

Analysis Method Research for the Influence of Core Power Distribution on RPV Radiation

Chunmei Xia, Qianxue Ding, Qiliang Mei

Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai
Email: xiacm@snerdi.com.cn

Received: Jun. 23rd, 2016; accepted: Jul. 10th, 2016; published: Jul. 13th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Core power distribution determines the distribution of core fission neutron and γ ray source. In the case of a certain reactor arrangement, core power distribution is the main factor that affects the radiation safety of reactor pressure vessel (RPV) (as the fast neutron ($E > 1.0$ MeV) flux in RPV). By combining the forward transport method with the adjoint transport method of a 2D discrete coordinate method program DORT, this paper presents a set of analysis method which can quickly judge the effect of the core power distribution change on RPV maximum fast neutron flux based on the CAP1400 reactor model. This method avoids the necessity to perform repeated transport calculation in the past analysis model. The sensitivity analysis for the influence of core power distribution on RPV radiation can be finished with one forward transport calculation and one adjoint transport calculation, as well as straightforward data process. This method can greatly improve the efficiency of calculation and analysis.

Keywords

Power Distribution, Fast Neutron Flux, Discrete Coordinate Method, Forward Transport, Adjoint Transport

堆芯功率分布对RPV辐照影响的分析方法研究

夏春梅, 丁谦学, 梅其良

上海核工程研究设计院, 上海

摘要

堆芯功率分布决定了堆芯裂变中子和 γ 射线源的分布,在堆本体布置确定的情况下,堆芯功率分布成为影响反应堆压力容器(RPV)辐照安全(即RPV中的快中子($E > 1.0 \text{ MeV}$)注量率)的主要因素。本文基于CAP1400反应堆模型,结合使用二维离散纵标法程序DORT的正向输运和共轭输运方法,研究给出了一套能快速判断堆芯功率分布变化对RPV中最大快中子注量率影响的分析方法。该方法避免了以往需要进行反复输运计算的分析模式,只需进行一次正向输运和共轭输运计算、并辅以简单的数据处理过程,即可完成堆芯功率分布对RPV辐照影响的敏感性分析,从而能大大提高计算分析效率。

关键词

功率分布, 快中子注量率, 离散纵标法, 正向输运, 共轭输运

1. 引言

核电厂正常运行堆芯相关一次屏蔽计算的辐射源为堆芯裂变中子和 γ 射线源,堆芯裂变中子和 γ 射线源分布取决于堆芯功率密度的空间分布,在堆本体布置确定的情况下,堆芯功率分布是影响一次屏蔽计算结果的主要因素。而在一次屏蔽分析中,反应堆压力容器(RPV)中的快中子($E > 1.0 \text{ MeV}$,本文提到的快中子均为此能量范围)注量率是最重要的考虑因素,因为RPV中的碳钢材料受到快中子辐照会发生性能变化,从而影响电厂的运行和寿命。因此本文针对堆芯功率分布变化对RPV中最大快中子注量率的影响进行研究分析,确保反应堆运行寿期内RPV的辐照安全。

为分析堆芯功率分布变化对RPV中最大快中子注量率的影响,若采用常用的一次屏蔽分析方法,需要针对多种功率分布方案进行反复计算,导致计算量过大且容易出错。为提高计算分析效率,本文结合使用二维离散纵标法程序DORT [1]的正向输运和共轭输运方法,研究得到了一种能快速判断堆芯功率分布变化对RPV中最大快中子注量率影响的分析方法。

2. 分析方法

2.1. 计算分析流程

首先采用DORT的正向输运方法[2],针对反应堆的 (R, θ) 几何,计算得到RPV内表面快中子注量率的周向分布,从而确定RPV中的最大快中子注量率 $\varphi(R, \theta)$ ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)及其所在的位置(假定RPV中的最大快中子注量率出现在其内表面)。

其次采用DORT的共轭输运方法[3],针对反应堆的 (R, θ) 几何,计算并通过后处理得到堆芯内不同位置各组件对RPV中最大快中子注量率的相对贡献 $F_i(x, y)$ 。

结合以上的正向输运和共轭输运结果进行堆芯功率分布对RPV辐照安全影响的敏感性分析,具体分析过程如图1所示。

2.2. 各组件单个粒子贡献分析方法

各组件对RPV中最大快中子注量率 $\varphi(R, \theta)$ 的贡献 $\varphi_i(R, \theta)$ 如下:

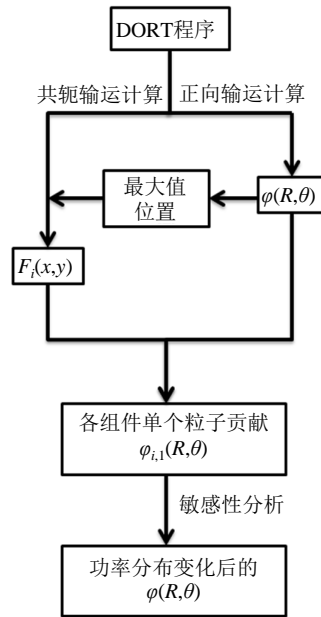


Figure 1. Analysis flow chart for the influence of core power distribution on RPV radiation
图 1. 堆芯功率分布对 RPV 辐照影响的分析流程图

$$\varphi_i(R, \theta) = \varphi(R, \theta) \times \overline{P_i(x, y)} \times \overline{F_i(x, y)} \quad (1)$$

