

实验反应堆功率调节系统 PID 控制器的解析设计方法

褚新元, 李 富, 黄晓津, 张良驹

(清华大学 核能技术设计研究院, 北京 100084)

摘要:通过对实验反应堆系统模型进行线性化和模型降阶、再对降阶模型进行 PID 控制器的理论设计的方法, 可使反应堆功率调节系统的设计最优化、客观化和解析化。将此解析化方法应用于一实验反应堆功率调节系统的设计, 通过数值仿真证明: 设计的控制器控制效果良好, 该解析化设计方法可行。

关键词: PID 控制; 模型线性化; 模型降阶; 鲁棒性; 实验反应堆

中图分类号: TL361

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)01-0065-05

An Analytical Method to Design the PID Controller for the Power Control System of Experimental Nuclear Reactor

CHU Xin-yuan, LI Fu, HUANG Xiao-jin, ZHANG Liang-ju

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

Abstract: In order to make the design process for power control system of experimental nuclear reactor optimal, objective and analytical, an analytical design process which contains the model linearization, model reduction, theoretical design of PID controllers is discussed. This method is applied to the design of the power control system of an experimental nuclear reactor, the numerical simulation results prove that the design process is practical, and the control performance is satisfactory.

Key words: PID control; model linearization; model reduction; robustness; experimental nuclear reactor

反应堆功率调节系统的作用是针对反应堆中的各种反应性扰动引起的功率变化自动移动控制棒, 使堆功率稳定在设定水平。与很多工业控制场合类似, 反应堆功率调节系统经常采用 PID 控制, 例如, 压水堆通常所采用的三通道非线性控制器实际为带非线性增益补偿的

PID 控制。PID 控制是比例、积分、微分控制的简称^[1], 其原理简单、实现方便、鲁棒性强, 是工业基本控制方法之一。

PID 控制器的数学描述为:

$$u = K_p(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{d}{dt} e) \quad (1)$$

其中: u 为控制器输出信号; e 为被控参数的偏

收稿日期: 2002-09-11; 修回日期: 2002-12-12

作者简介: 褚新元(1977—), 女, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 核能科学与工程专业

差信号; K_p 称为比例增益; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

可见,进行 PID 控制器的设计即是确定参数 K_p 、 T_i 、 T_d 。

设计可用的 PID 控制器,通常采用对仿真模型或在现场对实际系统进行控制器参数试凑法,此过程耗时耗力,且主观性较大,其结果在很大程度上依赖于实验者的经验和搜索过程。很多学者^[1,2]提出解析化设计 PID 参数,直接由被控系统的数学模型获得优化的 PID 控制器参数。对反应堆的功率调节系统,不允许在堆上直接进行可能引起功率振荡的控制器参数搜索试验,因而,必须针对模型预先设计控制器。反应堆系统的数学模型可通过理论推导或在现场通过反应性阶跃扰动后对反应堆的响应情况进行系统辨识获得。但因核反应堆本质上是一复杂的非线性高阶大型系统^[3],而解析化方法针对的模型一般是低阶的、线性的,能否采用 PID 控制器的解析设计方法尚未可知。

本工作将针对实验反应堆的具体情况,采用模型线性化、模型降阶等技术,探索反应堆功率调节系统 PID 控制器解析化设计方法。将该方法用于一实验堆的功率调节系统设计,通过对控制效果的数值仿真,验证所设计的控制器的控制指标是否达到预期效果、该设计方法是否可行,以期对今后反应堆功率调节系统的设计提供参考。

1 PID 控制器解析化设计方法

PID 控制器解析化设计方法的核心是由被控对象的数学模型直接得出 PID 控制器的参数。基于不同的控制要求和优化准则有多种设计方法,Ziegler-Nichols 参数整定法是目前常用的一种。当被控对象为带延迟环节的一阶惯性系统时,按 Ziegler-Nichols 参数整定法,系统传递函数表示为:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \tag{2}$$

