

# 中子倍增理论应用于碘坑仿真研究

郝建立, 陈文振, 王少明

(海军工程大学 核能科学与工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**采用中子倍增理论对碘坑仿真进行研究:首先,建立碘坑仿真模型;然后,将碘坑仿真模型对不同初始功率下反应堆突然停堆后的氙毒反应性变化进行计算,并将所得结果与点堆模型进行比较,计算结果表明,碘坑深度和初始功率呈线性关系;最后,将碘坑仿真模型应用于反应堆碘坑内机动性研究。本工作所得结论对反应堆安全分析和控制运行有一定的理论意义和参考价值。

**关键词:**碘坑;中子倍增;船用反应堆;氙毒

中图分类号:TL329

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2011)07-0842-05

## Application of Neutron Multiplication Theory in Simulation of Iodine Well

HAO Jian-li, CHEN Wen-zhen, WANG Shao-ming

(Department of Nuclear Energy Science and Engineering,  
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The simulation of the iodine well was studied by the neutron multiplication theory. Firstly, the model of simulation for the iodine well was established. Then, the reactivity worth of xenon poisoning in different initial neutron densities was studied by this model, and the result was compared with result of the point reactor model. The result shows that the relationship between the depth of iodine well and the initial neutron density was linearity. In the end, the maneuverability of the reactor in iodine well was studied by this model. The conclusions are very important to the safety analysis and operation of ship nuclear reactors.

**Key words:** iodine well; neutron multiplication; ship nuclear reactor; xenon poisoning

为了满足在海洋条件下运行的需要,核动力船必须有很强的机动性,必须具备随时启动反应堆和大幅度甩负荷后又很快提升功率的能力。而在碘坑下大幅度提升功率时,一方面由于氙吸收中子后被大量消耗,释放出正反应性。

虽然自动棒会自动跟踪下降,但范围有限,自动控制棒可能无法补偿,可能造成正反应性引入事故。另一方面,碘坑深度较高时,反应堆剩余反应性可能不足(特别是反应堆处于寿期末段时),无法满足提升功率的需求,造成事故<sup>[1]</sup>。

因此,研究碘坑内启动对提高舰船反应堆机动性和安全分析有重要的理论意义和应用价值。

反应堆在碘坑内启动时,反应性的变化情况复杂,因此,研究碘坑内启动,须首先研究中毒碘坑曲线。国外有关船用堆碘坑中毒研究报告较少,国内的研究主要采用求解点堆模型和中子扩散方程。张帆等<sup>[2]</sup>通过粗网格有限差分法求解三维两群中子扩散方程,研制出船用堆仿真软件包,进行碘坑仿真计算。黎浩峰等<sup>[3]</sup>通过推导出点堆解析解,得到对碘坑启动问题的物理意义比较清晰的理解。但堆中所有的微观过程链(从核裂变放出中子,中子在介质中迁移,到再次引起核裂变)的每一环节,均是离散的随机过程,最终都要求统计处理<sup>[4]</sup>。而点堆模型动态方程及扩散方程是将中子增殖作为源项处理,把本来离散的中子增殖过程作为连续函数来近似处理,湮灭了中子按代增殖的物理内在机理。

中子倍增理论从中子按代增殖的概念出发,通过离散的角度描述反应堆内中子行为。多年实践证明,该理论是合理的、正确的<sup>[5-6]</sup>。因此,本工作通过从中子按代增殖的概念出发,将中子倍增理论应用于碘坑仿真研究。

## 1 物理模型

考虑缓发中子在内的中子倍增公式<sup>[5]</sup>为:

$$\begin{cases} n_m = n_{m-1}k_m(1 - \beta) + S + \\ \sum_{j=1}^6 c_j(m-1)(1 - e^{-\lambda_j l}) \\ c_{jm} = c_{j(m-1)}e^{-\lambda_j l} + n_{m-1}k_m\beta_j \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $n_m$  为第  $m$  代中子密度;  $k_m$  为第  $m$  代增殖因数;  $\beta$  为缓发中子总份额;  $S$  为中子源在 1 代时间内对 中子数的贡献;  $\lambda_j$  为第  $j$  组缓发中子先驱核的衰变常量;  $c_{jm}$  为第  $m$  代、第  $j$  组缓发中子先驱核浓度;  $l$  为中子增殖的 1 代时间(即瞬发中子 1 代时间);  $\beta_j$  为第  $j$  组缓发中子份额。

考虑缓发中子在内的中子倍增公式是按裂变过程链式反应直接物理图像建立起来的,其物理意义清楚。公式把瞬发中子、中子源、缓发中子均计算在内,无论核裂变链式反应系统是处在次临界、临界、超临界状态,该公式均适用。在中子倍增理论模型下,结合碘、氙浓度变化的规律,建立碘坑仿真模型。

