

文章编号: 1000-6931(2001)05-0401-05

核反应堆中子通量密度的一种非线性控制方法

史小平

(哈尔滨工业大学 仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对核反应堆点堆动态非线性模型, 提出了一种非线性状态反馈的中子通量密度恒值控制的新方法。与传统的古典控制方法相比, 此方法不必对模型进行近似线性化处理, 因而, 控制精度较高, 适用的时域范围较广, 控制律也不太复杂。仿真结果验证了这种非线性控制律的有效性和优越性。

关键词: 核反应堆; 中子通量密度; 非线性控制

中图分类号: TL36.43 **文献标识码:** A

反应堆的点堆动态模型存在着固有的非线性, 传统方法是先在小范围内对模型进行近似线性化处理, 再用古典频域方法设计控制律。该方法的控制精度较差。本工作研究一种与传统古典控制方法不同、直接利用原始模型、在时域范围和控制精度上优于古典控制方法的堆中子通量密度的非线性控制方法, 并通过计算机仿真, 对两种方法进行比较, 以验证新方法。

1 反应堆数学模型及其控制系统基本结构

核反应堆动态方程^[1]可描述为:

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

$$= \sum_{i=1}^n {}_i \quad (2)$$

式中: ϕ 为中子通量密度; c_i 为第 i 组 (共有 n 组) 缓发中子先驱核数; ρ 为控制棒移动产生的反应性变化量, 是系统的控制信号; N 为外中子源每秒产生的中子数; l 为中子一代时间 (s); t 为时间 (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量 (s^{-1})。

收稿日期: 2000-07-17; 修回日期: 2000-09-11

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

控制的目的是将 控制在一个定值 * 上。这是一 的恒值控制问题。反应堆控制系统原理框图示于图 1。本工作主要研究设计该图中的控制律部分。

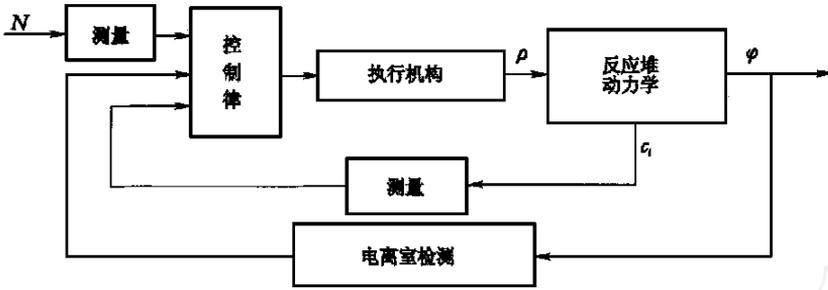


图 1 核反应堆控制系统结构图

Fig. 1 Structure of nuclear reactor control system

2 恒值问题的非线性控制律设计

假设将 控制到恒值 * 的同时,也将 ci 控制到相应的恒值 ci *, 令

$$\begin{aligned} x_1 &= - * \\ x_{i+1} &= c_i - c_i^* \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \tag{3}$$

结合式(1)和(3),则可得到如下非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = - \frac{1}{l} (x_1 + *) + \frac{1}{l} (x_1 + *) + \sum_{i=1}^n \lambda_i (x_{i+1} + c_i^*) + N \\ \dot{x}_{i+1} = \frac{\lambda_i}{l} (x_1 + *) - \lambda_i (x_{i+1} + c_i^*) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \tag{4}$$

当系统稳定,即 *, ci ci* (i = 1, 2, ..., n) 时,根据式(1),有:

$$\frac{\lambda_i}{l} * - \lambda_i c_i^* = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{5}$$

将上述 n 个等式相加,得:

$$\frac{*}{l} \sum_{i=1}^n \lambda_i - \sum_{i=1}^n \lambda_i c_i^* = 0 \tag{6}$$

将式(2)代入式(6),得:

$$- \frac{*}{l} + \sum_{i=1}^n \lambda_i c_i^* = 0 \tag{7}$$

结合式(5)和(7),式(4)可简化为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = - \frac{1}{l} x_1 + \sum_{i=1}^n \lambda_i x_{i+1} + N + \frac{1}{l} (x_1 + *) \\ \dot{x}_{i+1} = \frac{\lambda_i}{l} x_1 - \lambda_i x_{i+1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \tag{8}$$