其中: K 为系统增益; T 为惯性时间常数; τ 为延迟时间; s 为 S 变换的变量。

由表 1 所列 Ziegler-Nichols 整定公式可得到 PID 控制器^[2]参数 K_p 、 T_i 、 T_d 。由其它设计方法也可得到类似结果,但计算公式略有不同。

表 1 Ziegler-Nichols 整定公式

Table 1 Ziegler-Nichols PID tuning formula			
控制器类型	K_p	T_i	T_d
P	$T / (KT)$		
PI	$0.9 T / (KT)$	3τ	
PID	$1.2 T / (KT)$	2τ	0.5τ

很多复杂系统可由式(2)近似表示。图 1 是式(2)的阶跃响应曲线,即在系统输入端施加单位阶跃变化时的输出曲线。实际系统的阶跃响应与图 1 相似时,可由图 1 所示方法直接获得近似的一阶系统的 K 、 T 、 τ 值,进而利用式(2)完成 PID 控制器参数的解析化设计。

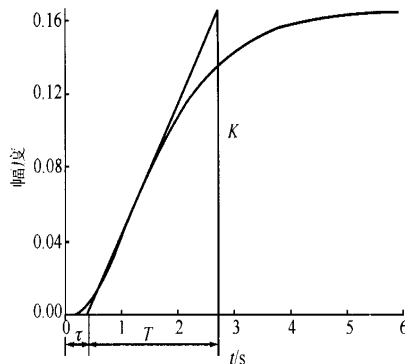


图 1 带时间延迟的一阶惯性模型阶跃响应

Fig. 1 Step response of 1-order linear system with delay

开环的反应堆系统包含堆芯中子动力学过程、以燃料温度效应和慢化剂温度效应为代表的热工反馈、动力堆上的二回路耦合等,使反应堆成为一个高阶非线性复杂系统。为把高阶非线性的反应堆系统近似成一阶惯性加延时的模型,须先解决模型线性化、模型降阶等问题。

1.1 模型线性化

在反应堆系统中,堆芯中子动力学方程是主要的非线性环节。在稳态运行点附近小范围内,中子动力学方程可线性化。

堆芯中子动力学方程^[3]为:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{eff}}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S_e \tag{3}$$

六组缓发中子方程为:

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

初始条件 $t=0$ 时,有:

$$- \lambda_i C_i(0) + \frac{\beta_i}{\Lambda} n(0) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (5)$$

堆芯功率为:

$$P(t) = K_n n(t) \quad (6)$$

其中: $n(t)$ 为中子通量密度; $\rho(t)$ 为总反应性增量; $C_i(t)$ 、 β_i 、 λ_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 分别为第 i 群缓发中子份额、缓发中子先驱核浓度及衰变常量; β_{eff} 为有效缓发中子份额, $\beta_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^6 \beta_i$; S_e 为外中子源项; Λ 为中子代时间; $P(t)$ 为功率, W ; K_n 为中子通量密度到堆功率的转换系数。

式(3)因存在 $\rho(t)$ 与 $n(t)$ 的乘积项而具有非线性。在运行稳态点,堆芯中子通量密度满足如下微分方程:

$$\frac{dn(0)}{dt} = \frac{\rho(0) - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} n(0) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(0) + S_e = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dC_i(0)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(0) - \lambda_i C_i(0) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

在稳态点的附近,设 $\Delta n(t) = n(t) - n(0)$, $\Delta \rho(t) = \rho(t) - \rho(0)$, $\Delta C_i(t) = C_i(t) - C_i(0)$, 由式(3)、(7)、(8)通过忽略高阶小量可得:

$$\begin{aligned} \frac{d[\Delta n(t) + n(0)]}{dt} &= \frac{\Delta \rho(t) + \rho(0) - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} \cdot \\ [n(0) + \Delta n(t)] &+ \sum_{i=1}^6 \lambda_i [C_i(0) + \Delta C_i(t)] + S_e \\ \Rightarrow \frac{d\Delta n(t)}{dt} &= \frac{\rho(0) - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} n(0) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(0) + \\ S_e &+ \frac{\rho(0) - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} \Delta n(t) + \frac{\Delta \rho(t)}{\Lambda} n(0) + \\ \frac{\Delta \rho(t) \Delta n(t)}{\Lambda} &+ \sum_{i=1}^6 \lambda_i \Delta C_i(t) \approx \\ \frac{\rho(0) - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} \Delta n(t) &+ \frac{\Delta \rho(t)}{\Lambda} n(0) + \\ \sum_{i=1}^6 \lambda_i \Delta C_i(t) \end{aligned}$$

