



## 控制棒驱动机构膨胀反应性反馈模型开发与应用

张熙司, 杨鹏, 薛方元, 霍兴凯, 刘一哲

### Development and Application of Control Rod Drive Mechanism Expansion Reactivity Feedback Model

Zhang Xisi, Yang Peng, Xue Fangyuan, Huo Xingkai, and Liu Yizhe

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.03.0165>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 核反应堆控制棒驱动机构故障检测仪研制

Development of Fault Detection Instrument for Control Rod Drive Mechanism of Nuclear Reactors

核动力工程. 2018, 39(3): 176–180

#### 核反应堆控制棒驱动机构动作部件状态检测研究

Study on Monitoring of Action Assembly of Control Rod Drive Mechanism in Nuclear Power Reactors

核动力工程. 2019, 40(2): 90–94

#### 控制棒驱动机构电流监测与故障诊断技术研究

Research on Current Monitoring and Fault Diagnosis Technology for Control Rod Drive Mechanism

核动力工程. 2019, 40(1): 172–175

#### 基于自然对流的控制棒驱动机构温场研究

Study on Temperature Field of Control Rod Drive Mechanism Based on Natural Convection

核动力工程. 2021, 42(2): 121–124

#### 直线电机型反应堆控制棒驱动机构电磁结构设计研究

Study on Electromagnetic Structure Design of Linear Motor Type Reactor Control Rod Drive Mechanism

核动力工程. 2021, 42(5): 213–217

#### 控制棒驱动机构上部Ω焊缝堆焊修复结构完整性分析

Integrity Analysis of Weld Overlay Repair Structure of Upper  $\Omega$  Seal Weld of Control Rod Drive Mechanism

核动力工程. 2018, 39(5): 75–79



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2023)03-0165-04; DOI:10.13832/j.jnpe.2023.03.0165

# 控制棒驱动机构膨胀反应性反馈模型开发与应用

张熙司<sup>1</sup>, 杨鹏<sup>2</sup>, 薛方元<sup>1</sup>, 霍兴凯<sup>1</sup>, 刘一哲<sup>1</sup>

1. 中国原子能科学研究院, 北京, 102413; 2. 中核战略规划研究总院, 北京, 100048

**摘要:** 在中国实验快堆功率试验阶段, 开展了功率反应性测量试验, 研究发现功率反应性的试验测量值与理论计算值存在较大偏差, 需要对功率反应性的计算方法进行改进。本研究对理论计算值与中国实验快堆功率反应性试验值之间的偏差进行了分析, 找出了导致偏差的主要原因, 并开发了控制棒驱动机构膨胀反应性反馈模型, 对理论计算的功率反应性进行了修正。结果表明, 修正后的理论计算值和试验测量值之间符合良好, 相对偏差为 6.5%。本研究开发的驱动机构膨胀反应性反馈模型可以用于钠冷快堆的反应性计算。

**关键词:** 钠冷快堆; 功率反应性反馈; 控制棒驱动机构膨胀

**中图分类号:** TL364 **文献标志码:** A

## Development and Application of Control Rod Drive Mechanism Expansion Reactivity Feedback Model

Zhang Xisi<sup>1</sup>, Yang Peng<sup>2</sup>, Xue Fangyuan<sup>1</sup>, Huo Xing kai<sup>1</sup>, Liu Yizhe<sup>1</sup>

1. China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413, China; 2. China Institute of Nuclear Industry Strategy, Beijing, 100048, China

**Abstract:** In the power test phase of China Experimental Fast Reactor, the power reactivity measurement test was carried out. The results showed that there was a large deviation between the measured values and the theoretical calculation values, and the calculation method of power reactivity needed to be improved. This research analyzed the deviation between the theoretical calculation values and the measured values of China Experimental Fast Reactor power reactivity, and the cause of the deviation was found out. Furthermore, this research developed a control rod drive mechanism expansion reactivity feedback model to correct the theoretical calculation results. The results show that the corrected theoretical calculation values are in good agreement with the measured values, with a relative error of 6.5%. Therefore, the control rod drive mechanism expansion reactivity feedback model developed in this research can be used for reactivity calculation in sodium cooled fast reactors.

