

核供热堆功率自动控制系统仿真研究

杨志军,刘隆祉,胡桂芬

(清华大学核能技术设计研究院,北京 102201)

摘要:核供热堆功率自动控制系统是一个多输入多输出的非线性系统。根据其特点,采用现代控制理论研究了核供热堆自动控制系统。通过仿真试验说明了采用“ μ 外环控制+LQR内环反馈”可获得最佳控制效果。

关键词:核供热堆;自动控制系统;现代控制理论

中图分类号:TL411+.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6931(2000)S0-0094-04

清华大学已建成的5 MW核供热实验堆及正进行设计的200 MW核供热示范堆是采用一体化结构布置、实现全功率自然循环、压力壳内上气室压力靠饱和水汽分压和氮气分压形成自维持稳压。因此,该堆在任何情况下,都不会出现堆芯失水事故,具有很高固有安全性。由于以上特点,使该堆的功率自动控制系统具有多种非线性关系。如反应性与中子功率的非线性关系;堆输出功率与主回路自然循环流量的非线性关系;换热器换热量与其一、二次侧流量和进出口温度之间的非线性关系。考虑其功率自动控制系统,均不可避免上述几种非线性关系,用传统PID方式或其它控制方式都不可能补偿这些非线性影响。只有采用多变量现代控制才能解决核供热堆非线性控制问题。

1 核供热堆稳态运行方式分析和控制变量选择

1.1 堆出口水温

核供热堆是以压水方式运行的,但它未设置稳压器,是靠饱和水汽分压和氮气分压构成的自稳压。如果在其整个运行功率范围内(0~100%),控制堆芯出口水温(或上气室水温)恒定不变,上气室水汽分压就不变,氮气压也基本不变,就能维持上气室自稳压,这对保证反应堆安全运行十分有利。但是,在核供热堆整个运行功率范围内要控制堆出口水温恒定,必须要求对二回路流量进行宽范围的调节。采用变频器作为电源,对二回路水泵调速调流量(简称变频器调速泵),可实现0~100%额定流量的调节。为安全起见,实现10%~100%额定流量范围调节是非常可靠的,这样可实现供热堆15%~100%额定功率范围内运行,而维持其出口水温恒定不变。

收稿日期:2000-01-10;修回日期:2000-04-02

作者简介:杨志军(1946—),男,河北邢台人,副研究员,反应堆工程专业

1.2 控制变量选择

核供热堆功率自动控制系统的主要作用是根据外负荷需求,调节堆功率跟随负荷的变化(负荷跟踪);当外负荷产生阶跃扰动时,控制系统要控制堆功率作快速响应;此外还要补偿燃烧和毒物等影响。以上控制过程中,始终要控制堆出口水温恒定不变,始终要控制堆的重要安全参数(压力、水温、堆功率、液位等)在安全规定范围内。

核供热堆功率自动控制系统是调节控制棒升降引入反应性 ρ_r ,来调节堆功率 P_r ,实现负荷跟踪和阶跃快速响应;通过调节二回路流量 W_2 ,以维持堆出口水温 T_{out} (或上气室水温 T)恒定。

2 核供热堆功率自动控制系统的仿真

对于多输入多输出的非线性系统,采用几个单回路的PID方案或采用外部积分模型参考输入输出线性化控制,都不可能很好地解决非线性补偿问题,因为以上方法把系统分成几个回路,使本来是一个有机整体的系统形成分散联合体,产生互相不稳定性性和互相不协调问题,故只能补偿部分非线性关系。对本系统最好解决方法是把系统看成一个有机整体,采用现代控制理论,构成如图1的2输入2输出控制系统方案。

核供热堆功率自动控制系统根据 μ 控制理论^[1]给核供热堆设计一个“ μ 外环控制 + LQR 内环控制”控制系统(图2)。

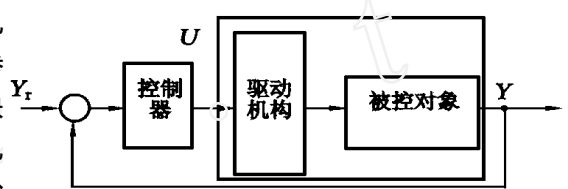


图1 2输入2输出的现代控制系统方案

Fig.1 2-input and 2-output modern control scheme
 Y_r ——给定值输入向量,包括堆功率 $P_{r,d}$,上气室温度 T_d ;
 Y ——被控制输出向量,包括堆功率 P_r ,上气室温度 T ;
 U ——控制输入向量,包括反应性 ρ_r ,二回路流量 W_2

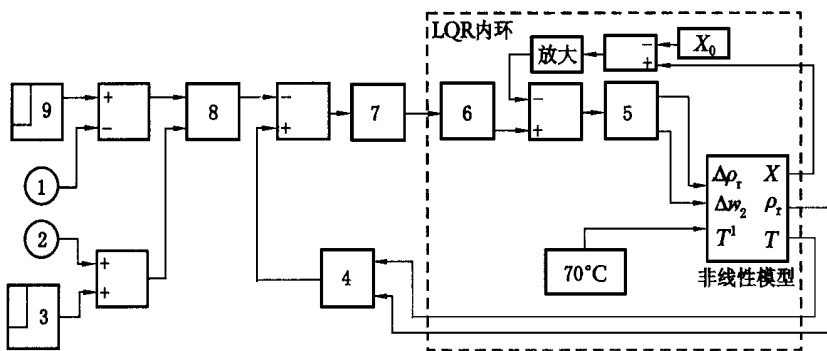


图2 “ μ 外环控制 + LQR内环控制”核供热堆控制系统仿真框图

Fig.2 “ μ -outer loop control and LQR inner-loop feedback” nuclear heating reactor's control simulation block

