

核动力堆热功率跟踪系统的 自校正模型算法控制

史小平, 伞冶

(哈尔滨工业大学 仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对核动力堆控制系统这一带不确定参数及干扰的复杂非线性系统,本工作用自校正模型算法控制原理提出了一种动力堆热功率跟踪控制的方法。该方法克服了一般多步模型算法控制律所存在的由于模型估计不准或模型参数大幅度变化引起系统动态特性和控制质量变坏的缺点。通过仿真,将本方法与一般多步模型算法控制相比较,结果证明了该方法可使系统具有更强的鲁棒性和更好的动态品质。

关键词:核反应堆;自校正模型算法控制;系统仿真

中图分类号: TL361

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2002)01-0067-03

Self-tuning Model Algorithmic Control of Thermal Power Tracking System for the Nuclear Reactor

SHI Xiao-ping, SAN Ye

(Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The nuclear reactor is a complex nonlinear system with uncertain parameters and disturbances. Based on the self-tuning model algorithmic control principle, a new thermal power tracking control method for the nuclear reactor is presented. The method can overcome the bad control quality of the normal multi-step model algorithmic control method, while the big variation of the system parameters occurs or the estimated model is inaccurate. After comparing with the normal multi-step model algorithmic control method, the simulation results show that the method presented in the paper makes the nuclear reactor system have stronger robustness and better performances.

Key words: nuclear reactor; self-tuning model algorithmic control; system simulation

核电厂动力堆控制系统的设计应满足热功率自动跟踪负荷变化的要求。但因反应堆动态模型存在着固有的非线性、纯滞后及不确定干扰,用传统的频域方法设计的控制器很难满足

高精度的跟踪要求。模型算法控制不过分依赖于被控对象的准确数学模型,且具有反馈校正、滚动优化和参考输入轨迹等特点,是一种先进的预测控制方法。

收稿日期: 2000-11-22; 修回日期: 2000-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69874007)

作者简介: 史小平(1965—),男,浙江宁波人,研究员,博士,自动控制专业

一般模型算法控制(如多步模型算法控制)主要取决于系统预测模型与真实模型的匹配程度。当核动力堆的参数发生大幅度变化时,原离线测试的脉冲响应数据将不再适合于反映当前的真实模型,即模型严重失配。为此,本工作提出一种自校正模型算法控制律,它能在线重新估计对象参数,用所估计的参数不断更新原模型参数,使系统具有更强的自适应能力和鲁棒性,并通过仿真对该方法进行验证。

1 结构及初始模型参数的确定

动力堆热功率跟踪系统结构^[1]中核反应堆的真实数学模型是带纯滞后、参数不确定的复杂非线性系统,其精确模型很难获得,且不利于控制器的设计。自校正模型算法控制方案是将复杂非线性模型分离成线性差分部分和非线性不确定干扰部分。模型算法控制本身对不确定干扰项具有良好的鲁棒性,而线性差分模型的参数则是时变的,需由自校正算法不断地在线修正。初始参数可由开环脉冲响应试验数据转换得到。试验时,初始模型参数脉冲响应序列 \hat{g} 值的确定见参考文献[1]。动力堆热功率跟踪系统的被控对象模型为:

$$p(k) = -a_1 p(k-1) - a_2 p(k-2) - \dots - a_{n_a} p(k-n_a) + b_0 u(k-d) + b_1 u(k-d-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b-d) + \xi(k) \quad (1)$$

或

$$p(k) = \mathbf{T}^T(k-d) \mathbf{X}(k) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}(k) = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{n_a} \ b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{n_b}]^T$, 线性差分模型参数向量; $\mathbf{T}^T(k-d) = [-p(k-1) \ -p(k-2) \ \dots \ -p(k-n_a) \ u(k-d) \ u(k-d-1) \ \dots \ u(k-n_b-d) \ 1]$, 系统输入输出序列向量; $\xi(k)$, 非线性不确定干扰项。

