

凝给水系统多目标耦合控制及参数自适应更新

谢军,申世军,何俐萍,王孟博,张磊
(电子科技大学机械与电气工程学院,四川成都611731)

摘要:针对凝给水系统内部泵阀强耦合特性所导致的多指标控制难题,以及系统运行时来自上下游设备强烈边界干扰问题,传统PID控制方式存在整体调节过程稳定性不足的缺陷。为改善系统控制性能提出多目标耦合与模糊神经网络(FNN)的复合控制策略,对系统内部进行耦合分析,提出供水流量—给水阀压差多目标耦合控制策略,实现泵阀对两者的协同控制,并针对系统外部干扰问题,构建基于模糊神经网络的控制参数更新方案,增强控制系统自适应能力和调节性能。仿真结果表明:相较于传统PID控制方式,多目标耦合+FNN控制方案的供水流量与给水阀压差波动分别减少6.6%和36.7%;设计的控制方案可以提高泵阀协同控制性能并有效应对外部边界干扰,从而改善管路流动削弱回路震荡,提高了凝给水系统的稳定性。

关键词:凝给水系统;耦合控制因素;多目标控制;模糊神经网络

中图分类号:U664 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2025.06.012

[引用本文格式]谢军,申世军,何俐萍,等.凝给水系统多目标耦合控制及参数自适应更新[J].热能动力工程,2025,40(6):110-118. XIE Jun, SHEN Shijun, HE Liping, et al. Multi-objective coupling control and parameter self-adaptive updating of condensate and feedwater system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6): 110-118.

Multi-Objective Coupling Control and Parameter Self-Adaptive Updating of Condensate and Feedwater System

XIE Jun, SHEN Shijun, HE Liping, WANG Mengbo, ZHANG Lei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China, Post Code: 611731)

Abstract: The traditional PID control method has the defect of poor overall stability in the control process due to the multi-index control problem caused by the strong coupling characteristics of pumps and valves inside this system, as well as the strong boundary interference from upstream and downstream equipment during system operation. To improve the control performance of the system, a hybrid control strategy integrating multi-objective coupling and a fuzzy neural network (FNN) is proposed. An internal coupling analysis of the system is conducted, leading to the formulation of a multi-objective coupling control strategy for water supply flow rate and feedwater valve pressure difference, which facilitates the coordinated control of the pump and valve. Addressing external disturbances of the system, a control parameter update scheme grounded in fuzzy neural network principles is established, thereby bolstering the self-adaptive capacity and regulatory performance of the control system. The simulation results show that the multi-objective coupling plus FNN control scheme reduces the fluctuations of water supply flow rate and feedwater valve pressure difference by 6.6% and 36.7% compared with the traditional PID control method. There-

收稿日期:2024-12-25; 修订日期:2025-02-26

基金项目:教育部产学研合作协同育人项目(202101204003)

Fund-supported Project: Ministry of Education Industry-University Cooperative Education Project (202101204003)

作者简介:谢军(2000-),男,电子科技大学硕士研究生。

通信作者:何俐萍(1973-),女,电子科技大学教授。

fore, the control scheme designed in this article can enhance the collaborative control performance of pumps and valves and effectively deal with external boundary interference, thereby improving pipeline flow, weakening loop oscillation, and enhancing the stability of condensate and feedwater system.

Key words: condensate and feedwater system, coupling control factors, multi-objective control, fuzzy neural network(FNN)

引言

热能系统作为核能发电系统的核心,主要将能源转化为电能,用于储存和维持系统正常运行^[1]。凝给水系统是热能系统重要组成部分,主要为其提供所需要的冷凝水,直接影响能量转换装置的性能,是热能系统能够稳定运行的基础,也是提高发电效率和输出能力的重要保障^[2]。热能系统运行时的负荷波动(如负载变化、动力源波动等)会对凝给水系统造成较大的随机边界干扰。此外,凝给水系统内部包含的设备数量众多、非线性程度较高、耦合关系复杂,对凝给水系统的稳定控制提出了挑战。

针对凝给水系统控制策略的研究,对于提升核能发电系统的自动化水平、增强运行的可靠性与安全性具有重要意义。在凝给水系统的协同控制方面,陈五星^[3]和李晓琳等人^[4]都分析了冷凝器的工作特性,并设计相应的水位协调控制系统,有效提升了水位控制效果;江正悦^[5]和曹子函^[6]探讨了不同控制逻辑下的PID控制器对除氧器和冷凝器的调节能力及系统稳定性的影响并对比了多种方案的优劣。在控制算法方面,张永生^[7]采用多种算法对二回路控制系统进行了优化,进一步提升了二回路各子系统的控制效果;姜頔等人^[8]、薛阳等人^[9]和邓天^[10]利用模糊理论的自适应性,实现了控制参数的动态更新,提升了水位控制的灵活性;彭昊宇^[11]基于模型预测控制理论,提出了一种引入松弛变量的非线性模型预测控制(NMPC)方法,并证明该策略在减少水位超调、抑制水位波动以及降低控制动作方面具有显著优势;陶静等人^[12]针对水位调节回路被控参数动态偏差过大等问题引入改进单神经元控制算法,提高了控制系统的抗干扰能力和响应速度;赵世泉^[13]提出了基于光滑滑模理论的增压锅炉上锅筒水位控制策略,解决了控制系统的抖振现象,提

