

# A Study on Temperature Adjustment of Ventilation System in Main Control Room of Nuclear Power Plant

Hui Wang Erlong Zhang

Daya Bay Nuclear Power Operation and Management Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

## Abstract

This paper investigates the control scheme for axial power deviation ( $\Delta I$ ) during power ramping operations at a nuclear power plant. Through an analysis of the factors influencing axial power deviation ( $\Delta I$ ), control strategies for the beginning-of-life and end-of-life response stages are proposed, thereby optimizing reactor control measures and ensuring the safety of the reactor core in the nuclear power plant.

## Keywords

nuclear power plant; axial power deviation ( $\Delta i$ ); adjustment; control strategy

## 核电厂升降功率期间轴向功率偏差 $\Delta I$ 控制研究

王辉 张二龙

大亚湾核电运营管理有限责任公司, 中国 · 广东 深圳 518000

## 摘要

本文针对某核电厂升降功率运行阶段轴向功率偏差  $\Delta I$  的控制问题进行研究。通过分析功率变化、控制棒动作、硼浓度调节及堆芯燃耗特性等因素对轴向功率偏差  $\Delta I$  的影响机理, 结合反应堆寿期初、寿期末的运行特点, 分别提出了相应的控制策略。通过优化反应堆控制逻辑与调节手段, 细化操作流程, 提升了轴向功率偏差的调节精度与响应特性, 确保堆芯功率分布始终处于安全限值范围内, 有效保障了反应堆堆芯安全, 为核电厂升降功率过程的安全稳定运行提供了可靠的技术支撑。

## 关键词

核电厂; 轴向功率偏差  $\Delta I$ ; 调整; 控制方法

## 1 问题描述

核电厂每逢升降功率 (如节日降负荷、机组检修降负荷等) 操作时, 当班值总会遇到以下两种棘手的情况: 1、降功率后轴向功率偏差  $\Delta I$  较难控制在理想区间; 2、由于升降功率时为控制  $\Delta I$  会把 R 棒短时放手动控制, 但在功率升降到位后, 由于温度偏差大的原因, 很难及时恢复 R 棒自动控制。实际上这两种, 最终都是为了控制  $\Delta I$  才导致的。在此, 为有效解决这两个问题给当班值带来的控制困扰, 需对核电厂升降功率期间  $\Delta I$  和 R 棒控制策略进行讨论确定。

## 2 $\Delta I$ 控制的影响因素

### 2.1 硼价值与慢化剂温度效应对轴向功率偏差影响机理分析:

基于硼价值的影响机理: 压水堆堆芯轴向温度场呈下低上高分布, 慢化剂温度越低, 硼的反应性价值越高, 因此堆

芯下部硼价值显著高于上部。在相同硼浓度变化条件下, 堆芯下部所引发的反应性变化绝对值更大, 对应功率变化幅度更为显著。

1) 硼稀释工况: 硼浓度降低, 堆芯下部反应性增益及功率上升速率、幅度均大于上部, 导致轴向功率分布向下偏移,  $\Delta I$  向负方向变化。

2) 硼化工况: 硼浓度升高, 堆芯下部反应性损失及功率下降速率、幅度均大于上部, 导致轴向功率分布向上偏移,  $\Delta I$  向正方向变化。

基于慢化剂温度系数与堆芯温度分布的影响机理: 额定功率运行工况下, 堆芯温度沿轴向自下而上逐步升高, 且堆芯入口温度受功率变化影响较小。硼化与稀释操作将引发堆芯温度场变化, 堆芯上部温度变化幅度大于下部, 由此引入的反应性效应亦更为显著。

1) 硼稀释工况: 堆芯整体温度升高, 上部温度变化更显著, 引入的负反应性更强, 抑制上部功率上升, 使得下部功率上升幅度大于上部,  $\Delta I$  向负方向偏移。

2) 硼化工况: 堆芯整体温度降低, 上部温度变化更显著, 引入的正反应性更强, 减缓上部功率下降, 使得下部功率下

【作者简介】王辉 (1982-), 男, 中国湖北荆州人, 本科, 工程师, 从事核电站运行控制研究。

降幅度大于上部,  $\Delta I$  向正方向偏移。

硼价值效应与慢化剂温度系数效应作用趋势一致: 硼稀释将导致  $\Delta I$  负向偏移, 硼化将导致  $\Delta I$  正向偏移, 该机理为反应堆轴向功率分布控制提供了理论依据。

