

# 基于 CMAC 算法的锅炉汽包非稳态水位安全动态矩阵控制

赵晓钧, 傅连莺

(云南省特种设备安全检测研究院, 昆明 650228)

**摘要:** 由于锅炉启停过程中, 汽包内部的蒸汽接触形成的温差增加了锅炉的受压缩应力和拉伸应力, 使得汽包的非稳态水位产生超调或振荡, 导致水位的波动范围较大; 对此, 提出基于密码体制的消息认证码算法的锅炉汽包非稳态水位安全动态矩阵控制方法; 引入 CMAC 预测算法预测动态锅炉汽包水位变化趋势; 通过设计目标水位参考轨迹实现时滞补偿, 以避免水位超调或振荡; 采用动态矩阵, 使优化控制量后的时滞汽包水位与无时滞汽包水位完全相同, 实现水位输出误差的优化控制; 测试结果表明, 设计方法在锅炉处于稳定负荷运行状态, 蒸汽流量和给水流量保持不变的工况下, 能够将汽包水位维持在设定值附近, 且波动范围小, 有效实现了水位稳定。

**关键词:** CMAC 算法; 锅炉汽包; 非稳态水位; 动态矩阵; 时滞补偿; 目标水位参考轨迹

## Dynamic Matrix Control of Boiler Bubble Unstable Water Level Safety Based on CMAC Algorithm

ZHAO Xiaojun, FU Lianying

(Yunnan Special Equipment Safety Testing Research Institute, Kunming 650228, China)

**Abstract:** With a boiler starting up or stopping, the steam inside the bubble contacts to form a temperature difference, which increases compression stress and tensile stress in the boiler, causing the unstable water level of the bubble to overshoot or oscillate, resulting in large fluctuations in water level. A dynamic matrix control method for boiler bubble unstable water level security with Cipher Based Message Authentication Code (CMAC) algorithm is proposed. Introduce CMAC prediction algorithm to predict the trend of dynamic boiler bubble water level changes. The target water level reference trajectory is designed to compensate time delay to avoid water level overshoot or oscillation. Using a dynamic matrix to ensure that the delayed bubble water level after optimizing the control variable is the same as the non delayed bubble water level, achieving the optimal control of water level output error. The test results show that with the boiler in a stable load operation state and unchanged steam flow rate and feedwater flow rate, the designed method can maintain the bubble water level near the set value with a small fluctuation range, effectively achieving stable water level.

**Keywords:** CMAC algorithm; boiler bubble; unstable water level; dynamic matrix; time delay compensation; target water level reference trajectory

## 0 引言

现代锅炉的显著特征在于蒸发量的大幅提升及汽包容积的相对缩减, 这会导致水位变动极为迅速。而水位异常, 无论是偏高还是偏低, 均可能触发重大事故<sup>[1]</sup>。水位过高会干扰汽包内部的汽水分离过程, 致使饱和蒸汽携带的水分增加, 引发汽轮机水冲击、轴封受损等一系列事故<sup>[2]</sup>。相反, 水位过低则会削弱自然循环锅炉汽

水循环系统中的脆弱环节, 导致局部水冷管壁过热损坏, 极端情况下甚至造成爆炸<sup>[3]</sup>。因此, 必须严格控制水位在规定范围之内。然而, 锅炉汽包水位的控制面临着诸多挑战。一方面, 锅炉汽包水位具有大时滞、强耦合、非线性、多扰动等复杂特性, 这增加了水位控制的难度<sup>[4]</sup>。另一方面, 汽包水位的波动受到多种因素的影响, 如锅炉负荷的变化、燃烧工况的变化、给水压力的

收稿日期:2024-12-11; 修回日期:2025-02-08。

作者简介:赵晓钧(1976-),男,大学本科,高级工程师。

引用格式:赵晓钧,傅连莺.基于 CMAC 算法的锅炉汽包非稳态水位安全动态矩阵控制[J].计算机测量与控制,2025,33(5):162-167,175.