记 $n = \Delta n$, 即 n 为偏移稳态点的增量,可得式(3)的线性化模型为:

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= \frac{\rho(0) - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} n(t) + \\ \frac{\rho(t)}{\Lambda} n(0) &+ \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \end{aligned} \quad (9)$$

式(4)、(9)的 s 变换下传递函数为:

$$(s + \lambda_i) C_i(s) = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(s) \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (s - \frac{\rho(0) - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda}) n(s) &= \\ \frac{n(0)}{\Lambda} \rho(s) &+ \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(s) \end{aligned} \quad (11)$$

1.2 等效为一阶线性加延迟模型

解析化设计方法的关键是将系统等效为一阶模型式(2)并得出特征参数 K 、 T 、 τ 。当模型阶数较低、系统各环节的时间常数相近时,其阶跃响应曲线为平滑的 S 型(类似图 1),由图 1 可直接得出各个参数值;或者直接采用已有的降阶方法将模型降为一阶。但当系统模型阶数较高、各环节的时间常数差别很大时,如反应堆系统,堆芯中子动力学方程在几秒内响应,各回路传热环节则在几十甚至几百秒内反应,系统阶跃响应曲线不规则,无法从图中直接得出参数值。由于现有降阶算法是对模型响应的全过程进行平衡优化,而控制系统更关注调整初始阶段的动态过程,因此,采用现有降阶算法直接降为一阶模型的策略不可取。

目前,模型降阶技术已发展出很多方法,如 Padé 降阶、Routh 降阶、主导模态降阶、稳定性方程法、Schur 法^[4]、频域响应法^[2]等。频域响应法较适于最后得出一阶系统的特征参数 K 、 T 、 τ ,但当系统阶数很高时,可能由于非主导极点的影响使该法无法实现,需采用其它降阶法(如 Schur 法)对高阶线性模型进行初步降阶,再用频域响应法得出最终的 K 、 T 、 τ 。Matlab 工具软件已提供这些方法的算法,可供参考。此处仅简单介绍频域响应法的原理。

以角频率 ω 为变量,式(2)可表示为:

$$G(j\omega) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \Big|_{s=j\omega} = \frac{K}{T_j \omega + 1} e^{-j\omega \tau} \quad (12)$$

系统的频域响应函数是复数,其 Nyquist 图(图 2)与负实轴第一个交点所对应的 ω_c 为剪切频率,该点与原点的距离为 $1/K_c$ 。 K_c 为

极限增益,它们满足如下方程:

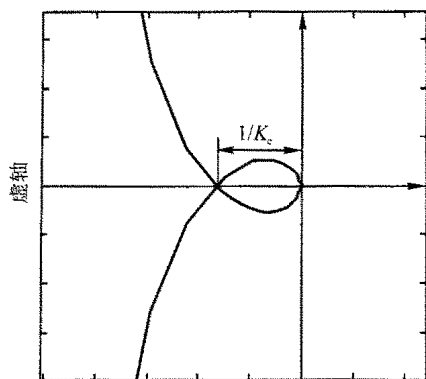


图2 Nyquist图

Fig. 2 Nyquist diagram

$$\begin{cases} \frac{K(\cos \omega_c \tau - \omega_c T \sin \omega_c \tau)}{1 + \omega_c^2 T^2} = -\frac{1}{K_c} \\ \sin \omega_c \tau + \omega_c T \cos \omega_c \tau = 0 \end{cases} \quad (13)$$

