

次临界增殖原理在核电教学应用研究

唐莉

大亚湾核电运营管理有限公司培训部

DOI:10.12238/pe.v2i5.9880

[摘要] 核电厂反应堆启动是从反应堆次临界状态下开始的,学习并理解次临界增殖原理有助于核电运行、维修技术人员在反应堆启动操作中理解操作过程,并对风险可知可控,防止出现非预期超临界风险。同时次临界增殖原理也是核电厂学习操纵员参加全国核电厂取照考试的必考要点。

[关键词] 次临界增殖; 倒计数率外推; 取照考试

中图分类号: TL82 **文献标识码:** A

Research on the application of subcritical proliferation principle in nuclear power teaching

Li Tang

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., LTD

[Abstract] The starting up of reactors in nuclear power plants starts from the subcritical state of reactors. Learning and understanding the subcritical proliferation principle helps nuclear power operation and maintenance technicians to understand the operation process in the reactor start operation, and control the risks to prevent unexpected supercritical risks. At the same time, the principle of subcritical proliferation is also the key point for the nuclear power plant learning operator to participate in the national nuclear power plant licensing examination.

[Key words] subcritical proliferation; inverted counting rate extrapolation; take the examination

引言

核反应堆是一种以可控方式实现中子与重核的自持式裂变反应的装置。如果堆内没有附加的中子源(即外中子源),则处于次临界状态的反应堆内,中子密度将逐渐衰减至接近零。相反,如果此时堆内有一个外中子源,中子密度的变化将是另一种形式。

1 次临界增殖原理

假定外中子源和中子通量密度都是均匀分布的,其中中子源发射的中子数是恒定的,为了推理的简化,认为中子源每 θ 秒(θ 为中子代时间)放出一批中子,每批为 S 个中子。如果在第一代开始时反应堆中有 S 个中子,在第二代开始时就有 $S+S_k$ 个中子,第三代开始时有 $S+S_k+S_k^2$ 个中子,以此类推。经过 n 代之后,中子总数为: $N=S+S_k+S_k^2+S_k^3+\cdots+S_k^{n-1}$ 。

可以看出这是一个等比级数,由于反应堆处于次临界状态,则比例系数 k 小于1。 k 小于1, $n \rightarrow \infty$,这个等比级数之和为有限值^[1-2],为: $N = \frac{S}{1-k}$ 。图1表征了不同 k 值的次临界增殖曲线。

$N = \frac{S}{1-k}$ 这个公式称作次临界增殖公式,它表示了一个

处于次临界状态下的反应堆,在外中子源存在的情况下,系统内的中子数趋于一个稳定值,并且该值与次临界程度有关;另外,反应堆起着放大中子源的作用,放大倍数为 $1/(1-k)$;同时可以看出,系统越接近于临界,即 k 越接近1, N 就越大。当系统到达临界, k 等于1时,中子数无限地增大,也就是中子数的倒数趋于零,图2给出了中子数倒数 $1/N$ 与 k 的关系。以上三点为次临界增殖的物理意义。

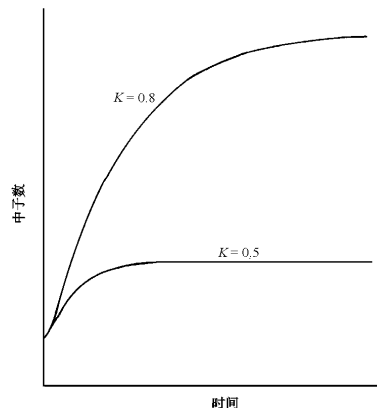


图1 次临界增殖曲线

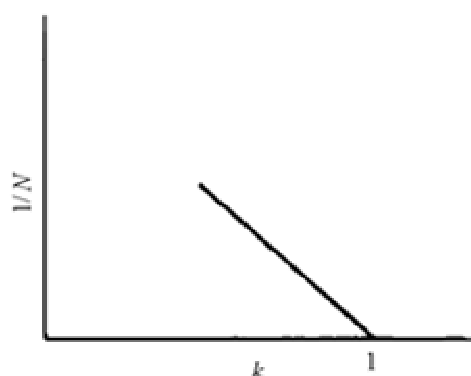


图2 1/N与k的关系

2 核电理论教学中的反应堆次临界增殖原理应用

在核电理论教学中, 不仅仅会阐明次临界增殖公式及其物理意义, 也会说明其应用: 在反应堆启动时, 利用上述原理^[3], 可以进行反应堆外推临界的操作。

在次临界反应堆中, 当改变反应堆的K值(即次临界度)时, 就可得到一个N值, 当在 $\frac{1}{N}$ 与k的坐标上标出两个点, 将此两个点的连线与K坐标的交点就是临界点, 即 $k=1$, $\frac{1}{N}=0$ 。k=1为临界点并无实用价值, 但机组上表征次临界度可以用其他改变反应性的方式, 比如改变控制棒棒位, 改变一回路硼浓度等。