变化以及汽包相对水容积的大小等,这些因素使得汽包水位的控制更加复杂和多变<sup>[5]</sup>。针对这些问题,研究人员开始探索更为先进和有效的汽包水位控制方法。

文献[6]探讨了锅炉汽包水位控制存在的响应迟缓与显著滞后问题,并创新性地融合模糊算法与标准PID控制策略,构建了一套三冲量模糊自适应PID控制系统。此系统能依据模糊逻辑动态调整PID参数。该控制系统虽然融合了模糊算法与PID策略,但面临算法复杂度较高,导致水位控制后的波动范围较大。文献[7]设计了一种基于DSP微处理器的锅炉汽包水位控制系统。将模糊控制技术应用于汽包水位控制,介绍了模糊PID算法的工作原理和应用,研制了具有良好控制效果的水位控制器。但模糊PID算法的具体实现可能受到处理器性能的限制,导致在锅炉负荷突然增加的工况下控制效果不佳。文献[8]介绍了一种融合改良遗传算法与PID控制的智能水位调控方案。该方案首先剖析了锅炉汽包水位控制系统的特性,随后运用改良的遗传算法对PID控制器参数实施优化,以适应系统的动态需求。但该方法采用的遗传算法的收敛速度和全局搜索能力受到问题规模、参数设置等因素的影响,导致控制的水位波动范围增大。文献[9]提出了一种创新的汽包水位控制策略,即基于模糊自适应PID的方法。该方法的核心在于引入模糊控制器对PID控制器实施智能优化,并依据模糊规则动态调整模糊控制器的参数,从而显著提升控制器的响应速度与控制精确度。但该方法将模糊控制器与PID控制器的集成结合增加控制的复杂性,导致在锅炉负荷突然增加的工况下控制效果较差。

对此,设计一种基于密码体制的消息认证码(CMAC, cipher-based message authentication code)算法的锅炉汽包非稳态水位安全动态矩阵控制方法。

## 1 锅炉汽包非稳态水位控制方法设计

### 1.1 锅炉汽包非稳态水位变化趋势预测

当汽包水位偏低时,会破坏锅炉内部的蒸汽—水循环平衡,进而引发锅炉大范围爆炸的风险。反之,若汽包水位过高,则锅炉运行效率下降,能源消耗增加,同时蒸汽的有效流通空间缩减,导致凝结水珠过多,加速了传输管道的污垢积累,最终可能损害锅炉结构<sup>[10-11]</sup>。对此,为了实现对锅炉运行状态的实时监控和有效调整,采用基于递归单元的CMAC算法,捕捉锅炉汽包水位非稳态变化的特征,实现锅炉汽包水位变化趋势预测。

在递归网络架构中,递归单元负责存储前一时刻的锅炉汽包水位高度及相应权重<sup>[12]</sup>。因此,网络在每个时间点的输入不仅限于当前实测的锅炉汽包水位高度,

还融合了前一时刻的锅炉汽包水位高度加权数据,实现了网络权值在所有时间点上的共享<sup>[13]</sup>。因此,构建基于递归单元的CMAC预测模型由输入空间、递归单元、联想空间、接受野、递归空间、权值空间以及输出空间构成。其中输入空间内包含五组输入:

$$\varphi = \begin{cases} \alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m] \\ \beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m] \\ \chi = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_m] \\ \delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m] \\ \varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m] \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $\alpha_m$ 是指第 $m$ 组锅炉蒸汽流量数据; $\beta_m$ 是指第 $m$ 组锅炉给水量数据; $\chi_m$ 是指第 $m$ 组锅炉燃料量数据; $\delta_m$ 是指第 $m$ 组锅炉汽包压力数据; $\varepsilon_m$ 是指第 $m$ 组锅炉负荷数据。

联想空间的大小由输入数据组数和量化单元个数共同决定,可以确保模型能够充分捕捉输入的锅炉蒸汽流量数据、锅炉给水量数据、锅炉燃料量数据、锅炉汽包压力数据以及锅炉负荷数据的细微变化<sup>[14]</sup>。将联想空间中每一组输入数据量化为多个离散单元,并将这些单元进一步聚合成块,每个块都代表了输入的锅炉数据的一种特征表示。当输入的锅炉数据发生变化时,根据新的数据分布调整块的划分与数量,以确保模型能够持续保持高精度的汽包非稳态水位预测能力<sup>[15]</sup>。但是由于在真实预测场景中,固定不变的递归权值未能充分考量前一时刻汽包非稳态水位输入对当前预测结果的潜在影响。为解决这一问题,采用模糊小脑模型神经网络的设计理念,为当前汽包非稳态水位输入与前一时刻汽包非稳态水位输入分配可动态调整的权值,通过网络训练过程实施权值优化<sup>[16]</sup>。再采用高斯函数作为可变权值,将汽包非稳态水位的输入构成分为两个组成部分:一是高斯函数动态权值与递归单元输出的乘积,二是该动态权值与当前时刻输入的锅炉数据的乘积。则设定初始权值的高斯函数为:

$$\varphi(\varphi) = \exp\left(-\frac{\varphi^2}{2}\right) \quad (2)$$

随着网络训练的进行,通过调整高斯函数的方差与均值实现权值的灵活变化。分别为递归单元与网络输入设置不同权重,调整后的高斯函数用下式来表示:

$$\varphi_{il} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\varphi_{il} - o_{il}}{u_{il}}\right)^2\right] \varphi(\varphi) \quad (3)$$

式(3)中, $\varphi_{il}$ 是指第 $i$ 个输入的第 $l$ 个聚合权值函数,其对应的高斯函数更改的均值为 $u_{il}$ ,方差为 $o_{il}$ 。在离散的时间 $T$ 上,此块输入可以表示为:

$$\varphi_{il}(T)' = (1 - \varphi_{il})\varphi_{il}(T) + \varphi_{il}\varphi_{il}(T-1) \quad (4)$$

式(4)中, $\varphi_{il}(T-1)$ 是指上一时刻的汽包非稳态水位输入值; $\varphi_{il}(T)$ 是指当前时刻的汽包非稳态水位输

入； $\varphi_{ii}(T)'$  是指更新后的汽包非稳态水位输入。

该递归过程能够使本次输入的块中含有上一时刻的汽包非稳态水位输入值，从而存储网络过去时刻的信息，并依据权值实施现在时刻信息与过去时刻信息的再分配，构成本次网络输入<sup>[17]</sup>。

将不同块组合构成函数接受野，其中联想空间中各汽包水位均对应一个接受野，此时多维输入的接受野函数为：

$$c_l = \sum_{i=1}^{5m} [(1 - \varphi_{ii})\varphi_{ii}(T)' + \varphi_{ii}w_{ii}] \quad (5)$$

式 (5) 中， $w_{ii}$  是指递归单元。

在接受野空间内，可以用下式表示变量：

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_i &= [\bar{\omega}_{i1}, \bar{\omega}_{i2}, \dots, \bar{\omega}_{i(5m)}] \\ w_i &= [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{i(5m)}] \\ o_i &= [o_{i1}, o_{i2}, \dots, o_{i(5m)}] \\ u_i &= [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{i(5m)}] \end{aligned} \quad (6)$$

式 (6) 中， $\varphi_i$  表示水位变化率， $w_i$  表示锅炉负荷， $o_i$  表示给水流量， $u_i$  表示蒸汽流量。

根据上式参数表示接受野函数，为：

$$\gamma(\varphi_i, w_i, o_i, u_i) = [c_1, c_2, \dots, c_l, \dots, c_{5m}] \quad (7)$$

式 (7) 中， $c_l$  表示水位高度。

在权值空间中，将各汽包水位对应的可调权值表示为  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p, \dots, \omega_q]$ ，其中每个  $\omega_j$  均为一个汽包水位预测变化向量，从而组成  $\omega$  矩阵。随着网络训练，实施权值变量预测的在线调整。以权值空间内被激活的权值代数和为网络输出，得到锅炉汽包非稳态水位变化趋势预测结果，具体如下式：

$$\zeta_j = \omega_j \gamma(\varphi_i, w_i, o_i, u_i) = \sum_{l=1}^{5m} \omega_{lj} c_l(\varphi_i, w_i, o_i, u_i) \quad (8)$$

### 1.2 基于锅炉汽包水位变化预测结果的水位时滞补偿

在实际控制过程中，控制系统往往面临模型不匹配及外部扰动等问题，导致汽包水位的预测结果与实际观测结果间存在偏差，并且由于传感器响应延迟、执行机构动作滞后或信号传输延迟的影响，水位控制往往存在一定的时滞问题，不能及时准确地反映实际水位情况，从而影响控制效果<sup>[18-19]</sup>。对此，本文基于水位变化预测结果，实施时滞补偿，通过控制水位变化的过渡时间，减少因时滞引起的波动和不稳定现象，以提高水位控制的实时性和准确性，优化锅炉的运行效率和安全性以及降低能耗和减少设备损耗。