**Key words:** Sodium cooled fast reactor, Power reactivity feedback, Control rod drive mechanism expansion

## 0 引言

在中国实验快堆功率试验阶段, 开展了功率反应性测量试验, 一方面为反应堆的安全运行提供依据, 另一方面用于与理论计算结果进行对比以校核理论计算结果的准确性。在中国实验快堆

首炉堆芯稳态计算中利用三维节块法(HND)程序对功率反应性效应进行理论计算, 结果表明, 从零功率(360℃)到满功率的总功率反应性为 $-486\text{pcm}$  ( $1\text{pcm}=10^{-5}$ )<sup>[1-4]</sup>, 而其测量试验结果显示, 从零功率(360℃)到满功率的总功率反

收稿日期: 2022-07-02; 修回日期: 2022-08-12

作者简介: 张熙司(1988—), 男, 博士研究生, 现主要从事反应堆安全分析方面的研究, E-mail: zhangxisicefr@163.com

应性却为-980pcm，理论计算与试验测量存在较大偏差，需要进行修正。

法国超凤凰快堆的功率试验阶段也开展了功率反应性的测量试验，结果显示理论计算值与实验值符合良好<sup>[5]</sup>。在其理论计算中，主要考虑6种反应性效应：钠密度变化、钠体积份额变化、燃料组件的轴向膨胀、堆芯的径向膨胀、多普勒（Doppler）效应和控制棒驱动机构膨胀效应。控制棒驱动机构膨胀效应是指在反应堆功率提升过程中，随着热钠池温度的上升，控制棒驱动机构、主容器都发生膨胀，造成驱动机构、主容器和堆芯的相对位移，从而导致控制棒下插并引入负反应性的现象。受限于国内缺乏该现象的模拟经验，控制棒驱动机构膨胀效应在国内试验快堆的功率反应性计算中并未得到考虑，这是造成理论值与试验值偏差较大的重要原因之一。

本文旨在开发一个控制棒驱动机构膨胀反应性反馈模型，提供控制棒驱动机构、主容器和堆芯膨胀量的计算方法，以便更全面评估钠冷快堆的功率反应性，提高理论计算的准确性并为钠冷快堆的安全运行和安全评价提供更多的理论支持。

## 1 控制棒驱动机构膨胀模型

### 1.1 影响膨胀的关键因素

中国实验快堆控制棒驱动结构的膨胀导致的相对位移主要包含3个因素：

(1) 随着功率的上升，热钠池温度不断上升，控制棒驱动机构随热钠池温度变化，造成控制棒驱动机构的膨胀从而导致控制棒下插。

(2) 热钠池温度不断上升，热钠池通过热屏蔽及主容器壁面冷却系统进行换热，造成主容器温度上升，主容器温度上升导致控制棒的提升。

(3) 堆芯功率的上升会导致堆芯轴向膨胀，造成控制棒相对堆芯下移。同时，控制棒本身发热量增加会造成控制棒的膨胀，造成控制棒相对堆芯下移。

最终，控制棒驱动机构膨胀导致的反应性 $\Delta\rho$ 为：

$$\Delta\rho = d(\Delta L_{DR} + \Delta L_{CORE} + \Delta L_{CONT} - \Delta L_{VES}) \quad (1)$$

式中， $d$ 为控制棒组临界棒位的微分价值； $\Delta L$ 为等效膨胀/下插量；下标：VES为主容器；DR为控制棒驱动机构；CORE为堆芯燃料；CONT为控制棒。

## 1.2 模拟方法

为模拟控制棒驱动机构的膨胀需要对反应堆主回路冷却剂回路进行建模，该模型中包含主要的冷却剂流道和控制体，并包含有主容器壁面冷却模型、控制棒驱动机构换热模型和堆芯换热模型，用于计算各自的温度和膨胀量。

**1.2.1 主容器壁面冷却模型** 主容器壁面冷却模型主要用于计算主容器的膨胀量，由于热钠池温度上升，主容器与热钠池发生换热，导致主容器温度上升并膨胀。该模型主要考虑与热钠池对应的直筒段。

根据结构材料的不同，将该部分模型分为12层，采用隐式差分方法求解每一层的温度：

$$V_m \rho_m C_m (T_m^{n+1} - T_m^n) = \Delta t [Ah_{m,m-1} (T_{m-1}^{n+1} - T_m^{n+1}) + Ah_{m+1,m} (T_{m+1}^{n+1} - T_m^{n+1})] \quad (2)$$