如果将控制信号 设计为如下形式:

$$= \frac{1}{x_1 + *} (- N + \sum_{i=1}^{n+1} a_i x_i) \tag{9}$$

式中: $a_i (i = 1, 2, \dots, n + 1)$ 为待定系数, 则可得闭环线性系统为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = (a_1 - \frac{1}{l})x_1 + \sum_{i=1}^n (a_{i+1} + a_i)x_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} = \frac{1}{l}x_1 - a_i x_{i+1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (10)$$

或写成 $n + 1$ 阶线性系统的状态空间形式^[2]:

$$\dot{x} = Ax \quad (11)$$

其中: 状态向量 x 和状态矩阵 A 分别为:

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_{n+1}]^T \quad (12a)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 - \frac{1}{l} & 1 + a_2 & 2 + a_3 & \dots & n + a_{n+1} \\ \frac{1}{l} & -1 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{2}{l} & 0 & -2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{n}{l} & 0 & 0 & \dots & -n \end{bmatrix} \quad (12b)$$

通过对式(11)配置极点, 可求得 $n + 1$ 个待定系数 a_1, a_2, \dots, a_{n+1} , 这样, 非线性控制律式(9)得以完全确定^[3]。该控制律最终可写为:

$$= \frac{1}{l} [a_1(\dots) - N + \sum_{i=1}^n a_{i+1}(c_i - c_i^*)] \quad (13)$$

控制结果使 $x_i = 0 (i = 1, 2, \dots, n + 1)$ 成立, 即实现了 $\dots, c_i = c_i^* (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

3 仿真实例

以 $n = 1$ 的情形为例进行仿真检验。

由式(1)得核反应堆数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} = \frac{-1}{l} + a_1 c_1 + N \\ \frac{dc_1}{dt} = \frac{1}{l} - a_1 c_1 \end{cases} \quad (14)$$

由式(13)得非线性控制律为:

$$= \frac{1}{l} [a_1(\dots) - N + a_2(c_1 - c_1^*)] \quad (15)$$

此时, 式(12b)简化为:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 - \frac{1}{l} & 1 + a_2 \\ \frac{1}{l} & -1 \end{bmatrix}$$

它的特征方程为:

$$s^2 + (\lambda_1 - a_1 + \frac{1}{l})s - \lambda_1 a_1 - \frac{1}{l} a_2 = 0 \tag{16}$$

对上式配置两个极点 $s_1 = -5, s_2 = -6$, 则根据式(16)得:

$$a_1 = \lambda_1 + \frac{1}{l} - 11 \tag{17}$$

$$a_2 = [l - 30l - \lambda_1(\lambda_1 l + \lambda_1 - 11l)] / \lambda_1$$

将式(15)、(17)代入式(14), 得到闭环系统。根据一座²³⁵U反应堆的现场资料^[4], 仿真时, 特取如下参数: $\lambda_1 = 0.005, \lambda_2 = 0.35 \text{ s}^{-1}, l = 10^{-5} \text{ s}, N = 0$ (即不考虑外中子源), $\beta = 5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}, c_1^* = 7 \times 10^{11}$ 。取 $t = 0$ 时的初值 $\phi_0 = 3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}, c_{10} = 2 \times 10^9$ 。

如果将模型(14)近似线性化为:

$$\begin{cases} \frac{d\phi}{dt} = \frac{\beta}{l} \phi - \frac{1}{l} \phi + \lambda_1 c_1 \\ \frac{dc_1}{dt} = \frac{1}{l} \phi - \lambda_1 c_1 \end{cases} \tag{18}$$

则可得输入为 ϕ^* 、输出为 x_1 的开环传递函数 $G_0(s)$ 为:

$$G_0(s) = \frac{x_1(s)}{\phi^*(s)} = \frac{1}{s^2 + (\lambda_1/l + \lambda_1)s}$$