由于期望汽包水位能够以更快的速度接近设定值，并在接近设定值时逐渐减缓变化速率，以避免超调或振荡，因此选择非线性参考轨迹，将非稳态汽包水位的当前值  $y_0$  设定为参考轨迹的起点。将调整后的预测值  $y_{set}$  作为目标水位参考轨迹的终点。选择一个既能满足锅炉

运行要求，又能保证控制系统稳定性和安全性的过渡时间  $t$ 。其中过短的过渡时间会导致非稳态汽包水位超调或振荡，增加控制系统的负担和能耗，以及导致锅炉运行不稳定，甚至引发安全事故<sup>[20-21]</sup>。而过长的过渡时间会影响锅炉的响应速度和效率，降低系统的整体性能，以及导致水位控制精度不足，无法满足锅炉运行的安全和稳定性要求。根据锅炉的额定负荷、运行工况以及安全性能要求确定一个合适的水位变化速率  $r$ 。接着观察不同  $r$  下的水位变化过程，以找到既能满足水位变化要求，又能避免超调和振荡的  $r$ 。假设锅炉时滞汽包水位存在  $u$  个采样周期滞后，则控制时域  $A$  的参数设计公式如下：

$$A' = A + u \quad (9)$$

优化时域  $k$  的参数设计公式如下：

$$k' = k + u \quad (10)$$

误差加权矩阵  $V$  的参数设计公式如下：

$$V' = \begin{pmatrix} 0_{u \times u} & 0 \\ 0 & V \end{pmatrix} \quad (11)$$

汽包非稳态水位控制加权矩阵  $G$  的参数设计公式如下：

$$G' = G \quad (12)$$

根据式 (9) ~ (12)，基于锅炉汽包非稳态水位变化趋势预测结果，设计目标水位参考轨迹，进行水位时滞补偿，为：

$$y(t) = \frac{y_0 + A'(y_{set} - y_0) \cdot k'(1 - e^{-t})}{\zeta_j V' G'} \quad (13)$$

通过将参考轨迹作为汽包水位调整至预测值的接近路径，能够确保汽包水位以较快的速度接近设定值，同时在接近设定值时逐渐减缓变化速率，以避免超调或振荡。

### 1.3 考虑时滞补偿结果的水位输出误差优化控制

为了避免实际控制中，时滞补偿效果受到限制，导致水位控制的输出结果出现误差。本文利用安全动态矩阵的实时调整能力优化水位控制结果，确保控制系统在面对各种复杂工况时，都能迅速作出响应，从而提高水位控制的实时性和准确性，保持汽包非稳态水位的稳定和安全。

为使锅炉汽包水位达到最优，需要对锅炉汽包水位未来变化趋势预测结果实施滚动优化<sup>[22-23]</sup>。将  $g$  时刻的汽包水位预测值优化指标取为下式：

$$\begin{aligned} \min(\zeta_j) &= \sum_{i=1}^k v_i U[\sigma(g+i) - y(t)]^2 + \\ &\sum_{a=1}^A \vartheta_i U \Delta h^2(g+a-1) \end{aligned} \quad (14)$$

式 (14) 中， $v_i$ 、 $\vartheta_i$  是指汽包水位预测值优化加权系数； $\sigma(g+i)$  是指汽包非稳态水位期望值； $k$  是指优化

时域,表示预测锅炉汽包水位输出量的数量; $A$ 是指控制时域,表示控制变量改变的次数; $\Delta h(g+a-1)$ 是指第 $a$ 个控制增量。在该式中,通过 $v_i$ 、 $\vartheta_i$ 分别对跟踪误差与汽包非稳态水位控制量增量实施加权,从而抑制其剧烈变化。

以控制增量为优化变量,求解出汽包非稳态水位的控制量<sup>[24]</sup>,具体如下:

$$\min(\zeta_j) = \|\sigma(g+i) - \zeta_j\|_v^2 + \|\Delta h(g+a-1)\|_G^2 \quad (15)$$

式(15)中, $V$ 是指由 $v_i$ 构成的对角阵,也就是汽包非稳态水位误差加权矩阵; $G$ 是指由 $\vartheta_i$ 构成的对角阵,也就是汽包非稳态水位控制加权矩阵。

