

特 约 综 述



何正熙,男,中共党员,研究员级高级工程师,长期从事核电站仪表与控制系统相关研究设计工作,申请专利百余件,公开发表论文 30 余篇,负责制定 IEC 国际标准 1 项、国家标准 1 项、能源行业标准 2 项,获省部级二等奖 3 项、三等奖 5 项,荣获中核集团彭士禄核动力创新青年人才、中国核能行业协会青年优秀创新人物等荣誉称号。

小型模块化反应堆控制方法综述

张薇薇¹, 何正熙², 万雪松¹, 刘方圆³, 邓 科¹, 肖 凯², 罗懋康¹

(1. 四川大学数学学院, 成都 610064; 2. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610213; 3. 中国核动力研究设计院反应堆燃料及材料重点实验室, 成都 610213)

摘 要: 小型模块化核反应堆具有建造周期短、安全性高、运维成本低、适应性强、应用领域广等显著优势, 广受世界各国关注, 也是我国的战略性需求。发展具有自适应、强鲁棒、高可控和高可信特性的新型控制方法, 有效降低甚至消除对控制人员值守的依赖, 是小型模块化核反应堆的一个重要发展趋势。智能化、自动化的反应堆控制系统通过高效的控制动作来实时跟踪负荷需求, 进而有效提高反应堆的稳定性、可靠性和安全性。本文对小型模块化核反应堆控制方法的研究现状进行了综述。本文首先回顾了基于经典控制理论的传统 PID 控制方法的原理及其优缺点, 然后总结了当前应用于反应堆控制系统的一些高精度、高效率智能控制方法, 如模糊控制、神经网络控制、智能优化控制、复合控制方法等的主要特点。最后, 针对当前小型模块化反应堆控制系统的应用需求和技术难点, 本文对智能控制方法的可能发展方向进行了展望。

关键词: 小型模块化反应堆; 反应堆控制; PID 控制; 智能控制; 复合控制

中图分类号: O29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2024.020001

A review on the control methods in small modular reactors

ZHANG Wei-Wei¹, HE Zheng-Xi², WAN Xue-Song¹, LIU Fang-Yuan³,
DENG Ke¹, XIAO Kai², LUO Mao-Kang¹

(1. School of Mathematics, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China;
3. Science and Technology on Reactor Fuel and Materials Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

收稿日期: 2023-10-26

基金项目: 基于机器学习的复杂系统模型机理数据融合技术研究(SCU&DRSI-LHCX-6)

作者简介: 张薇薇(1995—), 女, 河南开封人, 博士研究生, 主要研究方向为人工智能. E-mail: lfywscu@163.com

通讯作者: 何正熙. E-mail: hezhengxi0002@163.com

020001-1

Abstract: Due to the significant advantages such as short construction cycle, high safety performance, low operation and maintenance costs and strong adaptability, the small modular reactors (SMRs) have long been a focus of researchers around the world. Nowadays, it has also become a strategic need of our country. Recently, it has been clear that one of the promising development directions of intelligent control systems of the SMRs lies in the unmanned control systems therein some advanced control methods are applied with high robustness and reliability. These control systems can track load demand in real-time through efficient control actions and thus effectively improve the stability, reliability and safety of SMRs. Meanwhile, these systems can also reduce or even eliminate the dependence on operators significantly. In this paper, the mainstream control methods applied in SMRs are briefly reviewed. Firstly, principles and characteristics of the traditional PID control method based on the classical cybernetics are surveyed. Then, some intelligent control methods with higher accuracy and efficiency implemented in the reactor control systems, such as the fuzzy logic inference method, the neural network control method, the compound control method and the composite control method are summarized. Finally, facing to the requirements and technical problems of control systems in the SMRs, some potential research directions of intelligent control methods are prospected.

Keywords: Small modular reactor; Reactor control; PID control; Intelligent control; Compound control

1 引言

随着经济发展和生活水平的不断提高,全球的能源需求持续增长.当前在全球范围内,能源的主要来源依然是煤、石油、天然气等化石能源.这些能源不但污染大,而且在短时间内不可再生^[1],无法满足人类长期可持续发展的能源需求.因此,发展可再生、安全且清洁的能源技术是解决能源危机的必然选择^[2],核能正是其中一种高效清洁能源^[3].

历史上,核反应堆经历了先军用后民用的发展历程.民用反应堆一般通过提升反应堆的功率来降低成本、提高市场竞争力,这就导致核电厂逐渐大型化.另一方面,受到实际功率需求和使用空间的限制,军用核反应堆的功率水平一般远小于民用反应堆,更偏向小型化.

相对于大型核反应堆,小型化反应堆普遍采用模块化和一体化设计,并采用非能动安全系统^[4-6],以便有效提高反应堆的安全性和经济性.小型模块化反应堆(Small Modular Reactor, SMR)具有功率密度低、体积小、建造周期短、安全性高、运行维护成本较低、选址成本低、适应性强、部署灵活性高^[7]等显著优势,因而在世界各国得到广泛应用^[8-11].

当前,我国对不受环境影响、长寿命且安全可靠的无人化 SMR 的需求十分迫切.在国家发展改革委、国家能源局发布的《能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)》^[12, 13]中,明确提出我国将继

续深入实施创新驱动发展战略,进一步完善核能领域科技研发体系,重点支持 SMR 的发展和研究.值得注意的是,美国、日本等国家从上世纪九十年代初^[14]就已经对 SMR 及其应用开展了相当规模的研究,而我国在这方面的研究尚处于起步阶段.

在确保安全的前提下,无人化 SMR 能够摆脱对操控人员的值守依赖,提升反应堆的控制效能,是小型模块化反应堆的重要发展趋势之一.

SMR 高可用性的关键是避免不必要的停堆和减少换料维修时间.这需要有一套具有足够容错性、鲁棒性的高可靠、自动化控制系统.这些控制系统的设计和运转各有其控制方法和策略,具有不同的效能和应用领域.

传统的 PID 控制方法虽然操作简单灵活,静态特性好,且在工程中已有广泛应用^[15],但该方法仅适用于线性时不变系统的控制^[16].对于核反应堆等复杂非线性系统而言^[5],其本身具有较强的模型和参数不确定性,在运行过程中会受到大量外部干扰,因而传统 PID 控制方法无法很好地控制和处理这些强不确定因素.

近年来,随着控制理论的发展^[17],国内外研究者为提高核反应堆控制系统的性能不断探索新的控制方法,逐渐发展出一些智能化的控制和优化方法,较好地解决反应堆控制系统中普遍存在的强耦合、多变量、长时延及非线性等关键控制问题.在此基础上,出现了一些复合控制方法,如神经网络 PID 控制、模糊神经网络控制等,进一步融

合了多种智能控制方法.应用这些智能化控制方法,反应堆可以通过更高效的控制动作来实时跟踪负荷需求,显著提高控制效率和安全性能.

