

# 核反应堆功率调节系统控制特性研究

冯俊婷, 黄晓津, 张良驹

(清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘要:**某新型研究堆采用新型燃料元件和堆芯结构,反应堆的控制特性缺乏基本数据,功率调节系统的设计无可借鉴经验。通过半实物仿真试验,在同一功率定值下分别引入阶跃和斜坡反应性扰动,考虑调节棒在不同位置的价值影响,采用PD控制方案研究功率调节系统的调节特性和控制效果,并对控制方案和PD参数进行比较和优化,为反应堆功率调节系统的设计和投入运行奠定基础。半实物仿真试验结果表明:采用同一组控制器参数,无法满足预定的控制要求。充分发挥数字化控制器的优点,在同一功率定值、不同棒位下,采用不同的控制器参数能较好地满足预定的控制指标和性能要求。

**关键词:**核反应堆;功率调节系统;半实物仿真

中图分类号:TL361

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2006)03-0306-05

## Study on Characteristic of Reactor Power Regulating System

FENG Jun-ting, HUANG Xiao-jin, ZHANG Liang-ju

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** As a new type of research reactor with new fuel element and core structure, no experience can be used for the design and implementation of the power regulating system. Under same fixed power, steps disturbance and slope disturbance of reaction were leaded into semi object-based modeling and simulating, and count in the influence of rod operating area, the characteristic of the power regulation system is studied by using the PID control project. The results show that the same set of controller parameter can't satisfy for the preconcerted control request. Under the fixed power, the different controller parameter at the different rod positions can satisfied for the preconcerted control index and control performance.

**Key words:** nuclear reactor; power regulating system; semi object-based modeling and simulating

研究堆的功率定值范围宽,功率变化频繁,由实验样品引入的反应性扰动大,引入速度快,对控制特性(超调量、振荡次数、调节时间、稳态精度等)要求高,给功率调节系统设计增加了难

度。对此,必须通过半实物仿真试验研究才能初步确定控制模型及所能达到的调节特性和控制效果,以为功率调节系统的设计提供依据,减少功率自动调节系统投入过程的风险。

半实物仿真试验以反应堆的实时数学模型为基础,将功率调节回路的真实设备(包括数字化功率控制器、步进电机驱动器和步进电机,不包括控制棒传动机构)与用计算机模拟的反应堆实时模型联系起来,构成一个半实物的反应堆闭环控制系统。在这样的半实物仿真系统上进行各种运行工况和控制方式的闭环运行试验可近似真实地研究控制系统的性能,为确定功率自动调节系统的控制方案和初步确定控制器参数提供依据。

### 1 控制方案和原理

反应堆是一个包含核反应和热工水力过程的复杂系统,具有热工反馈弱、自稳定性差、非线性强等特点。功率调节系统的主要任务是抑制反应堆的功率扰动,使得反应堆功率维持在一定水平。设计出的控制系统不仅应满足控制性能指标,还应鲁棒性强,能够适应各种工况,易于进行参数整定。经研究,认定以闭环负反馈为基础的 PID 控制方案是较好选择。功率调节系统闭环控制方案原理图示于图 1<sup>[1]</sup>。

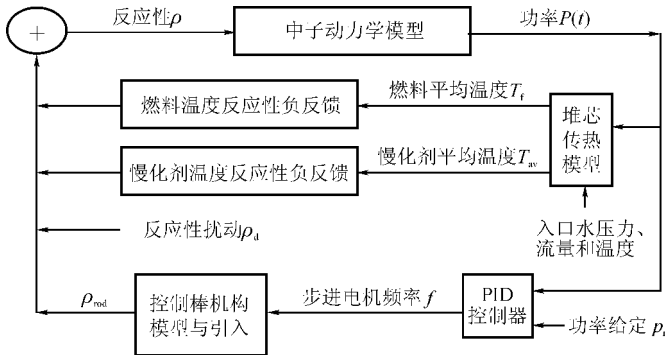


图 1 功率调节系统闭环控制方案原理图

Fig. 1 Control principle of close-loop power regulating system

从图 1 可知,功率调节系统闭环控制原理如下:当某种原因使得堆芯条件发生变化而引入了一反应性扰动时,此反应性扰动经过堆芯中子动力学过程使得堆芯功率发生变化;燃料温度随着功率的变化而发生改变,经过堆芯的传热和冷却水的输运,进一步引起慢化剂温度和密度变化;由燃料温度和慢化剂温度所引起的温度负反应性反馈反作用于堆芯;自动控制系统根据当前运行的反应堆功率与设定值间的偏差,经过控制器算法输出步进电机控制信号来驱动控制棒,实现抑制反应堆的功率扰动,保证反应堆的稳定功率运行。