高了上锅筒水位在大负荷工况变化情况下的稳定控制。综上所述,众多学者对于凝给水系统和蒸发器水位控制都提出了自己的看法并取得了一定效果,但是针对强边界干扰时考虑多指标稳定的泵阀协同控制研究较少,需要进一步的探索。

本文通过对凝给水系统控制策略进行应用研究与仿真验证,提出一套适用于热动力系统的泵阀协调控制方案,用于提升控制系统的抗干扰和稳定运行能力,对提高核能发电系统整体使用性能和输出能力具有重要意义。

1 凝给水系统及耦合因素

凝给水系统核心组成部分包括凝水泵、凝水回流阀、水质处理模块、给水泵、给水阀等,上下游主要设备分别为冷凝器和蒸汽发生器,系统简化结构如图1所示。所有相邻设备通过管道相互连接,共同组成水流管网系统。水流的动力学特性使得设备之间具有高度耦合的特点,任一设备运行时压力和流量的变化都会对相邻设备产生影响,逐渐扩展到整个系统。为了确保凝给水系统的稳定和安全运行,必须全面考虑各种影响因素,并通过实验与仿真技术的结合,深入分析系统的运行特性^[14]。

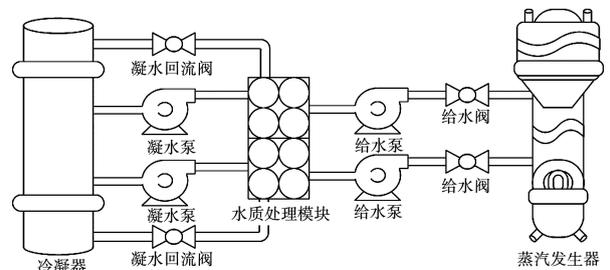


图1 凝给水系统结构简图

Fig.1 Simplified diagram of condensate and feedwater system structure

凝给水系统的主要功能是调节上游设备生产的

冷凝水压力和流速,从而满足下游蒸汽发生器的流量和压力等供水需求。供水流量及其稳定水平直接影响到下游设备的工作性能和输出能力,而下游设备工作的变化亦作用于凝给水系统出口压力,影响给水阀两端压差,成为凝给水系统主要干扰来源。给水阀两端压差的稳定是凝给水系统正常运行的重要基础,压差过大会导致管道内流量激增和回路振荡,不仅会增加管道及相关设备的压力负荷,同时也会影响给水阀的控制精度;压差过小会导致供水困难、给水阀控制失效等问题,当压差降为负值时甚至会造成给水阀卡滞,存在控制系统崩溃的风险。

2 供水控制原理及策略研究

2.1 凝给水系统 PID 控制原理

工程中常采用 PID 控制算法,对给水泵的转速和给水阀的开度进行实时调节,从而对凝给水出口流量和给水阀两端压差实现自动控制。PID 控制即比例-积分-微分控制,是一种广泛应用于工业控制系统中的反馈控制方法,具备结构简单、易于实现、稳定性好等优点。PID 控制原理框图如图 2 所示。

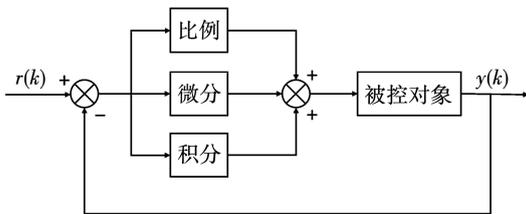


图 2 PID 控制原理框图

Fig. 2 Block diagram of PID control principle

PID 控制原理表达为:

$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d de(t)}{dt}] \quad (1)$$

式中: k_p —比例系数; T_i —积分时间常数; T_d —微分时间常数。

比例、积分、微分 3 个环节分别表示现在、过去和将来的状态,依照一定规则和经验调节 3 个环节的增益 K_p 、 K_i 和 K_d ,可以实现对被控对象的全过程

控制。

基于传统 PID 控制方式建立的凝给水供水流量和给水阀两端压差控制系统如图 3 所示。该系统通过 PID 控制器调节给水阀开度来控制供水流量,调节给水泵的转速来控制给水阀两端压差。泵阀独立控制的方式实现了压力和流量的简单解耦,在控制性能需求不高时能够精确控制凝给水系统供水流量和压力。