在本文中,我们系统总结了当前应用于反应堆控制系统中的一些传统和智能化控制方法,分析了经典PID控制方法以及智能控制方法的机制、优缺点及研究现状.最后,基于应用需求和难点问题,我们展望了SMR控制方法的发展趋势和研究方向.

2 PID控制方法

PID控制方法不依赖于控制对象的精确数学模型,而是通过控制变量偏差的变化幅度、累积效果和趋势及控制变量之间的简单相互影响关系等使得控制变量的输出逐渐趋近预期的控制效果. PID控制方法具有原理清晰易懂、易于工业实现、鲁棒性好等优点.

PID控制方法在核反应堆控制系统中已有普遍应用.汪等^[18]采用PID控制方法实现对钍基熔盐堆核能功率的控制.在合适的PID参数集下,该方法可以实现控制系统的快速响应、良好系统鲁棒性和抗干扰能力.雍等^[19]基于压水堆核电厂蒸汽发生器水位模型分别设计了单PID控制器、串级PID控制器及双PID控制器,并分析了每种控制方案的优缺点.

多数反应堆控制系统方案基于经典控制论的单输入单输出闭环串级PID控制方法,其原理如图1所示.该方法主要考虑系统的外部特性,是对系统的不完全外部描述,适用于单输入单输出、线性、定常、集中参数的对象^[16].PID控制方法的原理简单^[16, 20],且在反应堆长期运行过程中积累了相当多的参数调节经验,因而当前在工程控制领域具有主导地位.

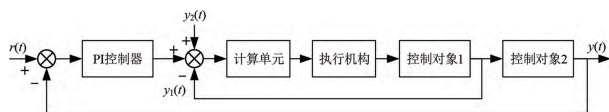


图1 单输入单输出PID控制系统原理

Fig. 1 Block diagram of the single input and single output PID control principle

但是,传统的PID控制方法缺乏自调节能力.这就使得该方法在面对复杂控制对象时的响应速度、超调量等指标难以实现进一步优化,因而在非线性系统中难以获得理想的控制效果.此外,常规

的PID控制系统不能自动地适应反应堆运行环境的复杂变化,在面对复杂工况时仍需要反应堆运行维护人员频繁进行手动操作,持续监督系统重要参数的变化,因而对操作人员的专业能力和心理素质要求较为苛刻,可能影响核动力装置的经济效益和安全可靠性.

3 智能控制方法

核反应堆系统极其复杂,通常无法用数学模型较好地进行概括和近似,从中提取出理想的控制模型.在这种情况下,神经网络、模糊控制等非解析方法可能具有较为明显的优势.

3.1 神经网络控制方法

不同于经典PID控制方法,神经网络控制方法不依赖于数学模型,而是从对象的输入输出数据中学习得到仿真模型,避开人为提取被控对象或设计控制器解析模型这一难题.该方法利用智能方法的预测和优化能力将控制系统的设计问题转化为优化问题.由于其具有自学习、非线性、并行计算和强鲁棒性等特点,在控制领域内得到了广泛应用.肖等^[21]针对反应堆堆芯具有非线性、时变等特点,且经典控制方法难以实现全工况内反应堆功率的良好控制的情况,提出了一种反应堆功率的神经网络预测控制方法.他们以国际革新安全反应堆(IRIS)为研究对象进行了仿真验证,结果表明该方法可以实现堆芯入口温度扰动和变负荷工况下反应堆功率的良好控制.张等^[22]采用核电站的真实监测数据,分别优化了基于时间序列的LSTM和基于特征再提取的CNN模型,发现基于上述模型可以有效预测核反应堆堆芯热功率分布.Lu等^[23]以KLT-40S核反应堆堆芯和蒸汽发生器作为研究对象,建立了基于深度学习的核反应堆系统热工参数预测方法,实现了对核反应堆系统热工参数的快速预测.Xiao等^[24]提出了一种小型压水堆的神经网络预测功率控制方法,以解决目前反应堆控制中采用的预测控制算法模型普遍存在识别精度较低的问题.小型压水堆的堆芯在典型瞬态工况下的仿真结果表明,该方法具有良好的负荷跟踪性能和较强的抗干扰能力.袁等^[25]设计了一种神经网络监督控制系统,用于船用一体化压水堆功率的控制,其中的PID控制器是反馈控制器,神经网络则是前馈控制器,其结构如图2所示.对压水堆功率控制的仿真结果表

明,与传统的PID控制相比,神经网络监督控制具有较强的鲁棒性和自适应能力,能有效地提高控制精度。

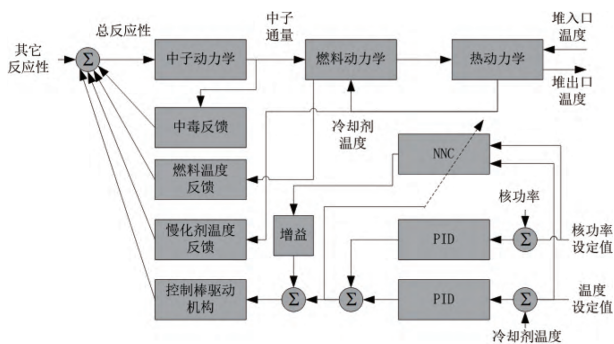


图2 压水堆功率控制系统原理^[26]

Fig.2 Block diagram of the PWR power control system principle^[26]

经过文献调研,我们认为目前将神经网络控制方法应用于小型反应堆控制系统中主要有3种思路:(1)利用神经网络的自适应、自学习功能优化控制系统的参数;(2)建立描述控制对象输入输出的映射关系(模型),即建立输入与输出之间的神经网络模型;(3)与其他方法相结合形成复合神经网络控制^[26],如与进化算法结合实现反应堆功率控制,与鲁棒控制技术结合实现对蒸汽发生器水位的控制等。这种复合控制方法可以将神经网络和其他智能算法的优势结合起来,有望取得较好控制效果。

总之,神经网络不依赖数学模型但可以不断逼近模型的函数,其核心是修改激励命令与对象状态之间的映射来提高控制效果,并对网络连接权重进行优化。相对于传统的PID控制方法,该方法具有诸多优点,如神经网络具有并行机制、模式识别、记忆和自学习能力的特点,能够学习与适应不确定系统的动态特性,能够充分逼近任意复杂的非线性系统,有很强的鲁棒性和容错性,等。但同时该方法也存在参数选择和优化过程复杂、训练时间长、可解释性差、对数据质量的要求较高等不足。

