

文章编号: 1000-6931(2001)06-0525-06

核动力堆热功率跟踪系统的多步模型算法控制仿真研究

史小平, 许天舒

(哈尔滨工业大学 仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 动力堆控制系统是一带不确定参数及干扰的复杂非线性系统, 采用常规的古典控制很难保证其热功率精确跟踪负荷的变化。本工作利用系统开环脉冲响应序列建立了一非参数模型, 并应用多步模型算法控制原理提出了一种动力堆热功率跟踪数字控制方法。该方法跟踪调节性能好、鲁棒性强、能消除不可测干扰。通过仿真检验和调试证明了该方法的正确性和有效性, 并实现了热功率-负荷的高精度匹配。

关键词: 核反应堆; 多步模型算法控制; 系统仿真

中图分类号: TL36.43 **文献标识码:** A

在核电厂运行过程中, 反应堆控制系统主要有 2 个作用: 1) 在稳态运行时, 确保反应堆及动力设备的中子通量密度、温度、压力、流量、液位等运行参数保持在各自的控制范围内; 2) 当核电厂负荷变化时, 反应堆热功率能跟踪负荷的变化, 改善过渡过程特性。

本工作主要就动力堆热功率跟踪负荷的变化, 提出一种与古典控制方法不同的多步模型算法数字控制律。由于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, 所以, 传统的小范围模型近似线性化及古典频域控制方法不能很好地满足高精度的跟踪要求。本文提出的控制方法, 不过分依赖于准确数学模型, 且具有反馈校正、滚动优化和参考输入轨迹等步骤, 它是一种先预测系统未来输出, 再确定当前控制动作的预测控制方法。本工作通过仿真对该方法进行验证。

1 核动力堆热功率跟踪系统的结构及非参数模型的建立

动力堆热功率跟踪系统结构简图示于图 1。图中的被控对象由反应堆核系统及热系统组

收稿日期: 2000-09-18; 修回日期: 2000-10-31

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, 副研究员, 博士, 自动控制专业

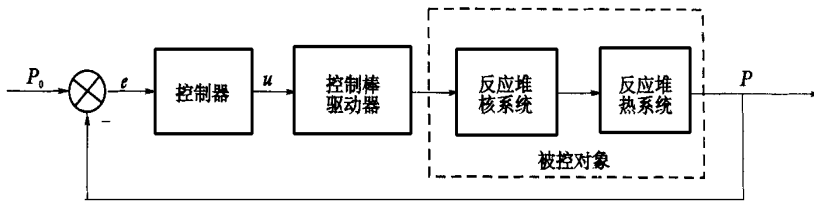


图 1 动力堆热功率-负荷跟踪系统框图

Fig. 1 Thermal power-referenced load tracking system diagram of the nuclear reactor

成,其具体结构非常复杂。图 1 中, u 为控制信号, 由它直接驱动核反应堆控制棒位移, 达到控制核反应程度的目的; P_0 和 P 分别为被跟踪的参考负荷信号和实际输出热功率; e 为偏差信号, 即 $e = P_0 - P$ 。在反应堆运行过程中, 该控制系统的任务是使热功率 P 跟踪参考负荷信号 P_0 。图 1 中核反应堆的真实数学模型是带纯滞后的、参数不确定的复杂非线性系统, 因此, 被控对象的精确模型很难获得, 即使能获得, 也因过于复杂而不利于控制器的设计。针对这种情况建立非参数模型是一行之有效的方法。该方法是先对系统进行开环脉冲响应试验, 然后截取一定量的试验数据。试验时, 可用一窄宽度方波脉冲的 u 信号 (幅值适当的大) 近似作用于被控对象, 得到一输出信号 P 的序列, 即系统近似脉冲响应序列 $\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_N$ (图 2)。图 2 中 t 为时间 (单位: s); τ 为采样周期 (单位: s)。设系统真实开环脉冲响应为

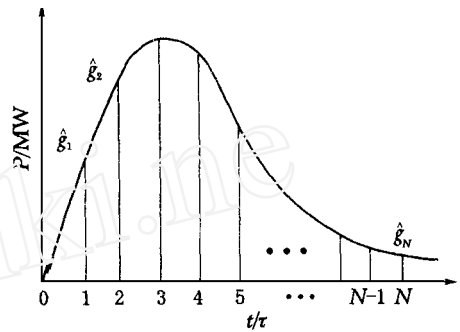


图 2 近似开环脉冲响应曲线示意图

Fig. 2 Approximate openloop impulse response

$$g(z^{-1}) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i z^{-(i-1)} \tag{1}$$