设第  $m$  代,即  $t = ml$  时,初始中子密度  $n_m = n(ml)$ ,初始碘浓度  $N_{I,m} = N_I(ml)$ ,初始氙浓度  $N_{Xe,m} = N_{Xe}(ml)$ 。第  $m+1$  代末的碘浓度  $N_{I,m+1}$  和氙浓度  $N_{Xe,m+1}$  为:

$$N_{I,m+1} = n_m\gamma_1k_m/\nu + N_{I,m}e^{-\lambda_1 l} \quad (2)$$

$$N_{Xe,m+1} = n_m\gamma_{Xe}k_m/\nu + N_{I,m}(1 - e^{-\lambda_1 l}) + N_{Xe,m}e^{-\lambda_{Xe} l} + n_m \frac{\sum_{a,p,m}}{\sum_{a,m}} \quad (3)$$

式中:  $\gamma_1$ 、 $\gamma_{Xe}$  为  $^{135}\text{I}$  和  $^{135}\text{Xe}$  的裂变产额;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_{Xe}$  为  $^{135}\text{I}$  和  $^{135}\text{Xe}$  的衰变常量;  $\nu$  为裂变核每次裂变放出的中子平均数;  $n_mk_m/\nu$  为第  $m+1$  代在 1 代时间内中子引发裂变的次数;式(2)右边第 1 项为第  $m+1$  代在 1 代时间内中子引发裂变对第  $m+1$  代碘浓度的贡献;式(2)右边第 2 项为第  $m$  代的碘浓度在 1 代时间内衰变后剩余的碘浓度;式(3)右边第 1 项为第  $m+1$  代在 1 代时间内中子引发裂变对第  $m+1$  代氙浓度的贡献;式(3)右边第 2 项为在 1 代时间内碘衰变对第  $m+1$  代氙浓度的贡献;式(3)右边第 3 项为第  $m$  代的氙浓度在 1 代时间内衰变后剩下的氙浓度;  $\sum_{a,p,m}$  为第  $m$  代的氙中子宏观吸收截面;  $\sum_{a,m}$  为第  $m$  代的反应堆堆芯的热中子宏观吸收截面,因此,  $\sum_{a,p,m}/\sum_{a,m}$  为 1 代时间内被氙吸收的中子占总被吸收的中子的比例,则式(3)右边第 4 项为在 1 代时间内由于吸收热中子而消失的氙浓度。

由于碘元素的中子吸收截面很小,因此,式(2)、(3)忽略了碘元素对中子的吸收。

由文献[7]得,第  $m$  代的氙毒反应性可近似表达为:

$$\rho_{q,m} = \frac{\sum_{a,p,m}}{\sum_{a,m}} \quad (4)$$

则式(3)可写为:

$$N_{Xe,m+1} = n_m\gamma_{Xe}k_m/\nu + N_{I,m}(1 - e^{-\lambda_1 l}) + N_{Xe,m}e^{-\lambda_{Xe} l} + n_m\rho_{q,m} \quad (5)$$

由文献[7]得第  $m$  代的氙毒反应性的表达式为:

$$\rho_{q,m} = -\frac{f\eta\sigma_{a,Xe}N_{Xe,m}}{\nu\Sigma_f} \quad (6)$$

式中:  $f$  为热中子利用系数;  $\eta$  为每次吸收中子产额;  $\Sigma_f$  为反应堆堆芯宏观裂变截面;  $\sigma_{a,Xe}$  为氙元素中子微观吸收截面。

结合式(1)~(6),得到中子倍增理论的碘

坑仿真模型:

$$\begin{cases} n_m = n_{m-1}k_m(1-\beta) + S + \\ \quad \sum_{j=1}^6 c_{j(m-1)}(1-e^{-\lambda_j t}) \\ c_{jm} = c_{j(m-1)}e^{-\lambda_j t} + n_{m-1}k_m\beta_j \\ \rho_{q,m} = -\frac{f\eta\sigma_{a,Xe}N_{Xe,m}}{\nu\Sigma_f} \\ N_{1,m+1} = n_m\gamma_1k_m/\nu + N_{1,m}e^{-\lambda_1 t} \\ N_{Xe,m+1} = n_m\gamma_{Xe}k_m/\nu + N_{Xe,m}e^{-\lambda_{Xe}t} + \\ \quad N_{1,m}(1-e^{-\lambda_1 t}) + n_m\rho_{q,m} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)为中子倍增理论的碘坑仿真模型,式中, $k_m$ 变化受控制棒行为、温度反馈和氙毒反应性影响。温度反馈对反应性的影响参见文献[6]。