3.2 模糊控制方法

模糊控制方法的基本思想是把人的操作经验当作控制模型,把模糊语言、模糊集及模糊推理作为数学工具,将准确测量结果模糊化,再经过模糊推理后准确化,进而实现智能控制。基于被控系统的物理特性,模糊控制能够模拟人的思维方式和控制经验,提供一种基于自然语言描述规则的控制

规律的新机制。一般而言,凡是无法或难以建立数学模型的问题都可以通过模糊控制方法来解决^[27-30]。模糊控制可以忽略对象的输入输出数据,从获取对象的“知识”这一角度出发来认识被控对象,甚至直接从专家和操作人员的历史知识和经验中形成“model-free”控制器。

模糊推理是模糊控制方法的核心,具有基于模糊概念的拟人化推理能力。该推理过程基于模糊逻辑中的蕴含关系及推理规则来进行^[31],其控制单元的基本功能结构如图3所示。

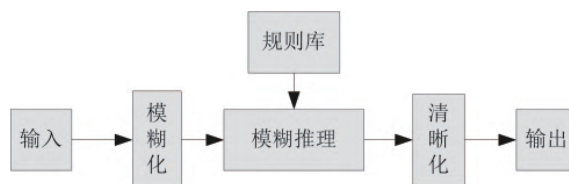


图3 模糊控制单元的基本功能结构

Fig.3 Basic functional structure of a fuzzy control unit

模糊控制方法在反应堆控制系统中也有应用。Li和Ruan^[32]比较了模糊控制、PID控制及自适应模糊控制等控制方法在反应堆控制方面的效果,发现模糊控制与PID控制相比具有较好的灵活性、鲁棒性,而且先进模糊控制可以动态调整规则库,具有更强的鲁棒性。Kim等^[33]设计了一种用于稳定蒸汽发生器水位的智能模糊控制器,获得了良好的控制效果。Rojas-Ramírez等^[34]提出一种控制反应堆功率调节至设定值的自适应模糊控制系统,通过建立李雅普诺夫函数来保证系统的稳定性,实现反应堆在安全范围内快速调节到设定功率的目的,减少了运行过程中的功率波动。原和黄^[35]针对核蒸汽供应复杂系统的控制问题,提出了一种基于T-S模糊控制器的控制系统。仿真结果表明,该方法比传统的线性PI控制器具有更好的控制效果。贾等^[36]在多用途重水研究堆上研究了功率调节系统的模糊控制,设计了Mamdani型二维模糊功率控制器。仿真结果显示,其反应堆功率调节系统在采用该模糊控制器后是稳定的,并且负荷跟随特性良好,其控制性能优于经典PID控制器。

综上,在小型反应堆控制系统的应用中,相比PID控制方法,模糊控制方法无需被控对象的精准数学模型,具有强鲁棒性,且处理过程模仿人的思维,更适用于解决小型反应堆控制过程中非线性、强耦合、时变滞后等方面的问题,并在一定程度上

抑制噪声。但是,由于信息的模糊处理容易导致系统的控制精度降低,并且该方法缺乏系统性,无法定义控制目标,因而该方法在小型反应堆的控制应用中需要与其他控制方法结合才能达到更好控制效果。

3.3 专家系统控制方法

1983年,Astrom^[37]首先将专家系统引入智能控制领域,并于1986年正式提出了专家控制的概念。专家系统可以处理定性、启发式的或不确定的知识信息,通过推理^[38, 39]来实现任务目标。基于专家系统发展而来的专家控制方法具有许多领域专家的知识 and 经验,能够解决专门性问题。该控制方法改变了传统控制方法依赖数学模型的方式,实现了知识模型与数学模型、知识处理技术与控制技术的结合^[40, 41],有利于解决复杂非线性系统的控制难题。

按照作用机理,我们可将专家控制系统的结构类型分为直接型专家控制和间接型专家控制两种^[42]。直接型专家控制系统直接控制生产过程与被控对象,其原理如图4所示。该控制器的任务和功能相对简单,专家系统直接被包含在控制回路中,直接给出控制信号来控制被控过程。在每一个采样时刻,控制系统均需要专家系统根据知识库规则和测量过程信息推导给出控制信号,因而该类控制系统对推理速度的要求较高。间接型专家控制是常规PID控制器、自适应控制和专家系统的结合,其控制原理如图5所示。该方法的作用方式是根据系统运行情况调整控制器参数,选择合适的控制方法^[41],以实现优化适应、协调、组织等高层决策的智能控制。间接型控制器可以实现优化、适应、协调、组织高层决策。

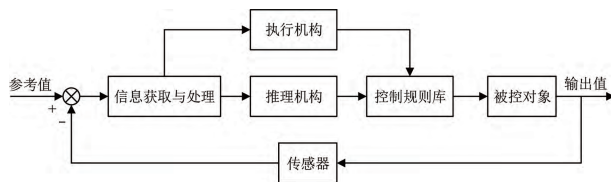


图4 直接型专家控制系统原理

Fig. 4 Block diagram of the direct expert control system principle

目前,专家控制与其他控制方法的结合在反应堆控制中更为普遍。陈等^[43]针对核电厂系统的故障特征建立了一个专家系统,通过引入Rough集理论来解决专家系统中的知识获取问题。该方

法可以准确诊断系统中的故障问题。彭和余^[44]为解决识别核动力装置的故障问题,采用面向对象的模糊Petri网知识表示方法对专家系统的知识库进行改进。这种改进的专家系统可以准确地识别系统故障。Liao等^[45]开发了一种反应堆冷态功能试验智能专家系统,改变了依靠人工读取、传输和处理数据的传统低信息化测试方法,该系统具有试验过程控制、实时数据采集与结果分析和数据存储等功能。

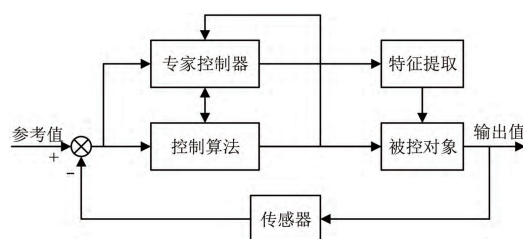


图5 间接型专家控制系统原理

Fig. 5 Block diagram of the indirect expert control system principle

综上,专家控制方法是在控制闭环中加入经验丰富的控制专家,控制系统作为工具可以自行选择各种方法,本质上是对“控制专家”的思路、经验、策略的模拟、延伸、扩展,具有透明度高、灵活性强、知识信息处理系统强等优点。但该方法需要获得专家知识,因而建造通用专家开发工具,并且稳定性和可控性理论分析较难。

