

# 基于蒙特卡洛方法的燃料组件 压紧力计算模型研究

朱发文<sup>1</sup>, 蒲曾坪<sup>1</sup>, 陈平<sup>1</sup>, 马超<sup>1</sup>, 李云<sup>1</sup>,  
周小云<sup>1</sup>, 曾孝敏<sup>1</sup>, 耿飞<sup>2</sup>

1. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213; 2. 福建福清核电有限公司, 福建福清, 350318

**摘要:** 基于蒙特卡洛分析方法建立了燃料组件压紧力计算模型, 开展了压紧力计算模型的验证, 证实了模型的有效性。实际工程中运用蒙特卡洛方法进行压紧系统验证计算时, 采用 20 万次模拟次数是比较合适的。

**关键词:** 蒙特卡洛方法; 燃料组件; 压紧力; 模型

中图分类号: TL352 文献标志码: A

## Investigation on Hold-down Force Calculation Model of Fuel Assembly Based on Monte Carlo Algorithm

Zhu Fawen<sup>1</sup>, Pu Zengping<sup>1</sup>, Chen Ping<sup>1</sup>, Ma Chao<sup>1</sup>, Li Yun<sup>1</sup>,  
Zhou Xiaoyun<sup>1</sup>, Zeng Xiaomin<sup>1</sup>, Geng Fei<sup>2</sup>

1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;  
2. Fuqing Nuclear Power Co. Ltd., Fuqing, Fujian, 350318, China

**Abstract:** The hold-down force calculation model of fuel assembly was established based on the Monte Carlo algorithm, and model validation has been demonstrated its validity. It is suitable to use 200 thousand simulation times for the hold-down system analysis when using Monte Carlo algorithm in practice.

**Key words:** Monte Carlo algorithm, Fuel assembly, Hold-down force, Model

### 0 引 言

燃料组件压紧系统在反应堆堆内的行为十分复杂, 需要综合考虑燃料组件的辐照生长、板弹簧的辐照松弛、燃料组件和堆腔的热膨胀以及板弹簧材料性能随温度变化等因素。在当前燃料组件设计中, 一般采用确定论方法开展燃料组件压紧系统分析计算。采用确定论方法计算时, 对各种影响压紧力的参数均取极限值, 并且对不确定性进行算术累加。事实上, 各种影响压紧力的参数均同时处于极限值的概率非常小, 因此得到的最小压紧力过于保守, 这导致燃料组件压紧力计算结果难以满足准则要求<sup>[1]</sup>。

为更准确地评估燃料组件压紧力, 需采用更合理的统计学方法进行燃料组件压紧系统验证。蒙特卡洛方法就是一种以概率统计理论为指导的数值计算方法, 可以进行大量模拟实际情况的计算, 每次计算时各种变量按给定的概率分布规律随机生成, 并经模型计算输出结果。然后对大量的计算结果进行统计处理, 得到在一定置信度下压紧力的统计分布范围。在实际工程中, 各变量一般遵循一定的概率分布, 通过基于一定置信度的统计计算结果开展计算, 计算结果更接近真实值。法国、韩国等已展开过相关计算<sup>[2]</sup>, 国内目前还尚未看到相关报道, 仅基于现有程序采用方

和跟法对压紧系统验证中的不确定性进行了初步探索<sup>[3]</sup>。但采用蒙特卡洛方法还需进行相应的模型开发,以便处理大量的计算数据。因此,有必要系统开展基于蒙特卡洛方法的燃料组件压紧力分析模型的开发与验证工作。