如图3所示, 横坐标为控制棒棒位, 纵坐标为中子计数率倒数。在核电机组实际测量时, 所记录的是从堆芯中泄漏到堆外的一部分中子对堆外核仪表系统所造成的中子计数率, 可以读取源量程计数(单位为c/s), 也可读取中间量程电流(单位为安培)。

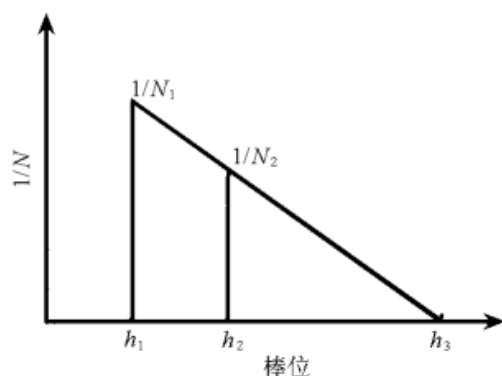


图3 1/N与控制棒位

为了使计数率倒数外推曲线(可称为1/M曲线)显示便于记录, 纵坐标一般不直接采用中子计数率倒数 $\frac{1}{C_i}$, 而是采用初始

计数率与实际计数率的比值, 即 $\frac{C_0}{C_i}$, 此种办法被称为“归一

法”。如图4所示。

法”。如图4所示。

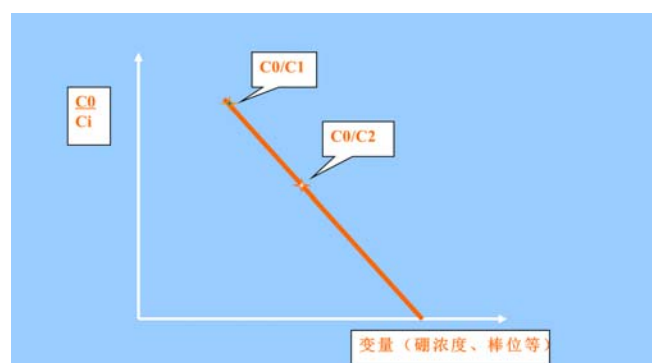


图4 归一法外推图

在反应堆达临界时, 一般来说, 共有五种逼近临界的方法:

- 直接提升控制棒达临界;
- 不做ICR曲线(即计数率倒数外推曲线), 提升控制棒达临界;
- 不做ICR曲线, 稀释达临界;
- 做ICR曲线, 提升控制棒达临界;
- 做ICR曲线, 稀释达临界。

我们将结合核电厂最常使用的“做ICR曲线, 稀释达临界”方案进行介绍。

在进行达临界操作之前需要结合预期达临界的时间、计划棒位进行反应性平衡计算, 以预估临界硼浓度。达临界操作开始, 首先, 将温度调节棒提升至棒组操作带中间位置, 将功率控制棒提升至零功率位置, 记录初始计数(C_0)作为1/M曲线的本底计数。然后, 以小于1000pcm/小时的速率开始稀释, 以增加堆芯的正反应性; 每15分钟记录下计数率 C_i 、硼浓度及注入的水容积, 计算 C_0/C_i 并画出1/M曲线; 由于稀释过程中硼的微分价值会发生变化, 所以在画图时会发现并不是所有记录的点都在一条直线上, 此时必须用连接最后两点间的直线向下延长至水平轴的方法来估算临界水容积和临界硼浓度, 如图5所示; 一旦1/M比值降至0.08以下(经验值), 即停止稀释, 并等候硼浓度均匀; 最后, 提升功率控制棒以获取临界。