## 2.2 功率变化对 $\Delta I$ 的影响

反应堆功率水平变化将直接引起堆芯热工水力状态与中子通量分布的耦合改变, 进而导致堆芯轴向功率分布发生偏移。为规范运行控制、确保堆芯功率分布满足安全限值要求, 现就功率升降过程中轴向通量差 ( $\Delta I$ ) 的变化特性及内在规律分析如下。功率提升工况下的轴向功率分布特性: 随着反应堆功率逐步提升, 堆芯释热率相应增加, 冷却剂在堆芯内的焓升逐步增大, 堆芯出口冷却剂温度随功率提升持续升高; 机组达到满功率运行时, 堆芯进出口水温差达到额定值。受堆芯轴向温度分布、慢化剂密度分布及反应性反馈效应共同作用, 堆芯中子通量密度峰值随功率提升逐渐向堆芯下部迁移, 堆芯下部功率份额逐步大于上部, 表现为轴向通量差  $\Delta I$  持续向负方向偏移。当反应堆功率下降时, 堆芯体积释热率减小, 冷却剂温升降低, 堆芯轴向温度梯度相应减小, 慢化剂密度分布趋于均匀。堆芯中子通量密度分布随之向堆芯上部恢复, 上部功率份额相对增大, 轴向通量差  $\Delta I$  逐步向正方向偏移。

## 2.3 平均温度变化对 $\Delta I$ 的影响

反应堆慢化剂温度系数为负值, 平均温度变化将通过慢化剂温度反馈效应, 引起堆芯轴向功率分布发生偏移: 平均温度升高  $\rightarrow$  出口温度升高  $\rightarrow$  上部功率相对降低  $\rightarrow \Delta I$  向左 (负向) 偏移; 平均温度降低  $\rightarrow$  出口温度降低  $\rightarrow$  上部功率相对升高  $\rightarrow \Delta I$  向右 (正向) 偏移。

## 2.4 燃耗变化对 $\Delta I$ 的影响

寿期初 (BOL) 轴向通量分布特性: 反应堆寿期初, 堆芯燃料燃耗较浅、轴向燃耗分布相对均匀; 在无控制棒插入条件下, 堆芯中子通量沿轴向分布基本呈对称分布。随着功率逐步提升, 堆芯出口慢化剂温度显著升高, 堆芯上部温度变化与慢化剂密度降低更为明显, 在负温度系数作用下, 中子通量密度峰随功率升高向堆芯下部偏移, 堆芯下部功率份额大于上部, 表现为  $\Delta I$  向负方向偏移。寿期末 (EOL) 轴向通量分布特性: 进入寿期末, 反应堆长期运行导致堆芯下部燃耗深度显著大于上部; 堆芯下部中子通量更高、中子注量更大, 燃料消耗与裂变产物中毒均比上部更为严重。在反应堆总功率保持不变的前提下, 堆芯下部燃料反应性下降更为显著, 中子通量与功率分布将自动向堆芯上部迁移以维持功率平衡, 最终表现为  $\Delta I$  随燃耗增加逐步向正方向偏移。

## 2.5 控制棒提插对 $\Delta I$ 的影响

R 棒为高价值黑棒, 运行期间保持在堆芯上部调节带内, 对  $\Delta I$  影响显著: 插入越深,  $\Delta I$  越负。氚振荡控制应在  $\Delta I$  振荡方向刚改变时实施干预; 禁止在振荡方向即将改变时干预, 防止振荡加剧。控制操作优先采用连续下插 2~3 步方式, 提升控制效果。G 棒采用叠步移动以减小轴向扰动,

但仍对  $\Delta I$  存在明显影响。插棒降功率总体趋势使  $\Delta I$  偏向负方向, 但受轴向反应性价值分布影响, 不同棒位区间可使  $\Delta I$  向负或向正变化, 运行中需动态监视 [1]。

## 2.6 氚毒变化对 $\Delta I$ 的影响

反应堆正常功率运行期间, 氚 - 135 浓度处于动态平衡状态, 其产生率与损失率基本相等。氚毒空间分布与中子通量分布直接相关: 中子通量高的区域, 氚毒积累量大; 中子通量低的区域, 氚毒积累量小。由于堆芯中子通量沿轴向分布不均匀, 氚毒轴向分布同样呈现不均匀特性, 进而对  $\Delta I$  产生显著影响。