根据 $\zeta_j$ 、 $\Delta h$ 与输出量在未来 $H$ 个时刻的初始汽包非稳态水位预测值 $\zeta_0$ 之间的关系,上式可改写为:

$$\min(\zeta_j)' = \|\sigma(g+i) - \zeta_0 - \mathbf{B}\Delta h(g+a-1)\|_v^2 + \|\Delta h(g+a-1)\|_G^2 \quad (16)$$

式(16)中, $B$ 是指 $A \times k$ 阶汽包非稳态水位预测动态矩阵。

在 $g$ 时刻, $\sigma(g+i)$ 、 $\zeta_0$ 均为已知量通过求解 $d\zeta_j/d\Delta h(g+a-1) = 0$ 使 $\zeta_j$ 取其中的极小值,得到 $\Delta h(g+a-1)$ :

$$\Delta h(g+a-1) = (\mathbf{B}^T \mathbf{V} \mathbf{B} + \mathbf{G})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{V} [\sigma(g+i) - \zeta_0] \quad (17)$$

式(17)中, $B^T$ 是指 $B$ 的转置矩阵。式(16)获得的是 $g$ 时刻最优值,根据其可以得到无约束情况下汽包非稳态水位安全动态矩阵的控制律<sup>[25]</sup>。具体如下式:

$$\Delta h(g) = \mathbf{R}^T \Delta h(g+a-1) = \mathbf{S}^T [\sigma(g+i) - \zeta_0] \quad (18)$$

式(18)中, $R^T$ 是指 $A$ 维行向量, $R^T = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$ ;  $S^T$ 是指 $k$ 维行向量,具体如下式:

$$\mathbf{S}^T = \mathbf{R}^T (\mathbf{B}^T \mathbf{V} \mathbf{B} + \mathbf{G})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{V} \Delta [S_1 \ \dots \ S_k] \quad (19)$$

式(19)中, $\Delta[S_1 \ \dots \ S_k]$ 是指 $k$ 维行向量的增量。

在获得 $\Delta h(g)$ 后,可以用下式表示被控对象实际的汽包非稳态水位控制量:

$$h(g) = h(g-1) + \Delta h(g) \quad (20)$$

式(20)中, $h(g-1)$ 是指上一时刻的汽包非稳态水位安全控制量。

当到下一采样时刻后,利用 $g+1$ 取代 $g$ ,通过同样的优化方式获得 $\Delta h(g+1)$ ,进而获得 $h(g+1)$ 。

在 $g$ 时刻,将 $h(g)$ 施加于锅炉汽包水位,求出施加汽包非稳态水位控制量 $h(g)$ 后未来时刻的汽包水位优化输出预测值。

为避免单纯依赖模型开环优化所导致的误差,在计算 $g+1$ 时刻的控制优化量之前,必须首先获取汽包水位的实际输出,并将其与优化输出预测值实施对比,实

现水位输出误差的优化控制,为:

$$\bar{\omega}(g+1) = \lambda(g+1) - h(g+1) \quad (21)$$

式(21)中, $\lambda(g+1)$ 是指汽包水位的实际输出。

## 2 实验结果与分析

对于设计的基于CMAC算法的锅炉汽包非稳态水位安全动态矩阵控制方法,通过实验测试其安全控制性能。在测试中,设计并搭建了一个实验锅炉系统,旨在模拟实际锅炉的汽包非稳态水位控制过程。该系统是一个小型锅炉系统,主要包括锅炉本体、水位测量装置、控制装置和执行机构四部分。选用卧式结构锅炉,以适应实验场地的限制。选定锅炉的容量满足以下条件:能够产生足够的蒸汽以模拟非稳态水位变化。水位测量装置采用高精度水位传感器,水位数据通过无线方式传输至控制系统,以便实施实时处理和实时控制。控制装置采用高性能工业计算机。利用标准通信协议实现控制装置与执行机构(调节阀)之间的通信。其中调节阀用于控制进入汽包的给水量,以维持水位在设定范围内。其中水位测量装置安装在实验锅炉内部。对于搭建的实验锅炉系统,利用设计方法实施其汽包非稳态水位安全控制。