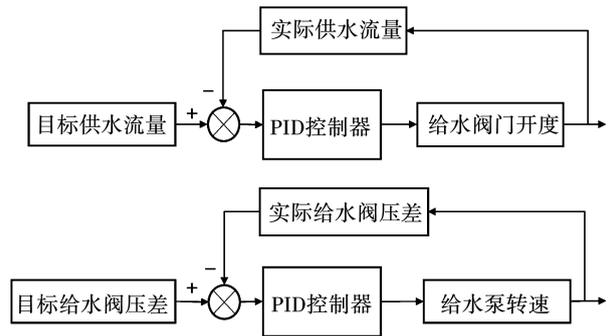


图 3 凝给水系统供水流量和给水阀压差 PID 控制框图

Fig. 3 Block diagram of PID control of water supply flow rate and water supply valve pressure difference of condensate and feedwater system

传统 PID 控制方式存在两方面问题:一方面,传统 PID 控制算法本身存在一定缺陷,每个 PID 模块仅有确定的 3 个控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d ,而 PID 控制器的设计和参数调整通常依赖于系统模型,一旦更改模型参数(如设备老化、轻微故障等),原有的控制参数便失去了本来的效果;这种单一的控制方式对外界干扰适应性较差,一旦系统边界条件发生变化,可能会造成控制性能减弱甚至失效;对于复杂系统,PID 参数的人为调整有一定难度,需要专业知识和大量经验。另一方面,泵阀独立控制压力和流量的方式只是简单解耦,根据伯努利原理,管路中的压力能和流速动能始终相互影响,不能简单地分开考虑。因此,对于泵阀的耦合控制研究提出了需求和挑战。

2.2 多目标耦合控制策略

在设备众多、耦合性强的凝给水系统中,简单的泵阀独立控制压差和流量的方式存在准确度和响应

速度较差的问题,在下游设备工作情况发生强烈波动或者工况变化时会出现如下问题:泵控制压差而忽略对流量的影响,加大了阀门控制流量的难度;多并联支路设备的调节速度不能有效配合,造成总供水流量满足需求,但两支路流量分配不当、控制逻辑出错等现象。

本文针对上述传统控制方式在管路系统耦合程度较高时产生控制效果不佳、逻辑容易出错的问题,提出多目标耦合控制策略。该策略核心原理是泵阀耦合特性使得给水泵和给水阀门同时作用于凝给水系统出口的流量和压力。基于这一非线性耦合特性,本文建立多目标耦合控制器,合理协调泵阀的控制作用,进而提升控制效果。泵阀协同控制压差和流量,只有当压差和流量同时收敛到目标值时,才输出最终的给水泵转速和给水阀门开度。多目标控制方案如图4所示。该方案控制效果主要取决于压差与流量的组合方式、权重配比和收敛准则3个影响因素。三者分别对应泵阀的协作关系和关联程度、系统对流量和压差指标的重视程度以及控制器对流量和压差组合后的控制准确度。

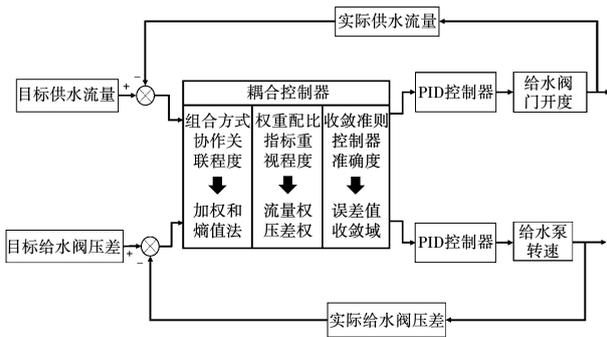


图4 多目标控制方案

Fig. 4 Multi-objective control scheme

图5给出了基于误差和的多目标控制方案。该方案以流量和压差各自的误差加权再求和为泵阀的控制目标,以侧重流量稳定兼顾压差波动为收敛方向,考虑实际精度要求选择相应的收敛准则,实现泵阀对流量和压差的联合控制。其中,在收敛方向中赋予各指标相应的权重系数(相乘),以修正数量级和重视程度差异带来的影响。

从兼顾多指标稳定和设备协同控制的角度,多

目标控制方案为凝给水控制系统设计指出了新的方向;在管路系统可控设备(变频泵,调节阀)的影响范围内,任何位置的流量或压力都可以加入到该设备的控制目标中。控制效果受限于设备自身的影响程度和其他可控设备的“争抢”程度。可以通过专家系统、模糊推导或智能算法调节设备优先级,从而实现精准调控。

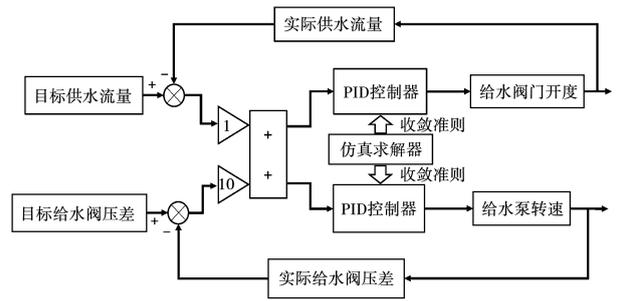


图5 基于误差和的多目标控制方案

Fig. 5 Multi-objective control scheme based on sum of errors

2.3 控制参数自适应优化

多目标控制方案将泵阀控制特性联合起来,提供了协同控制机制,可提高控制上限,但同时也进一步加剧了传统PID控制算法模型依赖性强、适应性较差、参数人为调整困难等问题。