由于系数 g_i 通常满足 $\lim_{i \rightarrow \infty} g_i = 0$, 故可截断处理为

$$g(z^{-1}) = g_1 + g_2 z^{-1} + \dots + g_N z^{-N+1}$$

通常取模型时域长度 $N = 20 \sim 50$ 。则其近似开环脉冲响应为

$$\hat{g}(z^{-1}) = \hat{g}_1 + \hat{g}_2 z^{-1} + \dots + \hat{g}_N z^{-N+1} \tag{2}$$

式(2)即为建立的系统非参数模型。该模型与真实模型相比存在一定的误差, 但其优点是形式简单、易于获得, 且利于多步模型算法控制器的设计。而这种模型误差和干扰造成的误差均可利用多步模型算法控制得以补偿。

由于本工作是离线仿真研究, 故对一假想的“真实非线性模型”^[11] (16) ~ (20) 做脉冲响应试验, 通过四阶龙格库塔法进行数值积分, 测得响应序列数据列于表 1。其中, 取 $N = 20$, 测试时的采样周期 $\tau = 20$ s。

表 1 脉冲响应 \hat{g} 的试验数据
Table 1 Data \hat{g} of impulse response experiment

脉冲响应序列	脉冲响应/ MW	脉冲响应序列	脉冲响应/ MW	脉冲响应序列	脉冲响应/ MW	脉冲响应序列	脉冲响应/ MW
\hat{g}_1	3 010	\hat{g}_6	2 975	\hat{g}_{11}	232	\hat{g}_{16}	128
\hat{g}_2	5 800	\hat{g}_7	2 160	\hat{g}_{12}	192	\hat{g}_{17}	118
\hat{g}_3	6 504	\hat{g}_8	1 401	\hat{g}_{13}	160	\hat{g}_{18}	108
\hat{g}_4	6 010	\hat{g}_9	862	\hat{g}_{14}	147	\hat{g}_{19}	99
\hat{g}_5	4 100	\hat{g}_{10}	460	\hat{g}_{15}	133	\hat{g}_{20}	91

2 热功率跟踪系统的多步模型算法控制律设计

设用离散脉冲响应序列描述的热功率跟踪系统真实开环模型为

$$P(k+1) = g(z^{-1})u(k) + (k+1) \tag{3}$$

其中: $(k+1)$ 为第 $k+1$ 步的不可测干扰。

式(3)从 $1 \sim S$ 步的预测开环模型为

$$P_m(k+1) = \hat{g}(z^{-1})u(k) \tag{4}$$

$$P_m(k+2) = \hat{g}(z^{-1})u(k+1) \tag{5}$$

⋮

$$P_m(k+i) = \hat{g}(z^{-1})u(k+i-1) \tag{6}$$

⋮

$$P_m(k+M-1) = \hat{g}(z^{-1})u(k+M-2) \tag{7}$$

$$P_m(k+M) = \hat{g}(z^{-1})u(k+M-1) \tag{8}$$

$$P_m(k+M+1) = \hat{g}(z^{-1})u(k+M-1) \tag{9}$$

⋮

$$P_m(k+S) = \hat{g}(z^{-1})u(k+M-1) \tag{10}$$

式中: S 为多步输出预测时域长度; M 为控制时域长度, 且 3 个自然数 M, S, N 满足 $M \leq S \leq N$ 。

将式(4) ~ (10) 写成矢量形式, 有

$$P_m(k+1) = GU(k) + F_0U(k-1) \tag{11}$$

其中: $P_m(k+1) = [P_m(k+1) P_m(k+2) \dots P_m(k+S)]^T$ 为预测模型输出矢量; $U(k) = [u(k) u(k+1) \dots u(k+M-1)]^T$ 为待求控制矢量; $U(k-1) = [u(k-N+1) u(k-N+2) \dots u(k-1)]^T$ 为已知控制矢量。