1——堆功率(输入值);2——堆出口水温(输入值);3——堆出口水温(给定值);4——多路调制器;
5——多路分离器;6——内环调制;7—— μ 控制器;8——多路调制器;9——堆功率定值器

“μ 外环控制 + LQR 内环控制”控制器是基于直接用线性系统理论去综合非线性系统,即在非线性系统各个稳定工作点处直接进行线性化,各点所得到的线性模型是不同的,但是,如果这些模型间的距离足够小,就可以设计一种固定控制器,使其对这一族模型具有鲁棒性。“μ 外环控制 + LQR 内环控制”可以解决这一问题。

设计 μ 控制器进行如下步骤:1) 要获得一个低阶线性标称模型,本系统根据物理含义的模型降阶和基于状态方程模型降阶法把 200 MW 核供热堆的 23 阶数学模型^[2]降为 13 阶标称模型;2) 确定输入相乘不确定权函数,对核供热堆功率运行范围两端(如 40 % 和 100 %)的高阶非线性模型进行线性化获得两个线性模型,这两个高阶线性模型与低阶线性标称模型相减,再除以标称模型,得到这两个输入相乘不确定性(用模型传递函数矩阵进行运算),要使一个控制器对多个线性模型产生类似控制效果,就要求在控制带宽范围内,所有这些模型与标称模型相乘不确定误差的频率响应幅度应小于 - 3 dB,系统增加了一个 LQR 内环反馈以缩小模型之间的误差;3) 设计指标的确定,设计指标用对象输出灵敏度加权函数 W_p 表示, W_p 函数给定原则是满足 $W_p(I + GK)^{-1} < 1$,这里, I 为 1 矩阵, K 为控制器矩阵, G 为不稳定系统模型矩阵,鲁棒控制的充要条件是 $W_p(I + GK)^{-1} < 1$,所以, $(I + GK)^{-1} > W_p$,在控制带宽 W_B 内,加权函数应该满足 $W_p \gg 1$,根据上述原则,本系统 W_p 由下式给出

$$W_p(s) = \begin{vmatrix} 50(62.5s + 1)/(12500s + 1) & 0 \\ 0 & 25(400s + 1)/(20000s + 1) \end{vmatrix}$$

用图 2 的控制系统,以 200 MW 核供热堆 23 阶数学模型为对象,在堆出口水温恒定不变(210 °C)稳态运行方式下,分别在 50 %、70 %和 90 %堆功率处,使堆功率阶跃 + 10 %,用 MATLAB 软件包^[3]进行仿真,所得结果示于图 3。

3 结论

- 1) 采用现代控制理论进行仿真试验,堆功率过度时间短(200 ms),几乎无超调,堆出口温度变化小(0.03 °C),需要引入反应性小。
- 2) 用现代控制理论,把系统看成一个有机整体,实现了系统多种非线性关系补偿。其效果比传统的 PID 方式优得多。
- 3) 采用现代控制理论研究核反应堆自动控制系统有很大的理论与应用前景。

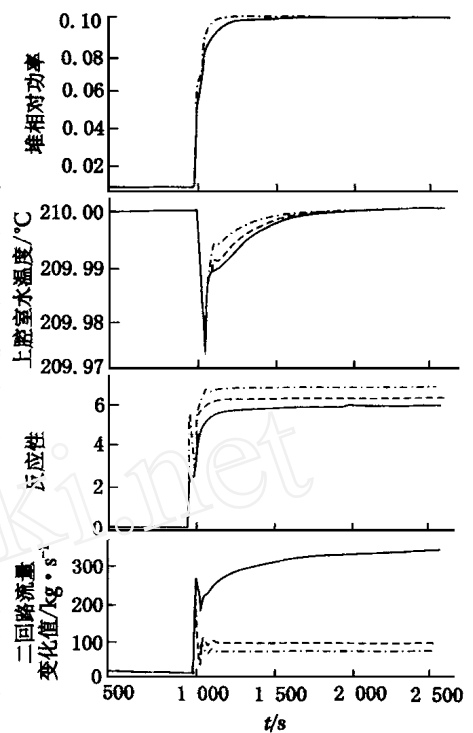


图 3 “μ 外环控制 + LQR 内环控制”对堆功率阶跃 + 10 % 时的响应曲线

Fig. 3 “μ-outer loop control and LQR inner-loop feedback” at power jump + 10 %, system dynamic curve
实线——90 % ~ 100 %;虚线——70 % ~ 80 %;
点划线——50 % ~ 60 %

参考文献:

- [1] Packard A, Doyle J, Balas G. Linear, Multivariable Robust Control With a μ Perspective[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1993, 115: 426~438.
- [2] 张玉爱, 马昌文, 居怀明. 200 MW 核供热堆的非线性动态模型[J]. 核动力工程, 1998, 19(4): 311~319.
- [3] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计——MATLAB 语言及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 6.

The Simulation Study on the Nuclear Heating Reactor's Power Auto-control System

YANG Zhi-jun, LIU Long-zhi, HU Gui-fen

(Institute of Nuclear Energy and Technology, Tsinghua University, Beijing 102201, China)

Abstract: The power automatic control system on nuclear heating reactor (NHR) is a multi-input & multi-output non-linear system. The power automatic control system on NHR is studied by modern control theory. Through the simulation experiments, it's clear that adopting μ outer-loop and LQR inner-loop feedback, the best control results are obtained.

Key words: nuclear heating reactor; automatic control system; modern control theory