模糊PID(Fuzzy PID)是一种将传统PID控制器与模糊控制理论相结合的控制方法,可以通过模糊逻辑控制器来调节PID控制器的参数,能够处理不精确、模糊或者复杂的输入信息,使系统的控制更加灵活和自适应^[15]。为了降低人为设置模糊推理过程参数带来的主观影响,可利用BP(Back Propagation)神经网络对数据进行学习和训练,从而客观修正模糊参数。BP神经网络是一种常见的前馈神经网络模型,通过误差逆传播算法进行训练,能够在没有事先给定映射数学关系的情况下,学习并存储大量输入输出之间的非线性关系。利用如图6所示包括输入层、隐藏层和输出层在内的典型三层BP神经网络,能够实现非线性函数逼近。

模糊神经网络(Fuzzy Neural Network, FNN)结合了模糊逻辑控制和神经网络的自适应能力,具有自学习、鲁棒性强、能够处理复杂非线性系统等优

势。基于 FNN 的控制参数自动更新结构如图 7 所示。该方案既可以基于先验知识进行模糊推理,针对系统的动态变化自动调整控制参数,又能够通过神经网络对大量数据进行学习和训练,自动优化隶属度函数和模糊规则激活度等模糊推导的过程参数,以适应不同的工况和环境变化^[16-19]。

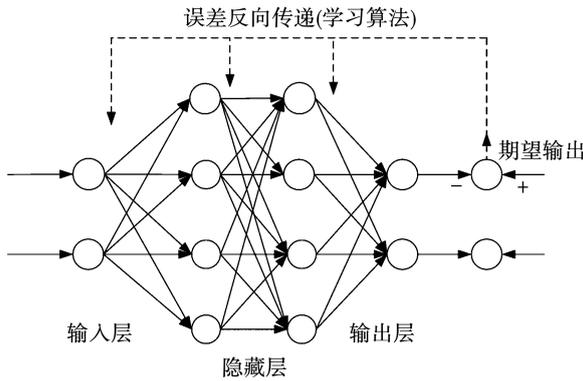


图 6 基于 BP 算法的多层前馈神经网络结构图

Fig. 6 Multi-layer feedforward network structure diagram based on BP algorithm

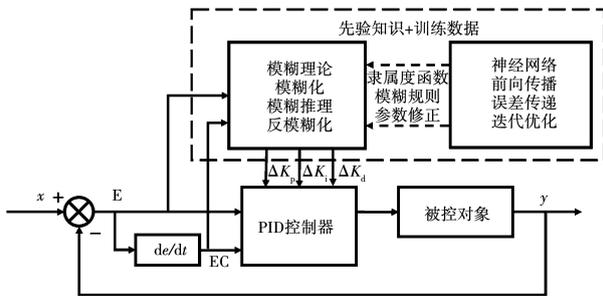


图 7 基于 FNN 的控制参数自适应更新结构图

Fig. 7 Control parameter self-adaptive update structure diagram based on FNN

因此,本文利用模糊神经网络控制的自适应性,设计一套针对凝给水系统供水流量和压力的控制参数自适应优化方案,提高系统抗干扰能力并改善整体控制效果。

针对凝给水系统,可以根据供水流量和给水阀两端压差的误差和误差变化率,推导泵阀 PID 控制器对应的控制更新参数 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d ,实时更新 K_p 、 K_i 和 K_d 参数,更新式为:

$$K_x = K'_x + \Delta K_x, x \in \{p, i, d\} \quad (2)$$

式中: K'_x —初始参数; ΔK_x —更新参数。

完成初始参数设定后,针对泵阀控制参数 ΔK_x 构建 FNN 控制参数自适应更新系统。具体地,供水流量与给水阀压差组合后的误差 E 和误差变化率 EC 取值如下:E 和 EC 的论域均为 $\{-4, -2.6, -1.3, 0, 1.3, 2.6, 4\}$ 。

给水阀开度模糊控制参数取值如下: ΔK_p 的论域为 $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$; ΔK_i 的论域为 $\{-0.03, -0.02, -0.01, 0, 0.01, 0.02, 0.03\}$; ΔK_d 的论域为 $\{-0.03, -0.02, -0.01, 0, 0.01, 0.02, 0.03\}$ 。

给水泵的转速模糊控制参数取值如下: ΔK_p 的论域为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$; ΔK_i 的论域为 $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$; ΔK_d 的论域为 $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$ 。

各模糊变量设为 7 级,即:模糊变量分别描述为正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(ZO)、负小(NS)、负中(NM)、负大(NB),表示模糊子集 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。模糊规则设定如下:

- (1) 当误差 E 较大时,增大比例增益以快速减少误差;当误差 E 较小时,减小比例增益避免过度修正。
- (2) 当误差 E 长时间存在时,增大积分增益,以消除持续的稳态误差;当误差 E 已经消除且趋于零时,减小积分增益,以避免积分过度积累造成系统震荡。
- (3) 当误差变化率 EC 较大时,增大微分增益,以增加对误差变化的响应,减小超调和震荡;当误差变化率 EC 较小时,减小微分增益,以减少系统的噪声和低频震荡。

表 1 给出了针对凝给水系统泵阀控制参数的具体更新规则。其中,横项指标 EC 和纵向指标 E 分别为供水流量与给水阀门压差组合之后的误差变化率和误差,两者都被划分为 7 个模糊等级。数据项为给水阀门和给水泵在相应 EC 和 E 条件下的控制更新参数 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 。

隶属度函数表示输入变量属于某一模糊子集的程度。本文在 Matlab 模糊编辑器中选择参数灵活、适应性强的 gauss2MF 函数。

表 1 凝给水系统供水流量和压力控制参数模糊规则表

Tab. 1 Fuzzy rule table for water supply flow rate and pressure control parameters of condensate and feedwater system

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB PB PB	PB PB PB	PM PB PM	PM PM PM	PS PM PS	PS PS PS	ZO ZO NB
NM	PB PB PB	PM PB PB	PM PM PM	PS PM PM	PS PS PS	ZO ZO ZO	NS ZO ZO
NS	PM PB PB	PM PM PM	PS PM PM	PS PS PS	ZO ZO PS	NS ZO ZO	NS NS NS
ZO	PM PM PM	PS PM PS	PS PS PS	ZO ZO ZO	ZO ZO NS	NS NS NS	NS PM NM
PS	PS PS PS	PS PS PS	ZO ZO PS	ZO NS ZO	NS PS NS	NS PS NM	NM PM NM
PM	PS PS PS	ZO ZO PS	NS NS ZO	NS NS NS	NM PS NM	NM PS NM	NB PB NB
PB	ZO ZO PS	NS NS ZO	NS NM NS	NM NM NS	NM PM NM	NB PM NM	NB PB NB

建立模糊推理系统后,再利用神经网络进行模糊变量隶属度函数和模糊规则激活度离线优化,其网络结构如图 8 所示。其中,误差表示供水流量和给水阀压差计算各自误差,再加权组合后的值。误差变化率为该值的导数。

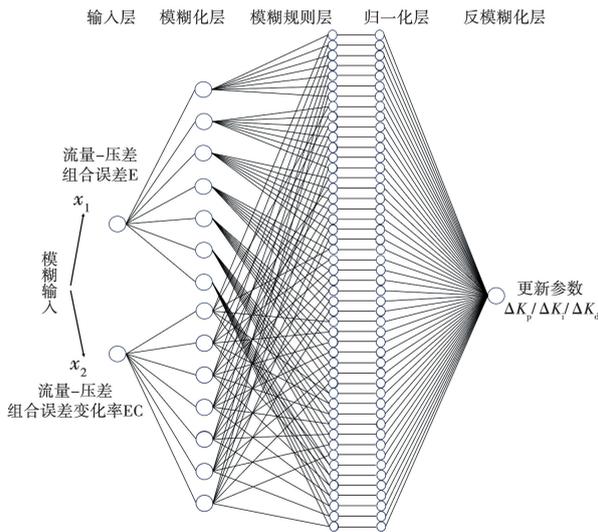


图 8 基于 FNN 的控制参数优化网络结构

Fig. 8 Control parameter optimization network structure based on FNN

由图 8 可知,第 1 层为输入层,令误差 E 和误差变化率 EC 输入分别为 x_1 和 x_2 。第 2 层为模糊化层,每个节点对应一个模糊语言,用于计算模糊变量对应语言的隶属度函数,即:

$$u_i^j = u_{A_i}(x_i) \quad (i=1,2; j=1,2,\dots,7) \quad (3)$$

式中: x_i —第 i 个输入变量; A_i^j —第 i 个模糊变量对应第 j 个语言的模糊子集。

第 3 层为模糊规则层,包含 49 个节点,分别对应表 1 中每个待更新控制参数的 49 条规则,主要计算每条规则对应的激活度,即:

$$a_k = u_1^{j_1} \wedge u_2^{j_2} \quad (4)$$

式中: k —模糊规则层的 49 个节点,取 $k=1,2,\dots,49$;上标 $j_1, j_2=1,2,\dots,7$ 。

第 4 层为归一化层,将每条规则的激活度用平均值表示,即:

$$\bar{a}_k = a_k / \sum_{k=1}^{49} a_k \quad (5)$$

第 5 层为反模糊化层,采用重心法提供模糊规则推导得到的输出语言的数值解释,即更新参数:

$$y = \sum_{k=1}^{49} y_{ck} \bar{a}_k = \sum_{k=1}^{49} y_{ck} a_k / \sum_{k=1}^{49} a_k \quad (6)$$

