

文章编号: 1673- 0062(2010) 01- 0001- 04

基于自适应蒙特卡罗方法对海水淡化堆非能动系统失效的研究与分析

肖玲梅¹, 于涛^{1*}, 余红星², 李喆², 汤华鹏²

(1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 2 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041)

摘要: 物理过程失效的研究对于非能动系统来说是十分重要的, 目前重要抽样的蒙卡方法应用最广. 但是该方法寻找设计点时要依赖于一次二阶矩法, 还要对参数标准正态化, 本文提出的基于自适应原理的蒙卡方法, 可以避免上述不足. 以 245 MW 海水淡化堆非能动系统为研究对象, 同时应用自适应蒙卡方法和目前其它方法研究其非能动系统的物理失效概率, 最后分析各方法在非能动系统上的适用性, 研究表明基于自适应原理的蒙卡方法计算结果更佳, 该方法不仅寻找设计点较简便, 而且对抽样效率、计算误差等方面都有较好改善.

关键词: 概率安全评价; 非能动系统; 自适应原理; 自适应蒙特卡罗方法

中图分类号: TL364⁺. 5 **文献标识码:** A

Research and Analysis on Nuclear Desalination Reactor's Passive Systems Based on Adaptive Monte Carlo Method

XIAO Ling-mei, YU Tao^{1*}, YU Hong-xing², LI Ji², TANG Hua-peng²

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China

2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract Adaptive monte carlo method can avoid the shortcomings of first-order and second-moment methods when searching for design point, such as the standardization of the parameters. This paper takes the passive system of nuclear desalination reactor for example, calculating the physical process failure probability of it using four methods, and then make a comparison. Finally, through analyzing the sensitivity of all the critical parameters related to the passive systems, we found that the uncertainty of trip water level, reactor power and the pipe resistance coefficient are most important to the reliability of the passive systems.

Key words PSA; passive system; adaptive principle; adaptive monte carlo method

收稿日期: 2009- 11- 03

基金项目: 国防基础研究基金资助项目 (A3720060121- 07)

作者简介: 肖玲梅 (1985-), 女, 山东日照人, 南华大学核科学技术学院硕士研究生. 主要研究方向: 核反应堆安全分析. * 通讯作者.

在当前反应堆设计改进和新一代反应堆的研发中,越来越重视“固有安全性”,其中就包括了建立在重力法则、热传递法则、惯性原理等基础上的非能动安全性^[1]。非能动安全性具有结构简单,不依赖人为干预和外部能源驱动等特点。非能动系统的应用使系统处于失效安全状态。

虽然非能动系统具有更高的可靠性,但并不意味着绝对可靠。由于作为驱动的自然力与阻力在数量级上很接近,能动系统可忽略的物理过程中的各种不确定性因素变得不可忽略,所以即使部件都正常,仍有可能使系统达不到预定的安全功能,因此物理过程失效的研究对于非能动系统来说是十分重要的^[2]。

Michel Marques, J. E. Pignatelli等人针对非能动系统研究了一套 RMPS方法,研究表明对非能动系统物理可靠性评估,理论上可以采用直接蒙卡方法、减小方差的抽样方法、一次二阶矩方法以及响应面方法。并将 RMPS方法应用于 900 MW 压水堆非能动余热排出系统的可靠性评估,非能动余热排出物理可靠性的计算采用了直接蒙卡方法^[3]。在国内,谢国锋、董节娟等人分别利用响应面法和重要抽样蒙卡方法计算了 HTR-10 的余热排出系统物理过程的失效概率,两种方法计算结果的数量级相同,但响应面法是无法分析误差的近似方法,重要抽样的蒙卡方法更为精确,且可以进行误差分析^[4-5]。闵萍在其博士论文中对高温气冷堆非能动余热排出系统的物理过程失效概率的计算也采用了重要抽样的蒙特卡罗方法^[6]。

综合国内外的研究发现,非能动系统物理过程失效概率的计算,主要是应用结构可靠度的各种方法,例如一次二阶矩法、响应面法、蒙特卡罗模拟方法等。其中重要抽样的蒙特卡罗模拟方法应用最广,但它必须要依赖于一次二阶矩法先寻找设计点。本文提出一种基于自适应原理的寻找设计点的方法,然后将其和蒙特卡罗模拟方法结合,并将此法应用于核能海水淡化堆非能动应急余热排出系统物理可靠性计算中。

