

doi: 10.7690/bgzdh.2024.12.006

压水堆核电机组给水流量控制优化

何朝均

(江苏核电有限公司, 江苏 连云港 222300)

摘要: 针对难以适应压水堆核电机组复杂的工作环境、给水流量控制不稳定、难以实现精确调节的问题, 提出一种基于非线性状态广义预测的压水堆核电机组给水流量控制方法。利用差压式流量计采集给水流量历史数据, 以此为依据, 利用非线性状态广义预测模型, 预测未来时刻给水流量, 根据预测结果与当下时刻采集结果之间的误差为输入, 计算误差补偿量, 通过控制器控制律, 实现压水堆核电机组给水流量控制。结果表明: 该方法能够在不确定的环境中高效地实现控制给水流量, 控制偏差相对更小, 控制性能更好。

关键词: 非线性状态广义预测; 压水堆核电机组; 给水流量控制方法

中图分类号: TM623; TP393 **文献标志码:** A

Optimization of Feedwater Flow Control for Pressurized Water Reactor Nuclear Power Unit

He Chaojun

(Jiangsu Nuclear Power Co., Ltd., Lianyungang 222300, China)

Abstract: In order to solve the problems that it is difficult to adapt to the complex working environment of PRESSURIZED WATER REACTOR nuclear power unit, the feedwater flow control is unstable, and it is difficult to achieve accurate regulation, a feedwater flow control method for PRESSURIZED WATER REACTOR nuclear power unit based on nonlinear state generalized prediction is proposed. The method comprises the following steps of: acquiring historical data of feedwater flow by using a differential pressure type flowmeter; predicting the feedwater flow at a future moment by using a nonlinear state generalized prediction model on the basis of the historical data; calculating an error compensation quantity by taking an error between a prediction result and a current acquisition result as an input; and controlling the feedwater flow of the pressurized water reactor nuclear power unit through a control law of a controller. The results show that the method can control the feedwater flow efficiently in the uncertain environment, and the control error is relatively smaller and the control performance is better.

Keywords: nonlinear state generalized prediction; pressurized water reactor nuclear power unit; feedwater flow control method

0 引言

压水堆核电机组作为现代能源供应的核心, 其稳定运行对保障电力供应和推动“双碳”目标的实现至关重要^[1]。给水流量控制作为确保核电机组高效、安全运行的关键环节, 其精准性直接影响到反应堆热量的有效转移^[2]。一旦给水流量出现问题, 可能会导致反应堆过热、压力下降或其他安全问题, 严重时甚至可能导致核事故。

Leszek 等^[3]提出一种基于 PID 的控制方法, 并采用了高斯-牛顿优化算法对控制器进行比例、积分、微分的整定。该方法难以适应复杂环境, 控制稳定性不足, 难以实现精确的调节。Yang 等^[4]设计自整定 PSO-FUZZY-PID 控制算法, 通过 PSO 优化 FUZZY-PID 控制器的参数, 提高控制器的阻尼性

能。陈远等^[5]提出一种基于模糊 PID 控制器, 模糊逻辑负责对 PID 参数调整, PID 负责计算控制量。王晓婷等^[6]设计滑模面, 并以此为参考, 让系统按照预定“滑动模态”状态轨迹运动, 从而实现控制。

本研究基于非线性状态广义预测的压水堆核电机组给水流量控制方法, 旨在解决传统控制方法的局限性和不足。

1 压水堆核电机组给水流量控制研究

1.1 给水流量历史数据采集

在压水堆核电机组给水流量预测中, 采集压水堆核电机组给水流量的历史数据是必要的第一步^[7]。采集设备为水流量传感器。

给水流量数据采集完成后, 需要进行 2 个检查。

收稿日期: 2024-06-02; 修回日期: 2024-07-20

第一作者: 何朝均(1981—), 男, 四川人。

1) 数据是否遗漏, 是否全面, 若存在遗漏, 就需要进行相应的处理。如果遗漏的数据量较小, 且对数据分析的影响不大, 可以考虑使用插值、外推或其他统计方法来填充遗漏的数据。如果遗漏的数据量较大, 或者遗漏的数据对数据分析有显著影响, 那么需要考虑重新采集数据或者使用其他替代数据源。2) 准确性检查, 需要确认采集的数据是否存在异常或者错误。如果存在异常或错误, 则需要清洗处理。