式中: y_{ck} —第 k 条规则推理出的 y 论域模糊子集中心值。

数据集可利用 Matlab 数据检查器和模糊工具箱采集历史仿真数据,获得供水流量和给水阀两端压差数据与 PID 更新参数的对应关系,便可以运用 BP 神经网络对模糊变量隶属度函数和模糊规则激活度进行修正,最终获得适用于具体凝给水系统多目标耦合控制方案的 FNN 参数自适应更新模型,即“FNN + 多目标耦合控制”。

综上,当前系统实现了给水阀门和给水泵的控制参数自适应优化。当遇到供水需求改变、上下游设备干扰、凝给水系统内部设备状态改变等情况时,给水阀和给水泵的控制参数 K_p, K_i 和 K_d 依据式(2)进行自适应更新。其中 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 和 ΔK_d 的值由系统当前状态下供水流量和给水阀门两端压差的组合误差及误差变化率经过 FNN 模型计算得出。

3 控制仿真与结果分析

利用 Matlab Simulink 软件建立凝给水系统模型,设备参数和边界条件采用实验台架数据。干扰

数据来源于实验采集的凝给水系统进出口压力波动数据。控制系统分别采用传统 PID、多目标控制和 FNN + 多目标控制方案, 流量和压差仿真曲线分别如图 9 ~ 图 11 所示。

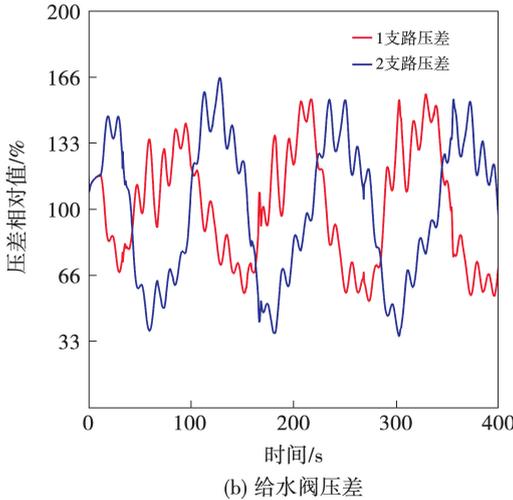
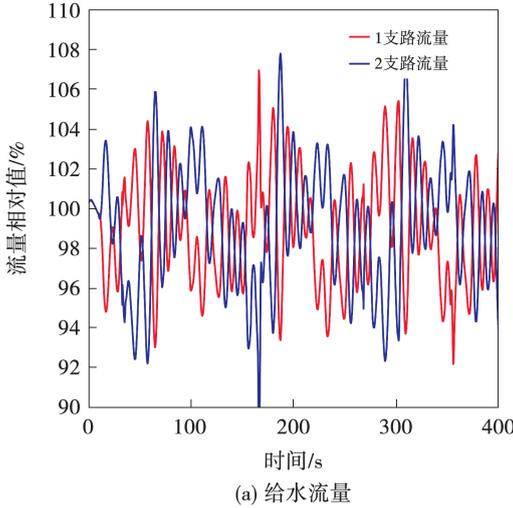


图 9 传统 PID 控制
Fig. 9 Traditional PID control

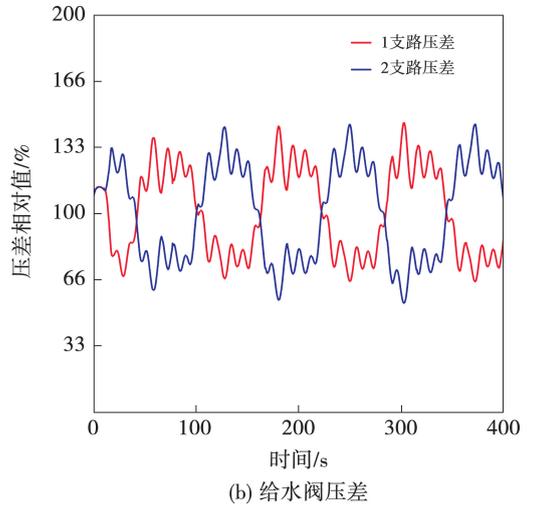
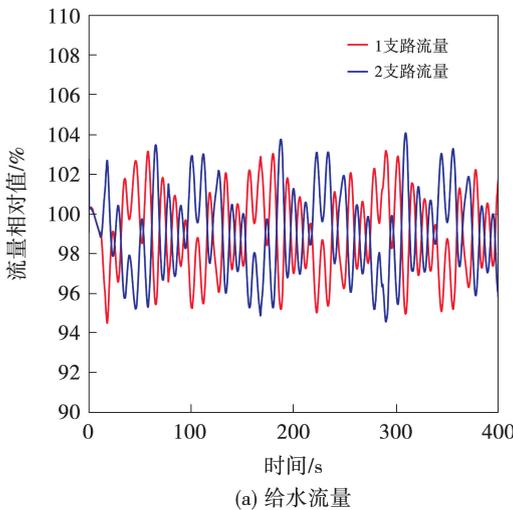