利用设计的基于递归单元的CMAC预测算法实施实验锅炉汽包水位未来变化趋势预测。在实验锅炉系统上安装蒸汽流量传感器、汽包压力传感器、电力负荷测量仪表,采集锅炉蒸汽流量数据、锅炉汽包压力数据以及锅炉负荷数据,记录锅炉的燃料量数据与高精度水位传感器的测量数据,将采集所得数据进行归一化处理,确定CMAC网络的输入层、联想层和输出层。将所得数据一起作为递归单元的输入数据,把预处理后的数据划分为训练集、验证集和测试集,再使用训练集数据对基于递归单元的CMAC预测算法模型进行训练。对训练好的测试集数据模型进行测试,计算预测值与实际值之间的各种评估指标,如均方误差、均方根误差、平均绝对误差等,以评估模型的预测准确性和泛化能力。将以上数据作为实验数据集实施汽包水位未来变化趋势预测。

检查数据集中是否存在缺失值。对于缺失量较小的情况,使用线性插值法实施填补。对于缺失量较大的情况,直接删除该部分数据。利用 $3\sigma$ 原则检测数据集中的异常值,对于检测到的异常值,实施核实和修正。并对数据实施标准化处理,以消除不同量纲对数据分析的影响。将处理后的数据按照一定比例(70%训练集,30%测试集)划分,用于训练和验证基于递归单元的CMAC预测算法。

在该步骤中,训练中的实验参数设置情况具体如表1所示。

表 1 实验参数设置情况

序号	项目	参数设置
1	每一组输入数据的量化单元个数	10
2	训练轮次	1 000
3	学习率	0.01
4	方差和均值的调整步长	0.01
5	误差计算	均方误差

训练过程如下：设定网络泛化参数后，应用训练集训练网络。输入锅炉的五种数据，首先对其实施离散化处理，引导数据进入联想空间，并在递归层记录输入信息于相应位置。因缺乏历史数据，网络初次接收数据时，初始递归层为空。此时，在递归层中直接存储首组数据的离散单元并激活，作为首组数据输出。其次，计算汽包非稳态水位输出与期望值间的误差，据此更新网络权值。当网络接收到新数据时，递归层已包含上一时刻的输入信息。基于可调权重，新数据与上一时刻输入的数据结合，作为当前网络输入数据。同时，通过更新递归层的存储单元的最新数据，再次计算误差，并根据此误差调整网络权值和递归单元权重。需要说明，每次接收新数据时均需根据输出误差动态调整网络权值和递归权值，直至网络达到稳定状态，即完成训练。

测试基于递归单元的 CMAC 预测算法在锅炉实际波动运行工况中的汽包非稳态水位未来变化趋势预测效果，如图 1 所示。

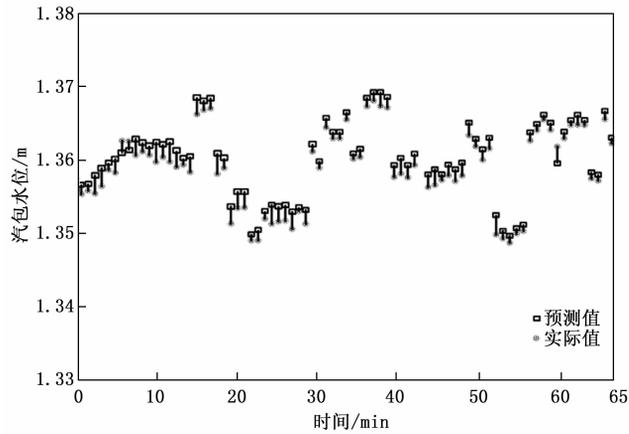


图 1 汽包非稳态水位变化趋势预测效果

基于递归单元的 CMAC 预测算法在锅炉实际波动运行工况中表现出了误差小、稳定的预测效果。原因分析如下：由于引入了递归单元，模型能够存储前一刻的锅炉汽包水位高度及相应权重，从而在当前预测中融合了历史信息，使本次输入包含了上一刻的汽包非稳态水位输入值，提高了输入数据的完整性和连续性，进而提升了预测的精度；采用高斯函数作为可变权值，能够随着网络训练的进行灵活调整，从而更准确地反映前一

