

[控制系统]

AP1000堆芯轴向功率控制策略优化研究

文/李昂
中核运维技术有限公司

AP1000采用机械补偿控制策略（MSHIM），反应堆通过M棒和AO棒分别控制平均温度和轴向通量偏差（AFD），但在机组运行过程中时常出现AO棒接近全提或全提出堆芯的情况，导致大幅减弱机组对于轴向功率的控制能力。基于此，对国内某AP1000电厂实际情况开展分析，通过优化MSHIM运行范围和定期开展AFD偏差校准的方式有效解决该问题，为机组长期安全和稳定运行奠定良好的基础。

AP1000反应堆控制系统采用MSHIM控制策略，分别利用M棒组和AO棒组控制反应堆平均温度和AFD，实现自动化堆芯平均温度和轴向功率分布控制。相比于采用A模式或G模式控制策略的传统核电站，AP1000机组正常满功率运行时M棒组为了补偿堆芯燃耗，一直在堆芯内运动，导致堆芯AFD处于持续变化中，进而需要AO棒的根据AFD变化情况频繁的进上提或下插予以控制；但在AP1000机组运行期间时常出现AO棒接近全提或全提出堆芯的情况，大幅减弱机组对于轴向功率的控制能力，是机组安全运行的重要隐患。因此，本研究针对国内某AP1000电厂现场实际情况对轴向功率控制策略开展优化研究。

轴向功率控制逻辑

在压水堆电站，堆芯的轴向功率分布是非均匀的，为了能更好地反映这种非均匀性，在反应堆设计中引入了轴向偏移（Axial Offset, AO）和轴向通量偏差（Axial Flux Difference, AFD）的概念，AO和AFD即为轴向功率不平衡的体现。

$$AO = \frac{P_T - P_B}{P_T + P_B} \times 100\% \quad (1)$$

$$AFD = \frac{I_T - I_B}{I_T + I_B} \times 100\% = AO \times P \quad (2)$$

式中， P_T 、 P_B 为堆芯上、下部功率； I_T 、 I_B 为上、下部探测器电流值； P 为当前堆芯功率。

相较于传统机组，AP1000由于采用MSHIM控制策略，堆外探测器将持续受到控制棒移动和阴影效应等因素的影响，无法准确反映堆芯真实AFD情况，因此不能直接用于控制。为实现相对精准的AFD控制，AP1000采用一套堆内补偿堆外的逻辑，处理流程如图1所示。

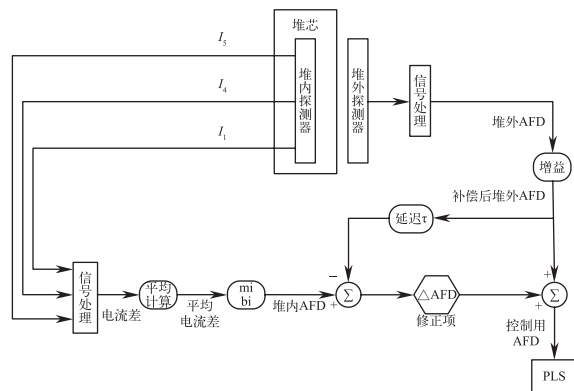


图1 控制用AFD信号处理流程图

其中，系统将在考虑自给能探测器的延迟效应

基础上实时计算堆内AFD与补偿后堆外AFD的偏差的“修正项”，确保两者反映同一时刻的堆芯状态，再利用修正项对补偿后堆外AFD进行修正，最终得到象限*i*用于实际AFD控制的AFD_{PLSi}，具体计算式为

$$\text{AFD}_{\text{PLSi}}(t) = \text{AFD}_{\text{堆外}i}(t) + \Delta\text{AFD}_i(t) \quad (3)$$

式中，AFD_{堆外*i*}为象限*i*的堆外核测系统输出并经过增益补偿后的AFD； ΔAFD_i 为象限*i*的AFD修正项。

当AP1000采用常轴向偏差控制策略（CAOC），以反应堆满功率标准运行状态下（先导棒90步，AO棒250步）的堆芯平均AFD为目标AFD值（TAFD），并将其作为轴向功率控制的基准输入控制系统中，以此目标值为中心建立 $\pm 1\%$ 的AFD控制带。当AFDPLS偏离控制带时，通过AO棒上提或下插将AFDPLS调回带内，从而实现轴向功率的控制。

