术。E-mail: thsoya@sjtu.edu.cn

通信作者: 乌晓江 (1977-), 男, 研究员。研究方向: 燃煤机组深度灵活调峰关键技术。E-mail: wuxiaojiang@sjtu.edu.cn

Keywords: coal-fired units; peak-shaving; modeling method; operational control; coordinated control systems

“双碳”目标下, 加快构建新型电力系统是能源结构低碳化转型的重要途径。截至 2022 年底, 我国电力装机约 25.64 亿 kW, 其中风电约 3.65 亿 kW, 太阳能约 3.93 亿 kW, 风、光装机容量约占总装机容量的 29.6%。2022 年, 全年发电量约 8.84 万亿 kW·h, 风、光全年发电量约占总发电量的 13.4%。目前, 我国煤电装机占比小于 50%, 发电量超过 60%, 承担了 70% 的顶峰任务。随着未来我国新能源装机容量的持续增加, 新型电力系统调节缺口将大幅增加, 传统电源调节能力不足的问题将日益凸显^[1]。因此, 大幅提高燃煤发电机组低负荷运行的安全稳定能力以及变负荷响应速度与变负荷跟踪能力, 对缓解大比例新能源并网的缺陷变得十分重要。

一般说来, 燃煤机组自身主辅机设备的灵活运行域是燃煤机组灵活运行能力的基础, 而运行控制技术则可在不改变机组硬件设施的条件下, 一定程度上进一步挖掘并提升机组的灵活运行能力。因此, 近年来针对燃煤发电机组灵活运行控制技术的研究受到国内外学者的广泛关注。由于燃煤发电机组是一个多设备、多流程的复杂热力系统, 其灵活运行控制主要存在以下难点^[2-3]: a. 机组模型为非线性时变系统, 随着机组负荷变化, 机组动态参数也呈非线性大幅变化, 尤其对于超(超)临界机组, 当运行在临界点附近工况时, 由于工质的热力学性质在拟临界区附近, 机组会表现出极大的非线性, 这意味着仅使用经典控制方法难以获得良好效果; b. 机组存在多变量, 且变量间存在强耦合关系, 各个子系统之间相互影响; c. 由于机组具有大惯性与大延迟特性的特点, 且锅炉侧表现得尤为明显, 对机组整体的协调控制造成较大影响。

综上所述, 要进一步提升燃煤发电机组的灵活运行能力, 还须在传统燃煤机组控制技术的基础上进一步融合预测控制、自适应控制、多目标智能寻优控制等先进控制理念, 从而在一定程度上提升机组最低负荷工况下的可靠性、关键参数稳定性、经济性以及变负荷过程中的快速协调性等性能。近年来, 国内外诸多学者在该领域开展了相关研究与探索。本文依据燃煤发电机组协调

控制系统灵活运行控制技术的发展历程, 从被控对象建模与灵活运行控制方法两个方面进行了梳理与总结, 并提出未来燃煤发电机组灵活运行控制技术的主要发展方向, 为燃煤机组开展深度灵活调峰优化运行控制提供依据。

1 建模与动态特性研究

建立理论模型是对实际被控对象进行抽象的过程, 为此, 能够准确描述被控对象特性的模型是大部分控制系统设计的基础。单元机组动态特性的研究一直是热控领域的一项重要工作, 其动态特性的复杂性是机炉协调控制系统研究工作中的重点与难点之一^[4]。被控对象模型的建立主要有 3 种方式: 机理建模、系统辨识以及将前两者融合的混合建模^[5]。

1.1 机理建模

机理建模以基本物理定律为原理, 结合参数测量、降阶简化等多种方式, 推导出被控对象的理论模型。Åström 等^[6]根据质量、能量守恒定理, 采用集总思想, 建立了 160 MW 汽包锅炉机组简化非线性模型。秦志明^[7]先利用稀疏化核偏最小二乘法对水汽热力参数进行软测量, 再根据物质与能量守恒进行建模, 并采用链式结构集总参数法对其进行简化, 最终建立了线性化的具有解析形式的超(超)临界机组模型。刘晔辉等^[8]根据亚临界机组输出负荷和蒸汽压力之间的热力学关系进行机理建模, 再针对其增量形式通过小偏差线性化进行简化, 最终得到某亚临界机组的无自平衡对象传递函数。机理建模过程能够加深对被控对象运转机制与特性的理解, 但由于许多实际物理过程很难用简单的数学表达式进行表征, 计算时通常需要进行理想化的条件假设, 并进行降阶与简化, 即只研究主要参数间的函数关系。在此过程中, 参数的准确性不够、理想条件与实际物理条件的差异较大等因素都易造成机理模型的误差较大。