4 智能优化方法

近年来,随着优化理论不断发展,除了前面提到的模糊控制、神经网络控制等方法之外,还有许多智能优化算法被用于解决反应堆控制系统中的参数优化问题。这些算法主要包括粒子群算法、遗传算法、禁忌搜索算法等。

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是由密歇根大学的Holland教授于1962年首次提出的,其基本思想是模拟生物进化中优胜劣汰、适者生存的法则,根据适应度函数衡量解的品质并通过复制、交叉等动作筛选个体,提高群体的适应度,进而迭代得到当前最优,最终得到全局最优^[39, 46]。该算法适用于解决非线性、非凸、多峰等复杂函数的优化问题^[47, 48]。

应用遗传算法,Panda和Padhy^[49]对核反应堆的电力系统稳定器和输电系统控制器进行了协调控制,给出了各扰动条件下电力系统的非线性仿

真结果,验证了该方法的有效性.刘等^[50]设计了一种反应堆平均温度线性自抗扰控制器,采用遗传算法优化控制器参数,解决了自抗扰控制器参数不易整定的问题.仿真结果表明,该优化方法对控制器参数进行优化是有效的,且具有良好的鲁棒性.Wan和Zhao^[51]采用带精英策略的非支配排序遗传算法,对AP1000反应堆轴向功率分步控制系统中冷却剂平均温度(Tavg)通道的超前/滞后时间常数和功率偏差通道的非线性增益进行了多目标优化,以阶跃瞬态时反应堆功率的超调量和Tavg超调量作为最小为优化目标.结果表明,优化后的反应堆功率和Tavg控制效果能够得到明显改善.

粒子群优化算法(Partical Swarm Optimiza-tion, PSO)是Eberhart和Kennedy受到鸟群觅食行为的启发于1995年提出的一种基于群体协作的随机搜索算法^[52].该算法通过个体之间的协同合作寻找适应度最小的最优解.同遗传算法相比,该算法需要调整的参数更少,更易实现.目前,粒子群算法已被广泛应用于反应堆控制系统中函数优化、神经网络训练、模糊系统控制等方面^[53].

Wang等^[54]采用惯性权重线性递减的粒子群优化算法对AP1000反应堆轴向功率分布控制系统进行了参数优化,优化过程以Tavg控制回路中的超前/滞后时间常数和磁滞回环区间域的上、下限为优化变量,以减小核功率偏差和M棒组的移动步数为目标构建目标函数,同时在目标函数中增加罚函数,以保证在优化过程中所选取的优化变量满足约束条件,并使AO棒组始终在其目标控制带之内.结果表明,优化后的反应堆功率和轴向功率偏差在瞬态过程中的超调量减少、响应速度加快.

5 复合控制方法

复合控制方法是近年来控制论研究领域的热点之一,它融合了多种智能控制方法,将模糊推理、神经网络、PID控制、智能优化等控制方法交叉融合,以进一步提高控制系统的性能.目前,该方法在实验验证中已经取得了良好的控制效果.

5.1 智能PID控制方法

随着控制论、计算机技术相关理论和方法的发展,在传统PID控制方法的基础上,部分研究者将PID控制方法与其他智能控制或优化方法相结

合,提出了多种新的PID控制方法.其中比较典型的有神经网络PID控制、模糊PID控制方法以及基于智能优化的PID控制方法,等.

5.1.1 神经网络PID控制方法 在小型反应堆控制系统中,PID控制是最常用且不依赖模型的控制方法,其控制效果依赖于比例、积分和微分系数的选取是否准确.但是,反应堆系统的复杂性、模型的不确定性使得比例、积分和微分增益的选取较为困难,进而影响到控制效果.神经网络与PID控制器相结合的控制方法可以很好地抑制PID控制器所产生的超调问题,提高控制系统的稳定性、可靠性和灵活性.神经网络和PID控制方法相结合主要有以下几种方式:(1)将神经网络作为优化工具在线调整PID控制控制系统的参数;(2)将神经网络与PID控制器连接,通过优化神经网络的连接权值来调整PID控制器的参数;(3)神经网络作为控制器,将PID控制方法融合到神经网络结构中;(4)PID神经网络多变量解耦控制,等.

Kong等^[55]提出了一种基于径向基函数的神经网络蒸汽发生器液位PID控制策略,通过RBF神经网络对蒸汽发生器的数学模型进行辨识,然后根据过程的特征变化对PID参数进行调整.仿真结果表明,该方法能够根据过程的动态特性自适应优化PID控制器的参数,表明这个控制策略是有效的.肖等^[56]为了实现PID控制器参数的在线调节,利用BP神经网络的自适应能力对PID参数进行实时整定,建立了堆芯功率BP神经网络PID控制系统.仿真结果表明,BP神经网络PID控制方法与传统的PID控制方法相比具有超调量小、响应速度快等优点,控制效果好.

Ding^[57]提出了一种基于模糊神经网络模型的PID神经网络控制方法,采用模糊神经网络模型和梯度下降法在线调整PID神经网络权值,并将该方法应用于循环流化床锅炉床层温度控制.Govindan和Pappa^[58]设计了一种基于反馈线性化在线学习的神经网络自适应控制器,采用基于改进增量规则和投影算法的在线权值调整算法在线调整神经网络卡和PID控制器的参数,以解决高阶点动态压水堆(PWR)在局部、全局负荷跟随和应急工况下功率水平跟踪问题.该方法具有更快的响应速度、较好的自适应性和较小的稳态误差.

Liu和Xia^[59]针对PID控制器无法对复杂系统进行有效控制的问题,设计了一种基于有监督

Hwbb学习算法的单神经元自适应PID控制器,提高了控制过程的安全性、可靠性、稳定性和灵活性。Hosseini等^[60]提出了神经网络PID控制方法监测稳压器系统的压力和液位的变化。结果表明,该控制系统在多种条件下都能抵抗干扰的影响,有效地控制稳压器系统的压力和液位。

Sun等^[61]针对船舶核电厂二次回路系统的解耦控制问题提出了一种基于PID-NN的多变量解耦控制方法。仿真结果表明,该方法对直流蒸汽发生器压力和汽轮机转速进行了较好的协调控制。

AP1000堆芯控制系统包括功率控制分系统和轴向功率分配控制分系统。Wei等^[62]为了解决两个子系统的强耦合关系设计了基于准对角RNN的数字PID控制系统,能够实现对原系统的解耦,具有较高的控制精度和灵活性。