1 基于自适应的蒙特卡罗方法

非能动系统物理过程失效概率的数学模型可以像文献[7]一样来描述,通常是最佳估计热工水力学计算程序,假设输入向量为 X ,其输出向量为 Y ,热工计算程序可以视为一个函数映射关系

$$Y = y(X) \quad X = x_1, x_2, \dots, x_n \quad (1)$$

由于程序的输入参量 X 具有不确定性,其输

出量 Y 必然也具有不确定性。假设系统的失效准则为 A ,则 $Y > A$ 将被视为失效,系统的性能函数可表示为:

$$g(X) = A - y(X) \quad (2)$$

则 $g(X) > 0$ 表示成功区域, $g(X) < 0$ 表示失效区域。

1.1 基于自适应原理寻找设计点的方法

已有的寻找设计点的方法,不仅要各参数标准正态化,还要依赖于一次二阶矩法,此法也只能得到设计点的均值,方差无法计算只好固定为原来的方差。此法未必能使方差最小,而且设计点的求得必须依赖于其他方法,有诸多不便。所以本文提出基于自适应原理寻找设计点的方法,可以同时得到设计点的均值和方差。具体算法描述如下:

1) 对输入向量 X 以其概率密度函数随机抽样 N 次,得到 N 组输入向量 $(X_1, X_2, \dots, X_N)$,对应得到 N 个性能函数值 $(g(X_1), g(X_2), \dots, g(X_N))$,找出 $g(X) < 0$ 对应的输入向量 X_i ,即是样本中位于失效区域的部分;

2) 用统计方法得到样本中位于失效区域的输入向量的均值和方差,均值点也即是设计点;

3) 具有这样的均值和方差的正态分布的联合概率密度函数作为我们的重要抽样密度函数;

4) 结合蒙特卡罗模拟方法计算非能动系统物理过程失效概率。

1.2 非能动物理过程失效概率计算模型

性能函数为 $g(X)$ 的非能动系统的失效概率可以表示为如下的积分形式:

$$P_f = \int_{g(X) < 0} f(X) dX \quad (3)$$

其中积分域为 $g(X) < 0$ 即失效区域, $f(X)$ 为输入参量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的联合概率密度函数。引入指示性函数 $I[g(X)]$, 如果 $g(X) < 0$ 表明系统失效, $I[g(X)] = 1$; 如果 $g(X) > 0$ 表明系统成功, $I[g(X)] = 0$ 。 $g(X) = 0$ 对应系统的极限状态,那么可以表示为

$$P_f = \int_{\Omega} I[g(X)] f(X) dX \quad (4)$$

其中积分域 Ω 表示整个空间。

基于自适应原理的蒙特卡罗方法就是以统计失效样本得到的均值和方差对应的联合概率密度函数 $h(X)$ 作为重要密度函数,则系统的失效概率为:

$$\hat{P}_f = \int_{\Omega} \frac{f(X)}{h(X)} h(X) dX$$

$$= \int_{\Omega_1} [g(X)] \frac{f(X)}{h(X)} h(X) dX \tag{5}$$

式中 Ω_1 为失效区域, Ω 为整个区域. 考虑用蒙特卡罗方法求解式 (5) 所示的积分, 就是从服从联合概率密度函数 $h(X)$ 的总体中抽取 N 个样本, 这时失效概率 P_f 的无偏估计为:

$$\hat{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(X_i)] \frac{f(X_i)}{h(X_i)} \tag{6}$$

其方差的无偏估计为:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I[g(X_i)] \frac{f(X_i)}{h(X_i)} - \hat{P}_f)^2 \tag{7}$$

基于自适应原理的蒙卡方法的变异系数表达式为:

$$Cov = \frac{\lambda_u \hat{\sigma}}{E(X) \sqrt{N}} = \frac{\lambda_u \hat{\sigma}}{\hat{P}_f \sqrt{N}} \tag{8}$$

基于自适应原理的蒙特卡罗方法求解非能动系统失效概率的基本算法如下:

- 1) 由于非能动系统是隐式的, 先利用响应面法得到性能函数;
- 2) 利用自适应抽样原理, 找出样本中位于失效区域的点, 计算这些失效点的均值和方差, 作为近似设计点;
- 3) 利用自适应抽样原理得到的近似设计点作为抽样中心, 抽样 N 次, 每一次都代入系统的性能函数, 利用式 (6) 计算失效概率.
- 4) 计算方差, 并利用式 (8) 计算相对误差. 如果相对误差不满足要求, 则增加抽样次数, 再执行第 2) 步, 若满足要求, 则终止计算.