1.2 系统辨识法

系统辨识是基于试验采集到的输入输出数据或工业系统正常运行数据进行数学模型构造的方

法, 所得到的模型严格意义上来说是一个与实际系统相近的经验模型, 也被称为“黑箱建模”^[9]。过去常用的系统辨识方法包括脉冲响应、最小二乘法^[10]等, 即给予系统特殊的输入信号, 观察输出建立模型的方法。随着计算机技术的蓬勃发展, 自 20 世纪以来深度学习、人工神经网络、遗传算法等辨识算法也应用其中^[11]。

Chawdhry 等^[12]采用传统的系统辨识方法, 即阶跃响应法对锅炉汽轮机机组进行辨识, 得到一种使用范围广泛的系统模型。智能辨识算法主要以计算机人工智能为基础。陆豪强^[13]选取人工蜂群算法, 对燃烧系统的各个子系统进行辨识, 得到了各传递函数。张晓丛^[14]以某 1000 MW 超临界机组的 3 个子系统共 6 个变量的历史数据为依据, 利用粒子群优化算法 (PSO) 进行系统辨识, 得到了较为理想的数学模型。

由于系统辨识建模仅基于现场试验数据, 因此不利于对系统机理的理解。同时, 这类模型存在泛化能力差的问题, 即在所给数据范围之外的精度和可靠性具有不可预知性, 尤其是对于燃煤发电系统这类非线性较大的系统^[15]。

1.3 混合建模

混合建模方法是将机理建模与系统辨识相结合, 即先根据机理搭建被控对象的系统框架与部分模型, 再通过系统辨识得出阶数、参数等特性^[16]。其中, 第二步辨识方法可分为传统方法和智能方法两类。

屈小凡^[17]针对超(超)临界机组, 将其拆分为多个子系统, 搭建整体结构, 再拟合函数, 提出利用基于多样性评价指标的改进差分进化算法进行参数辨识, 建立了三阶状态空间非线性模型, 并通过阶跃响应的仿真结果验证模型精度。周欣悦^[18]针对超临界机组建立了四输入、四输出的非线性模型, 并利用机理建模结合遗传算法的参数辨识方法求取模型参数。将模型数据与某 350 MW 机组实际数据进行对比验证, 发现该模型具有较好的量化精度。Hau 等^[19]通过一系列的假设与公式推导, 建立了超临界锅炉机组的非线性数学模型, 并结合运行数据, 采用回归分析与免疫遗传算法 (IGA) 确定相关参数。仿真结果表明, 该模型能够表征该单元的动态特性, 并具有良好的精度。

