

基于节点模型的空间堆系统动态特性分析

李华琪, 胡攀, 杨宁, 朱磊, 田晓艳, 陈立新, 江新标

西北核技术研究所, 西安, 710024

摘要：建立集总参数法的碱金属冷却空间堆系统动态特性分析的节点模型，利用 Simulink 软件开发了空间堆系统动态特性分析程序，并利用设计参数对程序进行验证。分析了控制鼓转角和外部负载电阻阶跃变化时的系统动态响应特性。结果显示：在控制鼓角度阶跃变化引入正反应性时，堆芯功率迅速上升后由于负反馈而达到新的稳定状态，但热电偶（TE）电功率的输出有一定的延迟。在外部负载电阻阶跃变化时，TE 热电转换电功率输出快速升高，使得 TE 热端温度升高，堆芯温度升高，由于负反应反馈导致堆芯温度下降。比较两者瞬态响应，外部负载电阻的变化较控制鼓角度的变化引起 TE 电功率输出的响应要快速。

关键词：节点模型；空间堆；动态特性
中图分类号：TL331 **文献标志码：**A

Development of A Nodal Model for Space Reactor System Dynamic Characteristics Analysis

Li Huaqi, Hu Pan, Yang Ning, Zhu Lei, Tian Xiaoyan,
Chen Lixin, Jiang Xinbiao

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024, China

Abstract : A lumped parameter method nodal model is developed for alkali metal cooled space reactor system dynamic characteristics analysis in this paper. The space reactor system dynamic response code was built by using Simulink, and the code was approved with steady state designed parameters. The transient response of space reactor was studied on the step responses of the increase in the drum angle and external load. The results show that the power increased rapidly, and then the power increased slowly to a final new steady state because of the core reactivity temperature feedback. When increased in external load, the TE electric power output increased rapidly and a great negative reactivity was brought to the core, thus the core underwent a rapid power decrease and core fuel temperature decreased. The TE electric power output responds to the change in external load in a much faster spend than the change in control angle.

Key words : Nodal model, Space reactor, Dynamic characteristics

0 前言

空间核反应堆电源（简称空间堆）是未来大功率、长寿命、小质量、高可靠性空间电源的最佳选择之一^[1]。为了满足空间任务的安全、可靠及寿命预期的要求，自动和半自动控制是空间堆设计的关键^[2]。而空间堆控制系统的基本要求是在不同运行模式下获得稳定的控制以及增强这些

运行模式转换瞬态的稳定，因此，空间堆自动控制的关键是获得其在不同瞬态的动态特性响应。本文以碱金属冷却、热电偶（TE）热电转换的空间堆^[3]为对象，建立了集中参数法的碱金属冷却空间堆系统动态特性分析的节点模型，并对控制鼓转角和外部负载阶跃变化的瞬态响应进行分析模拟。

1 空间堆系统及分析模型

1.1 碱金属冷却空间堆系统简介

碱金属冷却空间堆系统由核反应堆、泵送热传输系统、TE 热电转换和废热排放系统组成。堆芯采用高富集度 (93%) 的氮化铀 (UN) 燃料封装在包壳内, 堆芯反射层为氧化铍。

通过无转动部件的密封电磁泵 (EM) 驱动液态锂来导出堆芯的热量。因锂导热性好和 1350 K 时低蒸汽压而选择为冷却剂。一回路系统与能量转换系统之间通过热交换器换热。电磁泵泵送一回路冷却剂从堆芯进入热交换器的热端。在一回路热交换器中, 冷却剂流量在每一热交换器 30 个流道分布。大约 480 个 TE 单元在每一流道表面。当热量从流道表面传递给 TE 单元, 冷的流体从冷端收集流出一回路热交换器。在空间堆设计中, 3 条回路将热量传给 TE 部件。TE 单元通过二回路将废热传递给热管辐射散热器排向太空。

