

# 钠冷快堆中间回路建模仿真及流量控制研究

张厚明<sup>1</sup>, 姚远<sup>2,\*</sup>, 段天英<sup>3</sup>, 李茂林<sup>2</sup>, 熊文彬<sup>2</sup>, 高强<sup>2</sup>

(1. 国家核安全局 华北核与辐射安全监督站, 北京 100191; 2. 环境保护部 核与辐射安全中心, 北京 100082;  
3. 中国原子能科学研究院 中国实验快堆工程部, 北京 102413)

**摘要:** 针对钠冷快堆中间回路泵、管道、换热器等, 采用 Matlab/Simulink 软件建立了一种仿真模型, 对回路的流量和管道换热进行了计算。根据相似理论、泵水力特性曲线及回路压力损失等计算流量。编制了 SFAC V1.0 程序, 该程序的计算结果与实验值符合较好, 最大相对误差为 5%。将管道划分为不同节段, 在各节段上建立能量守恒微分方程组, 从而建立了管道换热计算的模型。同时, 对钠流量的控制方式进行了设计和改进, 对控制参数进行了整定, 并对流量需求进行了计算。计算结果表明, 该控制方式的控制品质较高。

**关键词:** 钠冷快堆; 中间回路; 建模; 仿真; Matlab/Simulink 软件; 流量控制

**中图分类号:** TL374.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2013)12-2283-05

**doi:** 10.7538/yzk.2013.47.12.2283

## Research on SFR Intermediate Loop Modeling, Simulation and Flow Control

ZHANG Hou-ming<sup>1</sup>, YAO Yuan<sup>2,\*</sup>, DUAN Tian-ying<sup>3</sup>, LI Mao-lin<sup>2</sup>,  
XIONG Wen-bin<sup>2</sup>, GAO Qiang<sup>2</sup>

(1. North Regional Office, National Nuclear Safety Administration, Beijing 100191, China;  
2. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China;  
3. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-34, Beijing 102413, China)

**Abstract:** In this paper, a simulation model composed of sodium flow calculation model and thermal analysis model was developed for sodium-cooled fast reactor intermediate loop flow and thermal analysis using Matlab/Simulink software. Sodium flow calculation model was based on similarity theory, hydraulic performance characteristic of pump and pressure drop of intermediate loop, and SFAC V1.0 was programmed. The sodium flow calculated by this code is in good agreement with the experimental data, and the maximum relative error is about 5%. The pipeline was divided into several segments and differential equations for energy conversation on each segment were established, resulting in a heat transfer calculation model for pipeline. The sodium flow control was also studied in this research, and control parameters were set by tuning

收稿日期: 2013-09-13; 修回日期: 2013-10-22

作者简介: 张厚明(1982—), 男, 山东滕州人, 工程师, 博士, 主要从事核电厂控制、仿真研究

\* 通信作者: 姚远, E-mail: YaoYuan@chinansc.cn

methodology. The flow regulation was simulated to evaluate this strategy, and the control quality of this strategy is rather high.

**Key words:** sodium-cooled fast reactor; intermediate loop; modeling; simulation; Matlab/Simulink software; flow control

钠冷快中子增殖堆(简称快堆)热传输系统与压水堆不同,一般采用三回路布置。其中,一回路和中间回路为钠回路,三回路为水-汽回路,中间回路是为隔离一回路放射性钠和三回路水而设置的。这种布置使得快堆热传输系统较压水堆延迟时间长,且在运行过程中多采用流量跟随负荷变化的方式;同时,蒸汽温度或压力也采用调整钠流量的方式使其维持在给定范围内<sup>[1-5]</sup>。因此,基于热工和控制两方面的考虑,应建立一种通用的钠回路流量、热工计算仿真模型,同时将建模及仿真研究的成果用于设计工程仿真机、全范围仿真机,为操纵员提供培训。另外,仿真模型在高速计算机上运行,通过实时采集快堆核电厂数据提前计算出各参数的运行趋势,从而为操纵员提供技术支持。因此,快堆建模及仿真研究具有重要意义。