鉴于机理建模存在复杂性高和精度低的问题, 系统辨识存在难以理解和泛化能力差的问

题, 混合建模则结合了两者的优点, 原理清晰且所得模型精度高, 是当前燃煤发电机组采用的主流建模方法。

2 燃煤发电机组灵活运行控制方法

准确的被控对象数学模型有利于加深对被控系统特性的理解, 这是大多数控制系统设计的基础。控制方法的选择应结合控制期望目标和被控对象特性进行综合考虑。

2.1 控制方法分类

根据使用的数学和计算机工具, 可以将燃煤发电机组控制方法分为经典控制、现代控制和智能控制 3 类, 其具体内容和相互关系如图 1 所示。

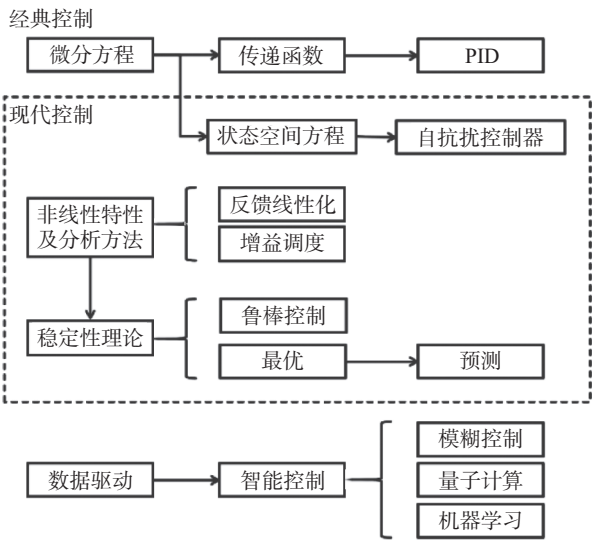


图 1 控制方法发展过程

Fig.1 Development of control technology

2.2 经典控制方法

经典控制理论以拉普拉斯变换为数学工具, 主要研究定常系统的控制方法^[20]。在工业控制领域中被广泛应用的 PID(比例·积分·微分)控制器已经在燃煤发电机组控制系统中得到推广使用。然而, 机组在调峰运行时, 负荷发生大范围快速变动, 传统的 PID 控制难以及时准确地矫正动态偏差, 导致控制效果不够理想^[21]。因此, 许多学者针对如何简化 PID 在燃煤发电机组中的应用过程以提升控制速率, 提出了更加简洁的参数整定方式。卫丹靖等^[22]研究并简化了火电机组模型, 提出了针对火电机组模型的 PID 参数整定简化方法, 并讨论了各个参数对控制性能的影响机理。另外, 也有许多学者通过在原有控制逻辑上增加

前馈、反馈回路来提升整体调控性能。李甲伟等^[23]为锅炉响应速度相对汽轮机响应速度要慢很多, 因此, 在亚临界机组锅炉侧的控制逻辑上增加前馈回路, 以协调机炉之间的能量匹配问题。周欣悦^[18]在原有机组控制逻辑上增加供热抽汽流量调节回路, 从而在变负荷初期通过调节抽汽流量加快机组变负荷响应速率。经仿真验证, 该方法可显著提升机组变负荷响应速率。经典控制方法的优势在于实现与维护简单, 但对于燃煤发电机组这类非线性、非定常系统, 其控制性能略逊于其他更先进的控制方法^[24]。

2.3 现代控制方法

2.3.1 现代控制方法概述

现代控制理论针对多输入多输出的被控对象进行分析与控制设计, 基本采用状态空间描述系统。相对于经典控制方法, 现代控制方法对多变量、非线性被控对象的控制效果更加理想^[25]。

2.3.2 自抗扰控制

自抗扰控制器是由中国科学院韩京清在 20 世纪 90 年代提出的一种不完全依靠数学模型的控制^[26], 其结构如图 2 所示, 由扩张状态观测器 ESO 和扩张状态反馈 ESF 组成^[27]。图中: r 为参考信号; u_0 为内环控制信号; u 为控制信号; y 表示输出; f 表示总扰动; Z 为状态变量观测值。该控制方法的核心思想是将所有自扰和外扰都归入总扰动函数 f , 控制器只须针对总扰动进行抑制^[28]。

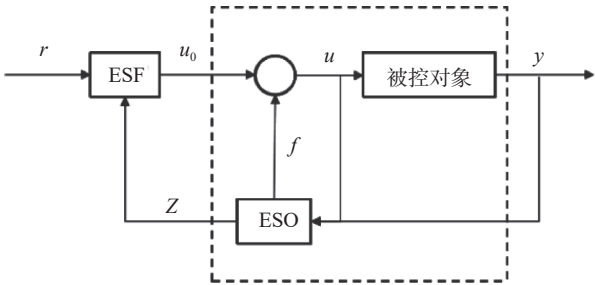


图 2 自抗扰控制器结构

Fig.2 Structure of active disturbance rejection controller

一般的自抗扰控制器都采用非线性机制, 且待整定参数多(一般形式的非线性自抗扰控制器的控制参数有 12 个)。因此, 在参数整定方面, 秦志明^[7]以 1000 MW 超(超)临界机组为研究对象, 改进 D-分割法, 提出了自抗扰控制器的全新参数整定方法。通过仿真验证了该方法具有良好的鲁棒性和对变负荷的适应性, 在升降负荷过程中能实现无振荡、无超调地跟随斜坡功率指令。此

外, 也可以通过线性化控制器的方法来简化参数, 如 Tan 等^[29]针对燃煤机组设计线性自抗扰控制器, 并提出了解耦补偿方案和主动扰动抑制控制方案, 经仿真验证发现该种方式能够对机组模型实现良好的解耦, 且能将变负荷速率提高约 20%。自抗扰控制器的设计原理清晰, 控制鲁棒性好, 尤其在外界扰动与内部扰动情况下仍能表现出较理想的效果。目前, 该方向的研究大多集中在结构简化和参数整定方法创新方面。