中子通量密度恒值问题古典控制方块图示于图 2。

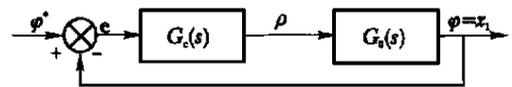


图 2 中子通量密度恒值问题古典控制方块图

Fig. 2 The classical control diagram for neutron flux density stable problem

在图 2 中, $G_c(s)$ 为控制器的传递函数, 是设计的目标。在此, 不妨定 $G_c(s)$ 为:

$$G_c(s) = \frac{m}{s^2 + (\lambda_1/l + \lambda_1)s} \tag{19}$$

式中: m 为待定参数。

闭环传递函数为:

$$G(s) = \frac{m}{s^2 + (\lambda_1/l + \lambda_1)s + m}$$

若令

$$m = (0.5 \lambda_1/l + 0.5 \lambda_1)^2$$

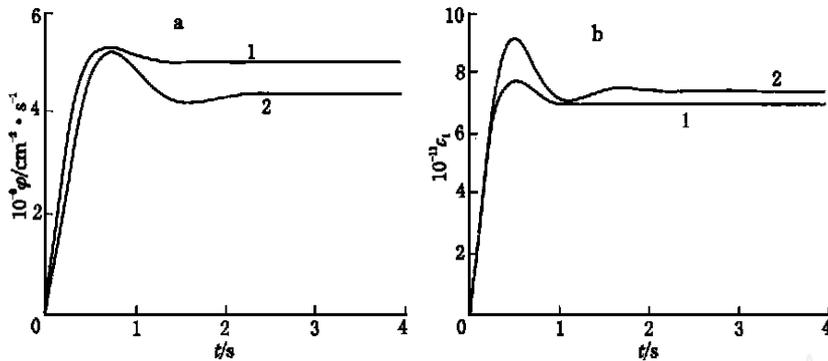
则闭环系统变成了无静差的临界阻尼二阶系统^[5]。

将控制器式(19)回到时域, 并代入系统式(14) ($N = 0$) 后, 在相同的初始条件下进行仿真。仿真结果示于图 3。

从仿真结果可看出: 古典控制方法虽使系统达到了无静差的临界阻尼状态, 但因从式(14)变为式(18)是一种近似处理, 使得控制的动态响应和静态精度均受影响; 相反, 在非线控制律式(15)作用下, 无论动态还是静态, 系统的状态响应都是相当好的。

4 结论

在反应堆的运行过程中, 控制系统起着重要作用。在稳态运行时, ϕ 的恒值控制尤为重要, 只有使 β 保持恒定, 才能使反应堆的输出功率保持恒定。现有的反应堆控制系统大都采

图3 非线性控制律和古典控制律作用下 (a)及 c_1 (b)的时域响应Fig. 3 Time domain responses of (a) and c_1 (b) under nonlinear and classical control law

1 ——非线性控制律; 2 ——古典控制律

用古典控制方式,控制效果不甚理想。从仿真实例可见:应用本工作提出的非线性控制方法,控制效果相当好。非线性控制律可通过计算机控制方式在现场得以实现。

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] 凯拉斯. 线性系统[M]. 北京:科学出版社,1985. 22~103.
- [3] Isidori A. Nonlinear Control Systems:An Introduction[M]. Berlin: Springer-verlag, 1989. 145~183.
- [4] 李友善. 自动控制原理(上册)[M]. 北京:国防工业出版社,1980. 31~233.
- [5] 傅龙舟. 核反应堆控制[M]. 北京:原子能出版社,1995. 17~19.

Nonlinear Control of Neutron Flux Density of the Nuclear Reactor

SHI Xiao-ping

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

Abstract: According to the nonlinear dynamic model of a nuclear reactor, a new constant neutron flux density control method based on nonlinear state feedback is presented. This new method has high accuracy and fits in wide time domain in contrast to the classical control methods because of no approximation of the reactor model. The nonlinear control law is not too complicated. The simulation results verify the effectiveness and the advantage of the presented control law.

Key words: nuclear reactor; neutron flux density; nonlinear control