K 对应模型阶跃响应的稳态值,可直接由传递函数得出。 ω_c 和 K_c 可由模型的 Nyquist 图求出,再由方程组(13)求出参数 T 和 τ 。

2 设计实例

2.1 控制系统框架

本工作研究的是一座游泳池式反应堆。该堆与其它堆型相比,堆芯小,温度低,进出口间温升小,热工反馈作用小,自稳能力差;堆芯动态参数变化大,存在不同的堆芯布置、不同燃耗水平、不同功率水平、不同的控制棒棒位多种工况组合,每种工况下中子代时间、缓发中子份额等参数变化大。针对这一被控实体,不但要由解析法设计出 PID 控制器参数,还要求控制器鲁棒性好,能满足各种工况控制要求。

包含功率调节系统的反应堆总体框架示于图3。功率调节系统是根据实际功率与设定功率的偏差,通过控制算法输出控制棒棒速控制信号,此信号经控制棒驱动机构驱动使控制棒移动,从而使反应堆功率维持在设定水平。

2.2 系统开环特性

通过对所建立的反应堆模型进行数值仿真来初步分析反应堆的动态特性。以燃耗0%运行工况为例,开环系统在阶跃反应性扰动下的响应特性示于图4。由图4可看出:模型包含响应速度在0.1 s量级的中子动态过程和100 s

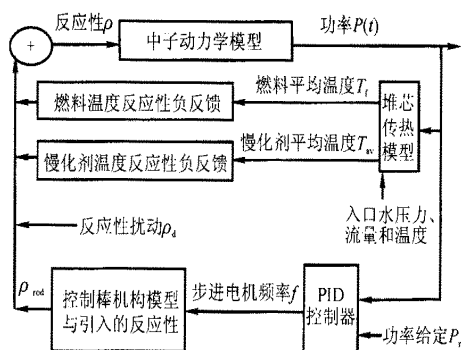


图3 实验堆控制系统闭环模型

Fig. 3 Close-loop control model for an experimental nuclear reactor

量级的温度反馈过程,此两个环节的特性差别很大,其响应曲线与图1的标准形状差别也很大,很难直接拟合出合适的 K 、 T 、 τ 参数,须采用更合理的线性化、降阶方法进行处理。

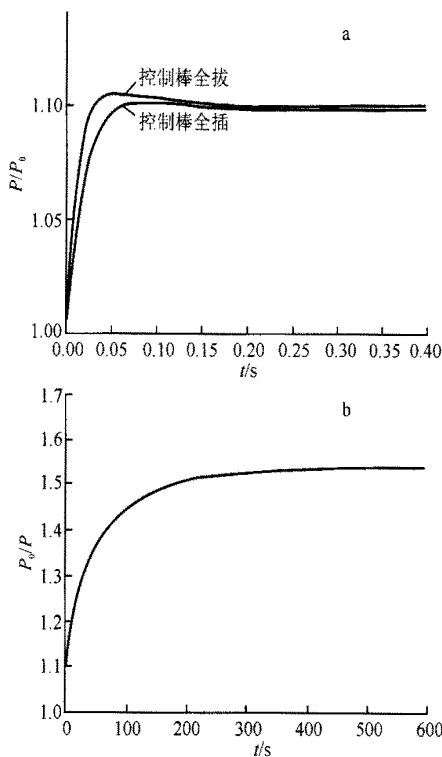


图4 燃耗0%时阶跃反应性扰动下堆芯归一化功率 (P/P_0)

Fig. 4 Step response of normalized reactor power under 0% of burnup level
a—0~0.4 s; b—0~600 s

2.3 模型处理结果

对原堆芯模型按式(9)进行线性化处理,得

到 16 阶线性模型,再采用 Schur 降阶方法^[4]将模型降到 5 阶线性模型。由图 5 所示的阶跃响应可看出,此 5 阶模型与原高阶线性模型在响应初始阶段吻合程度很高。作为参照,还采用 Padé 降阶方法由 16 阶线性模型降到 5 阶模型和 2 阶。由图 5 可看出,其阶跃响应与原高阶模型的差别较大。因此,初步降阶方法采用 Schur 降阶方法。再对此 5 阶模型采用基于频域响应的方法进一步降阶到 1 阶,得到参数 K 、 T 、 τ ,由此参数用 Ziegler-Nichols 参数整定法设计出 PID 控制器参数。