## 2 计算实例

对以 $^{235}\text{U}$ 为燃料的某船用压水堆进行碘坑仿真,并与点堆仿真结果进行比较,压水堆具体参数如下: $\beta_1 = 0.000\ 215$ ,  $\lambda_1 = 0.012\ 4\ \text{s}^{-1}$ ,  $\beta_2 = 0.001\ 424$ ,  $\lambda_2 = 0.030\ 5\ \text{s}^{-1}$ ,  $\beta_3 = 0.001\ 274$ ,  $\lambda_3 = 0.111\ \text{s}^{-1}$ ,  $\beta_4 = 0.002\ 568$ ,  $\lambda_4 = 0.301\ \text{s}^{-1}$ ,  $\beta_5 = 0.000\ 748$ ,  $\lambda_5 = 1.14\ \text{s}^{-1}$ ,  $\beta_6 = 0.000\ 273$ ,  $\lambda_6 = 3.01\ \text{s}^{-1}$ , 中子1代时间  $l = 0.000\ 1\ \text{s}$ ,  $\nu = 2.43$ ,  $f = 0.85$ ,  $\eta = 1.813\ 4$ ,  $\Sigma_f = 1.87$ ,  $\sigma_{a,Xe} = 3 \times 10^{-22}\ \text{m}^2$ ,  $\gamma_1 = 0.063\ 86$ ,  $\gamma_{Xe} = 0.002\ 28$ ,  $\lambda_1 = 2.87 \times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$ ,  $\lambda_{Xe} = 2.09 \times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$ 。

### 2.1 紧急停堆工况分析

反应堆在初始中子密度  $n_0$  分别为  $1.4N_0$ 、 $1.3N_0$ 、 $1.2N_0$ 、 $1.1N_0$ 、 $N_0$ 、 $0.9N_0$ 、 $0.8N_0$ 、 $0.7N_0$  ( $N_0$  为中子密度)下紧急停堆后,对氙毒反应性变化进行仿真研究。反应堆紧急停堆后,引入负反应性较大,使得中子注量迅速降为零,氙毒反应性变化计算结果示于图1。由图1可看出,点堆模型所得计算结果和中子倍增模型所得计算结果相近。随着初始中子密度增加,碘坑深度增加,到达氙毒反应性极值时间增加。

图2示出反应堆紧急停堆后,碘坑深度和初始中子密度的关系。

由图2拟合得到的碘坑深度和初始中子密度呈线性关系,碘坑深度和初始中子密度之间的关系式为:

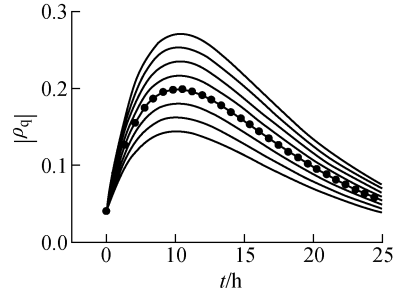


图1 不同初始功率下停堆后氙毒反应性随时间的变化

Fig. 1 Variety of xenon reactivity with time after reactor shutdown

从上到下的初始中子密度分别为  $1.4N_0$ 、 $1.3N_0$ 、 $1.2N_0$ 、 $1.1N_0$ 、 $N_0$ 、 $0.9N_0$ 、 $0.8N_0$ 、 $0.7N_0$

● ——点堆模型所得结果

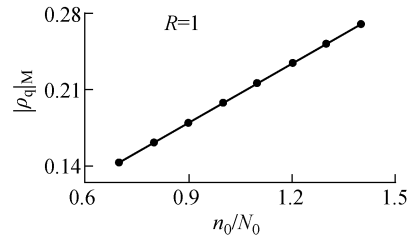


图2 碘坑深度随初始中子密度的变化

Fig. 2 Variety of depth of iodine well with prime neutron density

$$|\rho_q|_M = 0.016\ 73 + 0.181\ 59n_0 \quad (8)$$

式中: $|\rho_q|_M$  为碘坑深度。

该结果可由中子倍增模型很好解释:当反应堆停堆后,式(2)、(3)可写为:

$$N_{1,m+1} = N_{1,m}e^{-\lambda_1 t} = \frac{n_0\gamma_1e^{-\lambda_1 ml}}{(1-e^{-\lambda_1 t})\nu}$$

$$N_{Xe,m+1} = N_{1,m}(1-e^{-\lambda_1 t}) + N_{Xe,m}e^{-\lambda_{Xe}t} \quad (9)$$