时刻汽包非稳态水位输入对当前预测结果的潜在影响。这种动态适应性使得模型能够更好地应对锅炉汽包水位的高度波动，提高预测的稳定性和可靠性；递归 CMAC 模型通过联想空间、接受野和权值空间的组合，实现了对多维输入数据的非线性逼近。这种非线性逼近能力使得模型能够更准确地捕捉锅炉蒸汽流量、给水量、燃料量、汽包压力和负荷等输入数据之间的复杂关系，从而更准确地预测汽包非稳态水位的变化趋势；递归单元和动态权值的结合，使得模型在预测过程中能够保持较好的稳定性。即使输入数据发生较大波动，模型也能够通过调整权值和递归单元的输出，保持预测结果的相对平稳。

利用本文方法进行时滞补偿，得到的水位参考轨迹结果如图 2 所示。

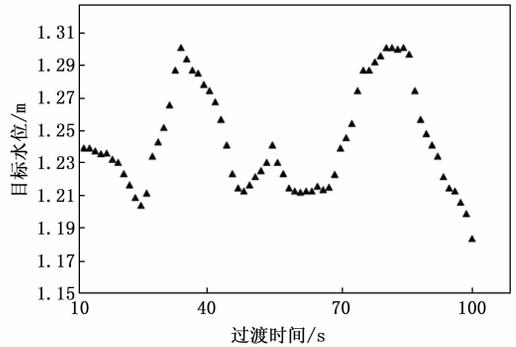


图 2 时滞补偿结果

测试设计方法的安全控制效果。设计 3 种实验工况为。

工况 1：锅炉处于稳定负荷运行状态，蒸汽流量和给水流量保持不变。

工况 2：锅炉负荷突然增加，模拟实际运行中的负荷变化。

工况 3：在锅炉稳定运行期间，人为增加给水流量，模拟给水系统的扰动。

在测试中，将文献 [6] 模糊 PID 在锅炉汽包水位控制系统中的应用方法 (A)、文献 [8] 改进的锅炉汽包水位智能控制算法 (B) 以及文献 [9] 模糊自适应 PID 在汽包水位控制中的应用方法 (C) 作为对比方法。基于训练中的实验参数，设置 3 种改进方法的实验参数。应用方法 (A) 可设置为：比例系数 0.6，积分系数 0.04，微分系数 0.08，隶属度函数采用三角形隶属度函数；智能控制算法 (B) 设置为：输入层神经元数量 5，隐藏层神经元数量 12，输出层神经元数量 (汽包水位预测值) 1。激活函数的隐藏层选用 ReLU 函数，输出层选用线性函数，损失函数的计算方法为均方误差，优化器选用 Adam 优化器，学习率为 0.001；应用方法 C 设置为：比例系数初始值 0.7，积分系数初始值