图 10 多目标耦合控制

Fig. 10 Multi-objective coupling controls

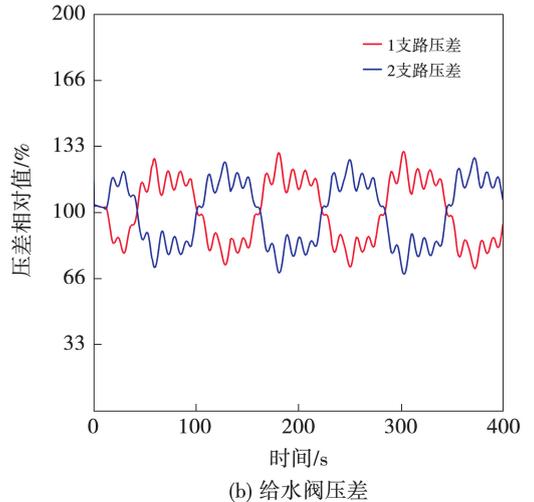
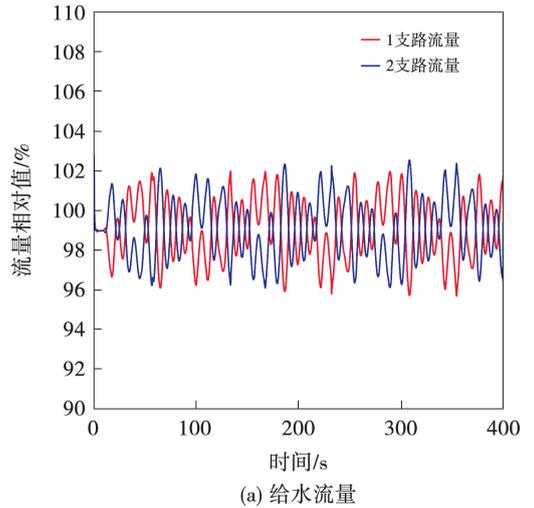


图 11 FNN + 多目标耦合控制

Fig. 11 FNN plus multi-objective coupling controls

由图9中可知,在传统PID控制方式下,两并联支路的供水流量和压差均在目标值附近呈不对称分布,且波动幅值较大。这是由于泵阀独立控制压差和流量,导致其中一个指标调节到目标值时,另一个指标偏离目标,从而形成耦合震荡。此外,这种控制方式的 K_p 、 K_i 和 K_d 控制参数固定,难以适应外界干扰对系统的影响,导致指标波动幅值较大。

由图10可知,在多目标耦合控制方案下,两并联支路的流量和压差在目标值附近均呈对称分布,波动幅值较小。这是由于耦合控制器实现了泵阀协同控制流量和压差,有效减少了耦合震荡带来的流量和压差不同步情况,并有助于减小两者的波动幅值。由图11可知,在FNN+多目标耦合控制方案下,流量和压差波动幅值进一步减小。这是由于FNN控制方案的引入,使得泵阀的控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d 随外界干扰同步变化,从而提升了控制系统自适应能力,提高了响应速度,抑制了指标波动。

不同方案的数值结果对比如表2所示。数据均采用相对值表示,为实际值与额定值之比。

表2 不同方案下的控制效果对比

Tab.2 Comparison of control effects in different schemes

控制方式	流量波动/%	压差波动/%
传统PID	9.8	66.7
多目标耦合	5.1	43.3
FNN+多目标耦合	3.2	30.0

由表2可知,在相同工况和边界干扰下,传统PID控制方式的供水流量和给水阀门两端压差最大;多目标耦合控制方案对流量和压差的波动具有抑制作用,相较于传统PID控制方式流量和压差波动分别降低4.7%和23.4%;FNN+多目标控制方案对流量和压差的控制效果最好,相较传统PID控制方式流量和压差波动分别降低6.6%和36.7%。

4 结论

本文针对传统PID控制中泵阀独立控制效果不佳、算法自适应性较差等问题,采用系统分析、算法推理和仿真验证等方法,设计了凝给水系统多目标耦合控制及FNN参数自适应优化方案。从设计与仿真中可以得出以下结论:

(1) 在控制条件的使用上,传统泵阀独立控制方式在凝给水系统性能需求不高时,能够实现供水流量和给水阀两端压差的简单控制。但是在面临复杂的系统内部设备耦合情况时表现较差。多目标耦合+FNN控制方案充分结合了管路压力和流量的耦合特性,通过构建耦合控制器实现了泵阀的协同控制,在应对设备强耦合作用和改善管路流动等方面有一定提高。相较于传统PID控制方案,该方案流量和压差波动则减少6.6%和36.7%。

(2) 在实现控制指标方面,相较于传统PID控制方式,多目标耦合+FNN控制方案能够有效抑制供水流量和压力的波动,对减轻系统压力、加速指标稳定和削弱回路震荡有一定贡献,并且有利于多指标稳定控制的深入研究。

(3) 在复杂工况的适应性上,FNN+多目标控制方案结合了模糊理论与神经网络控制方式。基于模糊推理的PID控制参数自动优化方案使凝给水系统对下游设备工作特性复杂变化具有更强的适应性,并且能够利用神经网络进行更精准和智能的数据学习与模型训练。