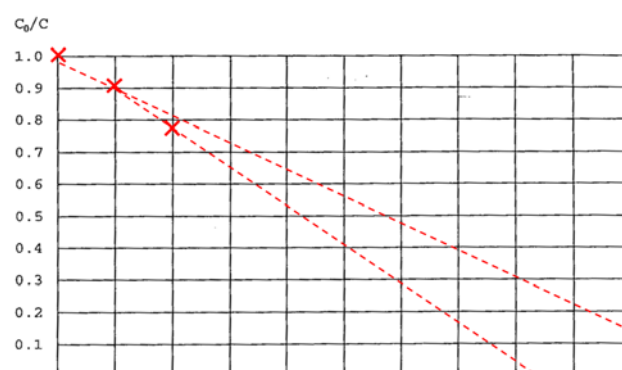


图5 稀释达临界时1/M曲线

在最后提棒获取临界时, 由于此时中子计数较大, 同时利用

控制棒提升获取正反应性时将瞬时改变次临界度, 并且控制棒棒位不变, 次临界度不变, 所以利用此阶段最容易观测次临界增殖现象。

稀释逼近临界操作时, 由于硼浓度示数变化滞后的性质, 需要在稀释操作过程中等待中子计数率稳定再进行下一步稀释; 若不等, 将产生严重的后果。如某核电站在临停检修后重新达临界时, 在将控制棒提升至要求的位置后, 按照预先计算的硼浓度和临界外推进行了五次稀释, 由于硼表示数波动较大以及燃料管理专业计算稀释量偏差较大等因素干扰, 操纵员在中间量程中子通量未稳定情况下即进行临界倒推, 在第五次稀释停止 2min30s 后再次稀释 0.9m³。第六次稀释操作结束后, 倍增周期已缓慢降至 34.8s, 中间量程中子通量上涨较快, 操纵员判断反应堆已进入超临界状态, 此时机组出现了非预期达临界状态 (非预期临界风险: 若堆芯功率高于 2%Pn 将超技术规范, 若堆芯功率上涨过快超过 ASG 系统的供水能力将可能导致反应堆停堆)。若在中子通量未稳定情况下即进行临界倒推, 则临界时中子通量会偏小, 结合计数率倒数外推曲线, 会导致外推得到的临界硼浓度较小, 产生非预期临界。

另外, 由于次临界增殖特性, 在逼近临界过程中, 不改变次临界度并等待一段时间后, 反应堆内的中子数将趋于一个稳定值, 这现象与反应堆临界时中子数稳定的物理现象相似。所以, 若要在机组上找到“临界点”或“临界棒位”, 需要首先观测到有稳定的正倍增周期, 则此时反应堆处于超临界状态, 再回插 1-2 步控制棒, 若此时反应堆倍增周期达到无穷, 中子计数达到稳定, 则此时判断为反应堆的“临界点”。

3 学习操纵员基础理论辅导中的反应堆次临界增殖原理应用

次临界增殖原理及其应用是操纵员取照考试中必考的知识, 需要得到学习操纵员和教员关注。

次临界增殖原理在取照理论考试中解答关键点有以下几种, 我们结合具体题目一一分析。

3.1 直接考核次临界增殖公式或其物理意义

例1: 关于次临界增殖, 下列说法中错误的有 [CD]。

- A. 对于次临界反应堆, 当中子源和次临界度不变时, 系统的中子总数趋近一稳定值。
- B. 次临界的反应堆对中子源有放大作用, 放大倍数是 $1/(1-k_{eff})$ 。
- C. 实际运行中可以在次临界下使反应堆达到任意高的功率。
- D. k_{eff} 越接近于 1, 引入等量的正反应性, 中子通量的增量越小, 达到平衡需要时间的越长。

本题目中考核的内容即为次临界增殖公式的物理意义, 其中选项 A 和 B 就是物理意义的直接描述, 选项 D 也是结合公式推导后得到的结论: $N = \frac{S_0}{1-K}$ 可得反应性变化前后的稳定中子

$$\text{计数率差值, } N_2 - N_1 = \frac{1}{1-k_2} - \frac{1}{1-k_1} = \frac{k_2 - k_1}{(1-k_2)(1-k_1)}$$

由于 $\rho = \frac{k-1}{k}$, 因此引入的正反应性可表示为:

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = \frac{k_2 - k_1}{k_2 k_1} \Rightarrow k_2 - k_1 = k_1 k_2 \Delta\rho \Rightarrow N_2 - N_1 = \frac{k_1 k_2 \Delta\rho}{(1-k_2)(1-k_1)},$$