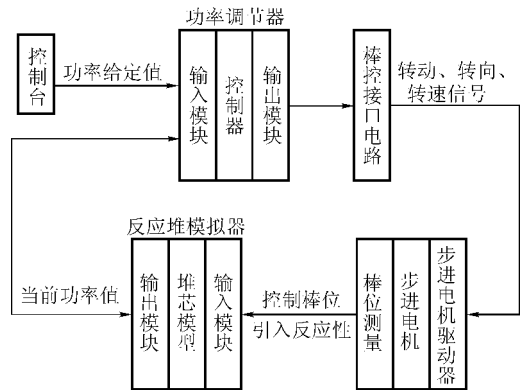


图 2 半实物仿真系统结构图

Fig. 2 Structure of modeling and simulating system

### 2 系统结构

半实物仿真系统的结构示于图 2。

#### 2.1 反应堆模拟器

反应堆模拟器采用 1 台 PC 机实现,执行所建立的反应堆实时模型,实时模拟反应堆的动态特性。反应堆实时模型用 Matlab 的实时代码生成器生成,棒位采集程序计算的结果通

过全局变量与反应堆模型共享。计算机通过 I/O 接口卡将当前的核功率的计算值转换为 3 位开关量的量程和 4~20 mA 模拟量数值送至数字化控制器。数字化控制器根据步进电机转动的步数计算出当前的棒位,通过计算机的 I/O 接口卡送到计算机的棒位采集程序。

## 2.2 控制器

控制器监测当前的核功率测量信号,并与功率定值进行比较,将两者的偏差信号按照预定的功率调节算法计算后产生控制棒操作信号。

功率自动调节系统采用 PID 控制算法。对于实测功率  $P(t)$  与功率设定值  $P_0$  的归一化差值  $e(t) = (P_0 - P(t))/P_0$ , 控制器输出的调节量(棒位、反应性)应为:

$$y(t) = K_p [e(t) + T_d \frac{d}{dt} e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt] \quad (1)$$

式中:控制参数  $K_p$  为比例增益;  $T_i$  为积分时间;  $T_d$  为微分时间<sup>[2]</sup>。

系统控制器的调节输出量是控制棒的速度,所以,对式(1)进行微分,忽略二次项微分,即有:

$$f(t) = \frac{dy(t)}{dt} = K'_p \frac{d}{dt} e(t) + K'_i e(t) \quad (2)$$

式中,  $K'_p$  为  $K_p$ ,  $K'_i$  为  $K_p/T_i$ , 即通过 PID 方式中的 PD 参数调节控制棒速度来调节反应堆功率。

控制器的具体实现机制是:由 PD 控制器输出的频率控制信号控制步进电机的转动速度,从而控制控制棒的提升/下降棒速,最终起到调节反应性的作用。

## 2.3 棒控接口电路

棒控接口电路接收数字化控制器输出的“转动控制信号”(开关量)、“转向控制信号”(开关量)及“转速控制信号”(0~20 mA 模拟量),经电路转换并作相应的逻辑处理之后,产生控制信号和脉冲信号,输出给步进电机驱动器,使步进电机驱动器控制步进电机按照控制系统设定的转速、转向和转动规定的步数实现调节棒的提升或插入,限制反应堆功率的动态偏离,实现稳定功率运行。

## 3 控制器参数整定<sup>[3]</sup>

在引入一定大小的反应性阶跃/斜坡扰动后,通过控制系统的调节作用,使反应堆功率回到功率定值,调节过程的超调量、振荡次数、过渡过程时间及静差满足设计要求。

参数整定的方法主要有:理论整定法,从 PID 调节规律的概念出发,根据对象的特性和控制准确度的要求从理论上得出各参数的整定数据;经验法,实际上是一种试凑法,控制器参

数初始值是经验法的核心,整定参数的预先值需根据对象特性及参考仪表的量程而定。

本实验通过经验法进行 PD 控制器参数的整定。

## 4 仿真实验

仿真实验在上述半实物仿真试验系统平台上进行,详细研究功率控制系统的闭环自动调节特性。

### 4.1 控制器参数对调节特性的影响

**4.1.1 比例的作用** 在给定功率 1 MW 下,微分作用一定,分别设比例值  $K_p$  为 45 和 40。对斜坡扰动和阶跃扰动的响应曲线示于图 3 和图 4。在两图中,第 1 个峰值为斜坡响应,第 2 个峰值是阶跃响应。在图 3 中,斜坡扰动的调节时间为 2.5 s,图 4 中的斜坡调节时间为 3 s。这表明,  $K_p$  值增大,调节时间变短,但过大将导致超调量增大和振荡次数增多。图 3 中的阶跃响应曲线显示,10 s 左右时的振荡幅度较大,系统的调节时间长。当  $K_p$  减为 40 时,系统阶跃响应的超调量和调节时间则满足要求。