## 1 模型建立

基于蒙特卡洛方法开展压紧系统验证时,需开发随机数生成模块、弹簧冷热态特性计算模块、辐照生长和松弛计算模块、力与变形计算模块以及数据统计模块。

### 1.1 随机数生成模块

基于蒙特卡洛方法开展压紧系统验证,关键在于确定各种压紧力影响参数的不确定性,该不确定性涉及到参数的随机数生成,其正确与否会影响到后续计算的准确性。随机数生成前,先要判断影响参数是确定值参数还是随机性参数。如对应工况的温度参数、材料热膨胀系数、板弹簧特性曲线、蒙特卡洛计算次数、置信度水平可归为确定值参数,而堆腔高度参数、燃料组件结构参数、燃料组件重量及水力载荷数据则应归为随机性参数。

针对随机性参数,根据参数的名义值、公差以及随机数分布类型,可以用随机数生成算法得到各参数的随机数。随机数分布类型设定了均匀分布和正态分布 2 种可供选择,当 1 个输入参数不能确定为正态分布,从保守上考虑则可以将该参数确定为均匀分布。根据每个参数的名义值、公差以及分布类型,可以计算出每个参数的标准差。

### 1.2 弹簧冷热态特性计算模块

根据输入的弹簧载荷—变形数据点,将塑性区的数据输入(第 1 点为冷态屈服点),通过在弹簧冷态塑性区采用最小二乘法进行多项式内插,得到 1 个表示为所有冷态塑性区内的函数,该多项式函数即为弹簧的冷态特性。

弹簧热态特性可通过冷态特性和转换系数获得。如热态屈服点由冷态屈服点和 1 个修正系数确定,修正系数为热冷态屈服强度之比除以热冷态杨氏模量之比的值。通过一系列冷热态转换,可获得弹簧的热态特性。

### 1.3 辐照生长和松弛计算模块

辐照引起的燃料组件生长和弹簧松弛均对压

紧力产生影响,同时考虑这两种现象需要一步步地迭代计算,计算量非常庞大。为了减少计算步骤和计算量,可按照先生长一半、松弛、再生长一半的顺序进行处理。

根据每个循环下的快中子注量和燃料组件生长规律,可计算出每个循环末燃料组件的最小、名义和最大生长率;根据压紧弹簧处的快中子积分通量可计算出每个循环末的弹簧松弛率。其中,可以根据组件类型的不同而选择不同的燃料组件生长规律。

### 1.4 力与变形计算模块

先计算弹簧变形量和间隙,再计算各种工况(冷态、泵启动、热备用、功率运行等)下弹簧压紧力,然后对各种工况下水力学力  $H$ 、燃料组件重力  $W$ 、浮力  $B$  和压紧力  $F$  开展平衡力  $P$  计算。其中,  $F$  为单次运算的结果,  $W$ 、 $H$ 、 $B$  为单次随机取值结果。

### 1.5 数据统计模块

当实际计算次数小于设定次数时,继续开展压紧力计算,直到实际计算次数等于规定的计算模拟次数为止。计算完成后,在给定置信度和容许区间情况下,对计算结果进行统计,具体计算方法如下:

计算结果的均值:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (1)$$

计算结果的标准差:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (2)$$

计算结果  $R$  的最小值:

$$R_{\min} = \bar{t} - kS \quad (3)$$

$R$  的最大值:

$$R_{\max} = \bar{t} + kS \quad (4)$$

式中,  $t$  为单次计算值;  $i$  为实际计算次数;  $n$  为设定次数;  $\bar{t}$  为所有计算值的均值;  $S$  为标准差;  $k$  为置信度和容许区间对应的统计系数。

## 2 模型验证

根据蒙特卡洛方法建立的压紧力计算模型开发了压紧力分析程序 HOFA。为了全面验证压紧力计算模型的正确性,开展了多种方式的验证,

包括随机数生成验证、分布类型及模拟次数验证等。

### 2.1 随机数生成验证

通过统计分析蒙特卡洛方法计算中有关变量随机输入数据的分布情况，验证随机数生成的正确性。采用随机变量的输入数据并统计分析随机输入数据的分布情况，以验证随机数生成模块的运行情况。

图 1 给出了其中一个随机输入变量—上管座冷态高度统计分布图，可看出上管座冷态高度分布规律符合给定的正态分布。根据随机变量统计分布图的数据分布情况，表明随机数生成模块符合模型设计要求。