5.1.2 模糊PID控制 常规的PID控制方法在非线性和时滞情况严重的情况下控制效果较为有限^[63]。另一方面,常规的模糊控制虽然在解决延迟系统问题方面有较大优势,但却存在精度不够、调节速度慢且在给定值附近易发生周期性波动等问题。因此,在核动力系统的应用中研究者常常将模糊控制与PID控制结合起来。比如,在传统PID控制系统中可以采用模糊规则,即根据设定值与实际值的偏差来整定PID控制器参数,并采用规则和模糊隶属函数作为参数,将非线性、逻辑以及其它输入信号增加到控制规律中^[64]。因此,模糊PID控制也具有一定工程应用价值。

Zeng等^[65]采用模糊PID控制方法来实现对反应堆堆芯功率的控制。仿真结果表明,模糊PID控制器的控制效果优于PID控制器。为了解决难以建立液态熔盐堆堆芯功率控制系统的数学模型的问题,Zeng等^[66]设计了一种模糊-PID复合控制器,该控制器综合使用两种控制方法的优点,取得了更好的控制效果。刘和叶^[67]对核反应堆进行建模,并在此基础上分别分析了PID控制与模糊PID控制的优缺点。相比之下,当模糊PID控制方法应用在核反应堆功率控制时,控制的效果可以得到明显提升。Wang等^[68]设计了维持加速器驱动系统二次平均冷却液温度的模糊PID控制。Jiang等^[69]提出了一种由模糊PID控制器和带加权或切换的模糊控制器组成的核心功率控制器方案,该方案结合了模糊PID控制器和模糊控制器的优点,可以实现对核心功率的良好控制效果。Puchalski等^[70]

针对大范围运行或低热功率水平运行条件下PID控制器对蒸汽发生器水位的控制效果不佳的问题,提出了一种带有局部PID控制器的多区域模糊控制方法,获得了更好的控制性能。

5.1.3 基于优化算法的PID控制方法 智能优化方法适用于解决非线性、非凸、多峰等复杂函数的优化问题。将PID型控制方法与智能优化算法相结合,将优化算法作为优化工具调整PID控制器参数,有望达到更好的控制效果。Mousakazemi^[71]提出了一种基于两点核反应堆模型的实数编码遗传算法,对PWR型核电站功率控制的PID控制器增益进行整定和调度。仿真结果表明,该控制器具有较高的性能,且误差较小。Sheng等^[72]提出了一种用于PID控制器参数的整定新混沌协同粒子群算法(CCP SO),与采用ZN方法整定参数的PID控制器相比,CCPSO具有更小的超调量、更好的稳定性和更短的整定时间。Tran和Jung^[73]设计了一种ms约束积分增益优化设计的PI控制器,用于稳定不同功率水平下的蒸汽发生器水位。仿真结果表明,该控制方法在给水处理系统中具有良好的控制性能和较强的鲁棒性。Zeng等^[74]设计了一种结合粒子群优化算法的IMC-PID控制器,用于解决在阶跃反应型扰动和负荷跟踪下的液熔盐堆堆芯功率控制问题。仿真结果表明,IMC-PID控制器对熔盐增殖堆核心功率的控制十分有效。

5.2 模糊神经网络控制

模糊神经网络控制结合了模糊逻辑和神经网络分别在处理结构化知识和非结构化信息方面的优点,将模糊控制的三个基本过程,即模糊化、模糊推理和解模糊全部对应到神经网络的各层神经元予以实现,因而具备神经网络的信息存储和学习功能。在训练中,按照设计好的控制指标,该方法能够实现自适应、自学习,优化每条规则的输出函数、控制规则、隶属函数^[75, 76],使控制偏差逐渐收敛。

Borouhaki等^[77]结合递归神经网络与模糊系统设计了一种核反应堆堆芯功率智能控制器。仿真结果表明,该控制器结构简单、可靠性强,能有效提高控制响应的效果。Borouhaki等^[78]提出了一种具有NARX神经网络快速数据生成能力和基于操作者知识和经验的模糊系统的核反应堆智能堆芯控制器。仿真结果表明,该控制器所采用的最优

控制棒群机动和可变重叠策略可以很好地实现负载跟随过程中的堆芯控制. 为了实现对反应堆功率的有效控制, 廖和陈^[79]提出一种基于 T-S 型模糊神经网络控制方法. 多种典型工况下的仿真结果表明, 该方法与 PI 控制器相比具有更好的控制效果. Oliveira 和 Almeida^[80]提出了一种基于人工神经网络的压水堆稳压器模糊控制方法, 其响应效果与测试结果较为吻合, 但其控制性能优于常规 PID 控制器.

值得指出的是, 虽然模糊神经网络控制方法的控制效果较好, 但目前相关的结果仍然较少, 还需要进一步研究.

5.3 智能优化算法与智能控制的结合

智能优化控制将智能优化方法和控制方法相结合, 是解决核反应堆控制难点的有效途径. 智能优化算法通常包括群体智能 (Swarm Intelligence, SI) 和进化计算 (Evolutionary Computing, EC) 两大类. 目前, 此类方法在核反应堆系统中的应用研究主要集中在粒子群优化算法、蚁群优化算法和遗传算法.

模糊控制、神经网络控制及两者之间的结合能解决以往传统控制器参数恒定所带来的问题, 取得很好的控制效果. 但这些智能控制器中的各类参数仍然是人为决定的. 例如, 神经网络方法中的模糊控制的方法中论域的划分、隶属度的选择、训练权值的选择等都依赖于专家的经验, 并没有达到完全基于训练数据的最优化设计.

采用智能优化方法对神经网络的各种设计要素进行调节可以在很大程度上降低设计要求和外部干预. 例如, 传统神经网络需要人为确定神经元及其层数、学习算法的类型、学习速率、网络参数及传递函数等, 而智能优化方法能够在既定指标的迭代引导中自动确定这些参数. Tian 等^[81]提出了一种基于约束的遗传算法, 以优化神经网络结构并考虑将其应用于核电厂 LOCA 检测, 具有很高的检测精度. Ejigu 和 Liu^[82]提出了一种基于梯度下降-粒子群优化混合算法的深度神经网络方法来监测压水堆堆芯功率和出口温度. 仿真结果表明, 与滑模控制、线性二次型调节器和 PID 控制方法相比, 该方法成功地跟踪了参考输入, 提高了系统的稳定性. Coban^[29]提出了一种基于粒子群优化算法的闭环模糊控制器, 用于解决核反应堆的功率控制问题. 测试结果表明, 该控制器在大多数情

况下可以成功控制反应堆, 且具有更小的上升时间、稳定时间和稳态误差.

6 总结与展望

近年来, 许多学者针对核反应堆系统的控制问题展开了深入研究, 提出了不少控制方法. 然而, 由于实际应用对反应堆安全性的要求极为严格, 且 SMR 在不少领域内正朝着少人甚至无人化方向发展, 对控制系统的可靠性、安全性要求极为严苛. 目前这些控制方法能够实际应用于 SMR 的极少. 另外, 虽然关于反应堆智能控制方法的研究方向和成果多, 但对于方法的成熟性缺少评估标准.