参考文献:

- [1] 张志萍,潘晓慧. 热力发电厂[M]. 北京:化学工业出版社,2024.
ZHANG Zhiping, PAN Xiaohui. Thermal power station[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2024.
- [2] 冯雪凯. 核动力二回路系统建模与控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2022.
FENG Xuekai. Research on modeling and control strategy of nuclear power secondary loop system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [3] 陈五星. 冷凝器水位控制建模和控制系统设计[J]. 船舶工程, 2024, 46(6): 89-93.
CHEN Wuxing. Modeling of water level control and design of PID control system for the marine condenser[J]. Ship Engineering, 2024, 46(6): 89-93.
- [4] 李晓琳,支高飞,高盼,等. 船舶蒸汽机冷凝器水位稳定性控制系统设计[J]. 计算机仿真, 2017, 34(8): 162-167.
LI Xiaolin, ZHI Gaofei, GAO Pan, et al. Design of marine steam engine condenser water level stability control system[J]. Computer Simulation, 2017, 34(8): 162-167.
- [5] 江正悦. 核动力二回路凝给水系统控制策略优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
JIANG Zhengyue. Study on control strategy optimization of conden-

- sate feedwater system in nuclear power secondary loop[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [6] 曹子函. 船用二回路乏汽及凝给水系统耦合控制仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
CAO Zihan. Simulation of coupling control of waste steam and condensate feedwater system in marine second loop[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [7] 张永生. 舰船核动力系统二回路控制策略研究[D]. 武汉: 中国舰船研究院, 2012.
ZHANG Yongsheng. Research on modeling and control strategy of nuclear power secondary loop system[D]. Wuhan: China Ship Research and Development Academy, 2012.
- [8] 姜 嶝, 刘向杰. 核电站蒸汽发生器水位模糊预测控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(12): 1705 - 1712.
JIANG Di, LIU Xiangjie. Fuzzy-model predictive control on water level of U-tube steam generator[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(12): 1705 - 1712.
- [9] 薛 阳, 冯建彪, 林 静. 基于模糊控制的核电蒸汽发生器水位的串级自抗扰控制[J]. 核科学与工程, 2016, 36(1): 134 - 140.
XUE Yang, FENG Jianbiao, LIN Jing. Nuclear steam generator water level cascade active disturbance rejection control based on fuzzy control[J]. Nuclear Science and Engineering, 2016, 36(1): 134 - 140.
- [10] 邓 天. 蒸发器水位控制系统的设计与优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
DENG Tian. The design and optimization research on steam generator level control system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [11] 彭昊宇. 压水堆核电站蒸汽发生器动态建模与水位控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
PENG Haoyu. Dynamic modeling and water level control study of pressurized water reactor steam generators[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.
- [12] 陶 静, 李来春, 关 笑, 等. 基于改进单神经元的凝给水系统控制[J]. 热动力工程, 2023, 38(2): 41 - 47.
TAO Jing, LI Laichun, GUAN Xiao, et al. Intelligent control of de-aerator condenser water level based on improved single neuron[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(2): 41 - 47.
- [13] 赵世泉. 大型船舶蒸汽动力装置汽/水回路协调最优控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
ZHAO Shiquan. Coordinated optimal control for the steam/water loop in large scale Ships' steam power plant[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [14] 车嘉祺. 强耦合多泵源给水系统给水控制策略优化研究[D]. 武汉: 中国舰船研究院, 2023.
CHE Jiaqi. Study on stable operation optimization of water supply system composed of strong coupled multi-pump source[D]. Wuhan: China Ship Research and Development Academy, 2023.
- [15] 吕从鑫, 汪 波, 陈静波, 等. 永磁同步电机控制策略综述与展望[J]. 电气传动自动化, 2022, 44(4): 1 - 10.
LYU Congxin, WANG Bo, CHEN Jingbo, et al. Review and prospect of control strategies for permanent magnet synchronous motors[J]. Electric Drive Automation, 2022, 44(4): 1 - 10.
- [16] JANG J S R. ANFIS-adaptive-network-based fuzzy inference system[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1993, 23(3): 665 - 685.
- [17] HE Liping, HUANG Hongzhong, DU Li, et al. A review of possibilistic approach to reliability analysis and optimization in engineering design[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4553(4): 1075 - 1084.
- [18] KARABOGA D, KAYA E. Adaptive network based fuzzy inference system(ANFIS) training approaches: A comprehensive survey[J]. Artificial Intelligence Review, 2019, 52(4): 2263 - 2293.
- [19] 赵 岩, 周秦源, 邵念锋, 等. 基于 RBF 神经网络模糊 PID 控制的电液伺服系统[J]. 机电工程, 2022, 39(2): 244 - 249.
ZHAO Yan, ZHOU Qinyuan, SHAO Nianfeng, et al. Electro-hydraulic servo system based on RBF neural network fuzzy PID control[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(2): 244 - 249.

(刘 颖 编辑)