

10 MW 高温气冷堆的集总参数动态模型

李海鹏, 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:应用基本的质量、能量和动量守恒原理,建立了 10 MW 高温气冷堆的动态数学模型。该模型采用了集总参数的建模方法,将反应堆按照不同热工水力学属性划分为多个节块,并采用了具有 6 组缓发中子的点堆中子动力学公式。对建立的模型进行了动态仿真。结果表明,所建立的模型能够用来进行反应堆的动态特性仿真。

关键词:10 MW 高温气冷堆;动态模型;集总参数;仿真

中图分类号:TL36 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2008)05-0442-05

Lumped Parameter Dynamic Model of 10 MW High-Temperature Gas-Cooled Reactor

LI Hai-peng, HUANG Xiao-jin, ZHANG Liang-ju

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

Abstract: Based on the fundamental conservation of mass, energy and momentum, a mathematical dynamic model of the 10 MW High-Temperature Gas-Cooled Reactor (HTR-10) was developed. The reactor was nodalized to a lot of sections which were lumped to display uniform thermal-hydraulic properties. The point kinetics equations with six precursor groups of delayed neutrons were coupled to the developed model. The transient simulation result shows that the model developed is effective to simulate the reactor dynamics.

Key words: 10 MW High-Temperature Gas-Cooled Reactor; dynamic model; lumped parameter; simulation

10 MW 高温气冷堆(HTR-10)是一座球床模式的实验堆^[1-2]。为研究高温气冷堆的动态特性,建立反应堆的动态数学模型是必需的。

目前,针对高温气冷堆的数学模型主要分为:1)分布参数模型^[3-7],主要用于反应堆的稳态热工水力设计、事故序列计算及安全评价等,

这种模型是详细的,但也是复杂的,不利于快速的仿真应用;2)集总参数^[8]模型,主要用于反应堆的快速实时仿真、控制特性研究以及控制系统的设计。

本文研究建立 10 MW 高温气冷堆集总参数动态数学模型,以用来研究反应堆的动态特性及进行反应堆控制系统设计。

1 物理描述

10 MW 高温气冷堆的堆体结构示于图 1^[2]。一回路冷却剂氦气进入压力壳后,向下流过堆芯和压力壳间的环形通道,在压力壳下部区域气流改变方向,一小部分气体流入卸料管,大部分气流绕过堆底的支撑结构,进入侧反射层石墨块内的冷却剂通道。氦气在冷却剂通道内自下向上流动。在反射层顶部,一回路冷却剂汇集于堆顶反射层上部的冷氦气联箱,主气流从堆顶自上而下相继流过堆芯和底反射层通道后流入反应堆底部热氦气联箱,不同温度的气流在热氦气联箱中得到充分混合后,通过热气导管流出反应堆压力壳^[1]。

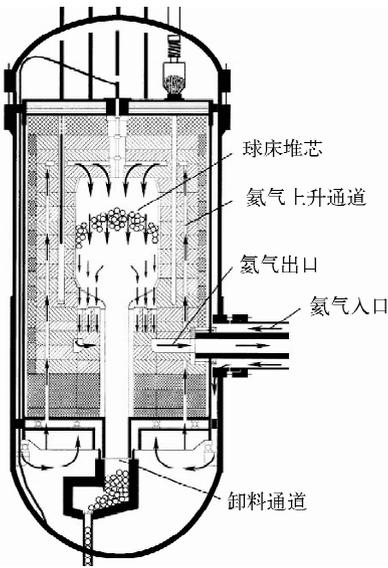


图 1 HTR-10 堆体结构示意图

Fig.1 Structure scheme of HTR-10

为建立集总参数的动态模型,现作如下假设:1) 所有氦气流道上的流体特性均匀;2) 换热特性采用单个平均通道计算;3) 不考虑流体质沿流动方向的传热;4) 模型应用于反应堆正常运行工况,未考虑启动停堆等工况。将反应堆划分为堆芯、反射层、下封头、下联箱、上升管、上联箱、下降管和出口联箱 8 个节块,结构示于图 2。