以往对快堆的建模及仿真研究集中于安全分析领域,如 SASSYS 软件等。对于具体的建模研究,以管道建模为例,PDAC-6<sup>[1]</sup>程序中的管道模型考虑了管道的延迟,将管道分为不同的节段,忽略交混,同时考虑了冷却剂与管道之间的换热。DYNAM<sup>[2-3]</sup>程序中的管道模型考虑了管壁潜热、管壁与外界的换热。EPRI-CURL<sup>[4]</sup>程序中的管道模型考虑了管壁与钠流的换热,采用管道节段上的出入口能量守恒方程,同时假设管道与外界绝热。目前,我国尚未获得上述程序或开发相关程序用于快堆控制系统研究,因此本工作对该问题进行研究并编制相应的计算程序。

## 1 基本原理

以往对控制系统进行设计时,一般采用传递函数的方法建立系统模型,对于工艺参数较多、换热工况较为复杂的系统,不能较为精确地计算<sup>[5]</sup>。本文对这种情况进行了进一步研究,以快堆中间回路为例,回路的主要部件有钠泵、管道、中间热交换器和直流蒸汽发生器等,如图1所示。钠泵为回路提供压头,其他均为压

力损耗部件。将中间热交换器、直流蒸汽发生器进行简化,不考虑其内部复杂的流场分布,仅对其压力耗损部件进行考虑,那么两者可简化为压力耗损部件的串联、并联等关系。

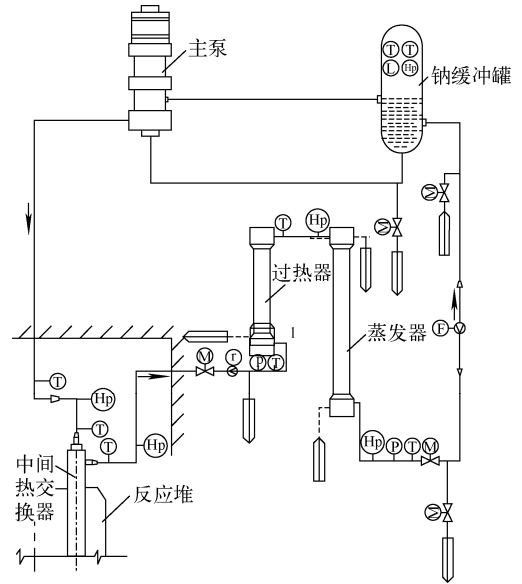


图1 钠冷快堆中间回路

Fig. 1 Intermediate loop of sodium-cooled fast reactor

泵的主要参数有流量、扬程、功率、效率及汽蚀余量等。由于其内部流动的复杂性,至今不能用理论计算的方法精确计算出各参数间的关系,而采用实验的方法确定,称之为性能曲线。性能曲线由制造厂商给出,包括流量-扬程、流量-效率等曲线。本文主要关注流量、扬程和泵转速间的关系。

根据相似理论,对于给定的泵,流量-扬程曲线确定,其转速与流量、扬程的关系<sup>[6]</sup>为:

$$q'_p = q_{p,0} \frac{\omega'_p}{\omega_{p,0}} \quad (1)$$

$$h'_p = h_{p,0} \left( \frac{\omega'_p}{\omega_{p,0}} \right)^2 \quad (2)$$

其中: $\omega_{p,0}$ 、 $\omega'_p$ 分别为初始、目标转速; $q_{p,0}$ 、 $q'_p$ 分别为初始、最终流量; $h_{p,0}$ 、 $h'_p$ 分别为初始、最终压头。

流量-扬程曲线根据文献[7]给出的泵特性曲线拟合得出。泵及飞轮的转速可表示为:

$$\frac{d\omega'_p}{d\tau} = \frac{\omega'_p - \omega_{p,0}}{\tau_p} \quad (3)$$

其中: $\tau$ 为时间; $\tau_p$ 为时间常数。

根据上述假设,并考虑冷却剂在管道内流动的时间延迟,将管道分为不同节段,根据能量守恒方程,在某节段上对于管壁和冷却剂分别有:

$$m_{p,i}c_{p,i} \frac{dt_{p,i}}{d\tau} = h_{p,i}(t_{f,i} - t_{p,i}) \quad (4)$$

$$m_{f,i}c_{f,i} \frac{dt_{f,i}}{d\tau} = w_{f,i}c_{f,i}(t_{f,i} - t_{f,o}) - h_{p,i}(t_{f,i} - t_{p,i}) \quad (5)$$