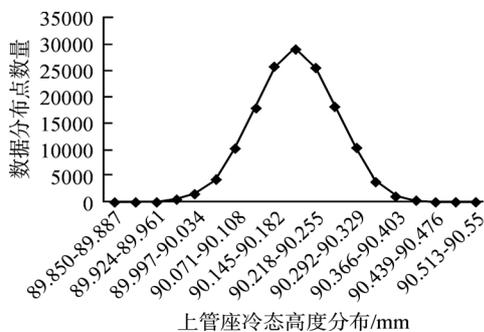


图 1 上管座冷态高度的随机数分布图

Fig. 1 Random Distribution of Top Nozzle Height in Cold

### 2.2 分布类型及模拟次数验证

蒙特卡洛方法是基于大量的数学模拟计算结果并经过统计处理得到某一置信度下的统计分布范围。模拟计算的次数越多，计算得到的结果越精确；但是模拟计算次数越多，计算的工作量就越大。分别针对 2 种随机数分布类型（均匀分布和正态分布），采用不同的模拟次数进行计算。通过对比各模拟次数的计算结果，以验证蒙特卡洛方法的正确性。综合计算结果对比情况及其他因素确定合适的模拟计算次数。当相邻模拟次数例题的计算结果偏差小于 2% 时，可以认为该计算的模拟次数是可行的。一方面，小于 2% 的压紧力及屈服力波动范围在工程上可以接受；另一方面，进一步提高模拟次数将大幅增加计算时间，从而会降低计算效率，提高计算成本。

验证例题主要考虑了均匀分布和正态分布两种随机数分布类型，每种均采用不同的模拟次数进行多次计算。在相同模拟次数的情况下，通过

对比多次计算得到的各项压紧力结果，验证蒙特卡洛方法的正确性并确定合适的模拟计算次数。计算输入的随机变量的分布类型采用均匀分布和正态分布时，在给定置信度（95%）和容许区间（95%）的情况下对各模拟次数分别进行 10 次计算。

（1）正态分布验证：当所有随机变量的分布类型采用正态分布时，经过各模拟次数的多次计算，各项压紧力及屈服力的最大偏差值见表 1。验证结果表明，随着模拟次数的增加，相同模拟次数的多次计算结果不断趋于收敛。当模拟次数为 15 万时，多次计算的各压紧力及屈服力的最大偏差值均小于 2%，满足验证要求（不大于 2%）。因此，综合计算结果对比情况，当随机变量的分布类型均采用正态分布时，计算中采用 15 万次模拟次数是比较合适的。

（2）均匀分布验证：当所有随机变量的分布类型采用均匀分布时，经过各模拟次数的多次计算，各项压紧力及屈服力的最大偏差值见表 2。验证结果表明，随着模拟次数的增加，相同模拟次数的多次计算结果不断趋于接近，即计算结果越来越精确。可以看出，当模拟次数达到可模拟次数上限 50 万次时，各项压紧力及屈服力的最大偏差值约 4.3%，未达到验证要求（不大于 2%），说明计算结果的收敛性欠佳。与其他方法相比，采用全均匀分布验证的蒙特卡洛方法适用性较差。

（3）混合验证：上述均匀分布验证和正态分布验证为蒙特卡洛方法压紧力验证的两种极端例子。事实上，各输入参数的随机分布有些服从均匀分布，有些则服从正态分布。基于正态分布和均匀分布的计算基础，混合分布验证的模拟次数只计算了 15 万次和 20 万次，每种模拟次数分别进行了 10 次计算，结果详见表 3。计算结果表明，当模拟次数为 15 万次时，多次计算的各压紧力及屈服力的最大偏差值为 2.826%；当模拟计算次数提高至 20 万次时，多次计算的各压紧力及屈服力的最大偏差值均小于 2%，满足验证要求（不大于 2%）。这说明，服从均匀分布的参数给验证结果的收敛性带来一定的影响。随着服从均匀分布的输入参数增多，需要增加模拟计算次数才能使各项压紧力及屈服力的最大偏差值满足验证要求。