1.2 压水堆核电机组给水流量预测

在非线性广义预测中, 通常使用非线性状态方程来描述系统的动态行为, 并利用辨识技术来估计系统的参数和状态。通过建立非线性预测模型, 能够更好地描述系统的非线性特性, 可以减小系统状态的预测误差, 提高系统的响应速度和预测精度。非线性状态广义预测模型预测给水流量的具体过程如下: 首先被控制的压水堆核电机组给水流量记为 y_t , 压水堆核电机组给水流量状态的影响因素记为 x_t 。对采集到的历史数据进行一次生成累加, 得到 $x_t(1)$ 和 $y_t(1)$ 。

由此建立压水堆核电机组的非线性状态描述模型, 即:

$$dy_t(1)/dt + \alpha y_t(1) = \beta x_t(1) \quad (1)$$

式中 α 、 β 为模型参数。

将上式离散化, 取采样周期为 Z , 将其转换成差分形式, 即:

$$y_{t+1}(1) = (1 + e^{-\alpha Z})y_t(1) - e^{-\alpha Z}y_{t-1}(1) + \beta(1 - e^{-\alpha Z})x_t(1)/\alpha \quad (2)$$

式中 $y_{t-1}(1)$ 为前一时刻的给水流量累加。

在上式两端同乘差分算子 λ , 得到:

$$y_{t+1} = 1 + e^{-\alpha Z}y_t - e^{-\alpha Z}y_{t-1} + \beta(1 - e^{-\alpha Z})\lambda x_t/\alpha \quad (3)$$

令

$$\left. \begin{aligned} c_{1,1} &= 1 + e^{-\alpha Z} \\ c_{1,2} &= 1 - e^{-\alpha Z} \\ d_{1,1} &= \beta(1 - e^{-\alpha Z})/\alpha \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由此根据式(3)按递推形式可得时刻 t 后 $t+1$ 步的压水堆核电机组给水流量预测输出为:

$$Y_{t+1} = \begin{bmatrix} c_{1,1} \\ c_{1,2} \end{bmatrix} \cdot y_t + d_{1,1} \cdot \lambda x_t \quad (5)$$

式中 n 为最大预测时域长度。

1.3 压水堆核电机组给水流量控制

基于误差补偿的控制策略设计一个控制器, 如图 1 所示。

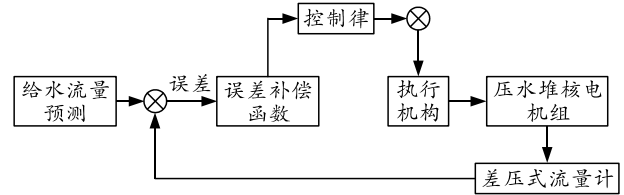


图 1 基于误差补偿的给水流量控制器

给水流量控制具体实现方式包括以下步骤:

1) 差压式流量计实时监测给水流量并与设定流量进行比较, 计算出当前误差值, 即:

$$E(t) = Y(t) - \hat{Y}(t) \quad (6)$$

式中: $E(t)$ 为给水流量误差; $Y(t)$ 为预测出来的 t 时刻给水流量; $\hat{Y}(t)$ 为 t 时刻实际给水流量。

2) 计算给水流量的误差累积量, 即:

$$F(t) = K_d \int E(t) dt \quad (7)$$

式中: $F(t)$ 为给水流量的误差累积量; K_d 为积分系数。

3) 对给水流量的误差累积量 $F(t)$ 进行离散化, 记为 $f(n)$, n 为离散点。

4) 根据 $f(n)$ 构建误差补偿函数 H , 即

$$H = |E(n+1) - f(n)| \quad (8)$$

式中 $E(n+1)$ 为离散化后的给水流量误差。

5) 根据误差补偿 H 构建控制律。即

$$u(t) = K_p \left(1 + \frac{E(t)}{T_i(H-1)} + \frac{J_d(H-1)}{T(H-\psi)} E(t) \right) \quad (9)$$