式中， $T$ 为温度； $V$ 为体积； $A$ 为节点换热面积； $C$ 为热容； $\rho$ 为密度； $h_{m,m-1}$ 为节点 $m$ 和节点 $m-1$ 的等效换热系数； $\Delta t$ 为时间步长；上标 $n$ 为时间步序号；下标 $m$ 为节点序号。

当 $m=1$ 时：

$$V_m \rho_m C_m (T_m^{n+1} - T_m^n) = \Delta t [Ah_{hot} (T_{hot} - T_m^{n+1}) + Ah_{m+1,m} (T_{m+1}^{n+1} - T_m^{n+1})] \quad (3)$$

当 $m=12$ 时：

$$V_m \rho_m C_m (T_m^{n+1} - T_m^n) = \Delta t [Ah_{m,m-1} (T_{m-1}^{n+1} - T_m^{n+1}) + Ah_{air} (T_{air} - T_m^{n+1})] \quad (4)$$

式中， $T_{hot}$ 为热钠池温度； $T_{air}$ 为空气温度，这两个温度为边界条件。不同层之间的换热系数 $h$ 采用纯导热模型，但是冷却剂的上下流通通道除外。冷却剂的上下流通通道为圆环型换热通道，考虑到圆环半径大、缝隙小，近似为平板换热模型， $h$ 采用国际原子能机构推荐的公式<sup>[6]</sup>计算：

$$h = kNu/D \quad (5)$$

$$Nu = 5.8 + 0.02Pe^{0.8}$$

$$Pe = RePr$$

式中， $Nu$ 为努塞尔数； $Pe$ 为贝克莱数； $Pr$ 为普朗特数； $Re$ 为雷诺数； $k$ 为流体的热导率； $D$ 为水力直径。

由于该直筒段的流动为螺旋上升通道，引入修正系数 $\eta$ ，用于修正螺旋流动速度增加引起的换热系数增加：

$$Re = \eta u D / \nu \quad (6)$$

式中， $u$ 为流体的轴向速度； $\nu$ 为流体的运动粘度。

当主容器壁面冷却模型将热钠池换成覆盖气体，并忽略热屏蔽和冷却流道的热阻，则以上计算方法可用于计算覆盖气体上方锥顶的主容器温度。

最终，主容器的 $\Delta L_{VES}$ 为：

$$\Delta L_{VES} = \Delta T_{VES} \alpha_{VES} L_{VES} \quad (7)$$

式中， $\alpha$ 为线膨胀系数； $L$ 为长度； $\Delta T$ 为温度变化。

**1.2.2 堆芯冷却模型** 采用隐式方法求解计算堆芯燃料的温度和控制棒的结构温度，公式如下：

$$\begin{cases} M_f C_f (T_f^{n+1} - T_f^n) = \Delta t A [h_f (T_c^{n+1} - T_f^{n+1})] + \Delta t P \\ M_{Na} C_{Na} (T_{Na}^{n+1} - T_{Na}^n) = \Delta t A [h_c (T_c^{n+1} - T_{Na}^{n+1})] \\ M_c C_c (T_c^{n+1} - T_c^n) = \Delta t A [h_f (T_f^{n+1} - T_c^{n+1}) + h_c (T_{Na}^{n+1} - T_c^{n+1})] \end{cases} \quad (8)$$

式中， $M$ 为质量； $h_f$ 为燃料与包壳的换热系数； $h_c$ 为包壳与冷却剂钠的换热系数； $\Delta t$ 为时间步长； $P$ 为燃料功率；下标： $f$ 为燃料或碳化硼； $c$ 为包壳； $Na$ 为冷却剂钠。

堆芯部分的控制棒等效下插量为：

$$\Delta L_{CORE} + \Delta L_{CONT} = \Delta T_{CORE} L_{CORE} \alpha_{CORE} + \Delta T_{CONT} L_{CONT} \alpha_{CONT} \quad (9)$$