2 数学模型

集总参数描述的数学方程如下。

质量守恒:

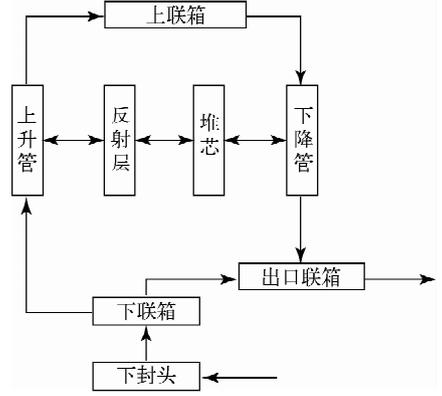


图 2 HTR-10 集总参数模块划分示意图

Fig.2 Nodalization scheme of lumped parameter dynamic model for HTR-10

$$\frac{dm}{dt} = G_{in} - G_{out} \quad (1)$$

能量守恒:

$$\frac{d(mh)}{dt} = G_{in}h_{in} - G_{out}h_{out} + Q_{in} - W \quad (2)$$

动量守恒:

$$p_{out} = p_{in} - \xi \frac{G_{in}^2}{\rho_{in}} \quad (3)$$

式中: m 为质量; G 为流量; h 为比焓; Q 为热量; W 为做功; p 为压力; ρ 为密度; ξ 为阻力压降系数;下标“in”和“out”分别表示输入和输出。

2.1 堆芯

反应堆堆芯是由燃料球组成的球床,为简化计算,将整个堆芯区域考虑成带有均匀空隙率的固体空间,裂变能在堆芯中产生并传递到向下流动的氦气中,同时向反射层固体传热。这一过程描述如下。

$$(1 - \epsilon_5)V_5\rho_c c_c \frac{dT_c}{dt} = P_{100}n_r -$$

$$\alpha_5 A_5 (T_c - T_5) - \alpha_{cr} A_{cr} (T_c - T_r) \quad (4)$$

式中: ϵ 为体积空隙率; V 为体积; c 为比热容; T 为温度; P_{100} 为额定功率; n_r 为相对中子密度(功率百分比); αA 为相应的换热系数;下标“5”为下降管;下标“c”为堆芯;下标“cr”为堆芯向反射层的传热。

整理可得:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{\rho_c c_c V_5 (1 - \epsilon_5)} [P_{100}n_r - \alpha_5 A_5 (T_c - T_5) - \alpha_{cr} A_{cr} (T_c - T_r)] \quad (5)$$

反应堆中子动力学方程采用具有6组缓发中子的归一化的模型,方程为:

$$\frac{dn_r}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n_r + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\Lambda} C_{ri} \quad (6)$$

$$\frac{dC_{ri}}{dt} = \lambda_i n_r - \lambda_i C_{ri} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (7)$$

式中: ρ 为反应性; β 为缓发中子份额; Λ 为中子代时间; C 为缓发中子先驱核密度; λ 为先驱核衰变常量。

反应性方程考虑了堆芯和反射层的温度反馈,其中,堆芯由燃料和石墨平均组成,同时考虑它们的反馈。总反应性为:

$$\rho = \rho_{rod} + (\alpha_f + \alpha_m)(T_c - T_{c0}) + \alpha_r(T_r - T_{r0}) \quad (8)$$

式中: ρ_{rod} 为控制棒引入的反应性; α_f 为燃料反应性系数; α_m 为慢化剂反应性系数; α_r 为反射层反应性系数;下标“r”表示反射层。

2.2 反射层

反射层接收堆芯的热传导,并与上升管的氦气对流换热,过程为:

$$V_r \rho_r c_r \frac{dT_r}{dt} = \alpha_{cr} A_{cr} (T_c - T_r) - \alpha_3 A_3 (T_r - T_3) \quad (9)$$