设第  $m$  代时氙浓度达到最大值。当氙浓度达到最大值时,  $N_{Xe,m+1} - N_{Xe,m} < 0$ , 故由式(8)可得氙浓度最大值为:

$$N_{Xe,m} = \frac{n_0\gamma_1e^{-\lambda_1 ml}}{\nu(1-e^{-\lambda_{Xe}t})} \propto n_0 \quad (10)$$

由式(10)可看出,氙浓度最大值和初始中子密度呈线性关系,又由于氙毒反应性和氙浓度为正比关系,因此,碘坑深度和初始中子密度呈线性关系。该结果可为反应堆操作人员在紧急停堆后对碘坑深度的预期提供参考,可有效应用于指导舰船反应堆控制运行。

### 2.2 反应堆碘坑下的机动性分析

为回避风浪、海啸等恶劣环境,船必须具有很强的机动性,这要求船用反应堆必须具有随时启动和大幅度甩负荷后很快又提升功率的能力,本工作针对反应堆大幅度甩负荷后又很快提升功率进行研究。反应堆以一定功率运行,对应的初始中子密度为  $N_0$ ,紧急降功率至中子密度  $N_x$ ,  $N_x$  分别为  $1/9N_0$ 、 $1/8N_0$ 、 $1/7N_0$ 、 $1/6N_0$ 、 $1/5N_0$ 、 $1/4N_0$ 、 $1/3N_0$ , 所得结果示于图 3。

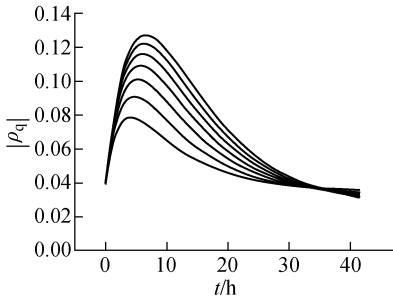


图 3 氙毒反应性随时间的变化

Fig. 3 Variety of xenon reactivity with time  
从上到下分别为中子密度由  $N_0$  降至  $1/9N_0$ 、 $1/8N_0$ 、 $1/7N_0$ 、 $1/6N_0$ 、 $1/5N_0$ 、 $1/4N_0$ 、 $1/3N_0$

由图 3 可见,随着功率下降幅度的增大,碘坑深度增加,到达氙毒反应性绝对值最大时间变长。其中,中子密度由  $N_0$  降至  $1/9N_0$  时碘坑深度达到初始氙毒反应性的 3 倍以上,如果反应堆处于寿期末期,剩余反应性不足,有可能出现在碘坑内无法启动而影响船只机动性。图 4 示出中子密度由  $N_0$  降至  $N_x$  和碘坑深度的关系。由图 4 拟合得到中子密度降至  $N_x$  和碘坑深度的关系式为:

$$|\rho_{q|M} = 0.12546 \times \exp\left(\frac{-N_x}{0.19756N_0}\right) + 0.05513 \quad (11)$$

式(11)的  $R^2$  为 0.9999。该结果可为操作人员在反应堆紧急降功率后对碘坑深度的预期提供参考,可有效应用于指导舰船反应堆控制运行。

为研究在碘坑内紧急提升功率后,氙毒反应性的变化情况,当中子密度由  $N_0$  降至  $1/9N_0$  后,分别取在碘坑前  $t_1$  和碘坑后  $t_2$  两个时间紧急提升功率至  $N_0$ ,其中  $t_1$ 、 $t_2$  时氙毒反应性相

同。计算结果示于图 5、6。

从图 5 可见,碘坑后期提升功率时,氙毒释放的正反应性较到达碘坑前所释放的正反应性要大,且有可能导致氙毒反应性绝对值小于稳定运行时氙毒反应性绝对值。这说明碘坑后期紧急提升功率较到达碘坑前提升功率条件更为恶劣,需尽量避免。