建立碱金属冷却空间堆动态特性分析的节点模型, 包含中子动力学模型、反应堆控制机理模型、堆芯传热模型、一回路热交换器模型、TE 热电转换模型和辐射散热器模型。

1.2 中子动力学模型

利用 6 组缓发中子点堆动态方程^[4]模拟堆芯功率随反应性的瞬变过程, 求解点堆动力学方程的动态参数参见文献^[5]。空间堆的反应性温度反馈主要来源为: 燃料芯块、燃料包壳、堆芯结构材料、反射层、锂、屏蔽体等^[6]。本文主要计算燃料的多普勒效应、燃料膨胀的反应性反馈和堆芯冷却剂膨胀反应性反馈^[4], 公式如下:

$$\begin{aligned} \rho(t) &= \rho_{CD} + \rho_{feedback} \\ &= \rho_{CD} + \alpha_D \ln(T_f/T_{f,0}) + \alpha_F (T_f - T_{f,0}) + \\ &\quad \alpha_{clad} (T_{clad} - T_{clad,0}) + \alpha_C (T_C - T_{C,0}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, t 为时间; ρ_{CD} 为控制鼓引入的反应性; $\rho_{feedback}$ 为反应性反馈; α_D 为燃料多普勒反应性系数, 2.4×10^{-7} ; α_F 为燃料膨胀反应性系数, $\alpha_F = -1.22 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$; α_{clad} 为燃料包壳膨胀反应性系数, $1.20 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$; α_C 为堆芯冷却剂膨胀反应性系数, $\alpha_C = -3.25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; T_f 为燃料温度, K; T_{clad} 为燃料包壳温度, K; T_C 为冷却剂温度, K; 下标: 0 为初始时刻。

1.3 反应性控制机理模型

外部反应性控制的方法是利用步进电机控制鼓系统的机理^[7]。控制鼓转轴可在 $0 \sim 180^\circ$ 内旋转。控制电压为一系列频率为 $0 \sim 1.33 \text{ Hz}$ 变化的电压为 27 V 的矩形脉冲。这个脉冲电压转换为转轴离散的运动来控制转鼓。步进电机转轴的位置方程如下:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 1.01 \frac{d\theta}{dt} = 0.525u \quad (2)$$

式中, u 为控制电压, V; θ 为步进电机的轴转角; t 为时间。

ρ_{CD} 可以拟合为 θ 的多项式函数^[7], 如下:

$$\begin{aligned} \rho_{CD} &= 6.89 \times 10^{-13} \theta^5 - 2.33 \times 10^{-10} \theta^4 + 3.28 \times \\ &\quad 10^{-9} \theta^3 + 4.57 \times 10^{-6} \theta^2 - 5.88 \times 10^{-5} \theta \end{aligned} \quad (3)$$

式中, θ 的取值范围为 $0 \sim 180^\circ$ 。

1.4 堆芯传热模型

建立了集总参数的堆芯简化传热模型来计算燃料、包壳、堆芯冷却剂的平均温度。 T_f 、 T_{clad} 、 T_C 可通过以下常微分方程组计算:

$$\begin{cases} \frac{dT_f}{dt} = \frac{1}{C_f} [P_n - (T_f - T_{clad})UA_f] \\ \frac{dT_{clad}}{dt} = \frac{1}{C_{clad}} [(T_f - T_{clad})UA_f - (T_{clad} - T_C)UA_{clad}] \\ 0.5 \frac{dT_C}{dt} = \frac{1}{C_C} [0.5(T_{clad} - T_C)UA_{clad} - \dot{m}_C C_p (T_C - T_{Pout})] \\ 0.5 \frac{dT_{Pin}}{dt} = \frac{1}{C_C} [0.5(T_{clad} - T_C)UA_{clad} - \dot{m}_C C_p (T_{Pin} - T_C)] \end{cases} \quad (4)$$