2.3.3 非线性控制

自 20 世纪 80 年代以来, 非线性控制理论开始进入蓬勃发展时期。对于燃煤发电机组, 尤其是超(超)临界机组, 非线性控制方法往往能够取得更好效果。目前常应用于燃煤发电机组的非线性设计方法主要有反馈线性化和增益调度两种。Moradi 等^[30]针对锅炉-汽轮机机组分别应用反馈线性化和增益调度方法设计了两款 PI 控制器, 并经过仿真发现两者都能达到较好的控制要求, 且基于反馈线性化的控制器更易实现, 但易产生约 50% 的超调, 基于增益调度的控制器时间响应速度更快, 且不存在超调与振荡现象。基于增益调度理论, 直接能量平衡法(direct energy balance, DEB)于 20 世纪 80 年代被提出。美国 Leads and Northrup 公司首先将 DEB 应用于电厂协调控制系统中, 并初步解决了部分动态响应问题。张鹤飞^[31]中加入前馈回路, 从而提出了基于 DEB 的炉跟机控制策略和 DEB-超前滞后前馈两种控制方法, 通过仿真实验比较发现: DEB-超前滞后前馈对负荷曲线最接近, 跟踪程度最好。由于非线性控制根植于物理模型, 且原理与经典控制相类似, 具有实现过程简单的优点, 但缺点在于控制效果较差, 抗干扰能力弱。

2.3.4 鲁棒控制

鲁棒控制是指在外界条件发生重大变化、被控系统内部出现动态扰动的情况下仍能保持良好的控制效果, 相关性能仍能保持最佳。目前, 在燃煤发电机组控制中最常使用的鲁棒控制理论是 H_{∞} 控制。Tan 等^[32]针对燃煤机组基于 H_{∞} 回路成型法设计了线性控制器。恒庆海等^[33]通过改进不确定性权函数和性能权函数, 改进机组现有的 H_{∞} 控制器性能, 提升了被控对象摄动时的鲁棒性。Tan 等^[34]通过仿真发现 H_{∞} 控制器一般在机组模型高频区具有更好的鲁棒性能。但全阶模型建立的 H_{∞} 鲁棒控制器往往结构复杂且阶数高, 不适

合工业实际应用。因此,必须通过简化使其低阶化、简单化,以方便应用于实际工程中。目前,主要采用两种途径实现降阶和简化,第一种是简化被控对象,如刘建江等^[35-36]针对锅炉过热器和再热器系统,利用最优 Hankel 范数近似降阶方法简化其扩张状态观测器,针对简化后的观测器设计低阶的 H_∞ 鲁棒控制器,并将该控制器应用于某 330 MW 机组,大大提升了控制系统的鲁棒性,将再热汽温等参数的动态偏差降低 30% 左右。Balko 等^[37]建立了基于锅炉-汽轮机机组的非线性多输入-多输出模型的线性化简化模型,并将其拆分为多个子系统,设计了一个分散的鲁棒控制器,所提出的分散控制器保证了预期规定的最大超调。另外,也可以在设计 H_∞ 控制器后再进行降阶处理,如 Hogg 等^[38]针对过热汽温和再热汽温的 H_∞ 鲁棒控制器,利用近似逼近的方法将其简化成一个具有 PID 简单形式的低阶多变量控制器。鲁棒控制具有较好的控制鲁棒性,但易使机组处于非最佳工作状态,导致机组运行的经济性较差。

