

核电厂堆功率复合控制器的研究

朱昊¹, 韦钢¹, 翟春荣², 陈秋南¹

1. 上海电力学院上海市电站自动化技术重点实验室, 上海, 200090; 2. 国核工程有限公司, 上海, 200233

摘要: 反应堆功率调节系统是核电厂反应堆控制的核心。本研究以反应堆为对象, 采用状态反馈加比例-积分-微分 (PID) 的复合控制结构对核电厂堆功率进行控制。状态反馈阵的存在能够明显改善堆功率系统的动态特性, 并对系统的控制量进行有效地抑制; PID 控制器对系统起到微调的作用。仿真结果表明, 该方法的正确性和有效性。

关键词: 反应堆堆功率; 复合控制; 状态反馈; PID 控制; 干扰

中图分类号: TL362+.5 **文献标志码:** A

0 前言

反应堆功率调节系统是核电厂反应堆控制的核心, 对核电厂具有重要意义。反应堆功率控制系统的主要作用是在核电厂运行过程中确保反应堆在设定中子注量率值上运行^[1-3], 实现反应堆功率自动跟随负荷变化。利用近似线性化所得到的传递函数模型来设计比例-积分-微分 (PID) 控制器, 是目前大多数核电厂所采用的中子注量率恒值问题的控制方法。但是由于模型的精度较差, 因而控制的效果也不太理想。另一方面, 由于很难得到中子动力学系统的精确模型, 因而也很难采用精确的非线性反馈控制。本研究采用状态反馈加PID的复合控制结构对核电厂堆功率进行控制。状态反馈阵的存在能够明显改善系统的动态特性, 对系统的控制量进行了有效的抑制; PID 控制器对系统起到微调的作用, 从而保证了反应堆中子注量率为恒值。该控制方法有效地抑制了堆功率系统的控制量, 跟踪调节性能好, 对实际工程应用具有参考价值。

1 堆功率调节系统的传递函数

堆功率调节系统主要包括功率控制执行机构和系统测量装置。功率控制执行机构主要由输出接口、步进电机、减速结构和控制棒等组成, 起到直接控制反应堆功率的作用。系统测量装置主要包括反应堆输出功率测量装置、步进电机转速

测量装置, 可以实时地检测反应堆的工作状态, 并通过回路反馈到控制器。堆功率调节系统框图见图 1。

反应堆模型的传递函数为:

$$W_1(s) = \frac{\Delta n(s)}{\Delta \delta_k(s)} = \frac{9.55 \times 10^{10} (13s + 1)}{s(0.149s + 1)} \quad (1)$$

式中, $W_1(s)$ 为反应堆点堆模型的传递函数; $\Delta n(s)$ 为中子密度的变化量; $\Delta \delta_k(s)$ 为控制棒的棒位信号变化量; s 为复频域变量。

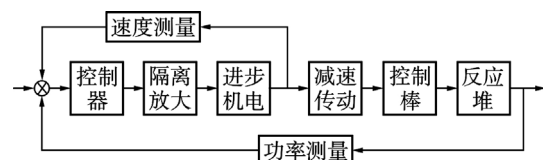


图 1 堆功率调节系统框图

Fig. 1 Block Diagram of Reactor Power Control System

电离室的传递函数为:

$$W_2 = \frac{\Delta I_k}{\Delta n} = \frac{800 \times 10^{-6}}{0.8 \times 10^{-10}} = 1 \times 10^{-13} \text{ A} / (\text{cm}^3 \cdot \text{s})^{-1} \quad (2)$$

式中, W_2 为电离室的传递函数; ΔI_k 为电离室输出电流信号变化量; Δn 为反应堆中子密度变化量。

步进电机的传递函数为:

$$W_3(s) = \frac{K_1}{s(T_1s + 1)} = \frac{1.17}{s(0.085s + 1)} \quad (3)$$

式中, $W_3(s)$ 为步进电机的传递函数, 输入为放大控制信号, 输出为速度信号; K_1 为步进电机的传

递系数，取 $K_1 = 1.17 \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{V})$ ； T_1 为电机的时间常数，取 $T_1 = 0.085 \text{ s}$ 。