式中, T_{Pout} 为堆芯冷却剂进口温度/一回路热交换器出口温度, K; P_n 为堆芯功率; C_f 为一回路热交换器热容; T_{Pin} 为堆芯冷却剂出口温度/一回路热交换器进口温度, K; \dot{m}_C 为堆芯冷却剂流量, kg/s; C_C 为冷却剂热容, J/K; C_f 为燃料热容, J/K; C_{clad} 为燃料包壳热容, J/K; UA_f 为燃料与包壳之间的等效热导, W/K; UA_{clad} 为燃料包壳与堆芯冷却剂之间的等效热导, W/K。

1.5 一回路热交换器热模型

一回路热交换器热模型与 TE 单元模型相耦合。从一回路热交换器排出的热量取决于 TE 单元热端的温度, 而在 TE 模型的热源则决定于一回路热交换器内流体温度。虽然热交换器一个流道表面耦合 480 个 TE 单元, 但在建模时, 采用一个单元节点来描述 TE 单元导出的热量。基于

这一假设，一回路热交换器的能量守恒方程为：

$$\frac{dT_{\text{Pout}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{PH}}} \cdot \frac{1}{N_{\text{H}}} \dot{m}_{\text{p}} C_{\text{p}} (T_{\text{Pin}} - T_{\text{Pout}}) - \frac{1}{C_{\text{PH}}} N_{\text{TE}} U A_{\text{PTE}} (T_{\text{Pin}} - T_{\text{Hshoe}}) \quad (5)$$

$$\frac{dT_{\text{Sout}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{SH}}} N_{\text{TE}} U A_{\text{STE}} (T_{\text{Cshoe}} - T_{\text{Sin}}) - \frac{1}{C_{\text{SH}}} \cdot \frac{1}{N_{\text{H}}} \dot{m}_{\text{s}} C_{\text{p}} (T_{\text{Sout}} - T_{\text{Sin}}) \quad (6)$$

式中， T_{Sout} 为热交换器二回路流道出口温度，K； T_{Hshoe} 为 TE 单元热端温度，K； T_{Cshoe} 为 TE 单元冷端温度，K； C_{PH} 为热交换器一回路流道热容，J/K； C_{SH} 为热交换器二回路流道热容，J/K； N_{TE} 为每一热交换器 TE 单元的数目； N_{H} 为热交换器数目； \dot{m}_{p} 为热交换器一回路冷却剂质量流量，kg/s； \dot{m}_{s} 热交换器二回路冷却剂质量流量，kg/s； $U A_{\text{PTE}}$ 为热交换器一回路流道流体到 TE 热端材料的等效热导，W/K； $U A_{\text{STE}}$ 为 TE 冷端材料到热交换器二回路流道流体的等效热导，W/K； T_{Sin} 为热交换器二回路流道进口温度，K。

1.6 TE 热电转换模型

在物性参数与温度无关的情况下，Thomson 效应可以忽略。如果进一步假设 P-型半导体和 N-型半导体有相同的物性参数和热端温度以及冷端温度是常数，基于控制方程及边界条件的温度分布结果如下^[8]：

$$K_{\text{TE}} (T_{\text{Hshoe}} - T_{\text{Cshoe}}) + \alpha_{\text{pn}} T_{\text{Hshoe}} I - 0.5 I^2 (R_{\text{p}} + R_{\text{N}}) = U A_{\text{PTE}} (T_{\text{Pin}} - T_{\text{Hshoe}}) \quad (7-1)$$

$$K_{\text{TE}} (T_{\text{Hshoe}} - T_{\text{Cshoe}}) + \alpha_{\text{pn}} T_{\text{Cshoe}} I + 0.5 I^2 (R_{\text{p}} + R_{\text{N}}) = U A_{\text{STE}} (T_{\text{Cshoe}} - T_{\text{Sin}}) \quad (7-2)$$

$$I = \left[\alpha_{\text{pn}} (T_{\text{Hshoe}} - T_{\text{Cshoe}}) \right] / (R_{\text{N}} + R_{\text{p}} + R_{\text{L}}) \quad (8)$$