其中: $m_{p,i}$ 、 $m_{f,i}$ 分别为管壁和节段内钠的质量; $c_{p,i}$ 、 $c_{f,i}$ 分别为管壁和节段内钠的平均比热容; $w_{f,i}$ 为节段内钠的质量流量; $t_{f,i}$ 为节段内钠的温度; $t_{f,i}$ 为节段内钠的入口温度; $t_{p,i}$ 为节段内管壁的平均温度; $h_{p,i}$ 为管壁和钠之间的换热系数。

在某节段上冷却剂传输产生的时间延迟为:

$$t_{f,i}(\tau) = t_{f,i}(\tau - \tau_i) \quad (6)$$

其中, $\tau_i = m_{p,i}/w_{f,i}$ 。

其中,钠传热 Nusselt 数采用 Subbotin 关系式<sup>[8]</sup>计算:

$$Nu = 5.0 + 0.025Pe^{0.8} \quad (7)$$

根据 Darcy-Weisbach 公式<sup>[9]</sup>,钠沿管壁的压头损失  $h_f$  为:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

式中: $\lambda$ 为摩擦系数; $l$ 为管道长度; $d$ 为管道直径; $v$ 为流速; $g$ 为重力加速度。

对于 90°支管,其压头损失<sup>[9]</sup>为:

$$h_f = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

其中, $\zeta$ 为局部阻力系数。 $\zeta$ 及其他弯管、孔板等节流件及其他压头损失计算公式见文献<sup>[9]</sup>,钠、管壁材料的物性参数来自文献<sup>[10-11]</sup>。

## 2 计算程序及热工水力模型

根据上述讨论,依据守恒定律,泵提供的压头增量与钠回路流量压力损失相同。初始工况下,在某转速下泵提供的压头与系统压力损失相同,从而确定系统流量;泵转速变化时,其压力变化导致流量变化,重新建立压力平衡。依

据这一思路,采用 Matlab 软件编制钠流量计算程序 SFAC V1.0 (sodium flow analysis code, Version 1.0)。

同样,根据式(4)~(7)采用 Matlab/Simulink 软件建立管道某节段的热工模型,如图 2 所示,模型中考虑了温度随流量的延迟效应,再将各节段依次串联起来,也即建立了管道的热工模型。根据式(3)建立泵转速模型,如图 3 所示。根据泵模型及 SFAC V1.0 程序建立钠回路流量计算模型,如图 4 所示。图 2 中的管道热工模型及图 4 中的流量计算模型组合起来即为钠回路热工水力模型。该模型不仅可计算系统的流量变化,同时也可计算管道出口温度随管道入口温度、流量及管壁温度的变化。