我们认为, 为促进反应堆智能控制技术向更加成熟的方向发展, 加快其实际应用, 还需要进一步关注以下几个问题:

(1) 多目标协调/分层递阶式智能控制. 目前大多数应用研究仍然集中在核反应堆系统的典型子系统上. 但考虑到实际情况下各个子系统的非独立性和各系统参数的强耦合性, 非常有必要开展核反应堆系统的整体智能控制研究. 鉴于核反应堆系统是一类非常复杂的多变量输入输出系统, 有必要针对多变量智能控制在核反应堆系统中的应用开展更广泛而深入的研究.

(2) 智能控制方法的安全性评估. 由于核反应堆具有高强度辐射、高强能量的特殊性, 工业上对于核反应堆系统的运行安全性要求极高. 为使得核反应堆智能控制系统的控制过程可信、结果安全可靠, 需要建立更加完善的智能控制系统安全性评估方法, 持续提升核反应堆智能控制算法的可信度.

(3) 复合控制. 随着人工智能技术的发展, 智能控制技术及其实现方式也在不断更新升级. 针对 SMR 高鲁棒性、高可靠性的控制需求, 应该不断更新复合智能控制方法, 提高反应堆的安全性.

参考文献:

- [1] Dittmar M. Nuclear energy: Status and future limitations [J]. Energy, 2012, 37: 35.
- [2] Cozzi L, Gould T, Bouckart S, *et al.* World energy outlook 2020 [R]. Paris: IEA, 2020.
- [3] Li G, Wang X, Liang B, *et al.* Modeling and control of nuclear reactor cores for electricity generation: A review of advanced technologies [J]. Ren Sust En-

- ergy Rev (ISO4), 2016, 60: 116.
- [4] Zhang H, Wang J J. Development status and promotion analysis of small reactors [J]. Sino-Global Energy, 2020, 2: 5. [张浩, 王建建. 小型反应堆发展现状及推广分析[J]. 中外能源, 2020, 2: 5.]
- [5] Dong Z, Cheng Z, Zhu Y, *et al.* Review on the recent progress in nuclear plant dynamical modeling and control [J]. Energies, 2023, 16: 1443.
- [6] Zhou L Q, Qi S, Zhou T. Development trend and prospect of small modular reactor [J]. Tech Innov Appl, 2017, 21: 2. [周蓝宇, 齐实, 周涛. 小型模块化反应堆发展趋势及前景[J]. 科技创新与应用, 2017, 21: 2.]
- [7] Yan X, Wang P, Qing J, *et al.* Robust power control design for a small pressurized water reactor using an H-infinity mixed sensitivity method [J]. Nucl Eng Technol, 2020, 52: 1443.
- [8] Ho M, Obbard E, Burr P A, *et al.* A review on the development of nuclear power reactors [J]. Energy Procedia, 2019, 160: 459.
- [9] Zhou P, Hou B, Chen X, *et al.* Development trend of small reactor technology [J]. AEST, 2020, 54: 218.
- [10] Zhang B W. Research on key technologies of autonomous [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. [张博文. 小型模块化反应堆自主控制关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.]
- [11] Qiu J W, Xu R, Zhao Y T. Autonomous control of small nuclear reactor and its applications for deep space exploration [J]. J Astronaut, 2019, 1: 1. [邱建文, 徐瑞, 赵宇庭. 小型核反应堆自主控制及其深空探测应用设想[J]. 宇航学报, 2019, 1: 1.]
- [12] Zhan L, Bo Y, Lin T, *et al.* Development and outlook of advanced nuclear energy technology [J]. Energy Strategy Rev, 2021, 34: 100630.
- [13] Wang J Q, Dai Z M, Xu H J. Research status and prospect of comprehensive utilization of nuclear energy [J]. Bull Chin Acad Sci, 2019, 34: 460. [王建强, 戴志敏, 徐洪杰. 核能综合利用研究现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34: 460.]
- [14] Sun X K, Zhang M, Li L W. The development status and suggestions of advanced small nuclear power reactors [C]//Proceedings of the 2021 Annual Academic Conference of the Chinese Nuclear Society, Beijing: Chinese Nuclear Society, 2021: 152. [孙小凯, 张明, 李林蔚. 先进小型压水堆的发展现状及建议[C]//中国核学会2021年学术年会论文集. 北京: 中国核学会, 2021: 152.]
- [15] El-Naggar M F, Mosaad M I, Hasanien H M, *et al.* Elephant herding algorithm-based optimal PI controller for LVRT enhancement of wind energy conversion systems [J]. Ain Shams Eng J, 2021, 12: 599.
- [16] Borase R P, Maghade D K, Sondkar S Y, *et al.* A review of PID control, tuning methods and applications [J]. IJDC, 2021, 9: 818.
- [17] Zhou G, Tan D. Review of nuclear power plant control research: Neural network-based methods [J]. Ann Nucl Energy, 2023, 181: 109513.
- [18] Wang Q Q, Yin C C, Sun X J, *et al.* PID design and simulation of TMSR nuclear power control system [J]. Nucl Tech, 2015, 38: 56. [汪全全, 尹聪聪, 孙雪静, 等. TMSR核功率控制系统的PID设计与仿真[J]. 核技术, 2015, 38: 56.]
- [19] Yong E L, Liu H L, Zhang C G. Study on PID control method of SG water level in nuclear power plant [J]. Theor Res Constr, 2016, 9: 1590. [雍二磊, 刘宏林, 张晨光. 核电厂SG水位PID控制方法研究[J]. 城市建设理论研究, 2016, 9: 1590.]
- [20] Zhao Y, Du X, Xia G, *et al.* A novel coordinated control for integrated pressurized water reactor [J]. Ann Nucl Energy, 2015, 85: 1029.
- [21] Xiao K, Li J, Zhao M W, *et al.* Research on neural network predictive control of small pressurized water reactor [J]. Nucl Power Eng, 2020, 41: 50. [肖凯, 黎婧, 赵梦薇, 等. 小型压水堆功率神经网络预测控制研究[J]. 核动力工程, 2020, 41: 50.]
- [22] Zhang A X, Teng J, Ju Y, *et al.* Prediction of nuclear reactor core thermal power based on artificial neural network [J]. Comput Simul, 2021, 038: 455. [张奥鑫, 滕婧, 琚贇, 等. 基于神经网络的核反应堆堆芯热功率预测[J]. 计算机仿真, 2021, 038: 455.]
- [23] Lu Q, Yuan Y, Li F, *et al.* Prediction method for thermal-hydraulic parameters of nuclear reactor system based on deep learning algorithm [J]. Appl Therm Eng, 2021, 196: 117272.
- [24] Xiao K, Wu Q, Chen J, *et al.* A neural network predictive control method for power control of small pressurized water reactors [J]. Ann Nucl Energy, 2022, 169: 108946.
- [25] Yuan J D, Xia Q G. Application of neural network supervisory control to power regulating of marine integral pressurized water reactor [J]. Appl Sci Technol, 2005, 32: 24. [袁建东, 夏国清. 神经网络监督控制在船用一体化压水堆功率控制中的应用[J]. 应用科技, 2005, 32: 24.]