轴向功率分布控制策略优化研究

1. 稀释赶棒过程中AO棒全提

(1) 问题描述

基于MSHIM运行策略，AP1000机组通过M棒的自动移动补偿短期的燃耗，通常在M棒接近提升限前，通过一回路稀释的方式进一步调整M棒位置，从而实现周期性的循环。在原设计方的分析中，为均衡控制棒燃耗阴影和辐照注量率，推荐在先导棒130~100步范围内循环，预计AO棒可控制在245~255步范围内，稀释的周期约为1.5~2周。但在机组实际稀释赶棒的过程中，当M棒到达某特定位置时，时常伴随着AO棒的快速上提，且较大可能出现AO棒全提出堆芯的情况，如图2所示，类似的情况在稀释赶棒过程中时有发生。

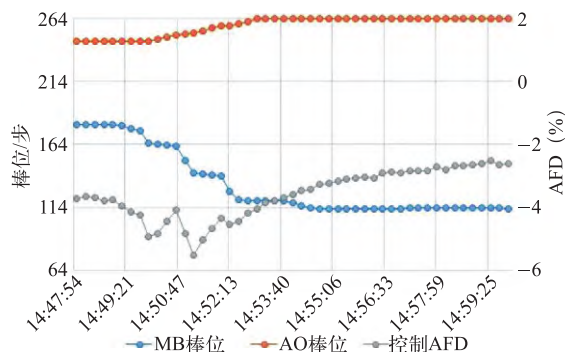


图2 稀释过程中AO棒快速全提

对于AO棒组，在全提出堆芯的情况下，相当于失去了其中向堆芯上部的调节轴向功率分布的能力，同时AO棒短时间的快速移动也存在引发氙振荡的潜在可能，是影响机组安全运行的潜在风险。

(2) 分析及优化

在MSHIM控制策略中堆芯平均温度（Tavg）的控制优先级高于AFD的控制。在稀释的过程中，M棒在Tavg与堆芯参考温度（Tref）偏差大于0.83℃的情况下会下插以维持平均温度。针对M棒动作期间对堆芯AFD影响开展了计算分析，结果如图3所示。

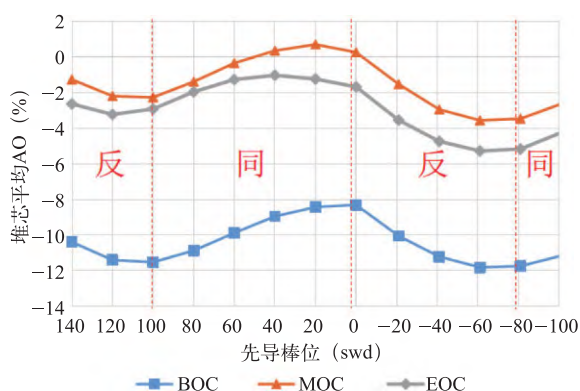


图3 首循环不同棒位M棒对堆芯AFD影响

分析可知，在MSHIM控制策略下，AFD的控制是受到M棒和AO棒耦合作用的。当先导棒处于0~80步运行区间时，此时MB/MC处于堆芯中平面上，M棒的下插会抑制堆芯上部功率，AFD逐渐向负方向变化，需要AO棒上提进行控制，也即M棒和AO棒为反向调节。此时若Tavg和AFD两者同时超带，由于Tavg的控制优先级较高，M棒组将会快速（72步/min）下插多步，以期快速将Tavg控制在Tref的回差以内。此时由于M棒的快速移动，可能使AFD的偏差快速增大，AO棒将需要快速上提来将AFD控制在回差内，而AO棒的上提将引入大量的正反应性，Tavg又将超带，此时需要M棒下插进行平衡。在这个互相干涉和影响的过程中，有较大可能导致AO棒短时间内全提，轴向功率分布发生较大变化。相比之下，当先导棒在100至0步的区间时，由于处于MA/MD的中平面以下，随控制棒的插入下部功率被抑制，AFD逐渐向正方向变化，而一旦超出AFD控制带，AO棒将下插进行调节。即在此区域，M棒组和AO棒组处于同向调节过程，

若Tavg和AFD同时超带，将优先AO棒移动，由于AO棒价值较高，在调节平均温度的同时又可以兼顾调节AFD，因而此区域反应性和AFD的变化较为平稳。因此，同向区间时机组控制稳定性显著优于反向区间，将MSHIM运行范围控制在先导棒100至0步能够有效保障AO棒的调节能力，避免AO棒频繁的全提。