2.3.5 最优控制

最优控制解决的核心问题是最优化问题,即在多个约束条件下,目标函数或性能函数如何才能达到最优值这一问题。性能函数一般由控制结果的评价函数和控制消耗的函数组成,例如最终幅值和控制输入的加权和,通过求解这类最优化问题能够达到付出最少能量获得最优控制效果的目的。因此,最优控制经常用于燃煤发电机组的节能优化控制中,将机组经济性能作为目标函数进行最优化计算。Cori 等^[39]将 LQR 线性二次型调节器应用于燃煤机组,并取得了优于已有 PID 的控制性能。但由于一般的最优计算往往在整个时间域上进行,计算量大。为改善这一缺陷,预测控制在 20 世纪 70 年代后期被提出,这种方法仅考虑未来若干时间步内目标函数的最优化,在保证一定最优性的基础上降低计算量^[40]。它基于模型对系统未来动态行为的预测,是一种对被控对象模型精度要求不高的动态优化控制方法^[41]。广义预测控制方法被应用在主汽压力、过热汽温、再热汽温控制环节,并经过仿真和实际应用证明该方法具有良好的控制效果,相比于现有 PID 控制方法,能够更好地解决大惯性、大迟延等问题^[38,42-43]。针对超临界机组再热汽温系统,以综合运行稳定性和经济性的性能指标作为目标函数,能在保证控制稳定性的同时提高运行经济性^[44-47]。崔晓波等^[46]将 laguerre 函数、多模型控制技术、

块结构思想应用于综合了稳定性和经济性指标的预测控制中,该控制方法已正式应用于某电厂 650 MW 超临界机组上,使机组快速变负荷时的动态偏差降低约 60%。

最优控制的核心在于目标函数的设计,调节函数的各权重可以精准地达到理想效果。但目标函数过于复杂会导致计算量增大。

2.4 智能控制方法

近年来,计算机和人工智能技术的迅猛发展,使得燃煤机组智能控制成为可能^[48]。自 1965 年以来,智能控制已成为针对被控对象寻找最佳控制律的有效方式之一^[49]。智能控制算法在燃煤发电机组控制系统中的应用方式主要有两种:用智能算法优化已有控制系统或控制系统整体都采用智能控制方法。第一种应用中,智能算法主要作为参数优化等的方式被用于已有的经典控制^[7,14,50]或现代控制^[17,51-54]框架中,该方面的相关典型研究成果如表 1 所示。

利用智能算法优化现有控制器是一种简单、易操作的通过控制系统升级提升机组变负荷能力的方法,但其效果会受到原始控制器的制约导致其优化效果有限;第二种应用中,最常见的是神经元控制器,这是一种不需要具体被控对象模型的控制器,其结构由适用于控制的神经元模型组成(如图 3 所示),其参数整定方法多种多样^[55]。图中: $x_i(t)$, $p_i(t)$ 表示被控对象输出; $w_i(t)$ 表示神经元自学习权值; K 表示增益; $s(t)$ 表示控制信号。张建明等^[56]将模糊控制器和神经元控制器相结合,提出一种前馈模糊神经非模型协调控制方法。该方法具有响应速度快、不需要解耦补偿、应用方便等优点。吕剑虹等^[57]将自适应理论用于神经元控制器当中,提出了两种基于自适应神经元模型的负荷控制系统,该系统只需要对 6~8 个参数进行学习,在功率指令发生阶跃变化时,该系统的控制品质相对普通 PID 控制系统有所提升,跟踪速度提高约 70%。除神经元控制外,遗传算法、粒子群算法等优化算法也常用于煤电机组控制系统当中。El-Guindy 等^[58]结合了数据挖掘技术、非线性分析等方法,基于多目标优化算法获得机组最佳平衡工作点。经试验验证,该方法在不降低机组变负荷能力的条件下取得较好的节能效果。目前,智能算法在实际工程应用中已取得不少成果。刘桂生等^[59]提出了仿人工智能控制算法并应用于国电谏壁 12 号 330 MW 亚临界机

表 1 智能控制优化方法分类及其应用效果

Tab.1 Classification and effects of intelligent control optimization methods

分类	文献	方法	控制效果	变负荷范围/速率
优化经典控制	[7]	神经网络用于参数在线自动优化,利用混沌优化策略整定PID参数	变负荷速率和范围都有所提升	10.3% MCR/min, 33%~100% Pe,
	[14]	针对1 000 MW超临界机组,模糊控制对PID进行优化	提升稳定性与变负荷速率	/
	[50]	基于小数级PID的迭代学习控制	提高变负荷速率,更快到达理想响应点	25%~100% Pe
优化现代控制	[17]	针对超(超)临界机组将改进模糊C均值算法引入预测控制,用该算法修改目标函数与总模型集	对负荷大范围变化具有强适应性。但采用的模型集有限,无法实时在线修正	30%~100% Pe
	[51]	模糊模型和实数编码的免疫优化算法应用于预测控制中,用于非线性预测控制的在线滚动优化	有效,达到预期效果	/
	[52]	模糊模型预测控制与基于数据的预测控制	第一种方法使用简洁,第二种方法效果更好	8.7% MCR/min& 11.6% MCR/min
	[53]	提出可以用神经网络建立超超临界机组模型,并根据模型建立了基于神经网络的预测控制	基于神经网络的预测控制比现有控制逻辑的性能更好,变负荷速率更快	10.8% MCR/min
	[54]	针对500 MW燃煤机组模型设计非线性预测控制算法,利用专门设计的免疫遗传算法在线求解预测控制的非线性约束优化问题	可以在保证稳定性的同时降低计算复杂度	35%~100% Pe