由于每次引入定量的正反应性, 随着不断添加正反应性, k 值增大, 因而计数率增量增大。

3.2 利用次临界增殖公式的变形

例2: 反应堆处于次临界状态, 初始核功率为 P_0 , 添加

$\Delta\rho_1 = \ln \frac{k_2}{k_0} = 0.02$ 后, 稳定的次临界核功率水平变为 $2P_0$, 那

么要使反应堆刚好临界, 还需引入的正反应性 $\Delta\rho_2 = \ln \frac{k_2}{k_1}$ 的大小为 [C]

A. $\Delta\rho_2 = \Delta\rho_1$

B. $\Delta\rho_2 > \Delta\rho_1$

C. $\Delta\rho_2 < \Delta\rho_1$

D. 无法比较

本题目利用次临界增殖公式的变形

$C_0(1-k_0) = C_1(1-k_1)$, 则 $k_1 = \frac{1+k_0}{2}$, 再根据

$\Delta\rho_1 = \ln \frac{k_1}{k_0} = 0.02$, $k_1 = 0.98$, $k_2 = \Delta\rho_2 = \ln \frac{k_2}{k_1} 1 = 0.0198$, 则

$$\Delta\rho_2 < \Delta\rho_1。$$

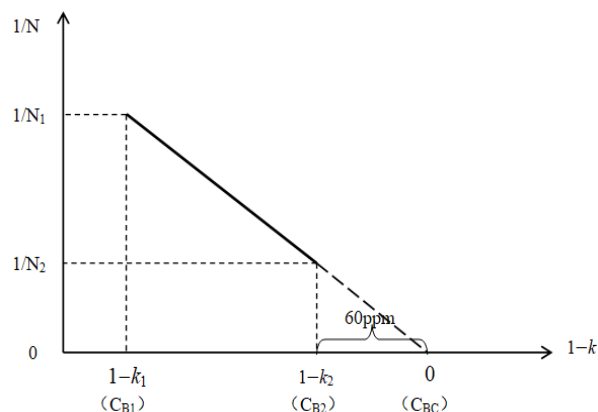


图6 临界外推原因图

3.3 利用次临界外推曲线中的“相似三角形”原理

例3: 在反应堆启动期间, 当硼浓度减少120ppm后, 平均计数率为原来的3倍, 请估算硼浓度还需增减多少ppm才能达临界?

结合次临界增殖公式, 可以得到临界外推原理, 此原理已在前面描述过, 可得到图6临界外推原因图。结合此题, 可知还需要稀释60ppm硼浓度可达临界。“相似三角形”原理的利用可以解决很多题目, 并且简化了计算步骤, 应用方便。

3.4 次临界下“计数率加倍”类型题目

关于次临界时“计数率加倍或减半”的题目较多, 而且此部分的题目应用的原理为前三点提到的原理, 但为了减少考试时的做题时间, 部分题目应该作为结论被记住, 以应用在选择题或判断题上, 如:

(1) 次临界反应堆中, 添加正反应性后中子计数率加倍, 次临界度减半。

(2) 反应堆处于接近临界的次临界状态, 引入一定量的正反应性后, 中子计数率变为原来的3倍, 若再添加上述一半的正反应性, 则反应堆处于临界状态。

(3) 当接近临界点抽提控制棒, 稳定计数率加倍。如果重新

加入导致首次加倍的同样大小的反应性, 稳定计数率将大于加倍并且反应堆将临界。

4 结语

经过上述分析表明, 次临界增殖原理是核电理论教学中必须讲授的知识点, 对机组达临界有实际意义, 同时也是取照人员必须掌握并深刻理解的内容, 以提高技术理论考试成绩及实际操作机组的技能。

[参考文献]

[1] 咎云龙. 培训管理[M]. 原子能出版社, 2003.

[2] 谭世杰. 压水堆次临界状态下反应性测量的理论修正分析与试验初步探讨[J]. 核科学与工程, 2021, 41(4): 675-681.

[3] 郑军伟, 程雄伟. 压水堆核电机组反应堆首次临界启动研究[J]. 自动化仪表, 2021, 42(1): 266-269.

作者简介:

唐莉(1986—), 女, 汉族, 黑龙江省哈尔滨市人, 大学本科, 大亚湾核电运营管理有限公司, 工程师, 研究方向: 核电技术理论教学。