2. 堆芯平均AFD (AFD_{CA}) 与AFD_{PLS}偏差

(1) 问题描述

反应堆工程师通过对在线监测系统计算出的AFD_{CA}和AFD_{PLS}持续跟踪发现两者偏差始终存在并呈持续增长的趋势，且其偏差随先导棒位变化会呈现出一定的规律性。此时AO棒位也普遍高于标准工况（先导棒90步左右时，AO棒约在256~258步），如图4所示。在此阶段，当稀释M棒组至较低的棒位时，偏差会逐渐增大，最大时接近2%；而随着电厂运行、燃耗积累，控制棒逐渐上提，偏差逐渐减小到0.6%~0.8%。

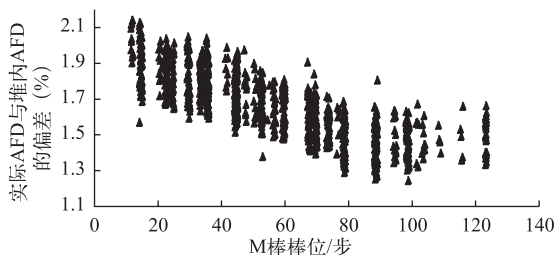


图4 AFDCA与AFDPLS偏差记录

分析可知，在偏差过大的情况下，会出现AFD_{CA}超出±1%控制带时，AFD_{PLS}未达到需动作条件，或在AFD_{CA}不需动作的时候，AFD_{PLS}却调节了轴向功率。该问题导致AO棒长期处于非预期棒位，一方面将增加运行过程中，全提出堆芯导致失去部分轴向功率分布控制能力的风险；另一方面从长期角度，还将导致燃料的轴向燃耗梯度与设计偏离，进而影响堆芯控制稳定性，增加AFD控制难度，并可能对下一循环的换料堆芯设计论证产生影响。

(2) 分析及优化

如前文所述，AFD_{PLS}来源于堆内AFD的补偿，而对于自给能探测器，堆芯中子通量水平及分布对其指示有较大影响，针对AP1000典型中子通量分布（热群）的变化情况进行了分析，结果如图5

所示。

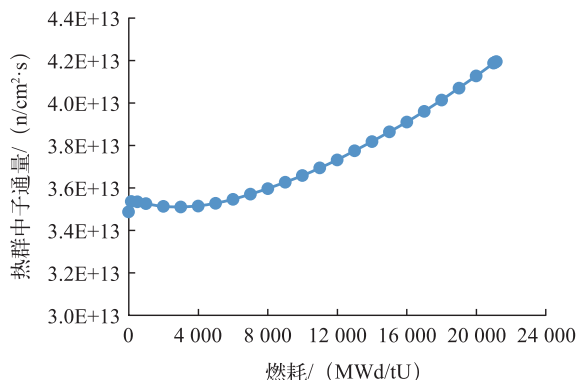


图5 AP1000平衡循环典型中子通量分布

由分析结果可知，堆芯中子通量分布随机组燃耗将有显著变化，这种变化将直接作用于探测器指示，因此在未定期校准堆内AFD拟合系数的情况下，其适用性将逐渐变差，导致AFD_{PLS}和设计值的偏差持续积累，最终导致AO棒位偏离，控制有效性不足。

要解决堆芯AFD的偏差问题，调节用于堆内AFD拟合的斜率（ m ）和截距（ b ）是最直接有效的方法。初始设置的 m 、 b 系数是调试物理试验期间基于堆芯大幅度AFD变化情况拟合得出的系数，正常功率运行期间AFD变化范围有限，如基于机组功率运行期间数据贸然调节斜率 m ，可能导致系数包络范围有限，存在某些情况下出现更大的偏差的可能。因此，通过定期修正 b 系数的方式可直接有效地进行AFD偏差校准，同时 b 系数的计算还应综合考虑M棒动作范围内统计误差的平均值，从而提升校准有效性。

结束语

本研究从某电厂现场实际问题出发，通过针对性的分析和研究，提出AP1000轴向功率分布控制策略优化措施：将MSHIM运行范围控制在先导棒100步至0步（AO棒和M棒同向区间）；综合燃耗及M棒动作影响，定期通过修改 b 系数的方式进行AFD_{CA}和AFD_{PLS}偏差校准。基于本研究内容的现场实际应用，成功解决棒组间的互相干涉导致AO棒快速全提的问题，确保控制系统对于AFD控制的有效性，充分保障AO棒的调节能力及堆芯轴向功率分布的稳定，有效维护了电厂的安全和稳定运行。EA

（收稿日期：2025-03-25）