- [26] Yang X M. Application status and prospect of intelligent control technology in thermal power plants [J]. Therm Power Gener, 2018, 4: 1. [杨新民. 智能控制在火电厂应用研究现状与展望[J]. 热力发电, 2018, 4: 1.]
- [27] Zhang H G, Meng X P. Theory and application of intelligent control [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005. [张化光, 孟祥萍. 智能控制基础理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.]
- [28] Coban R, Can B. Identification and control of ITU Triga Mark-II Nuclear Research Reactor using neural networks and fuzzy logic [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [29] Coban R. A fuzzy controller design for nuclear research reactors using the particle swarm optimization algorithm [J]. Nucl Eng Des, 2011, 241: 1899.
- [30] Yuan Y, Coble J. A Takagi-Sugeno fuzzy power-distribution method for a prototypical advanced reactor considering pump degradation [J]. Nucl Eng Technol, 2017, 49: 905.
- [31] Huang C P, Jiang M, C G. Fuzzy control for ramp metering and variable speed limitation of freeway [J]. Comput Tech Dev, 2010, 20: 38. [黄春平, 蒋珉, 柴干. 高速公路的匝道与可变限速联合模糊控制[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20: 38.]
- [32] Li X, Ruan D. Comparative study of fuzzy control, PID control, and advanced fuzzy control for simulating a nuclear reactor operation [J]. Int J Gen Syst, 2000, 29: 263.
- [33] Kim M, Kim C, Rohan M, *et al.* Evolutionary optimization of fuzzy systems for water level control in the steam generator of nuclear power plant [C]// 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Piscataway: IEEE, 2004: 2303.
- [34] Rojas-Ramírez E, Benítez-Read J S, Segovia-De-Los Ríos A. A stable adaptive fuzzy control scheme for tracking an optimal power profile in a research nuclear reactor [J]. Ann Nucl Energy, 2013, 58: 238.
- [35] Yuan Y, Huang X J. T-S fuzzy method for control of steam temperature of modular-HTGR-based nuclear steam supplying system [J]. Atom Energy Sci Tech, 2018, 52: 699. [原越, 黄晓津. 高温气冷堆核蒸汽供应系统出口蒸汽温度的 T-S 模糊控制方法[J]. 原子能科学技术, 2018, 52: 699.]
- [36] Jia Y W, Duan T Y, Xu Q G. Study on application of fuzzy control [J]. Atom Energy Sci Tech, 2017, 51: 474. [贾玉文, 段天英, 徐启国. 模糊控制应用于研究堆功率调节系统的研究[J]. 原子能科学技术, 2017, 51: 474.]
- [37] Åström K J. Implementation of an auto-tuner using expert system ideas [R]. Lund: Lund University, 1983.
- [38] Mayadevi N, Vinodchandar S S, Ushakumari S. A review on expert system applications in power plants [J]. IJEC, 2014, 4: 116.
- [39] Zhang Y, Yang Z, Si H F. Overview of four types of intelligent control methods [J]. J Jinling Inst Tech, 2018, 34: 5. [张艳, 杨忠, 司海飞. 四种智能控制方法简述[J]. 金陵科技学院学报, 2018, 34: 5.]
- [40] Lin L, Wang X. New direction of nuclear code development: artificial intelligence [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021.
- [41] He C F. Modeling and control of fermentation process based on fuzzy neural network [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2003. [何朝峰. 基于模糊神经网络的发酵过程建模与控制[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2003.]
- [42] Cai Z X, Yu L L, Xiao X M. Principles and applications of intelligent control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014. [蔡自兴, 余伶俐, 肖晓明. 智能控制原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.]
- [43] Chen Z H, Xia H, Liu M. Research on fault diagnosis expert system of nuclear power system [J]. Nucl Power Eng, 2005, 26: 523. [陈志辉, 夏虹, 刘邈. 核电系统故障诊断专家系统研究[J]. 核动力工程, 2005, 26: 523.]
- [44] Peng Q, Yu R. Fuzzy Petri Net expert system and application in fault diagnosis of nuclear power plant [J]. Nucl Power Eng, 2013, 34: 69. [彭俏, 余刃. 模糊 Petri 网专家系统及其在核动力装置故障诊断中的应用[J]. 核动力工程, 2013, 34: 69.]
- [45] Liao T, Zhai B, Han L. Development and application of intelligent expert system for cold functional test of reactor vessel open in nuclear power plant [C]//2020 Chinese Automation Congress, Piscataway: IEEE, 2020: 4956.
- [46] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence [M]. Cambridge: MIT Press, 1992.
- [47] Liu J K. Intelligent control: Theoretical basis, algorithm design and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019. [刘金琨. 智能控制: 理论基