仅从平均温度效应考虑: 氚毒减少  $\rightarrow$  平均温度升高  $\rightarrow \Delta I$  向左偏移;

氚毒增加  $\rightarrow$  平均温度降低  $\rightarrow \Delta I$  向右偏移。

从通量分布效应考虑 (平均温度不变) 下部通量高: 氚毒增加  $\rightarrow \Delta I$  右; 氚毒减少  $\rightarrow \Delta I$  左; 上部通量高: 氚毒增加  $\rightarrow \Delta I$  左; 氚毒减少  $\rightarrow \Delta I$  右。

## 2.7 $\Delta I$ 控制的影响因素综述

综合以上 6 种控制手段可以简单分为冷热控制和棒控制, 为方便记忆可以简单记为: 热插冷提或左热右冷 (即冷和提棒效果相同, 热与插棒效果相同) [2]。

## 3 寿期初升降功率 $\Delta I$ 控制策略

### 3.1 硼化降功率

硼化降功率,  $\Delta I$  有向右的趋势, 使堆平均温度稍高于整定值, 可以使  $\Delta I$  有向左的趋势。在降功率前, 将 R 棒置于较高的位置, 以便在降功率过程中及到所要求的低功率水平后 R 棒有足够的控制裕度以控制  $\Delta I$  的变化。

仅从硼的价值方面考虑, 硼化降功率时, 堆芯下部功率下降速率及幅度要大于堆芯上部, 从而使得降功率过程中,  $\Delta I$  向正的方向偏移; 另一方面, 随着功率的降低, 堆芯上部慢化剂温度下降, 堆芯功率分布逐渐向堆芯上部偏移, 也使得  $\Delta I$  向正的方向偏移。功率降低后约 6~8 小时内机组积毒, 积毒过程同样使  $\Delta I$  向正的方向偏移。

综合上面因素, 在硼化降功率过程中,  $\Delta I$  肯定是往正的方面的偏移。因此, 为了更好地控制  $\Delta I$ , 在控制上有足够的裕度, 我们应在降功率前一、二天, 将 R 棒提到较高的位置。在降功率过程中, 通过 R 棒的适时插入, 将  $\Delta I$  控制在  $\Delta I_{ref2} \pm 3\%$  的范围内。另外, 在降功率过程中, 可通过将堆芯温度维持稍高于整定温度来辅助  $\Delta I$  的控制。当反应堆达到某一低功率水平并运行一段时间 (约 6-8 小时左右) 后, 开始解毒, 解毒过程使得  $\Delta I$  向左变化, 因此我们可以利用这个机会将 R 棒提到较高的高度 (通过硼化来平衡), 但也不能太高, 以便保证 R 棒留出上提空间以及为以后的升功率留有足够的余量。

### 3.2 使用控制棒插棒降功率

通过插 G 棒来降率, 总的趋势是使  $\Delta I$  向左偏移。降功率过程中利用氚毒减少 G 棒插入, 同时尽可能提出 R 棒

以便后期置换出 G 棒。

在通过插 G 棒来降功率的过程中，我们应根据  $\Delta I$  的变化逐渐地提出 R 棒，以减小氙振荡的幅度，并保证在随后的提升 G 棒的过程有足够的 R 棒来补偿。另外，在降功率过程中，应利用氙毒的积累来补偿 G 棒的插入，使 G 棒不至于插得太深。同时也避免上部氙毒的过分积累。一旦达到所要求的低功率水平后，应尽快地将 G 棒往上提。综述降功率过程中  $\Delta I$  的控制方法。

### 3.3 降功率过程中较好的 $\Delta I$ 的控制方法总结：

短期降功率（小于 12 小时）：一般选择插棒降功率，R 棒预留在较高位置（调节带上部）。降功率时 G 棒下插使  $\Delta I$  向负变化，利用棒位校正与硼化操作尽可能减少  $\Delta I$  变化。

长期降功率（大于 12 小时）：一般采用硼化降功率，R 棒尽量在高位。有经验认为，降功率前 4 小时左右插几步 R 棒人为造成  $\Delta I$  负向振荡有利于  $\Delta I$  控制。根据降负荷前  $\Delta I$  的振荡方向其操作略为不同：

$\Delta I$  基本稳定或正向振荡：先以尽可能低的速率启动降功率（使  $\Delta I$  向负），当  $T_{av}$  热到一定程度插 R 棒（使  $\Delta I$  向负），同时硼化一定量（大概估算）继续降功率（ $\Delta I$  向正），再插 R 棒……如此适当交替操作。