注:最后一列“/”表示该文献没有采用具体变负荷范围和速率,而是采用目标负荷的阶跃变化对控制系统进行评估,最终达到无超调无振荡的跟踪效果。

组,该方法提高了机组变负荷速率,抑制主汽压力等主要参数的波动。柳倩等^[60]将特征轨迹法和生物启发的智能算法相结合设计出了一种针对亚临界机组协调控制系统的智能算法,经实际应用验证发现该方法能使平均变负荷速率达到5.9 MW/min,大大降低最大动态偏差。

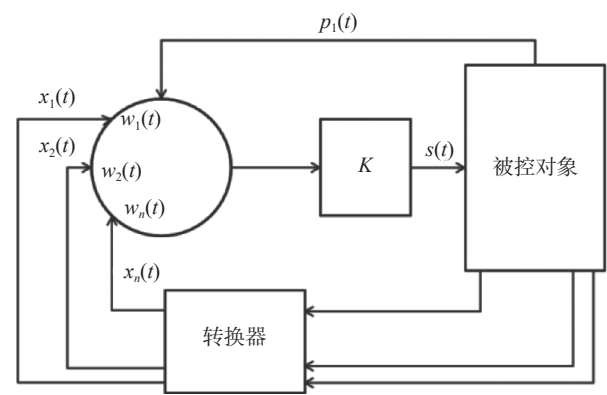


图 3 神经元控制系统
Fig.3 Structure of neuron controller

3 总结与展望

“双碳”目标对我国煤电机组的灵活运行性能提出了更高的要求,现代控制理论与智能控制方法的发展为燃煤机组智能化控制提供了基础和土壤。我国煤电机组在灵活运行智能化控制方面,将向以下主要方向发展:

- a. 被控对象模型将更多采用混合建模方式,且辅以机器学习等智能系统辨识办法,利用现有完备的数据集构建全工况高精度模型,这是未来燃煤发电机组被控对象建模的主要发展趋势;
- b. 预测控制在燃煤发电机组控制领域中得到广泛应用,并取得较好效果,未来仍有较大的发展空间;
- c. 目前,控制方法的优化目标大多集中于通过优化机组协调控制系统提升变负荷速率、低负荷稳定性等方面,对机组变负荷过程中的经济性、脱硫脱硝环保性能以及锅炉岛与环保岛间的协调优化控制的关注还比较少,未来,多输入、多目标智能寻优控制将成为主流,机组低负荷及变负荷运行过程中的机组经济性 & 污染物排放协同优化控制等将被重视;
- d. 智能控制和现代控制的有机结合将具有更加广阔的发展前景,是我国未来燃煤机组灵活运行控制技术发展的主要方向。

参考文献:

[1] 张显荣,徐玉杰,杨立军,等.多类型火电-储热耦合系统性能分析与比较[J].储能科学与技术,2021,10(5):1565-1578.

[2] 汪德良,李志刚,柯于进,等.超超临界参数机组的水汽品质控制[J].中国电力,2005(8):57-61.