电机放大器的传递函数为：

$$W_4(s) = \frac{K_2}{T_2s + 1} = \frac{10}{0.112s + 1} \quad (4)$$

式中， $W_4(s)$ 为步进电机放大器的传递函数，输入为速度信号，输出为速度放大信号； K_2 为步进电机放大器的传递系数，取 $K_2 = 10$ ； T_2 为步进电机放大器的时间常数，取 $T_2 = 0.112 \text{ s}$ 。其中，以上堆功率调节系统各传递函数的数值取为典型值。

2 控制系统的状态空间表述

状态空间法采用矩阵运算形式的时域分析方法，不仅可以处理多变量系统，而且可以处理非线性性和时变系统^[4]。

状态空间表达式如下：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] \\ y(t) = g[x(t), u(t), t] \end{cases} \quad (5)$$

式中， $\dot{x}(t)$ 为系统的状态方程； $x(t)$ 为系统的状态； $u(t)$ 为系统的输入； t 为时间； $y(t)$ 为系统的输出方程。状态反馈通过将系统的状态变量乘以相应的反馈系数，反馈到输入端与参考输入叠加形成控制变量，实现闭环系统的极点的任意配置。

由于系统的状态变量包括系统内部特性的全部信息，因此状态反馈比传统的输出反馈能更有效地改善系统的性能，采用状态反馈不但可以实现闭环系统极点的任意配置，而且也是实现解耦和构成线性最优调节器的主要手段^[5]。

如果给出了对象的状态方程模型，则希望引入某种控制器，使得闭环系统的极点可以移到指定的位置，指定系统闭环极点的位置，使得其动态性能得到改进。整个分析过程中，最主要的是获得期望极点和反馈矩阵 (F) 的获取。期望极点的获得可以通过主导极点 $s_1, s_2 = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1-\xi^2}$ ，其余的辅极点的选取空间比较大； F 的获得可以通过将系统转化为可控标准型，由可控标准型表示的单输入系统算法，得到 F ，从而设计出期望的状态空间控制器^[6]。

3 复合控制器的设计

3.1 控制对象的基本构架

根据核电厂堆功率控制的数学模型，建立广义被控对象数学模型，其开环传递函数为：

$$G_0(s) = (0.008478s + 0.0006522) \div (0.00141848s^5 + 0.038873s^4 + 523.336s^3 + 3511s^2) \quad (6)$$

基于 Matlab 控制工具箱，将传递函数方程转换为状态空间方程，其系数矩阵如下：

$$A = \begin{bmatrix} -27.4 & -368941.4 & -2475184.7 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 5.9768 \ 0.4598] ; D = 0$$

由上述结果可知，状态方程可控，则可以由全体状态变量实施的全状态反馈来任意配置系统的极点。

3.2 极点配置方法与状态反馈矩阵

期望极点可以通过频域设计法的根轨迹图获得。经超前校正后的控制系统幅频特性满足设计要求。低频段表征闭环系统具有较好的稳定性；中频段表征闭环系统具有良好的动态性能，包括超调量、调节时间等；高频段则表征闭环系统具有较好的复杂性和噪声抑制性能。

频域设计的闭环极点共有7个。其中，系统的开环传递函数有5个极点，加上二级超前控制器的2个极点。配置期望极点时，考虑到系统为5阶，选择距离虚轴更近的5个极点，因为其对控制系统的影响更为明显，所以最终确定的期望极点为：

$$P = [-0.0776, -0.00318, -5.69 + 5.17i, -5.69 - 5.17i, -4.25] \quad (7)$$

相应的系统反馈矩阵 (F) 可通过 MATLAB 中的爱克曼函数得到：

$$F = [-11.7, -556.1, -3265, 20.3, 0.1] \quad (8)$$

由于反应堆广义数学模型中存在一个零点，而使用配置极点法设计的控制器不考虑零点的影响，零点的存在将影响到状态空间法的控制效果。所以单纯使用状态空间反馈方法设计的控制器效果会大打折扣。