此外, 矩阵 G 和 F_0 分别为

$$G = \begin{bmatrix} \hat{g}_1 & 0 & \dots & 0 \\ \hat{g}_2 & \hat{g}_1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \hat{g}_M & \hat{g}_{M-1} & \dots & \hat{g}_1 \\ \hat{g}_{M+1} & \hat{g}_M & \dots & \hat{g}_1 + \hat{g}_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hat{g}_S & \hat{g}_{S+1} & \dots & \hat{g}_i \end{bmatrix}$$

$$F_0 = \begin{bmatrix} \hat{g}_N & \hat{g}_{N-1} & \hat{g}_{N-2} & \dots & \dots & \hat{g}_3 & \hat{g}_2 \\ 0 & \hat{g}_N & \hat{g}_{N-1} & \dots & \dots & \hat{g}_4 & \hat{g}_3 \\ \vdots & \ddots & \ddots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \hat{g}_N & \dots & \hat{g}_{S+2} & \hat{g}_{S+1} \end{bmatrix}$$

由于模型有误差,为提高预测精度,采用预测模型输出误差对预测模型输出进行修正。即多步输出预测为

$$P_c(k+1) = P_m(k+1) + h[P(k) - P_m(k)]$$

$$= GU(k) + F_0U(k-1) + h(k) \quad (12)$$

式中: $P_c(k+1) = [P_c(k+1) \ P_c(k+2) \ \dots \ P_c(k+S)]^T$ 为系统输出预测矢量; $(k) = P(k) - P_m(k)$, (k) 为 k 时刻预测模型的输出误差;修正系数矢量 $h = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_S]^T$, 通常, 令 $h_1 = 1$ 。

为求得最优控制律,设给定性能指标为

$$J_c = \sum_{i=1}^s q_i [P_c(k+i) - P_0(k+i)]^2 + \sum_{j=1}^M u^2(k+j-1)$$

$$= [P_c(k+1) - P_0(k+1)]^T Q [P_c(k+1) - P_0(k+1)] + U^T(k) U(k) \quad (13)$$

其中: $P_0(k+1) = [P_0(k+1) \ P_0(k+2) \ \dots \ P_0(k+S)]^T$ 为参考负荷输入矢量;加权矩阵 $Q = \text{diag}(q_1 \ q_2 \ \dots \ q_s)$; $U = \text{diag}(1 \ 2 \ \dots \ M)$ 。

令 $\frac{\partial J_c}{\partial U(k)} = 0$, 可得多步模型算法控制律为

$$U(k) = (G^T Q G + \dots)^{-1} G^T Q [P_0(k+1) - F_0 U(k-1) - h(k)] \quad (14)$$

式中:控制矩阵 $(G^T Q G + \dots)^{-1}$ 为一 $M \times M$ 维矩阵,可一次同时算出从 k 到 $k+M-1$ 时刻的 M 个控制量,对当前和以后 M 个时刻进行 M 步的开环顺序控制。在实际执行时,由于模型误差、系统的非线性特性和干扰等不确定因素的影响,按式(14)求得的控制律去进行当前和未来 M 步的开环顺序控制,可能会较大幅度地偏离期望轨迹。为及时纠正这一误差,可采用闭环控制算法,即按式(14)求得控制量后,实际只执行当前一步的 $u(k)$,下一时刻的控制量 $u(k+1)$ 再按式(14)递推一步重算。因此,最终的模型算法控制律可写为

$$u(k) = [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{M-1} (G^T Q G + \dots)^{-1} G^T Q [P_0(k+1) - F_0 U(k-1) - h(k)] \quad (15)$$

以上优化算法是不同于通常最优控制的滚动优化算法^[2]。

3 控制系统的计算机仿真

假设核反应堆被控对象的“真实模型”用微分方程组^[1]描述为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} = \frac{-\lambda}{l} + \sum_{i=1}^n \beta_i c_i + \\ \frac{dc_i}{dt} = \frac{\lambda}{l} - \lambda_i c_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (16)$$

$$= \sum_{i=1}^n \beta_i \quad (17)$$

$$= u \quad (18)$$

$$T_{av} = \quad (19)$$

$$P = (UA)_f (T_f - T_{av}) \quad (20)$$

式中: λ 为中子通量密度; c_i 为第 i 组(共 n 组)缓发中子先驱核数; β_i 为控制棒移动产生的反应性变化量; l 为中子一代时间(s); t 为时间变量(s); λ_i 与 β_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 分别为相应各组的缓发中子份额及衰变常数(s^{-1}); λ 为不可测外中子源干扰; T_f 为燃料温度($^{\circ}C$); T_{av} 为冷却剂平均温度($^{\circ}C$); $(UA)_f$ 为燃料的等效传热系数乘燃料表面积($W/^{\circ}C$); P 为反应堆热功率(MW)。