表 1 正态分布时的各项计算结果偏差

Table 1 Computation Results Bias of Normal Distribution

计算项	多次计算结果的最大偏差/%					
	2000 次	10000 次	50000 次	100000 次	150000 次	200000 次
冷态最大压紧力	1.535	0.838	1.832	0.743	0.451	0.321
热态最大压紧力	9.296	7.778	4.845	1.453	0.873	0.769
冷态中心区最小压紧力	5.662	5.519	0.630	0.630	0.198	0.136
冷态边缘区最小压紧力	2.590	2.311	3.559	1.413	0.197	0.137
热态中心区最小压紧力	11.798	8.565	5.708	2.417	1.615	0.173
热态边缘区最小压紧力	12.594	1.632	1.018	0.653	0.201	0.246
最小屈服力	3.926	2.443	0.878	0.846	0.276	0.181

表 2 均匀分布时的各项计算结果偏差

Table 2 Computation Results Bias of Uniform Distribution

计算项	多次计算结果的最大偏差/%					
	50000 次	100000 次	200000 次	300000 次	400000 次	500000 次
冷态最大压紧力	6.840	4.627	2.348	1.326	0.861	0.784
热态最大压紧力	16.435	10.904	4.308	1.721	1.463	0.090
冷态中心区最小压紧力	11.536	11.528	1.946	0.676	0.596	0.205
冷态边缘区最小压紧力	8.270	7.411	5.959	4.476	4.046	4.228
热态中心区最小压紧力	18.952	18.841	6.530	5.593	1.902	1.831
热态边缘区最小压紧力	24.689	22.660	13.008	11.381	4.143	3.759
最小屈服力	4.468	3.332	2.143	1.131	1.629	0.774

表 3 混合分布时的各项计算结果偏差

Table 3 Computation Results Bias of Mix Distribution

计算项	多次计算结果的最大偏差/%	
	150000 次	200000 次
冷态最大压紧力	2.841	0.160
热态最大压紧力	0.189	0.176
冷态中心区最小压紧力	0.192	0.096
冷态边缘区最小压紧力	0.131	0.101
热态中心区最小压紧力	1.408	0.209
热态边缘区最小压紧力	0.212	0.265
最小屈服力	0.121	0.077

以上验证结果表明,当随机变量的分布类型服从混合分布时(部分输入参数为正态分布,部分输入参数为均匀分布),蒙特卡洛方法计算中采用 20 万次模拟次数是比较合适的。

### 3 结 论

基于蒙特卡洛方法开展了燃料组件压紧力计算模型研究,建立了压紧力计算模型,并开展了

压紧力计算模型的验证,结论如下:

(1) 当随机变量的分布类型都采用均匀分布时,其计算结果的收敛性欠佳;当随机变量的分布类型都采用正态分布时,其计算结果则具有较好的收敛性。

(2) 基于参数实际分布及计算收益考虑,随机变量的分布类型应采用混合分布(正态分布参数与均匀分布参数均有),其计算结果趋于收敛,且在计算中采用 20 万次模拟次数是比较合适的。

参考文献:

- [1] 张林,蒲曾坪,冯琳娜. 燃料组件压紧部件分析研究[J]. 核动力工程, 2013, 34(S1):148-151.
- [2] Sang Youn Jeon, Nam Gyu Park, Gyu Tae Choi, et al. An Investigation on the Holddown Margin using Monte-Carlo Algorithm for the PWR Fuel Assembly[C]. Transactions, SMiRT 19, Toronto, August 2007.
- [3] 李云,李华. 统计法在燃料组件压紧验证中的应用研究[J]. 中国核电, 2014, 7(S1): 215-218.

(责任编辑:张祚豪)