模型参数向量 $\mathbf{X}(k)$ 的估计初值 $\hat{\mathbf{X}}(0) = [\hat{\alpha}_1 \ \hat{\alpha}_2 \ \dots \ \hat{\alpha}_{n_a} \ \hat{\beta}_0 \ \hat{\beta}_1 \ \dots \ \hat{\beta}_{n_b}]^T$ 可由式(3)确定:

$$\begin{aligned} \hat{g}_1 &= \hat{\beta}_0 \\ \hat{g}_2 &= \hat{\beta}_1 - \hat{\alpha}_1 \hat{g}_1 \\ \hat{g}_3 &= \hat{\beta}_2 - \hat{\alpha}_1 \hat{g}_2 - \hat{\alpha}_2 \hat{g}_1 \\ &\dots \\ \hat{g}_{k+1} &= \hat{\beta}_k - \sum_{i=1}^k \hat{\alpha}_i \hat{g}_{k-i+1} \\ \hat{\beta}_k &= 0 \quad (k > n_b) \\ \hat{\alpha}_i &= 0 \quad (i > n_a) \end{aligned} \quad (3)$$

2 自校正模型算法控制律设计

自校正模型算法控制是利用系统的离散差分模型在线估计参数,将它转换为脉冲响应模型后再设计控制器,具体算法步骤如下。

1) 置下列初值: N (模型时域长度), n_a , n_b , S (输出时域长度), M (控制时域长度), Q (模型算法控制的加权矩阵), Γ (模型算法控制的加权矩阵), λ (自校正算法的遗忘因子), τ (输入滤波器的柔化因子), $\hat{\mathbf{X}}(0)$, $\hat{\mathbf{Y}}(0)$ (最小二乘算法的增益系数)。

2) 读取数据: $p(k)$, p^* (参考负荷输入信号 p_0 的稳态值)。

3) 应用最小二乘递推公式估计式(2)的模型参数:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}(k) &= \hat{\mathbf{X}}(k-1) + \\ K(k) [p(k) - \mathbf{T}^T(k-d) \hat{\mathbf{X}}(k-1)] & \quad (4) \\ K(k) &= \frac{\mathbf{T}^T(k-d) \mathbf{T}(k-d)}{\mathbf{T}^T(k-d) \mathbf{T}(k-d) + \lambda^{-1} \mathbf{K}(k-1)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{Y}}(k) &= \frac{1}{\lambda} \left[\hat{\mathbf{Y}}(k-1) - \right. \\ &\left. \frac{\mathbf{T}^T(k-d) \mathbf{T}(k-d) \hat{\mathbf{Y}}(k-1)}{\mathbf{T}^T(k-d) \mathbf{T}(k-d) + \lambda^{-1} \mathbf{K}(k-1)} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中:遗忘因子 λ 一般取为 0.95 ~ 0.997。

4) 由式(4)计算 \hat{g}_i ($i=1, 2, \dots, N$)。

5) 计算预测模型的输出误差 $e(k) = p(k) - \hat{p}_m(k)$ 。

6) 由式 $p_0(k+i) = \frac{1 - \lambda^{-i}}{1 - \lambda^{-1} z^{-1}} p^*$ = $G_0(z^{-1}) p^*$ 计算参考输入 $p_0(k+1)$ 。

7) 按文献[2]所述方法递推计算 $(G^T Q G + I)^{-1}$, 其中: G 为由脉冲响应数据构成的 $S \times M$ 矩阵; I 为 M 阶单位方阵^[3]。

8) 计算 $(G^T Q G + I)^{-1} G^T Q$ 的第一行 d_1^T 。

9) 回到多步模型算法控制策略,求得控制增量为:

$$u(k) = d_1^T [P_0(k+1) - F_0 U(k-1) - h(k)] \quad (7)$$

其中: $P_0(k+1) = [p_0(k+1) \ p_0(k+2) \ \dots \ p_0(k+S)]^T$ 为参考负荷序列向量; F_0 的定义参见文献[2]; h 为误差修正系数,可人为设定; $U(k-1)$ 为以往时刻控制信号序列向量,即

$$U(k - 1) = [u(k - N + 1)$$

$$u(k - N + 2) \dots u(k - 2) u(k - 1)]^T。$$

10) 返回计算步骤 2)。

3 自校正模型算法控制与一般多步模型算法控制的仿真比较

假设核反应堆被控对象的“真实模型”用微分方程组^[3]描述为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} = \frac{-}{l} + \sum_{i=1}^n i c_i + \\ \frac{d c_i}{dt} = \frac{i}{l} - i c_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