其中,下标“3”表示上升管。

整理得:

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{1}{\rho_r c_r V_r} [\alpha_{cr} A_{cr} (T_c - T_r) - \alpha_3 A_3 (T_r - T_3)] \quad (10)$$

2.3 下封头

假设下封头为一具有体积的均匀混合空间,不考虑压力损失,则:

$$V_1 \frac{d\rho_1}{dt} = G_{in} - G_1 \quad (11)$$

$$V_1 c_p \frac{d(\rho_1 T_1)}{dt} = G_{in} c_p T_{in} - G_1 c_p T_1 \quad (12)$$

$$\rho_{in} = \rho_1 \quad (13)$$

其中: c_p 为氦气比定压热容;下标“1”表示下封头。

将式(11)代入式(12),并整理得:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{G_{in}}{\rho_1 V_1} (T_{in} - T_1) \quad (14)$$

根据氦气的密度公式^[9],有:

$$\rho = 48.14 \frac{p}{T} \left(1 + 0.4446 \frac{p}{T^{1.2}}\right)^{-1} \quad (15)$$

将上式求导,得:

$$\frac{d\rho}{dt} = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \frac{dT}{dt} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T \frac{dp}{dt} \quad (16)$$

因压力-流量过程比焓-温过程快得多,这里将压力变化忽略,即:

$$\frac{dp}{dt} = 0 \quad (17)$$

这样,密度变化则为:

$$\frac{d\rho}{dt} = 48.14 \frac{p}{T} \left(1 + 0.4446 \frac{p}{T^{1.2}}\right)^{-1} \cdot \left[-\frac{1}{T} + \frac{0.4446 \times 1.2 \frac{p}{T^{2.2}}}{1 + 0.4446 \frac{p}{T^{1.2}}} \right] \frac{dT}{dt} \quad (18)$$

利用式(18),可不用将氦气密度作为状态变量,从而大幅降低了反应堆数学模型的阶数。

2.4 下联箱

下联箱的作用是描述氦气在堆芯底部的漏流。一小部分氦气从这里直接进入卸料管流出反应堆,大部分进入上升管。过程为:

$$G_{23} = G_1 (1 - \beta_2) \quad (19)$$

$$G_{26} = G_1 \beta_2 \quad (20)$$

$$T_2 = T_1 \quad (21)$$

$$p_2 = p_1 \quad (22)$$

式中: β 为泄漏率;下标“2”表示下联箱。

2.5 上升管

在上升管内,冷氦气自下向上流动,并与反射层换热,相应的过程为:

$$V_3 \frac{d\rho_3}{dt} = G_{23} - G_3 \quad (23)$$

$$V_3 c_p \frac{d(\rho_3 T_3)}{dt} = G_{23} c_p T_2 - G_3 c_p T_3 + \alpha_3 A_3 (T_r - T_3) \quad (24)$$

$$p_3 = p_2 - \xi_3 \frac{G_{23}^2}{\rho_2} \quad (25)$$

将式(23)代入式(24),得:

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{\rho_3 c_p V_3} [G_{23} c_p (T_2 - T_3) + \alpha_3 A_3 (T_r - T_3)] \quad (26)$$

2.6 上联箱

在上联箱内,上升管来的氦气来流充分混合后,被平均分配到下降管中,这里简单描述为:

$$G_4 = G_3 \quad (27)$$

$$T_4 = T_3 \quad (28)$$

$$p_4 = p_3 \quad (29)$$

式中:下标“4”表示上联箱。

2.7 下降管

在下降管中,冷氦气自上而下流过堆芯的空隙,将堆内的热量带走,达到冷却堆芯和传递能量的作用。该过程为:

$$\epsilon_5 V_5 \frac{d\rho_5}{dt} = G_4 - G_5 \quad (30)$$

$$\epsilon_5 V_5 c_p \frac{d(\rho_5 T_5)}{dt} = G_4 c_p T_4 - G_5 c_p T_5 + \alpha_5 A_5 (T_c - T_5) \quad (31)$$

$$p_5 = p_4 - \xi_5 \frac{G_4^2}{\rho_4} \quad (32)$$

将式(30)代入式(31),得:

$$\frac{dT_5}{dt} = \frac{1}{\rho_5 c_p \epsilon_5 V_5} [G_4 c_p (T_4 - T_5) + \alpha_5 A_5 (T_c - T_5)] \quad (33)$$