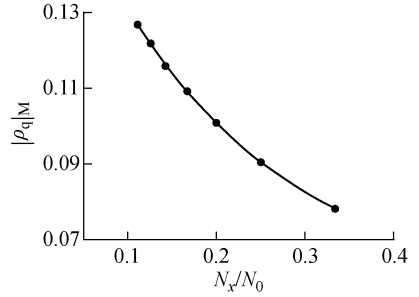


图 4 碘坑深度随  $N_x$  的变化

Fig. 4 Variety of depth of iodine well with  $N_x$

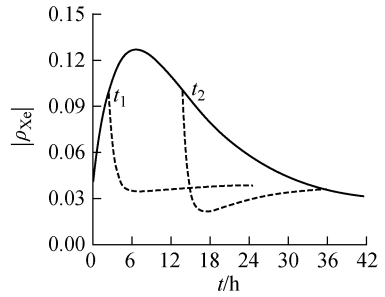


图 5 氙毒反应性随时间的变化

Fig. 5 Variety of xenon reactivity with time  
实线为未提升功率时的氙毒反应性

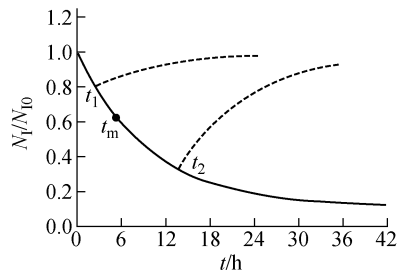


图 6 碘浓度随时间的变化

Fig. 6 Variety of iodine density with time  
实线为碘坑内未提升功率时的碘浓度,  
 $t_m$  为到达碘坑最大深度时间

碘坑后期提升功率时,氙毒释放的正反应

性较到达碘坑前所释放的正反应性要大可由碘浓度变化很好地解释。由图6可见,在到达碘坑前提升功率时,碘浓度很高,碘衰变成氙可对由于吸收中子而消失的氙浓度有一定的补偿,而在碘坑后期,碘浓度已很低,无法对由于吸收中子而消失的氙浓度给予补偿,因此,碘坑后期提升功率会产生很大的正反应性,当超过控制棒自动跟踪范围时会引发反应性事故,需谨慎对待。

### 3 结论

通过中子倍增理论建立了碘坑仿真模型。通过碘坑仿真模型对某压水堆紧急停堆、紧急降功率和紧急大幅度降功率后又紧急大幅度提升功率行为进行计算,对计算结果分析得出以下结论。

1) 中子倍增理论所建立的碘坑仿真模型与点堆模型所得结果相近,可应用于反应堆安全分析和控制运行。

2) 通过对不同的初始功率下,反应堆突然停堆后,氙毒反应性变化进行仿真,发现随着初始中子密度增加,碘坑深度增加,到达氙毒反应性极值时间增加;通过拟合得到碘坑深度和初始中子密度为线性关系,并从理论上对线性进行了解释。该结果可为反应堆操作人员在紧急停堆后对碘坑深度的预期提供参考,可有效应用于指导舰船反应堆控制运行。

3) 通过对反应堆紧急降低功率进行计算发现,随着功率下降幅度的增大,碘坑深度增加,到达氙毒反应性绝对值最大时间变长;通过拟合得到碘坑深度和反应堆降至功率为指数关系。

4) 通过对反应堆碘坑内紧急提升功率仿真计算发现,碘坑后期提升功率时,氙毒释放的正反应性较到达碘坑前所释放正反应性要大,且有可能导致氙毒反应性绝对值小于稳定运行时氙毒反应性绝对值,正反应性释放的速度也

较快。这说明碘坑后期紧急提升功率较到达碘坑前提升功率条件更为恶劣,需尽量避免。

本工作所得结果可为反应堆在碘坑内控制运行和安全分析提供理论依据,具有一定的价值和意义。

### 参考文献:

- [1] 张法邦. 核反应堆运行物理[M]. 北京:原子能出版社,2000.
- [2] 张帆,朱波,蔡章生,等. 舰船用反应堆停堆氙毒特性仿真研究[J]. 原子能科学技术,2006,40(1):67-71.  
ZHANG Fan, ZHU Bo, CAI Zhangsheng, et al. Simulation of xenon poison characters for ship nuclear reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2006, 40(1): 67-71(in Chinese).
- [3] 黎浩峰,许国军,陈文振,等. 碘坑内启堆氙毒反应性研究[J]. 原子能科学技术,2009,43(3):198-202.  
LI Haofeng, XU Guojun, CHEN Wenzhen, et al. Analysis of reactivity worth for xenon poisoning during restart-up of reactor in iodine pit[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(3): 198-202(in Chinese).
- [4] 黄祖洽. 核反应堆动力学基础[M]. 北京:北京大学出版社,2007.
- [5] 王子义. 核反应堆中子倍增理论基础[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [6] 郝建立,王少明,王子义,等. 大阶跃反应性下考虑燃料温度反馈时的中子倍增公式[J]. 原子能科学技术,2010,44(1):31-34.  
HAO Jianli, WANG Shaoming, WANG Ziyi, et al. Neutron multiplication formula with temperature feedback while inserting large step reactivity[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(1): 31-34(in Chinese).
- [7] 谢仲生,张少泓. 核反应堆物理理论与计算方法[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000:259-261.