式(18)、(19)均为近似关系, λ 和 $(UA)_f$ 均为常量。若取 $n = 1$, 并离散化^[3]上述模型, 可得

$$\lambda(t_{k+1}) = \frac{1}{l} [u(k) - \lambda_1] \lambda(t_k) + \beta_1 c_1(k) + \lambda(t_k) + \lambda(t_k) \quad (21)$$

$$c_1(t_{k+1}) = \frac{1}{l} [\lambda(t_k) - \lambda_1] c_1(k) + c_1(k) \quad (22)$$

$$P(k) = (UA)_f [T_f(k) - T_{av}(k)] \quad (23)$$

为了方便, 假设燃料温度 T_f 为时间 k 的一次函数 $T_f(k) = 500 + 10k$ 。式(21)、(22)、(23)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: $\beta_1 = 0.005$, $\lambda_1 = 0.35 s^{-1}$, $l = 10^{-5} s$, $\lambda = (2/3) \times 10^{-5}$, $\lambda_1 = 0.25$, $(UA)_f = 1.5 MW/^{\circ}C$ 。取 $t = 0$ 时的初值为 $\lambda(0) = 3 \times 10^7 cm^{-2} s^{-1}$, $c_1(0) = 2 \times 10^9$ 。用非参数模型所设计的多步模型算法控制律(15)进行控制, 采样周期 $T_s = 20 s$, 不可测干扰

取区间 $[-1, 1]$ 内的均匀分布随机序列。取 $M = S = 2$, 参考负荷输入为 $P_0(k) = 3000 - 2500e^{-250k}$, 加权阵取为 $Q = \text{diag}(0.5, 0.5)$, $R = \text{diag}(1, 1)$; 误差修正系数取为 $h_2 = 2.5$; 初始控制设为 $u(0) = 0$ 。

仿真结果示于图3。从结果可知: 核反应堆热功率跟踪参考负荷的精度和动态响应品质均令人满意。

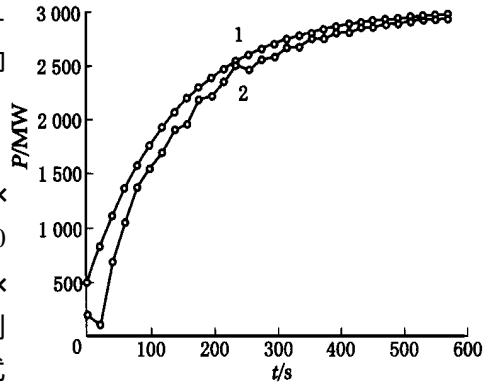


图3 核反应堆热功率跟踪参考负荷的动态响应过程

Fig. 3 Dynamical response process of the thermal power tracking the referenced load of the nuclear reactor
1——参考负荷; 2——反应堆热功率

4 结论

本工作提出了一种核动力堆热功率跟踪参考负荷变化的多步模型算法数字控制方法。该方法不过分依赖于被控对象的准确数学模型,又具有反馈校正、滚动优化和轨迹参考输入等特点,因此,是一种预测控制方法。在控制精度、动态性能和鲁棒性等方面优于经典反馈控制。通过仿真检验,证明了本工作所提出的控制方法的正确性和有效性,为核电厂的计算机控制指出了一个方向。

参考文献:

- [1] 傅龙舟. 核反应堆动力学[M]. 北京:原子能出版社,1988. 10~55.
- [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] 凯拉斯. 线性系统[M]. 北京:科学出版社,1985. 22~103.

Simulation Study of Multi-step Model Algorithmic Control of the Nuclear Reactor Thermal Power Tracking System

SHI Xiao-ping, XU Tian-shu

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

Abstract: The classical control method is usually hard to ensure the thermal power tracking accuracy, because the nuclear reactor system is a complex nonlinear system with uncertain parameters and disturbances. In the paper, a sort of non-parameter model is constructed with the open-loop impulse response of the system. Furthermore, a sort of thermal power tracking digital control law is presented using the multi-step model algorithmic control principle. The control method presented in the paper has good tracking performance and robustness. It can work despite the existence of unmeasurable disturbances. The simulation experiment testifies the correctness and effectiveness of the method. The high accuracy matching between the thermal power and the referenced load is achieved.

Key words: nuclear reactor; multi-step model algorithmic control; system simulation