2 自适应蒙卡方法的应用于海水淡化堆

2.1 系统边界与初始化条件

245MW 核能海水淡化堆为中国核动力研究院设计院自主设计开发的低温常压海水淡化堆. 应急余热排出系统是海水淡化堆的专设安全系统, 在事故情况下, 非能动应急余热排出功能靠蓄压水池和反应堆之间以自然循环方式来完成.

本文的研究重点考虑系统模型的 5 个不确定性参数, 反应堆初始功率、蓄压水池氮气空间压力、蓄压水池中水的初始温度、上升管阀门开启的触发水位以及管道阻力系数. 各个参数的概率分布以及取值范围如表 1 所示, 失效准则选取为堆芯包壳限制温度 $1\,204^{\circ}\text{C}$.

表 1 输入参数信息

Table 1 Detailed information of input parameters				
参数	均值	方差	取值范围	分布类型
初始功率	245	2.45	(230, 260)	正态分布
氮气空间压力	0.2	0.025	(0.1, 0.3)	正态分布
水温度	30	4	(15, 45)	正态分布
触发水位	13.8	0.2	(13.0, 14.5)	正态分布
阻力系数	6.0	2.0	(0, 15)	正态分布

2.2 自然循环失效概率的计算与分析

本文选取在 LBLOCA 事故情况下, 计算海水淡化堆余热排出系统物理过程失效概率. 为了便于各种计算方法的比较, 本文同时采用了基于自适应原理的蒙卡方法、响应面法、直接蒙卡方法和基于一次二阶矩的蒙卡方法. 四种方法的计算结果以及对应的变异系数如表 2 所示.

表 2 四种可靠性计算方法的计算结果

Table 2 The outcome of four calculating methods			
计算方法	计算次数	失效概率	相对误差
响应面法	33	3.34×10^{-4}	X
直接蒙卡	106	3.1×10^{-5}	X
一次二阶矩蒙卡	1 000	2.7×10^{-5}	2.73
自适应蒙卡	1 000	1.6×10^{-5}	1.09

从表 2 可以看出在计算高可靠度的非能动系统物理过程失效概率时, 四种方法存在以下特点: 响应面法是误差无法分析的近似方法, 对非线性系统计算结果不佳; 直接蒙卡方法存在抽样效率低、计算费时的缺点, 因抽样次数达不到要求, 误差太大; 一次二阶矩蒙卡方法和自适应蒙卡方法的计算结果相近, 但是基于自适应原理的蒙卡方法在相同的抽样次数下, 误差更小, 计算结果的精确度更高.

为了进一步验证基于自适应原理的蒙卡方法相对于一次二阶矩蒙卡方法的优越性, 本文分别在抽样 100、200、500、1 000 次情况下, 对两种方法的误差作了比较分析, 结果如图 1 所示.

通过图 1 可以发现, 在相同的抽样次数的情况下, 基于自适应原理的方法相对误差更小, 在抽样 200 次时就可以达到一次二阶矩蒙卡方法抽样 1 000 次才能达到的误差水平. 这说明基于自适应原理的蒙卡方法不仅寻找设计点的方法上更简便, 而且抽样效率更高, 其结果更精确.

2.3 参数敏感性分析

敏感性分析可以为如何改进设计, 更有效的

减小系统输出的不确定性从而提高非能动系统可靠性提供指导性的建议. 本系统选取的不确定性参数较少, 因此可以通过确定论方法, 计算单个参数对系统输出的影响. 本文采用对每个参数在均值点上下偏移 $\pm 3\sigma$ 时, 包壳峰值温度之差作为敏感性分析的依据. 敏感性分析的结果如图 2 所示.