式中， K_{TE} 为 TE 单元的有效热导，W/K； α_{pn} 为塞贝克效应系数，V/K； I 为电流，A； R_{L} 为外部负载电阻， Ω ； R_{p} 为 P-型半导体内部电阻， Ω ； R_{N} 为 N-型半导体内部电阻， Ω 。

电功率输出 P_{e} 为：

$$P_{\text{e}} = I^2 R_{\text{L}} \quad (9)$$

流入 TE 发电器的热功率 q_{TE} 为：

$$q_{\text{TE}} = U A_{\text{PTE}} (T_{\text{Pin}} - T_{\text{Hshoe}}) \quad (10)$$

TE 的热电转换效率 η 为：

$$\eta = P_{\text{e}} / q_{\text{TE}} \quad (11)$$

1.7 辐射器模型

单节点模型用于描述辐射散热器的散热。假设辐射散热器冷却剂温度等于出口温度，辐射器的温度 T_{Sin} 为：

$$\frac{dT_{\text{Sin}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{prad}}} \cdot \frac{1}{N_{\text{Hx}}} \dot{m}_{\text{s}} C_{\text{p}} (T_{\text{Sout}} - T_{\text{Sin}}) - \frac{1}{C_{\text{prad}}} \varepsilon \sigma F_{\text{rad}} A_{\text{TE}} (T_{\text{Sin}}^4 - T_{\text{a}}^4) \quad (12)$$

式中， ε 为发射率 (0.85)； N_{Hx} 为换热器数量； F 为辐射散热器表面几何因子； σ 为 Stephan-Boltzman 常数， $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； T_{a} 为空间温度，250 K。

2 计算结果分析

2.1 系统分析程序简介

基于以上模型利用 MATLAB/Simulink 软件建立碱金属冷却空间堆系统动态特性分析程序，并与利用 SNPSAM 程序^[9]计算的稳态运行设计参数相比较对程序进行验证。表 1 给出了本文模拟结果与满功率运行设计参数之间的比较。许多结果与 SNPSAM 的设计参数符合很好。最大的不同在于转换效率和转换功率，原因在于本文选取了在最大转换效率的外部负载电阻值。因此，建立的模拟模型可用于可信的空间堆控制及动态特性分析。

表 1 模拟模型与设计参数的比较

Table 1 Comparison between Simulation Results and Design Parameters

参数名	参数设计值	模拟结果
堆芯热功率 / kW	2000	2000
电功率输出 / kW	112	115.7
系统效率 / %	5.59	5.785
堆芯进口温度 / K	1254	1250
堆芯出口温度 / K	1284	1284
燃料平均温度 / K	1376	1376
包壳平均温度 / K	1288	1288
TE 热端温度 / K	1237	1237
TE 冷端温度 / K	857	856.5

2.2 控制鼓转角的阶跃变化情况

研究了空间堆正常运行时控制鼓角度阶跃变

化 15° 引入正反应性的动态特性响应。假设控制棒转角在 50 s 时阶跃变化 15° 。控制鼓转角阶跃变化工况的空间堆各参数的动态响应计算结果表明：堆芯燃料膨胀效应和冷却剂温度反馈为主要的反应性反馈，燃料包壳和燃料多普勒反应性反馈则较小，且燃料多普勒效应为正反馈，但堆芯总的反应性反馈为负，在 150 s 时堆芯总的反应性变为 0，这说明碱金属冷却空间堆具有自动调节的特性。

空间堆堆芯热功率和 TE 电功率输出的响应变化计算结果表明，堆芯热功率会随着控制鼓反应性引入迅速阶跃上升，达到峰值功率，随后由于堆芯反应性负反馈的作用下降到新的稳定状态。而电功率的输出变化不是迅速阶跃增加的，电功率的上升存在一定的延迟，这是由于 TE 电功率随堆芯出口温度的变化而变化，由于热惯性的作用使得温度响应存在一定的时间过程，因此 TE 电功率的变化与 TE 温度的响应相一致。电流和热电转换效率的响应计算结果表明，电流和热电转换效率都会升高并达到稳定状态。