其中:

$$J_d = T_d \cdot T / (T + T_d / \delta) \quad (10)$$

$$\psi = T_d / (\delta T + T_d) \quad (11)$$

式中: T_d 为微分时间常数; δ 为滤波器时间常数; T 为采样周期; T_i 为积分常数; $u(t)$ 为给水流量控制量。

6) 将式(9)计算处理控制量转换为相应的控制信号, 将控制信号输出到执行机构, 调整压水堆核电机组给水流量。

通过这种控制方式, 压水堆核电机组的给水流量得到了有效的管理和优化, 确保了核电机组的稳定运行。

2 实验测试

本实验旨在测试基于非线性状态广义预测的压水堆核电机组给水流量控制算法的有效性和性能。

通过模拟实际运行工况，验证该算法在各种复杂工况下的控制效果和鲁棒性。

利用差压式流量计采集实验平台运行过程中给水流量数据。采集到给水流量数据如表 1 所示。

表 1 给水流量历史数据示例

时间/s	启动阶段/(t/h)	稳态运行阶段/(t/h)	停堆阶段/(t/h)
1	87.63	74.63	42.63
2	85.24	74.12	42.85
3	88.63	74.52	41.45
4	89.62	74.21	42.63
5	90.14	74.69	41.68
6	91.45	74.12	43.63
7	87.45	74.63	43.02
8	85.59	74.23	42.05
9	89.63	74.22	41.45
10	90.14	74.47	42.98
11	91.63	74.52	42.57
12	90.12	74.65	41.25
13	88.63	74.32	41.05
14	87.89	74.44	40.56
15	87.14	74.66	40.21

为进一步验证所研究方法的控制性能，与文献[3—6]方法进行对比，然后计算控制偏差，公式为：

$$R = \sum_{t=1}^T \Delta E(t) / T \quad (12)$$

式中： R 为控制偏差； $\Delta E(t)$ 为控制后 t 时刻与预期的给水流量偏差； T 为控制时间。

控制偏差对比结果如图 2 所示。

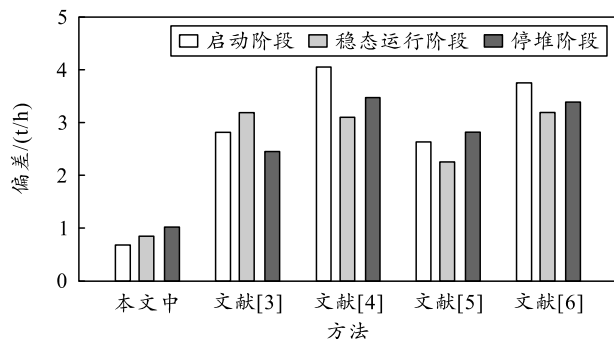


图 2 给水流量控制偏差对比

从上图中可以看出，与文献[3—6]方法相比，本文中方法的控制偏差相对更小。由此说明该方法的控制更为精确，控制性能表现更为优秀。

3 结束语

通过建立基于误差补偿的控制模型，能够在不确定的环境中实现高效的给水流量控制，提高机组的稳定性和安全性，为压水堆核电机组的运行优化提供了新的思路和途径。

参考文献：

- [1] 郭世圆, 马为之, 卢瑞麟, 等. 基于 LSTM 神经网络的复杂工况下明渠流量预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(12): 1924-1934.
- [2] 李双宇, 张明凯, 刘艳臣, 等. 基于 LSTM 模型的排水系统流量预测研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(5): 59-64.
- [3] LESZEK C, KRZYSZTOF W, ADAM S. An Adaptive PID Control System for the Attitude and Altitude Control of a Quadcopter[J]. Acta Mechanica et Automatica, 2023, 18(1): 29-39.
- [4] YANG W R, ZHANG D L, ZHANG Y M, et al. Self-tuning vibration reduction study of magnetic fluid rolling-ball damper based on PSO-FUZZY-PID[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2024, 238(1): 29-47.
- [5] 陈远, 唐炜, 程鲲鹏, 等. 面向调节阀的流量控制仿真研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(22): 184-189.
- [6] 王晓婷, 赵展, 王阳, 等. 基于滑模技术的液态肥流量高精度控制方法[J]. 农机化研究, 2023, 45(4): 8-14.
- [7] 张琴琴, 刘文强, 陈之鸿, 等. 基于 LSTM-SVM 模型的河流流量预测[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2023, 43(6): 45-52.