**1.2.3 控制棒驱动结构的膨胀模型** 对于热钠池内控制棒驱动机构部分膨胀，首先计算其温度变化，换热关系式为：

$$M_{DR} C_{DR} (T_{DR}^{n+1} - T_{DR}^n) = \Delta t A_{DR} h_{DR} (T_{hot}^n - T_{DR}^n) \quad (10)$$

式中， $A_{DR}$ 为控制棒驱动机构等效换热面积。

对于气腔内的控制棒驱动机构部分膨胀，换热关系式为：

$$M_{DR} C_{DR} (T_{DR}^{n+1} - T_{DR}^n) = \Delta t A_{DR} h_{DR} (T_{gas}^n - T_{DR}^n) \quad (11)$$

式中，下标  $gas$  为覆盖气体。

最终，控制棒驱动机构的等效膨胀量为：

$$\Delta L_{DR} = \Delta T_{DR} \alpha_{DR} L_{DR} \quad (12)$$

## 2 利用驱动机构膨胀反应性反馈模型对中国实验快堆功率反应性的修正

根据控制棒临界棒位的微分价值和驱动机构膨胀模型对中国实验快堆进行计算分析，分别计

算零功率（360℃，0 MW）和满功率（65 MW）下的反应堆温度，得到控制棒驱动结构膨胀反应性价值如表1所示，修正后的功率反应性如表2所示。可以看到理论计算值与试验测量值相对偏差为6.5%，考虑到试验测量和理论计算的不确定度一般在20%左右，该修正后的结果是比较理想的。

## 3 驱动机构膨胀反应性反馈模型在事故分析中的应用

驱动机构膨胀反应性反馈模型用于除修正钠冷快堆的功率反应性之外，还可以用于事故分析，增加反应性反馈效应，减少事故分析的保守度。

以中国实验快堆发生的超功率瞬变的事故为例，本文采用中国原子能科学研究院开发的中子动力学分析程序—NKF<sup>[7]</sup>结合控制棒驱动机构膨胀反应性反馈模型，选取最终安全分析报告的调节棒失控提升合并无紧急停堆事故进行分析。事故开始时，1根调节棒从堆芯底部以30 mm/s的速度经15 s后提升至顶部，总共引入152 pcm的正反应性，主泵仍以额定转速运转。反应堆相对功率变化趋势见图1，由于所有控制棒不能下落，反应堆功率逐渐上升，在负反馈的作用下，反应堆功率逐渐下降并趋于稳定。

事故过程中的反应性变化如图2所示，在200~600 s的时间段内，冷却剂温度、燃料轴向膨胀和组件弯曲已经不再引入新的负反应性，而控制棒驱动机构膨胀仍然持续引入新的负反应性，从而持续降低反应堆功率。

将中国实验快堆原安全分析报告（未考虑控制棒驱动机构膨胀）的计算结果和考虑控制棒驱动机构膨胀的计算结果进行比较，见表3，可以看到考虑控制棒驱动机构膨胀后反应堆的功率峰值更低，且在600 s时反应堆功率仍处于缓慢下降过程中。这意味着整个回路的温升更慢，操纵员的干预时间更加充足，主泵可以在该事故下运行更长时间，反应堆具有更好的安全性。

表1 临界棒位和对应的微分价值

Tab. 1 Critical Rod Position and Corresponding Differential Value

参数名	补偿棒棒位/mm	安全棒棒位/mm	调节棒棒位/mm	控制棒总微分价值/(pcm·mm <sup>-1</sup> )	控制棒驱动机构等效膨胀量/mm	控制棒驱动机构膨胀反应性/pcm
参数值	275	500	275	19.44	22.11	429.73

表2 修正后的反应性功率效应

Tab. 2 Power Reactivity Effect after Correction

参数名	参数值
钠密度变化/pcm	-121.76
钠体积分额变化/pcm	-26.03
燃料组件轴向膨胀/pcm	-390.69
反射层组件的轴向膨胀/pcm	-10.52
堆芯的径向膨胀(燃料组件弯曲)/pcm	+100.0
Doppler效应/pcm	-37.27
控制棒驱动机构膨胀效应/pcm	-429.73
总的功率反应性效应(360℃、额定功率)/pcm	-915.99
试验测量值(360℃、额定功率)/pcm	-980
理论与试验值的相对偏差/%	-6.53