$\Delta I$  向负振荡：先同时启动降功率与硼化一定量（ $\Delta I$  先是继续向左，硼化效应出现后向右），然后再插 R 棒→硼化→插 R 棒……。

紧急降功率后，Xe 毒累积的速度快，用校正因子提 G 棒（目标：仅 G1 棒组插入在

堆芯上部或者更高，即迭步棒位 515 步以上；必要时可适量硼化）；适时地插入 R

棒以控制  $\Delta I$  稳定在  $\Delta I_{ref1}$ （考虑向正的裕度）。当 R 棒已插至接近 LOW 棒位时，等待，继续用稀释来补偿 Xe 毒累积，适当保持平均温度高于参考温度。

### 3.4 稀释升功率时 $\Delta I$ 的控制方法

稀释升功率过程中  $\Delta I$  会向左移动，在低功率运行期间或升功率前尽量维持 R 棒于较低的棒位。

$\Delta I$  在升功率过程中是向左边偏移的，应该注意的是：升功率过程中， $\Delta I$  不能太负，不要让它从左边离开运行区，避免违反技术规范的和引起过大的氙振荡。所以，我们在升功率过程中就应通过 R 棒的提升来控制  $\Delta I$  的变化，以使得整个升功率过程中  $\Delta I$  的变化尽量小，最好能够沿着参考 I 线变化。要达到这样的要求，必须要有足够的 R 棒来补偿

$\Delta I$  的变化，这就要求我们在低功率运行期间或升功率前尽量维持 R 棒于较低的棒位。当 Xe 振荡周期达到使  $\Delta I$  向正向偏移时，RO 应尽量先通过插入 R 棒的手段来抑制  $\Delta I$  的发展和恶化。

## 4 寿期末升降功率 $\Delta I$ 的控制策略

寿期末堆芯上部功率响应敏感，氙振荡明显， $\Delta I$  控制难度增大；燃烧加深、硼浓度降低，轴向功率呈马鞍形，冷却剂温度负系数绝对值增大，对  $\Delta I$  影响加剧。随着燃烧加深、硼浓度降低，对寿期末  $\Delta I$  控制影响最显著的两大变化为：轴向功率分布呈马鞍形（上下部各出现功率峰，半堆芯高度处为功率谷）；冷却剂温度负温度系数绝对值增大，冷热态变化对  $\Delta I$  的影响显著增强。

### 4.1 寿期末降功率主要特点与控制策略

若降功率持续时间较短且技术规范允许，优先采用插棒方式降功率。若因工况需要必须硼化降功率（长时间低功率运行），关键在于充分利用降功率前的准备时间，将初始状态调整至最优：功率棒组全部置于堆顶；R 棒组尽量调至调节带上部、接近上限； $\Delta I$  尽可能偏左；氙毒水平稳定。

降功率过程中的动态控制：开始降功率后：功率棒组通过校正因子保持在堆顶；因负温度系数效应， $\Delta I$  向正方向漂移，上部功率升高，氙毒振荡趋势显现；同时降功率过程的涨毒效应逐渐建立 [3]。此时控制措施：降低硼化速率；适当下插 R 棒，抑制  $\Delta I$  正向增大；当  $\Delta I$  由右顶点开始向左顶点回落时，逐步插入控制棒，并配合控制棒提升，控制  $\Delta I$  左倾趋势。

### 4.2 寿期末升功率主要特点与控制策略

寿期末升功率的典型特点：一回路硼浓度较低；硼稀释效应在升功率过程中响应缓慢；R 棒位置通常较高，长时间低功率后用于  $\Delta I$  控制的调节余量不足。易出现的问题：升功率过程中  $\Delta I$  快速向负方向偏移，且无有效控制手段。处理方法：必要时暂停升功率；等待氙毒变化趋缓或转向；再重新启动升功率过程。

### 参考文献

- [1] 庞松涛.压水堆核电站过程控制系统[A].庞松涛.工程技术类[C].北京：中国电力出版社，2014：p35；
- [2] 傅龙舟[A].核电厂堆控制，工业技术[T].北京：中国原子能出版社，1995：p20-22。
- [3] 中国核能电力股份有限公司[A].核电厂堆芯反应性管理，工业技术[T].北京：中国原子能出版社，2022：p51-52；