0.05, 微分系数初始值 0.1, 可根据误差和误差变化率调整系数初始值。隶属度函数采用三角形隶属度函数。

在 3 种工况下, 4 种方法的汽包水位控制效果如图 3 所示。

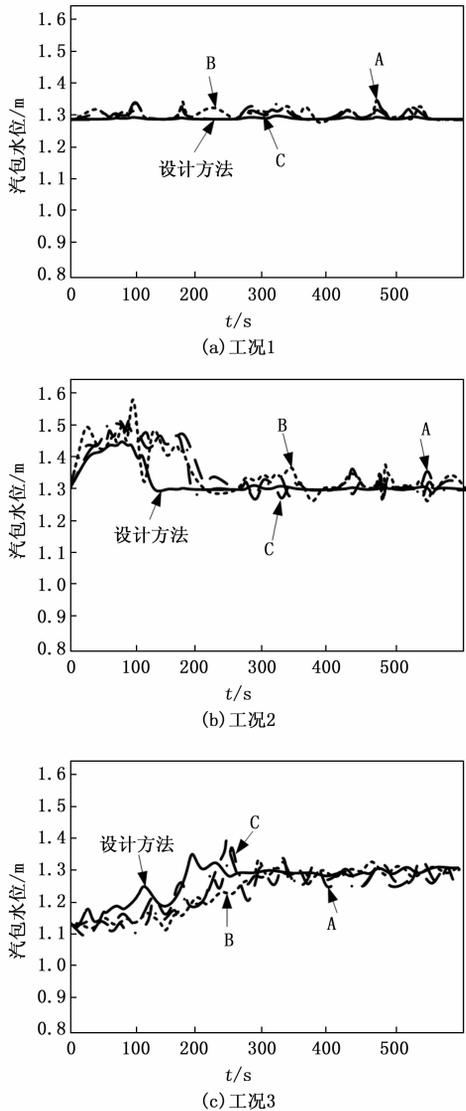


图 3 3 种工况下 4 种方法的汽包水位控制效果

从图 3 (a) 可以看出, 设计方法在稳定负荷下能够将汽包水位维持在设定值附近, 且波动范围小。而 3 种对比方法的波动严重, 说明其控制精度低于设计方法。从图 3 (b) 可以看出, 设计方法在负荷变化时能够迅速调整给水流量, 防止水位出现大幅度波动。而 3 种对比方法的调整响应速度均慢于设计方法, 同时其波动严重, 控制精度也更低。从图 3 (c) 可以看出, 设计方法能够及时识别并响应给水流量的变化, 维持水位稳定。而 3 种对比方法的调整响应速度更慢, 控制精度更低。由此可知, 设计方法在汽包水位控制中, 具有更高的控制精度, 这是因为设计方法采用的 CMAC 预测

算法能够准确预测汽包水位的变化趋势, 并通过设计目标水位参考轨迹, 引导汽包水位在各种工况下快速恢复到预设的轨迹上, 实现更精准的汽包水位控制, 提高系统的响应速度和稳定性。

### 3 结束语

本研究不仅验证了 CMAC 算法在预测锅炉汽包水位未来变化趋势方面的有效性, 实现安全控制方面的卓越性能。并通过结合时滞补偿设计, 成功实现了对时滞汽包水位的补偿, 使优化后的控制量能够紧密跟随无时滞汽包水位的变化, 从而确保了锅炉运行的安全性和稳定性。

### 参考文献:

- [1] 刘伟龙, 余祖珏, 孙鹤铭, 等. 基于动态仿真的 35MW (th) 富氧燃烧锅炉岛控制策略 [J]. 动力工程学报, 2023, 43 (9): 1166 - 1173.
- [2] 董益斌, 熊敬超, 王敬宇, 等. 融合激光雷达料位测算的锅炉燃烧优化模型预测控制 [J]. 化工学报, 2024, 75 (3): 924 - 935.
- [3] 丁志龙, 王 鹏, 王永刚, 等. 改进自适应遗传算法优化的船用增压锅炉上锅筒水位滑模控制方法 [J]. 中国舰船研究, 2023, 19 (2): 181 - 186.
- [4] 刘 佳, 李 扬, 尤建华. 基于 TIA 博途软件的小型直流锅炉给水控制系统的设计 [J]. 热能动力工程, 2023, 38 (10): 176 - 180.
- [5] 汤仔华, 宋国良, 宋维健, 等. 循环流化床锅炉快速变负荷调节技术研究进展 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (6): 2279 - 2291.
- [6] 孟亚男, 周雪阳, 姬庆宽, 等. 模糊 PID 在锅炉汽包水位控制系统中的应用 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12 (12): 117 - 118.
- [7] XIN, FANG Y. Design of Fuzzy PID Controller for Water Level of Boiler Steam Drum Based on DSP [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 130 - 134: 3455 - 3458.
- [8] 燕 尧, 赵吉鹏, 金志刚. 锅炉汽包水位智能控制算法研究与改进 [J]. 工业加热, 2024, 53 (6): 14 - 18.
- [9] 程双龙. 模糊自适应 PID 在汽包水位控制中的应用研究 [J]. 安顺学院学报, 2024, 26 (1): 119 - 124.
- [10] 张 铿, 张武志, 司瑞才, 等. 火电机组 MFT 控制回路分析及可靠性探讨 [J]. 锅炉技术, 2022, 53 (2): 68 - 73.
- [11] 李志东, 陈 达, 刘学迅, 等. 基于 TD-PLS 模型预测前馈的垃圾焚烧锅炉脱酸自动控制策略研究与应用 [J]. 锅炉技术, 2024, 55 (1): 23 - 28.
- [12] 张文祥, 晏海能, 孙志军, 等. 超临界 660 MW 循环流化床锅炉 NO<sub>x</sub> 排放控制困难分析及处理 [J]. 热力发电, 2024, 53 (5): 109 - 114.

(下转第 175 页)