#### 4 结论

本文采用自主开发的控制棒驱动机构膨胀反应性反馈模型对中国实验快堆功率反应性的理论计算进行了良好的修正, 计算结果与试验测量符合良好。此外, 该模型中对于主容器的模拟主要考虑了升温下的自由膨胀, 实际上堆顶旋塞、堆顶屏蔽和主容器的锥部存在一定的相互作用, 有可能对主容器的膨胀起到一定的抑制作用, 这也可能是造成理论与试验测量偏差的原因之一, 需要进行详细的力学评价才能给出进一步的结论。建议后续对功率反应性试验过程进行修订, 在钠冷快堆功率反应性测量时增加热钠池温度测点记

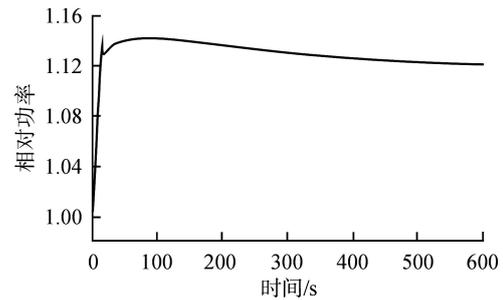


图1 反应堆相对功率随时间的变化  
Fig. 1 Change Curve of Reactor Relative Power over Time

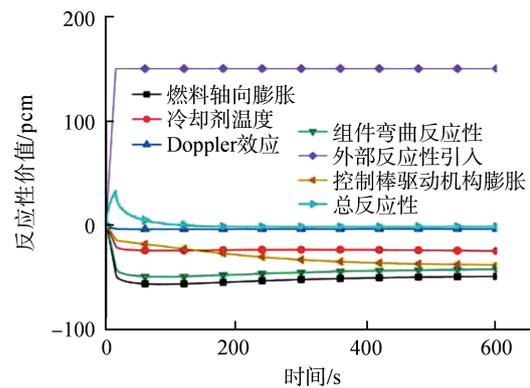


图2 反应性反馈随时间的变化  
Fig. 2 Change Curve of Reactivity Feedback over Time

录和主容器壁面温度测点记录, 以更好的预测主容器的膨胀量。

表3 事故进程比较

Tab. 3 Accident Process Comparison

安全分析报告的事故分析事件类型	事件进程时刻/s	考虑驱动机构膨胀的事故分析事件类型	事件进程时刻/s
1根调节棒失控提升, 正反应性引入速率为10.13pcm/s	0.0	1根调节棒失控提升, 正反应性引入速率为10.13pcm/s	0.0
调节棒提升到顶	15.0	调节棒提升到顶	15.0
堆芯相对功率达最大值1.241	46.2	堆芯相对功率达最大值1.142	88.7
反应堆状态稳定	600	堆芯功率呈现下降趋势	600
堆芯相对功率为1.18	600	堆芯相对功率为1.12	600

#### 参考文献:

- [1] 苏著亭, 叶长源, 阎凤文, 等. 钠冷快增殖堆[M]. 北京: 中国原子能出版社, 1991: 575.
- [2] 李泽华. 反应性功率系数测量导则: CEFR01HWLTDT03[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2005.
- [3] 李泽华. 应用三维节块法程序计算动态参数[J]. 核科学与工程, 1997, 17(3): 276-280.
- [4] 李泽华. 中国实验快堆首炉堆芯的稳态物理特性: CEFR01Z19LWS10-JS[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2001.

- [5] VANIER M, BERGEONNEAU P, GAUTHIER J C, et al. Superphénix reactivity and feedback coefficients[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1990, 106(1): 30-36.
- [6] IAEA. Comparative assessment of thermophysical and thermohydraulic characteristics of lead, lead-bismuth and sodium coolants for fast reactors: IAEA-TECDOC-1289[R]. Vienna: IAEA, 2002.
- [7] 田和春. 求解反应堆动态方程的插值多项式法[J]. 核动力工程, 1989, 10(6): 39-46.

(责任编辑: 王中强)