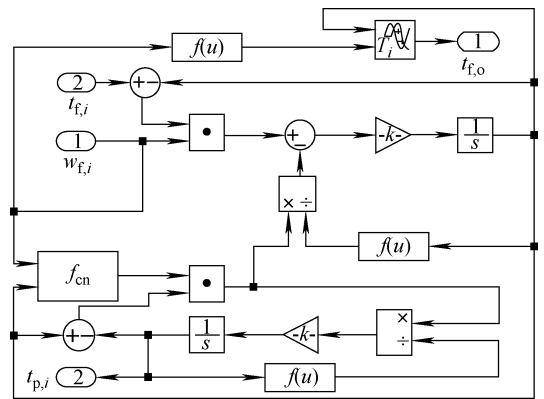


图 2 管道节段 i 的热工模型

Fig. 2 Thermal model of segment i in pipe

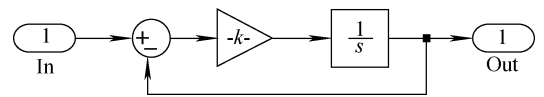


图 3 泵模型

Fig. 3 Pump model

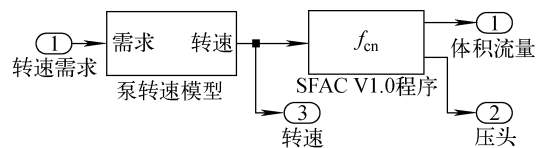


图 4 钠回路流量模型

Fig. 4 Sodium loop flow model

根据所建立的模型对快堆中间回路流量进行计算,中间回路部件较一回路更多,主要包括

管道、泵、钠缓冲罐、中间热交换器和直流蒸汽发生器等。计算结果与实验值<sup>[12]</sup>的比较示于图 5a。由图 5a 可见:流量计算结果与实验测量结果符合较好,其最大相对误差约为 5%;在泵低转速时其相对误差较大,而在泵高转速时则很小。以上结果表明,本程序计算结果精确性较高,完全可满足工程应用的需要。采用上述模型计算中间热交换器出口(中间回路热段管道入口)温度在 10 s 时刻阶跃降低 10 °C,蒸汽发生器入口(中间回路热段管道出口)温度的变化示于图 5b,其管道延迟时间与文献[7]给出的相同。对于热工模型,在后续的工作中将进一步采用实验数据对模型进行验证。

### 3 流量控制

根据流量控制模型,提出一种与中国实验快堆目前采用的流量控制不同的控制方式,如图 6 所示。中国实验快堆目前采用的流量控制方式为开环控制,且不包括负荷-流量函数发生器。

本文所设计的流量控制系统采用前馈和反馈控制。前馈控制的信号来自负荷-泵转速函数发生器,在负荷改变时,快堆监测控制系统根

据负荷需求及其他参数,通过负荷-泵转速函数发生器直接给出泵转速信号,用于快速改变泵转速。通过泵转速反馈控制系统使得泵转速迅速改变至需求值,从而对钠流量进行快速、粗略的调节,此调节方式为前馈控制,也即开环控制。对于系统反馈控制是通过快堆监测控制系统的负荷-流量函数发生器给出流量需求信号,通过流量需求信号与当前流量计所测流量进行比较,两者差值通过 PID 调节系统、泵转速控制系统对泵转速进行调节,从而使流量达到所需流量值。

所设计的流量控制系统采用的前馈、反馈控制方式兼顾了流量快速改变及控制精度的要求,较中国实验快堆目前采用的流量控制方式更为优越。通过负荷与泵转速、流量的关系,本文拟合了负荷-泵转速、负荷-流量函数,同时对控制参数进行了整定。采用这种控制方式对中间回路 100%~90% 流量阶跃需求及 100%~40% 流量-3%/min 线性需求进行计算,在前馈开环和反馈闭环控制下计算的结果示于图 7。计算结果表明,该流量控制系统的控制品质较高。