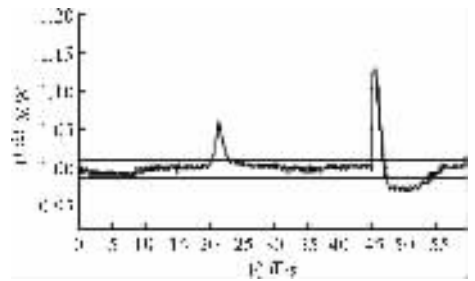


图 3  $K_p=45, T_d=0.35$  时的斜坡和阶跃响应曲线  
Fig. 3 Response curve of slope and step disturbances at  $K_p=45, T_d=0.35$

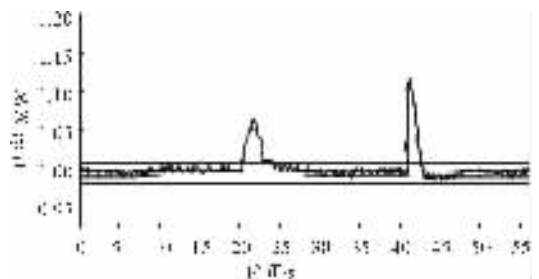


图 4  $K_p=40, T_d=0.35$  时的斜坡和阶跃响应曲线  
Fig. 4 Response curve of slope and step disturbances at  $K_p=40, T_d=0.35$

**4.1.2 微分的作用** 在 10 MW 功率下进行自动调节,然后加入阶跃扰动和斜坡扰动,功率控制系统自动调节功率回到给定的定值功率上。图 5 所示为在比例增益  $K_p=30$ 、微分系数  $T_d=3$  下的阶跃响应曲线。为减小功率的振荡次数,保持比例增益不变,减小微分作用,微分系数从 3 减小到 1.7。该条件下的结果示于图 6。从图 5 中的曲线可以看到,功率振荡 3 次后趋于平稳,相对于图 6 中的响应曲线振荡次数较多,过渡过程时间较长。由图 6 可知,在  $T_d=1.7$  时,功率振荡次数减小,静态偏差小于 1% 的给定值。

价值曲线非线性较严重所致。

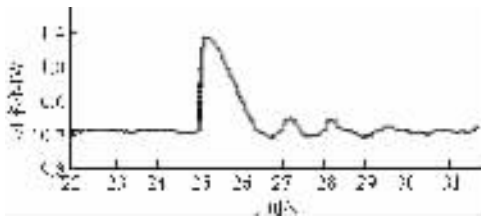


图 5  $K_p=30, T_d=3$  时的阶跃响应曲线  
Fig. 5 Response curve of step disturbances at  $K_p=30, T_d=3$

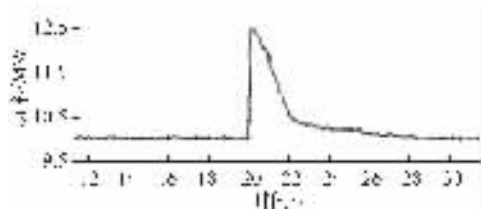


图 6  $K_p=30, T_d=1.7$  时的阶跃响应曲线  
Fig. 6 Response curve of step disturbances at  $K_p=30, T_d=1.7$

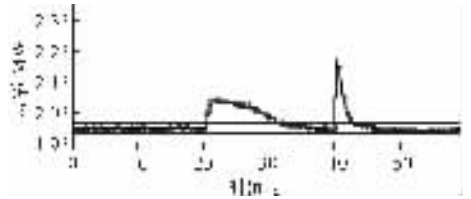


图 7 棒位为 598 mm 时的斜坡和阶跃响应  
Fig. 7 Response curve of slope and step disturbances for rod position 598 mm

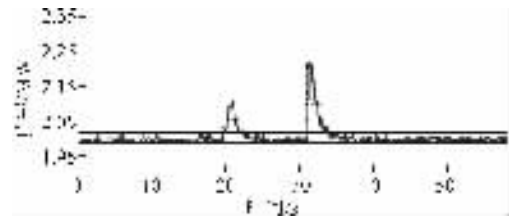


图 8 棒位为 428 mm 时的斜坡和阶跃响应  
Fig. 8 Response curve of slope and step disturbances for rod position 428 mm