- [3] 于达仁, 徐志强. 超临界机组控制技术及发展 [J]. *热能动力工程*, 2001, 16(2): 115–121.
- [4] 赵雯文. 充分利用火电机组储能的高速率变负荷控制系统研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2016.
- [5] 万家欢. 面向燃烧振荡的参数化建模和主动控制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [6] ÅSTRÖM K J, EKLUND K. A simplified non-linear model of a drum boiler-turbine unit[J]. *International Journal of Control*, 1972, 16(1): 145–169.
- [7] 秦志明. 超超临界机组动态模型与控制的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [8] 刘暑辉, 田亮. 深调峰工况亚临界机组无自平衡对象控制器优化 [J]. *华北电力大学学报*, 2021, 48(1): 69–75.
- [9] 王琳, 马平. 系统辨识方法综述 [J]. *电力情报*, 2001(4): 63–66.
- [10] 邹乐强. 最小二乘法原理及其简单应用 [J]. *科技信息*, 2010, 2(23): 282–283.
- [11] CAMPOS-DELGADO D U, ZHOU K, ALLGOOD D, et al. Active control of combustion instabilities using model-based controllers[J]. *Combustion Science and Technology*, 2003, 175(1): 27–53.
- [12] CHAUDHRY P K, HOGG B W. Identification of boiler models[J]. *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*, 1989, 136(5): 261–271.
- [13] 陆豪强. 大型火电机组燃烧系统的建模与控制方法研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2018.
- [14] 张晓丛. 1000MW 超临界机组燃烧系统智能控制算法研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2021.
- [15] 周志华, 陈世福. 神经网络集成 [J]. *计算机学报*, 2002, 25(1): 1–8.
- [16] 陈彬, 王小东, 王戎骁, 等. 融合机理与数据的灰箱系统建模方法研究 [J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(12): 2575–2583.
- [17] 屈小凡. 超(超)临界机组深度调峰协调系统建模与控制策略研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [18] 周欣悦. 超临界供热机组协调控制系统建模与控制研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.
- [19] HAU G, TANG Z Y, GONG L J, et al. A dynamic model of supercritical boiler-turbine unit based on immune genetic algorithm parameter identification[C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Kunming: IEEE, 2021: 6185–6190.
- [20] 郑南宁, 贾新春, 袁泽剑. 控制科学与技术的发展及其思考 [J]. *自动化学报*, 2002, 28(S1): 7–17.
- [21] 王传波, 刘咏. 现代控制理论与经典控制理论的对比研究 [J]. *机械管理开发*, 2006(3): 6–8.
- [22] 卫丹靖, 田亮, 边防, 等. “机跟炉”协调控制系统参数整定规律研究 [J]. *华北电力大学学报*, 2016, 43(6): 91–96.
- [23] 李甲伟, 刘新龙, 梁祖雄, 等. 火电机组深度调峰控制系统优化研究 [J]. *自动化仪表*, 2022, 43(7): 67–72.
- [24] TAN W, LIU J Z, FANG F, et al. Tuning of PID controllers for boiler-turbine units[J]. *ISA Transactions*, 2004, 43(4): 571–583.
- [25] 王玮, 孙阳, 刘吉臻, 等. 适应电网快速调频的热电联产机组新型变负荷控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(21): 63–69.
- [26] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. *控制与决策*, 1998, 13(1): 19–23.
- [27] GAO Z Q. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design[C]//Proceedings of 2006 American Control Conference. Minneapolis: IEEE, 2006.
- [28] GAO Z Q, HUANG Y, Han J Q. An alternative paradigm for control system design[C]//Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando: IEEE, 2001: 4578–4585.
- [29] TAN W, FANG J X, FU C F. Linear active disturbance rejection controllers (LADRC) for boiler-turbine units [C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an: IEEE, 2013: 5339–5344.
- [30] MORADI H, ALASTY A, BAKHTIARI-NEJAD F. Control of a nonlinear boiler-turbine unit using two methods: gain scheduling and feedback linearization [C]//Proceedings of the ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Seattle: ASME, 2007: 491–499.
- [31] 张鹤飞. 600 MW 亚临界机组协调控制系统仿真研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [32] TAN W, MARQUEZ H J, CHEN T W, et al. Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit[J]. *Journal of Process Control*, 2005, 15(8): 883–891.
- [33] 恒庆海, 鲁婧, 周海, 等. 锅炉燃烧系统鲁棒控制研究 [C]//2011 年中国智能自动化学术会议论文集(第一分册). 北京: 中国自动化学会智能自动化专业委员会, 2011.
- [34] TAN W, MARQUEZ H J, CHEN T W. Multivariable robust controller design for a boiler system[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(5): 735–742.
- [35] 刘建江, 倪维斗, 张法文, 等. 基于 H_∞ 理论的状态变量控制在再热汽温控制中的应用 [J]. *动力工程*, 2000, 20(5): 867–871.
- [36] 刘建江, 李政, 倪维斗, 等. 基于 H_∞ 理论的状态变量控制在主蒸汽温度控制中的应用 [J]. *动力工程*, 2000, 20(3): 669–673, 684.
- [37] BALKO P, ROSINOVÁ D. Nonlinear boiler-turbine unit: modelling and robust decentralized control[J]. *IFAC-*

PapersOnLine, 2016, 49(4): 49–54.