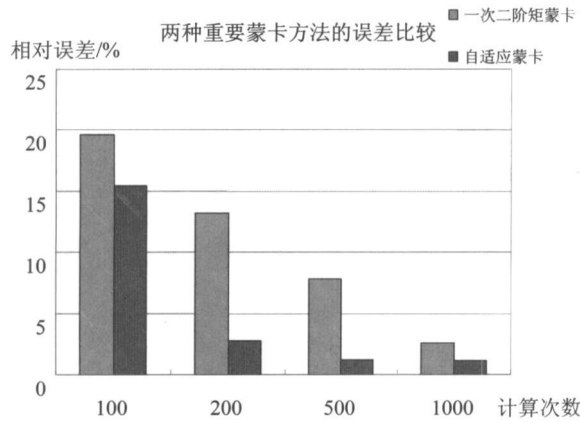


图 1 相对误差比较

Fig 1 Comparison of relative error

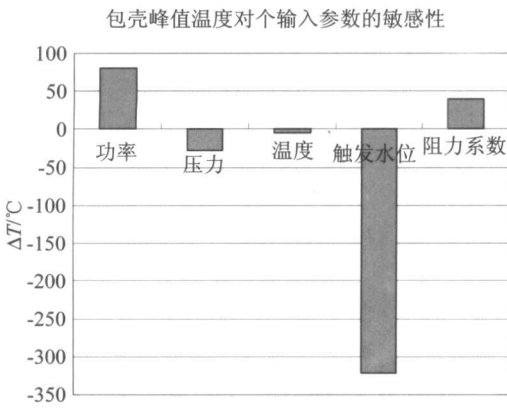


图 2 输入参数的敏感性分析

Fig 2 Sensitivity analysis of input parameters

通过对输入参数的敏感性分析, 可以发现上升管隔离阀的触发水位、堆芯功率以及管道阻力系数对系统输出有较大影响. 其中触发水位影响最大, 因为它直接影响事故发生后自然循环建立的时间, 即余热开始排出的时间, 必定对系统输出影响最大, 理论分析和结果分析具有一致性. 我们可以得出这样的结论: 减小触发水位、堆芯功率以及管道阻力系数的不确定性可以更有效的降低自

然循环的失效概率, 提高非能动系统的物理可靠性.

3 结论

本文建立了自适应蒙卡的理论方法, 并应用于海水淡化堆非能动应急余排物理过程失效概率的分析, 可以得出以下结论:

- 1) 自适应蒙卡方法较一次二阶矩蒙卡方法来说, 相对误差更小, 在相同的误差水平下, 需要的抽样次数更少, 而且不需对参数进行正态标准化, 也不依赖于一次二阶矩方法, 只需要简单的统计方法即可得到设计点的均值和方差, 简单便捷的同时, 又不失其准确性;
- 2) 对于高度可靠的非能动系统来说, 较响应面法和直接蒙卡方法来说, 同属于重要抽样方法的一次二阶矩蒙卡方法和自适应蒙卡方法更适用, 并且二者计算结果相近, 都可以进行误差分析;
- 3) 减小触发水位、堆芯功率以及管道阻力系数三个重要参数的不确定性, 可以更有效的减低自然循环的失效概率, 提高海水淡化堆应急余热排出系统的物理可靠性.

参考文献:

[1] Bugazzi L Evaluation of uncertainties related to passive systems performance[J]. NuclEng Des, 2004, 230: 93-106

[2] Christian Kirchsteiger A new approach to quantitative assessment of reliability of passive systems[J]. Safety Science, 2005, 43: 771- 777

[3] Michel Marques Pignatelli J F, Saigues P, et al Methodology for the reliability evaluation of a passive system and its integration into a Probabilistic Safety Assessment[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235: 2612 - 2631.

[4] 谢国锋, 何旭洪, 童节娟, 等. 响应面方法计算 HTR - 10 余热排出系统物理过程的失效概率 [J]. 物理学报, 2007, 56(6): 3192- 3197.

[5] 谢国锋, 童节娟, 何旭洪, 等. 用 Monte Carlo 方法计算 HTR - 10 余热排出系统物理过程的失效概率 [J]. 核动力工程, 2008, 29(2): 85- 87.

[6] 闵 萍. 概率安全评价在高温气冷堆中的应用 [D]. 北京: 清华大学, 2006

[7] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000