2.3 外部负载电阻的阶跃变化情况

TE 单元外部负载电阻阶跃变化 0.01Ω 时的空间堆系统瞬态响应特性的计算结果表明：当 TE 单元的负载阶跃变化 0.01Ω 时，使得 TE 电流阶跃减小，引起电功率的阶跃下降，但外部负载电阻的增加使得电功率会增大，在 2 者的相互作用下电功率输出最终增大。电功率输出的响应是非常迅速的，与控制鼓转角变化响应相比较，变化外部负载可能有固有负荷跟踪的能力而不改变堆芯热功率和堆芯出口温度。

外部负载电阻的阶跃变化引起 TE 热端温度的升高和冷端温度的下降，从而使得热电转换效率升高，而 TE 温度的升高使得冷却剂温度升高，由于冷却剂温度负反馈，使得堆芯热功率下降，从而使得堆芯燃料温度先升高达到峰值后会下降到一稳定的值，燃料膨胀则引入正的反应性，最终在 250 s 时堆芯总反应性反馈为 0，亦即堆芯总反应性为 0，反应堆系统达到稳定状态。堆芯热功率和堆芯温度的变化很小，说明 TE 热电转换具有一定的负荷跟踪调节能力。

3 结 论

主要研究了基于集中参数法的空间堆系统动态特性分析模拟的节点模型，利用 Simulink 软件编制了空间堆系统动态特性分析程序，并初步分析了碱金属冷却空间堆在控制鼓转角和外部负载电阻阶跃变化时的瞬态响应。根据计算得到以下结论：

(1) 建立的空间堆系统节点模型可用于动态特性分析以及自动控制方法研究。

(2) 在控制鼓转角阶跃变化时，堆芯热功率迅速阶跃变化达到峰值功率，由于反应性反馈后下降到稳定值，而电功率的响应随堆芯温度的变化而变化，由于材料的热惯性使得温度和电功率输出的响应存在一定的时间延迟。

(3) 在外部负载电阻阶跃变化时，TE 电功率输出则会迅速响应，与控制鼓转角变化响应相比较，变化外部负载可能有负荷跟踪能力而不改变堆芯热功率以及出口温度，另外，TE 电功率输出响应的变化也很迅速。

参考文献：

- [1] 苏著亭, 杨继材, 柯国土. 空间核动力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- [2] Anderson J L, Oakes L C. Instrumentation and Controls Evaluation for Space Nuclear Power Systems [C]. Proceedings of the First Symposium on Space Nuclear Power Systems, New Mexico, 1984: 109-114.
- [3] Demuth S F. SP100 Space reactor design [J]. Progress in Nuclear Energy, 2003, 42(3): 323-359.
- [4] 李华琪, 江新标, 杨宁, 等. HP-STMCs 空间堆堆芯典型瞬态热工分析[J]. 核动力工程, 2015, 36(3): 36-40.
- [5] Berkan R C, Upadhyaya B R, Kisner R A. Low-Order Dynamic Modeling of the Experimental Breeder Reactor-II[R]. ORNL/TM-11161, 1990.
- [6] Wright S A, Houts M. Coupled reactor kinetics and heat transfer model for heat pipe cooled reactors[C]. Space Technology and Applications International Forum-STAIIF 2001. American Institute of Physics, 2001: 815-820.
- [7] Shtessel Y B. Sliding Mode Control of the Space Nuclear Reactor System[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Information Sciences, 1998, 34(2): 579-589.
- [8] Soo S L. Direct Energy Conversion[M]. Prentice-Hall, Inc, 1968.
- [9] El genk M S, Seo J T. SNPSAM-Space Nuclear Power System Analysis Model[C]. Space Nuclear Power System 1986, Orbit Book Company, Inc., Malabar, FL, 1987: 111-123.

(责任编辑：王中强)