3.3 PID 控制器设计

根据 F 对系统进行仿真，效果不理想。在实际堆功率调节系统中，被控对象零点的存在严重影响到系统的动态性能，这对系统状态空间的设计产生影响，导致最终的仿真结果不理想。要解决此问题，需要采用新的控制结构以消除该零点

以及其他因素对系统的影响。

本文在此状态空间结构的基础上增加一个反馈回路,采用状态反馈加 PID 的复合控制结构。该控制结构的优势在于反馈阵的存在已改善了系统的动态特性, PID 控制器将完成对堆功率调节系统的微调,进一步优化系统各动态性能指标,并保证堆功率系统的中子注量率的精确控制。

基于经验法整定 PID 控制器的参数, PID 控制器传函公式如式(9)所示:

$$G_{PID}(s) = 45 + 0.06 \times \frac{40s + 1}{0.02s + 1} \quad (9)$$

4 仿真分析

4.1 复合控制系统仿真结果

基于 MATLAB/simulink 仿真平台,构建堆功率调节系统复合控制结构。观测复合控制结构输出响应结果,仿真结果见图 2。

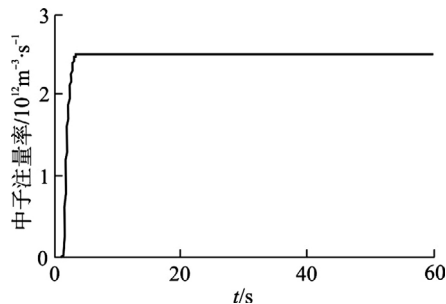


图 2 复合控制结构测试
Fig. 2 Test of Compound Control Structure

由图 2 可知,复合控制系统的响应曲线超调量几乎为 0,响应时间在 3 s 以内,系统的动态特性十分理想,且稳态误差为零,保证了反应堆中子通量密度维持在设定值上。

4.2 控制量对比分析

复合控制结构相对于传统 PID 控制器有一项极为显著的优点,即控制量小。复合控制结构的控制量见图 3。

复合控制结构的控制量不足 600,数量级控制在 10^2 ;而传统 PID 控制器中,其控制量达到了 10^6 的数量级,可见复合控制结构在实际工程中更易实现。

实际上,在复合控制结构中,与传统 PID 控制器不同的是,由于其状态反馈阵的存在,除了对被控对象的逐级比例反馈之外,更重要的是,状态反馈阵巧妙地将系统分割成多个回路,各个

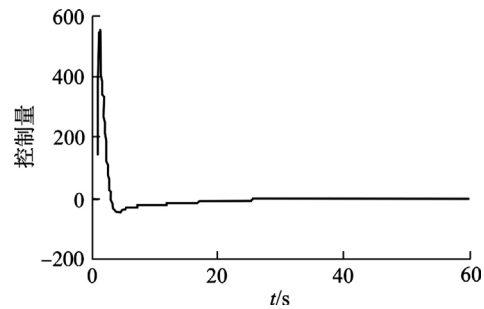


图 3 复合控制结构的控制量曲线
Fig. 3 Curve of Control Quantity for Compound Control Structure

回路的比例环节在实际控制过程中,分级消纳了系统的控制量,使得系统控制量的抑制效果十分明显。该方法在实际工程中也更易实现。

5 结论

采用状态反馈和传统 PID 控制器相结合的复合控制结构对核电厂堆功率进行控制,主要结论有:

(1) 提出的核电厂堆功率复合控制结构设计思路清晰,具有较好的控制效果,且能够有效消纳系统的控制量。

(2) 在复合控制系统中,状态反馈矩阵改善堆功率系统的动态特性,并对系统的控制量进行有效抑制;PID 控制器对系统起到微调的作用。

(3) 在核电厂堆功率调节系统的发展方向上, PID 控制器依旧是首选,实际运用中可加入非线性环节对控制量进行限制以确保控制量的可实现性。

(4) 提出的复合控制结构具有一般性,适用于存在零点的复杂被控对象,为该类控制系统的设计提供了新的思路。

所设计的核电厂堆功率复合控制系统动态跟踪调节性能好,对核电厂反应堆参与电网调峰具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 郭胤,黄晓津. 反应堆功率保成本控制器设计[J]. 核科学与工程, 2009, 29(2): 118-122.
- [2] 熊莉,刘涤尘,赵洁. 大型核电站的建模及接入电网的相互影响[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 10-14.
- [3] Chao-Chee Ku, Kwang Y. Lee, R. M. Edwards. Improved Nuclear Reactor Temperature Control Using Diagonal Recurrent Neural Networks[C]. IEEE, Amer, 1992, 2298-2308.
- [4] 杨平,翁思义,郭平,等. 自动控制原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [5] Edwards R M, Lee K Y, Schultz M A. State Feedback

Assisted Classical Control: An Incremental Approach to Control Modernization of Existing and Future Nuclear Reactors and Power Plants[J]. Nucl. Technol, 1990, 92: 167-185.

[6] 杨平,余洁,冯照坤,等. 自动控制原理实验与实践[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

Research on Compound Controller in Nuclear Power Plants

Zhu Hao¹, Wei Gang¹, Zhai Chunrong², Chen Qiunan¹

1. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, 200090, China;

2. Power Engineering Corp. Ltd, Shanghai, 200233, China

Abstract: The reactor power control system is the core of the reactor control system in the nuclear power plant. Taking an experimental reactor as the research object, the compound control structure including the state feedback and the PID controller to control the nuclear reactor power are adopted. The existence of the state feedback array can obviously improve the dynamic characteristics of the power system, restraining the controlling quantity of the system effectively; PID controller plays the role of fine-tuning the system. The simulation results show that the method is correct and effective.

Key words: Reactor power, Compound controlling, State feedback, PID controlling, Disturbance

作者简介:

朱 昊(1988—),男,2011年毕业于上海电力学院电站自动化专业,获学士学位。现主要从事核电站自动化设计、分布式发电技术、微电网优化控制技术等方面的研究。

韦 钢(1958—),男,教授。1989年毕业于浙江大学电力系统及其自动化专业,获硕士学位。现主要从事电力系统运行分析、电力系统规划、电力系统谐波及补偿技术等方面的研究工作。

翟春荣(1988—),男,工程师。2011年毕业于上海电力学院电站自动化专业,获学士学位。现主要从事核电站自动化设计方面的工作。

(责任编辑:杨洁蕾)

(上接第85页)

Nuclear Safety Review on Exceeding Allowable Flaw Treatment of Reactor Pressure Vessel

Zhang Lin^{1,2}, Chu Qibao³, Fang Yonggang³

1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. Ministry of Environmental Protection, Beijing, 100035, China; 3. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing, 100082, China

Abstract: Based on the nuclear safety review on the defect beyond tolerance of Unit 2 reactor pressure vessel of Tianwan NPP and Unit 4 reactor pressure vessel of Qinshan Phase II NPP, to the standards for the safety evaluation of the fracture mechanics of RPV defects beyond tolerance, the defect characterization, the fracture toughness, the selection of residual stress and the thermal shock under load are discussed, in order to be useful for the follow-up of the nuclear safety review.

Key words: Reactor pressure vessel, Defect beyond tolerance, Nuclear safety review

作者简介:

张 琳(1978—),女,2004年毕业于清华大学化学工程专业,获硕士学位。现从事核电安全监管工作。

初起宝(1980—),男,工程师。2006年毕业于北京化工大学化工机械专业,获硕士学位。现从事核电设备安全审评与研究工作。

房永刚(1981—),男,工程师。2007年毕业于北京航空航天大学材料工程专业,获硕士学位。现从事核电设备安全审评与研究工作。

(责任编辑:王中强)