2.8 出口联箱

出口联箱有2个入口流量,分别为下联箱的泄漏流和下降管的流量。过程为:

$$V_6 \frac{d\rho_6}{dt} = G_5 + G_{26} - G_6 \quad (34)$$

$$V_6 c_p \frac{d(\rho_6 T_6)}{dt} = G_5 c_p T_5 + G_{26} c_p T_2 - G_6 c_p T_6 \quad (35)$$

$$p_6 = p_5 \quad (36)$$

式中:下标“6”表示出口联箱。

将式(34)代入式(35),得:

$$\frac{dT_6}{dt} = \frac{1}{\rho_6 V_6} [G_5 (T_5 - T_6) + G_{26} (T_2 - T_6)] \quad (37)$$

2.9 状态空间模型描述

选择氦气入口压力 p_m 、氦气入口流量 G_m 、氦气入口温度 T_m 和控制棒引入反应性 ρ_{rod} 共4个变量作为输入变量。

同时选择中子相对密度 n_r 、缓发中子先驱核相对密度 C_{ri} ($i=1, 2, \dots, 6$)、下封头温度 T_1 、上升管温度 T_3 、下降管温度 T_5 、出口联箱温度 T_6 、堆芯温度 T_c 和反射层温度 T_r 共13个变量为状态变量,则式(5)、(6)、(7)、(10)、(14)、(26)、(33)和(37)组成了反应堆动态数学模型的状态方程。

这些状态方程和相应的代数方程共同组成了反应堆的状态空间动态模型。

3 模型仿真

为对得到的模型进行验证,对上面建立的

数学模型进行了阶跃、斜坡等输入仿真实验,得到相应的动态结果。仿真模型中相应的参数及关系式详见文献[9],其中,关键参数如下。

1) 堆芯均匀空隙率 $\epsilon=0.39$; 进入卸料管的氦气泄漏率 $\beta=0.1$ 。

2) 换热公式

下降通道换热公式采用德国安全导则 KTA3102.2 所规定的公式, $Nu=1.27 \frac{Pr^{1/3}}{\epsilon^{1.18}} \cdot Re^{0.36} + 0.033 \frac{Pr^{1/2}}{\epsilon^{1.07}} Re^{0.86}$; 上升通道采用单

项氦气流动换热公式, $Nu=0.094 Re^{0.72} Pr^{0.33}$ 。

3) 压降公式

球床堆芯下降通道的压降公式采用德国安全导则 KTA3102.3 规定的计算公式, $\frac{\Delta p}{\Delta H} = \Psi \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{1}{2\rho} \cdot \left(\frac{m}{A}\right)^2$, 其中, $\Psi = \frac{320}{Re} + \frac{6}{\left(\frac{Re}{1-\epsilon}\right)^{0.1}}$ 。

4) 氦物性公式

采用德国安全导则 KTA3102.1 规定的计算公式。

作为例证,现考察一典型的动态工况:在100%额定功率下,其它入口参数不变,在第50s阶跃引入5分(0.05 β)的正反应性,观察系统出口各参数的变化情况(图3)。