- [38] HOGG B W, EL-RABAIE N M. Multivariable generalized predictive control of a boiler system[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1991, 6(2): 282–288.
- [39] CORI R, MAFFEZZONI C. Practical-optimal control of a drum boiler power plant[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 1981, 14(2): 3011–3016.
- [40] 陈虹, 刘志远, 解小华. 非线性模型预测控制的现状与问题 [J]. *控制与决策*, 2001, 16(4): 385–391.
- [41] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(3): 222–236.
- [42] HOGG B W, EL-RABAIE N M. Generalized predictive control of steam pressure in a drum boiler[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1990, 5(3): 485–492.
- [43] YU-CHANG F, DONG-LIN S. Model free adaptive predictive control for main stream pressure system of power plant[J]. *Energy Procedia*, 2012, 17: 1682–1688.
- [44] 朱齐丹, 冷欣. 基于约束预测控制的增压锅炉汽包水位系统研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009, 30(11): 1246–1250.
- [45] 张嘉英, 武欣梅. 大型单元机组锅炉燃烧系统改进型预测控制的研究 [J]. *锅炉技术*, 2012, 43(2): 21–24.
- [46] 崔晓波, 陈雨亭, 秦文伟, 等. 多模型块结构 Laguerre 函数预测控制在再热汽温系统中的应用 [J]. *东南大学学报 (自然科学版)*, 2013, 43(4): 803–808.
- [47] KLAUČO M, KVASNICA M. Control of a boiler-turbine unit using MPC-based reference governors[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 1437–1447.
- [48] 辛斌, 陈杰, 彭志红. 智能优化控制: 概述与展望 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(11): 1831–1848.
- [49] 南英, 陈昊翔, 杨毅, 等. 现代主要控制方法的研究现状及展望 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2015, 47(6): 798–810.
- [50] JAN A Z, KEDZIA K, ABBASS M J. Fractional-order PID controller (FOPID)-based iterative learning control for a nonlinear boiler system[J]. *Energies*, 2023, 16(3): 1045–1045.
- [51] 朱红霞, 沈炯, 丁轲轲. 单元机组负荷非线性预测控制及其仿真研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(23): 72–77.
- [52] WU X, SHEN J, LI Y G, et al. Data-driven modeling and predictive control for boiler-turbine unit using fuzzy clustering and subspace methods[J]. *ISA Transactions*, 2014, 53(3): 699–708.
- [53] ZHU H Y, TAN P, HE Z Q, et al. Nonlinear model predictive control of USC boiler-turbine power units in flexible operations via input convex neural network[J]. *Energy*, 2022, 255: 124486.
- [54] ZHU H X, ZHAO G, SUN L, et al. Nonlinear predictive control for a boiler-turbine unit based on a local model network and immune genetic algorithm[J]. *Sustainability*, 2019, 11(18): 5102–5102.
- [55] 王宁, 涂健, 陈锦江. 使用单个自适应神经元的智能控制 [J]. *华中理工大学学报*, 1993(3): 31–35.
- [56] 张建明, 王宁, 王树青. 火力单元机组的前馈模糊神经非模型协调控制 [J]. *动力工程*, 2000, 20(3): 664–668.
- [57] 吕剑虹, 陈建勤, 陈来九. 基于自适应神经元模型的火电单元机组负荷控制系统仿真研究 [J]. *中国电机工程学报*, 1995, 15(1): 1–7,60.
- [58] EL-GUINDY A, RÜNZI S, MICHELS K. Optimizing drum-boiler water level control performance: a practical approach[C]//Proceedings of 2014 IEEE Conference on Control Applications (CCA). Juan Les Antibes: IEEE, 2014: 1675–1680.
- [59] 刘桂生, 石卫兵, 高峥, 等. 基于仿人智能控制算法的 330 MW 机组深度调峰控制研究 [J]. *汽轮机技术*, 2019, 61(5): 368–370,374.
- [60] 柳倩, 杨向东, 吕剑虹, 等. 基于降步长天牛须搜索算法的火电机组 CCS 特征轨迹设计 [J]. *发电设备*, 2019, 33(6): 409–414.

(编辑: 丁红艺)