$$= \sum_{i=1}^n i \quad (9)$$

$$= u \quad (10)$$

$$T_{av} = \quad (11)$$

$$p = (UA)_f (T_f - T_{av}) \quad (12)$$

式中各参量的物理意义参见文献[3]，、和 $(UA)_f$ 均为时变系数。

若取 $n = 1$ ，并离散化^[4]上述模型，可得：

$$(k + 1) = \frac{1}{l} [u(k) - c_1] (k) + c_1 (k) + (k) \quad (13)$$

$$c_1(k + 1) = \frac{1}{l} (k) - c_1(k) + c_1(k) \quad (14)$$

$$p(k) = (UA)_f [T_f(k) - (k)] \quad (15)$$

为方便起见，假设燃料温度 T_f 为时间 k 的一次函数 $T_f(k) = 500 + 10k$ 。式(13)、(14)、(15)即为所建的被控对象仿真模型。

在仿真时，选择下列实际系统参数： $\tau = 0.005$ ， $\lambda = 0.35 \text{ s}^{-1}$ ， $l = 10^{-5} \text{ s}$ ；设下列 3 个系数随时间 k 变化的规律分别为 $\lambda = (2/3) \times 10^{-5} \times (1 + 0.3 \arctg k)$ ， $\lambda = 0.75 + 0.5 \sin 4k$ ， $(UA)_f = (1.5 + 0.15 \sin 0.2k) \text{ MW/}$ 。取 $t = 0$ 时的初值 $(0) = 3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $c_1(0) = 2 \times 10^9$ 。采样周期 $T_s = 20 \text{ s}$ ，不可测干扰 $w(k)$ 取区间 $[-1, 1]$ 内的均匀分布随机序列。取 $M = S = 2$ ， $p_0(k) = 3000 - 2500e^{-250k}$ ， $Q = \text{diag}(0.5, 0.5)$ ， $R = \text{diag}(1, 1)$ ， $h_2 = 2.5$ ， $u(0) = 0$ 。分别用自校正多步模型算法控制律式(7)和一般多步模型算法控制律^[2]进行控制(图 1)。

从图 1 可看出：当核反应堆热功率跟踪系

统的参数大范围变化时，因原来估计的被控对象模型严重失配，导致一般多步模型算法控制效果明显变差，热功率跟踪参考负荷的动态品质下降，过渡过程出现严重振荡。上述情况下用自校正模型算法控制的跟踪性能则得到明显改善，系统的鲁棒性大为增强。

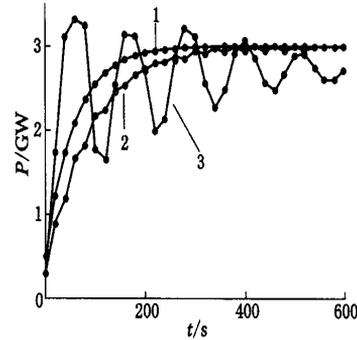


图 1 核反应堆热功率跟踪参考负荷的动态响应过程

Fig. 1 Dynamical response process of the thermal power tracking of the referenced load for the nuclear reactor
1——参考负荷;2——自校正模型算法控制;
3——一般多步模型算法控制

4 结论

本工作将自校正模型算法控制原理应用于动力堆热功率跟踪系统的控制问题中。该方法主要通过实时辨识和修正模型参数，不断适应被控对象模型参数的大范围变化，它是一般多步模型算法控制的一种改进。通过与一般模型算法控制律的仿真比较，证明了自校正模型算法控制律可使闭环系统具有更强的鲁棒性和更好的动态品质，能使核动力堆热功率更好地跟踪参考负荷输入信号。

参考文献：

[1] 史小平,许天舒.核动力堆热功率跟踪系统的多步模型算法控制仿真研究[J].原子能科学技术,2001,35(6):525~530.
[2] 舒迪前.预测控制系统及其应用[M].北京:机械工业出版社,1996.66~70.
[3] 傅龙舟.核反应堆动力学[M].北京:原子能出版社,1988.10~55.
[4] 凯拉斯.线性系统[M].北京:科学出版社,1985.22~103.