开始时,系统处于稳态,控制棒反应性为零。当在第50s阶跃引入反应性后,由于中子动力学的作用,瞬发中子迅速增加,导致反应堆功率迅速上升,从而使得堆芯温度迅速上升。由于堆芯向氦气的传热作用,使得氦气温度上升,氦气温度的上升导致流动阻力的加大,从而出口压力有所降低。堆芯温度的升高也引起了反射层温度的升高,但因反射层是由大量具有大热容量的石墨组成,所以,反射层温度上升缓慢。堆芯和反射层的温度负反馈效应使得功率上升到一最大值后开始渐渐震荡回落到一稳态值,其它出口参数也相应震荡回落到各自的新的稳态值。石墨反射层具有很大的热容量,其动态过程较长,动态时间约为 5×10^4 s,而其它反应堆动态时间较短,约为350s。

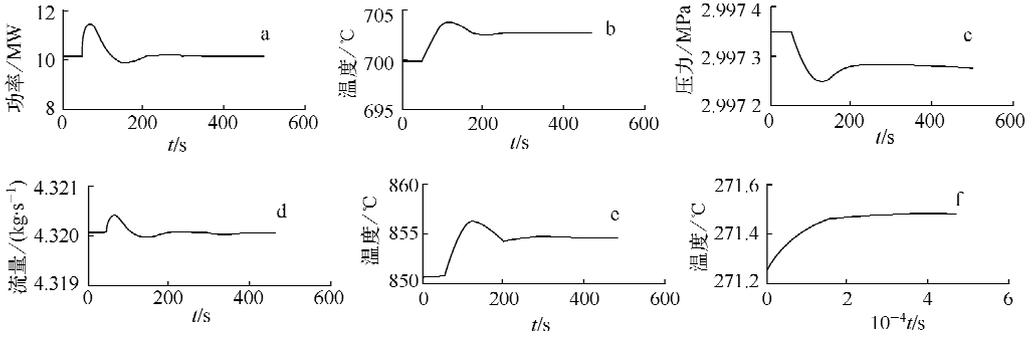


图3 100%额定功率下控制棒阶跃引入5分反应性时的系统瞬态响应

Fig. 3 Transients due to 5 cents step of control rod reactivity at 100% rated power

a——堆热功率;b——氦气出口温度;c——氦气出口压力;
d——氦气出口流量;e——堆芯温度;f——反射层温度

4 结论

动态仿真验证表明,本文针对10 MW高温气冷堆建立的集总参数动态数学模型能够正确反映反应堆正常运行工况范围内的动态特性,模型可用来进行反应堆的动态特性仿真及作为控制系统设计的基础。

参考文献:

- [1] XU Y. HTGR advances in China[J]. Nuclear Engineering International, 2005, 50(608): 22-25.
- [2] 刘俊杰,王敏稚,张征明,等. 10 MW高温气冷实验堆的堆体结构特点[J]. 核动力工程, 2001, 22(1): 53-56.
LIU Junjie, WANG Minzhi, ZHANG Zhengming, et al. Features of reactor structure design for 10 MW High-Temperature Gas-Cooled Reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(1): 53-56(in Chinese).
- [3] 黄晓津. 10 MW高温气冷堆的动态建模及动态特性的仿真研究[D]. 北京:清华大学自动化系, 1998.
- [4] 黄晓津. 先进模块式高温气冷堆的建模、仿真研究以及实时仿真系统的研制及其应用[R]. 北京:清华大学核能与新能源技术研究院, 2000.
- [5] GAO Z, SHI L. Thermal hydraulic calculation of the HTR-10 for the initial and equilibrium core[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218: 51-64.
- [6] GAO Z, SHI L. Thermal hydraulic transient analysis of the HTR-10[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218: 65-80.
- [7] WOLF L. High temperature reactor core physics and reactor dynamics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 121: 227-240.
- [8] 黄晓津,冯元琨. HTR-10堆芯的工程化动态模型[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2002, 42(增刊): 32-35.
HUANG Xiaojin, FENG Yuankun. Dynamic engineering model of the HTR-10 reactor core[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2002, 42(Suppl.): 32-35(in Chinese).
- [9] INET. 10 MW高温气冷实验堆反应堆热工水力设计[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院, 2001.