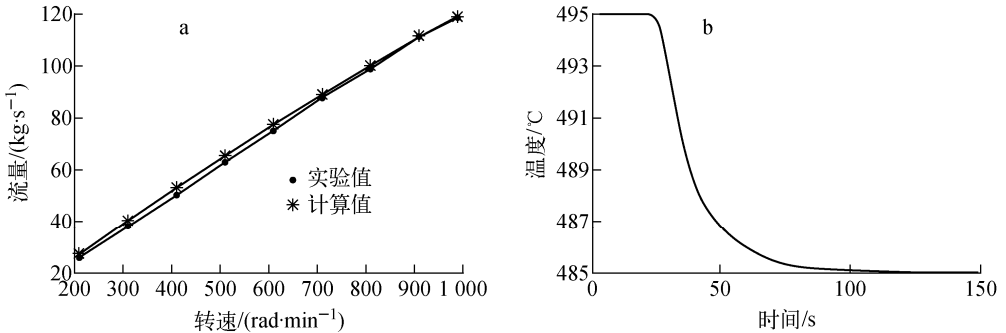


图 5 采用模型计算的流量及温度

Fig. 5 Flow and temperature calculated with model

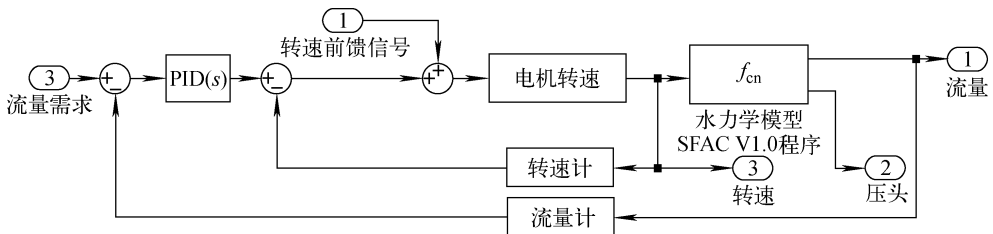


图 6 钠流量控制

Fig. 6 Sodium flow control

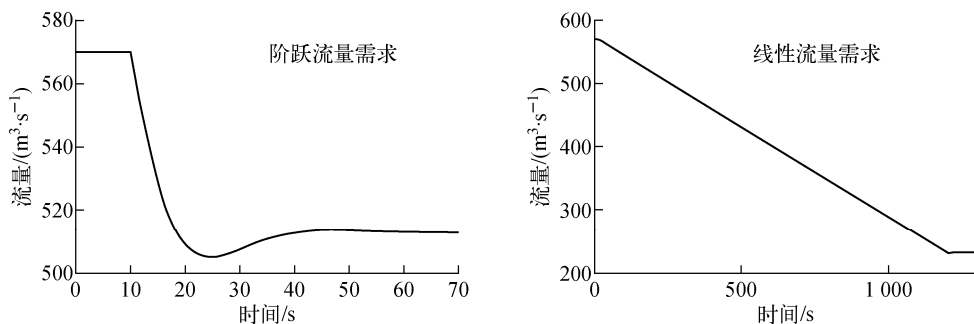


图7 流量控制计算结果

Fig.7 Calculated result of flow control

## 4 结论

本文使用 Matlab/Simulink 软件建立了管道的热工水力模型以及钠回路流量计算程序和模型,为未来示范、商用快堆核电厂的设计提供了技术基础。本模型可用于钠回路的热工水力设计及快堆核电厂的控制系统设计。

对于钠流量控制,提出一种前馈、反馈控制相结合的调节方式,这种方式控制品质较高。

应指出,管道热工水力模型中未考虑压力传播与流量建立之间的延迟,且由于钠流速较高,因此忽略了节段之间的交混。同样,由于管道外包覆有绝热材料,绝热效果很好,因此忽略管壁向环境的散热。未来将对上述问题进行深入研究以便获取更加精确的模型。

## 参考文献:

- [1] FURUICHI K, KOHATA Y, NAKAMURA K, et al. Dynamic analysis and control system design of a LMFBR plant [C] // Proceedings of 1st Power Plant Dynamics, Control and Testing Symposium. USA: [s. n.], 1973.
- [2] RAJAKUMAR A, VAIDYANATHAN G. Simulation and control studies for FBTR steam/water system [C] // Proceedings of 6th Power Plant Dynamics, Control and Testing Symposium. USA: [s. n.], 1986.
- [3] VAIDYANATHAN G, KASINATHAN N, VELUSAMY K. Dynamic model of fast breeder test reactor [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2010, 37(4): 450-462.
- [4] RAHBAR M K, CADY K B. Dynamical models and numerical simulation of system-wide transients in loop-type LMFBRs [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1981, 64(2): 259-281.
- [5] 张厚明,段天英,刘国发. 池式钠冷快堆电厂运行方案仿真研究 [J]. *核科学与工程*, 2011, 31(1): 28-40.  
ZHANG Houming, DUAN Tianying, LIU Guofa. Study on operation simulation for PSFRB [J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2011, 31(1): 28-40 (in Chinese).
- [6] LOBANOFF V S, ROSS R R. Centrifugal pumps, design & application [M]. USA: Gulf Publishing Company, 1992: 12-27.
- [7] 中国实验快堆最终安全分析报告 [R]. 北京:中国原子能科学研究院, 2008.
- [8] SUBBOTIN V I, PAPOVYANTS A K, KIRILLOV P L, et al. A study of heat transfer to molten sodium in tubes [J]. *Atomic Energy*, 1963, 13(4): 991-994.
- [9] 孔珑. 工程流体力学 [M]. 北京:中国电力出版社, 1992: 102-155.
- [10] 中国特钢企业协会不锈钢分会. 不锈钢实用手册 [M]. 北京:中国科学技术出版社, 2003: 474, 510, 555.
- [11] 居怀明,徐元辉,李怀萱. 载热质热物性计算程序及数据手册 [M]. 北京:原子能出版社, 1990: 92-99.
- [12] 骆学军. 中国实验快堆工程调试报告——二回路钠循环泵调试 [R]. 北京:中国原子能科学研究院, 2009.