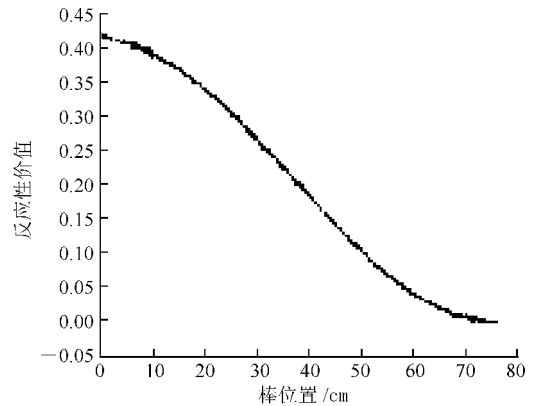


图 9 控制棒价值曲线

Fig. 9 Value curve of control rod

**4.2 控制棒棒位对调节特性的影响**

控制棒的价值曲线是非线性的,在控制棒移动相同距离时,引入的反应性随棒位的不同而异。图 7、8 所示是在同一功率水平下棒位分别在 598 mm 和 428 mm 处时,对同一组 PD 参数进行斜坡和阶跃反应性扰动试验(扰动量大小一定)时得到的功率响应曲线。图 9 所示为控制棒价值曲线。

从图 9 可以看到,当控制棒处于堆芯中间位置附近时,控制棒微分价值最大,且处于控制棒价值曲线的线性段;当控制棒处在堆芯上部或下部时,控制棒微分价值相对较小,且处于控制棒价值曲线的非线性段,控制效果存在较大差异<sup>[1]</sup>。在控制棒全长 20%~80% 的有效区内,线性段(中间处长约 25 mm)和两端非线性段必须采用不同的 PD 参数才能满足预定的控制要求。

由图 7、8 可见,棒位在 598 mm 时的斜坡响应调节时间较长,棒位在 428 mm 时的响应特性较好。这是因控制棒在 598 mm 位置时的

以上半实物仿真试验结果表明:采用同一

组控制器参数无法满足预定的控制要求,应在同一功率定值、不同棒位下采用不同组的控制器参数,这样,方能较好满足预定的控制指标和性能要求。

经过大量的半实物仿真试验研究得到了在同一功率定值、不同棒位下的相应的控制器参数。图 10 所示为功率为 2 MW 水平下、棒位在 599 mm 附近,采用调整了的 PD 参数得到的斜坡和阶跃响应曲线。从曲线可以看到,与采用单一控制器参数的控制系统相比,控制特性得到了明显改善,达到了设计要求。

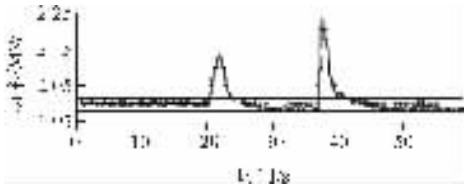


图 10 棒位为 599 mm 时的斜坡和阶跃响应

Fig. 10 Response curve of slope and step disturbances at rod position with 599 mm

如果把控制棒有效区分成 3 段,即 600~450 mm(有效区的高端)、450~280 mm(有效区的中段)和 280~150 mm(有效区的低端),在同一功率(2 MW)、不同棒位下,欲使调节特性满足预定要求,所应采用的 PD 参数值则如表 1 所列。

表 1 2 MW 功率下棒位与最优 PD 参数间的关系  
Table 1 Rod position with optimized PD parameter at power of 2 MW

棒位/mm	PD 参数	
	P	D
600~450	30	1.2
450~280	25	1.8
280~150	40	1.0

这一结果表明,无法找到 1 组固定的 PD 参数可以在同一功率、不同棒位下使调节特性满足预定要求。

## 5 结论

1) 比例系数  $K_p$  增大,系统动作灵敏,调节速度加快。但  $K_p$  过大,则使振荡次数增加,调节时间加长,系统趋于不稳定。

2) 微分作用能够阻止偏差的变化,改善系统的动态特性,减小超调量,缩短调节时间,允许加大比例控制使稳态误差减小,提高控制精度。但微分系数  $T_d$  太大将引起过大的超调,被调量振荡加剧,系统特性变坏; $T_d$  太小时,微分作用太弱,调节特性不能满足要求。只有选择合适的  $T_d$  才可得到满意的调节性能。

3) 无法找到 1 组恰当的 PD 参数可在所有工况下满足预定的工作特性和控制要求。对此,必须在同一功率水平、不同棒位下,采用分段 PD 控制器参数,方能全范围满足控制要求。对这种分段 PD 参数的控制方案,采用模拟电路的控制器是很难实现的,采用数字化控制器则可很好实现。

## 参考文献:

- [1] 褚新元. 某项目功率调节系统半实物仿真的研究[D]. 北京:清华大学核能技术研究院,2002.
- [2] 王锦标,方宗智. 过程计算机控制[M]. 北京:清华大学出版社,1999: 6-10.
- [3] 张守元,黎利红. 动态过程中 PID 控制参数模糊整定的探索[J]. 矿冶工程,2000,20(2):22-24. ZHANG Shouyuan, LI Lihong. The study of fuzzy adjustment of PID control parameters in dynamic process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000, 20(2):22-24(in Chinese).