- 础,算法设计与应用[M].北京:清华大学出版社,2019.]
- [48] Ma J T. The research of the reheating furnace temperature control method based on fuzzy neural network [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011. [马景涛. 基于模糊神经网络的加热炉温度控制方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.]
- [49] Panda S, Padhy N P. Power system with PSS and FACTS controller: Modelling, simulation and simultaneous tuning employing genetic algorithm [J]. IJEC, 2007, 1: 493.
- [50] Liu Y Y, Zhou S L, Wang M X. Linear active disturbance rejection control of reactor power [J]. Contr Eng China, 2015, 22: 848. [刘玉燕, 周世梁, 王明新. 反应堆功率线性自抗扰控制方法研究[J]. 控制工程, 2015, 22: 848.]
- [51] Wan J, Zhao F. Optimization of AP1000 power control system setpoints using genetic algorithm [J]. Prog Nucl Eeerg, 2017, 95: 23.
- [52] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. Piscataway: IEEE, 1995: 1942.
- [53] Xu B H, Ruan J. Optimization of processing conditions for C4 olefin production based on particle swarm optimization algorithm improved XGBoost model [J]. Sci Tech Eng, 2023, 23: 2016. [徐博涵, 阮敬. 基于粒子群优化算法改进的XGBoost模型制备C4烯烃工艺条件优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23: 2016.]
- [54] Wang P, Wan J, Luo R, *et al.* Control parameter optimization for AP1000 reactor using particle swarm optimization [J]. Ann Nucl Energy, 2016, 87: 687.
- [55] Kong X S, Chen X R, Guan J S. PID controller design based on radial basis function neural networks for the steam generator level control [J]. CIT, 2016, 16: 15.
- [56] Xiao D, Zeng W J, Yu T, *et al.* Research on core power control of research reactor based on BP neural network [J]. Nucl Sci Eng, 2022, 42: 744. [肖盾, 曾文杰, 于涛, 等. 基于BP神经网络PID的研究堆堆芯功率控制研究[J]. 核科学与工程, 2022, 42: 744.]
- [57] Ding Z F. A novel fuzzy PID neural model control method [C]//2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. Piscataway: IEEE, 2009: 675.
- [58] Govindan V, Pappa N. Online learning based neural network adaptive controller for efficient power tracking of PWR type reactor with unknown internal dynamics [J]. Ann Nucl Energy, 2022, 168: 108866.
- [59] Liu Y, Xia H. Research on integrated reactor coordinated control technology based on single neuron PID controller [C]//China Nuclear Science and Technology Report. Beijing: China Atomic Energy Press, 2013: 634. [刘妍, 夏虹. 基于单神经元PID控制器的一体化反应堆协调控制技术研究[C]//中国核科学技术进展报告. 北京: 中国原子能出版社, 2013: 634.]
- [60] Hosseini S A, Shirani A S, Lotfi M, *et al.* Design and application of supervisory control based on neural network PID controllers for pressurizer system [J]. Prog Nucl Energy, 2020, 130: 103570.
- [61] Sun J, Wang W, Zheng K. Research of PID neural networks decoupling control of marine nuclear power plant [J]. J Harbin Eng Univ, 2007, 28: 656.
- [62] Wei X, Wang P, Zhao F. Design of a decoupled AP1000 reactor core control system using digital proportional-integral-derivative (PID) control based on a quasi-diagonal recurrent neural network [J]. Nucl Eng Des, 2016, 304: 40.
- [63] Chopra V, Singla S K, Dewan L. Comparative analysis of tuning a PID controller using intelligent methods [J]. Acta Polytech Hung, 2014, 11: 235.
- [64] Gao D J, Tan J, Lin H Q. Applying advanced control technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. [高东杰, 谭杰, 林红权. 应用先进控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.]
- [65] Zeng W, Jiang Q, Liu Y, *et al.* Core power control of a space nuclear reactor based on a nonlinear model and fuzzy-PID controller [J]. Prog Nucl Energy, 2021, 132: 103564.
- [66] Zeng W, Jiang Q, Xie J, *et al.* A fuzzy-PID composite controller for core power control of liquid molten salt reactor [J]. Ann Nucl Energy, 2020, 139: 107234.
- [67] Liu W J, Ye J H. Study on power control of nuclear reactors [J]. J Chin Soc Power Eng, 2016, 36: 378. [刘文杰, 叶建华. 核反应堆功率控制研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36: 378.]
- [68] Wang W, Di Maio F, Zio E. Hybrid fuzzy-PID control of a nuclear Cyber-Physical System working under varying environmental conditions [J]. Nucl Eng Des, 2018, 331: 54.
- [69] Jiang Q, Liu Y, Zeng W, *et al.* Study on switching control of PWR core power with a fuzzy multi-

- model [J]. *Ann Nucl Energy*, 2020, 145: 107611.
- [70] Puchalski B, Duzinkiewicz K, Rutkowski T. Multi-region fuzzy logic controller with local PID controllers for U-tube steam generator in nuclear power plant [J]. *Arch Control Sci*, 2015, 25: 429.
- [71] Mousakazemi S M H. Control of a PWR nuclear reactor core power using scheduled PID controller with GA, based on two-point kinetics model and adaptive disturbance rejection system [J]. *Ann Nucl Energy*, 2019, 129: 487.
- [72] Sheng G, Mu Y, Lie T T, *et al.* Chaos cooperative particle swarm optimization based water level control for nuclear steam generator [J]. *Matec Conf*, 2016, 55: 4004.
- [73] Tran T C, Jung J C. Controller tuning constants for the advanced power reactor 1400 feedwater control system based on ms-constrained integral gain optimization method [J]. *Ann Nucl Energy*, 2019, 127: 39.
- [74] Zeng W, Zhu W, Hui T, *et al.* An IMC-PID controller with particle swarm optimization algorithm for MSBR core power control [J]. *Nucl Eng Des*, 2020, 360: 110513.
- [75] Abdelfattah H, Kotb S A, Esmail M, *et al.* Adaptive neuro-fuzzy self-tuned-PID controller for stabilization of core power in a pressurized water reactor [J]. *IJRCS*, 2023, 3: 1.
- [76] Yang X Y, Wang B H, He S Y. The application of ANFIS in predicting groundwater depth [J]. *J Guangdong Technical College of Water Resource Electr Eng*, 2013, 11: 52. [杨先野, 王宝华, 何司彦. ANFIS在地下水埋深预测中的应用[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2013, 11: 52.]
- [77] Boroushaki M, Ghofrani M B, Lucas C, *et al.* An intelligent nuclear reactor core controller for load following operations, using recurrent neural networks and fuzzy systems [J]. *Ann Nucl Energy*, 2003, 30: 63.
- [78] Boroushaki M, Ghofrani M B, Lucas C, *et al.* Identification and control of a nuclear reactor core (VVER) using recurrent neural networks and fuzzy systems [J]. *IEEE T Nucl Sci*, 2003, 50: 159.
- [79] Liao L T, Chen Z. Research on reactor power regulation based on T-S fuzzy neural network [J]. *Nucl Power Eng*, 2013, 34: 109. [廖龙涛, 陈智. 基于 T-S 型模糊神经网络的反应堆功率调节研究[J]. 核动力工程, 2013, 34: 109.]
- [80] Oliveira M V D, Almeida J C S D. Application of artificial intelligence techniques in modeling and control of a nuclear power plant pressurizer system [J]. *Prog Nucl Energy*, 2013, 63: 71.
- [81] Tian D, Deng J, Vinod G, *et al.* A constraint-based genetic algorithm for optimizing neural network architectures for detection of loss of coolant accidents of nuclear power plants [J]. *Neurocomputing*, 2018, 322: 102.
- [82] Ejigu D A, Liu X. Gradient descent-particle swarm optimization based deep neural network predictive control of pressurized water reactor power [J]. *Prog Nucl Energy*, 2022, 145: 104108.