需要指出的是,控制系统主要需要调整堆芯功率在 0.1 s 量级时间内的动态过程,而缓慢的温度反馈过程对控制系统的设计影响很小,因此,中子动态过程是主要的研究对象,模型降阶时也主要考虑 0.1 s 量级内的响应。

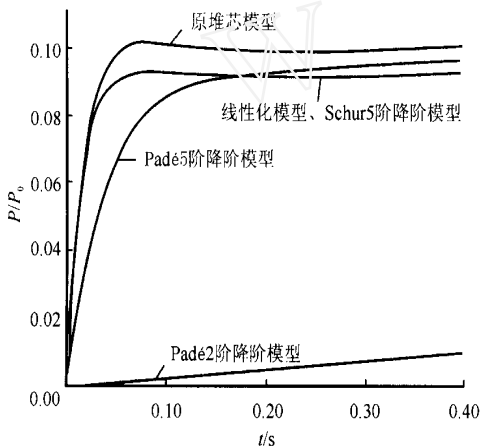


图 5 原堆芯模型与几种降阶模型
反应性阶跃扰动响应比较

Fig. 5 Comparison of step response
among original reactor model and reduced models

2.4 控制效果评价

基于 2.3 节由降阶得出的 1 阶线性模型的 K 、 T 、 τ 可用 Ziegler-Nichols 参数整定法设计出 PID 控制器参数。把此 PID 控制器用于图 3 所示的反应堆闭环控制系统,此时,堆芯模型采用最原始的非线性模型,图 6 列出多种工况下在阶跃反应性扰动下的闭环控制效果。可看出所有运行工况下控制系统采用同一组参数时,稳定时间和超调量等控制指标均满足要求,说明设计的 PID 控制器的鲁棒性令人满意,对反

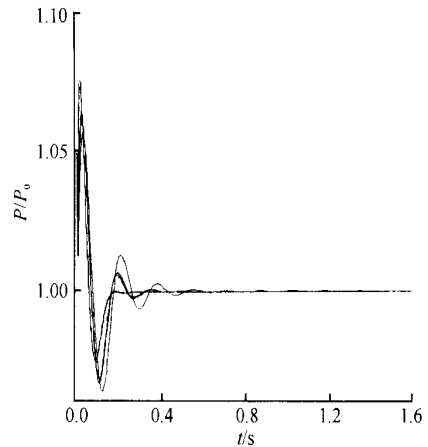


图 6 反应堆闭环后对反应性
阶跃扰动的功率响应曲线

Fig. 6 Normalized power for step reactivity
for close-loop reactor

曲线 1 ——控制棒全拔, 燃耗 0 %; 曲线 2 ——控制棒全拔, 燃耗 10 %; 曲线 3 ——控制棒全插, 燃耗 0 %; 曲线 4 ——控制棒全插, 燃耗 10 %; 曲线 5 ——控制棒全插, 燃耗 50 %; 曲线 6 ——0.06 % 功率水平下控制棒全插, 燃耗 0 %

应堆堆芯模型进行线性化、降阶、再解析化设计 PID 控制器的方法合理、可行。

3 结论

在设计实验堆功率调节系统的 PID 控制器时,可采用对高阶非线性的反应堆模型进行线性化、降阶、再对降阶模型进行 PID 控制器的理论设计方法。设计出的 PID 控制器具有良好的鲁棒性,适用于反应堆这种工况复杂的特殊情况。该方法过程直接、结果客观、性能稳定,是一种可行的方法。

参考文献:

- [1] 金以慧. 过程控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1993. 10.
- [2] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 47.
- [3] 凌备. 核反应堆工程原理(第二版)[M]. 北京:原子能出版社, 1989. 59.
- [4] Safonov MG, Chiang RY. A Schur Method for Balanced-truncation Model Reduction[J]. IEEE Trans Autom Control, 1989, 34(7): 731 ~ 733.