式中, $\varphi_i(R, \theta)$ 为组件 i 对 RPV 中最大快中子注量率 $\varphi(R, \theta)$ 的贡献; $\varphi(R, \theta)$ 为 DORT(R, θ) 正向输运计算得到的 RPV 中的最大快中子注量率, $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$; $F_i(x, y)$ 为 DORT(R, θ) 共轭输运计算得到的堆芯内不同位置各组件对 RPV 中最大快中子注量率的相对贡献; $P_i(x, y)$ 为组件 i 在堆芯平衡循环寿期内平均的径向(x, y)相对功率密度; $\overline{P_i(x, y)} \times \overline{F_i(x, y)}$ 表示将参数 $P_i(x, y) \times F_i(x, y)$ 进行全堆芯归一。

各组件实际产生的粒子数 N_i 如下:

$$N_i = N_0 \times \overline{P_i(x, y)} \quad (2)$$

式中, N_i 为组件 i 实际裂变产生的粒子数; N_0 为全堆芯平均单位高度内由于裂变每秒产生的中子和 γ 射线总的粒子数; $\overline{P_i(x, y)}$ 表示将参数 $P_i(x, y)$ 进行全堆芯归一。

各组件单个粒子对 RPV 中最大快中子注量率的贡献如下:

$$\varphi_{i,1}(R, \theta) = \varphi_i(R, \theta) / N_i \quad (3)$$

式中, $\varphi_{i,1}(R, \theta)$ 为组件 i 中平均单个粒子对 RPV 中最大快中子注量率的贡献。

2.3. 敏感性分析方法

通过以上分析可以判断哪些组件对 RPV 中的最大快中子注量率的影响较大, 再通过这些组件功率密度分布进行调整, 定量分析组件功率密度分布变化对 RPV 中最大快中子注量率 $\varphi(R, \theta)$ 的影响:

$$\varphi(R, \theta)' = \sum \left(N_0 \times \overline{P_i(x, y)'} \times \varphi_{i,1}(R, \theta) \right) \quad (4)$$

式中, $\varphi(R, \theta)'$ 为调整组件功率密度之后的 RPV 中的最大快中子注量率, $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$; $\overline{P_i(x, y)'}$ 为调整后的组件 i 在堆芯平衡循环寿期内平均的径向(x, y)按全堆芯归一的功率密度。

根据公式(4)即可进行堆芯功率密度变化对 RPV 中最大快中子注量率影响的敏感性分析。

3. 计算模型和参数

3.1. 几何结构

本文基于 CAP1400 反应堆进行建模计算。CAP1400 堆芯燃料组件数为 193 个, 单个燃料组件截面积为 $21.402 \text{ cm} \times 21.402 \text{ cm}$, 燃料组件中心距为 21.504 cm , 堆芯活性区高度为 426.72 cm 。

本文对 RPV 内表面的快中子注量率进行分析, 建模时, 为提高计算效率, 暂不模拟堆芯围筒半环板、RPV 以外区域和辐照监督管及其支架。堆芯围板厚度为 3.0 cm ; 吊篮内半径为 189.5 cm , 厚度为 6.0 cm ; RPV 内表面堆焊层内半径为 221.5 cm , 厚度为 0.6 cm ; RPV 厚度为 22.5 cm 。

图 2 给出了 DORT(R, θ) 计算模型的水平剖面简图。

3.2. 功率密度分布

本文基于堆芯核设计给出的 CAP1400 堆芯平衡循环寿期内平均径向(x, y)的组件功率密度分布进行敏感性分析(假定组件内 PIN-BY-PIN 相对功率密度分布不变)。

4. 计算结果和分析

4.1. 各堆芯组件对 RPV 中最大快中子注量率的贡献

采用 DORT(R, θ) 的正向输运方法, 计算得到 RPV 内表面快中子注量率的周向分布, 见图 3。由图 3 可以看出, RPV 中的最大快中子注量率 $\phi(R, \theta)$ 为 $1.22 \times 10^{10} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 位于 45° 、 135° 、 225° 和 315° 方位角附近, 由于堆芯的对称性, 本文选取 45° 方位角附近的 RPV 内表面的最大快中子注量率进行分析。

采用 DORT(R, θ) 的共轭输运方法, 计算得到堆芯内不同位置各组件对 RPV 中最大快中子注量率的相对贡献, 具体见表 1。根据表 1 可以判断, L141、M13、M14、N12 和 N13 位置处的组件对 RPV 中的最大快中子注量率贡献较大, 贡献约占 94.2%, 因此以下主要针对这几个组件的功率调整进行 RPV 辐照影响的敏感性分析。

4.2. 敏感性分析

CAP1400 反应堆堆芯额定热功率为 4040 MW , 计算得到全堆芯平均单位高度内由于裂变每秒产生的中子和 γ 射线总的粒子数 N_0 为 5.76×10^{18} 。

根据以上计算结果, 再结合 1.2 和 1.3 节的分析方法, 分别调整组件 L141、M13、M14、N12 和 N13 的功率密度(其它条件不变), 可得出 RPV 中最大快注量率的变化率随各组件功率密度变化率的变化趋势基本上呈线性关系(具体见图 4), 组件 L141、M13、M14、N12 和 N13 对应的曲线斜率分别约为 0.0544、0.1402、0.2869、0.0531 和 0.2837, 组件 M14 的影响最大, 其次为组件 N13。

当组件 L141、M13、M14、N12 和 N13 的功率密度同时变化时, 通过分析可得出如下的近似经验公式:

$$0.0544 \times A_{L141} + 0.1402 \times A_{M13} + 0.2869 \times A_{M14} + 0.0531 \times A_{N12} + 0.2837 \times A_{N13} \approx A_{\phi(R, \theta)}$$

其中 A_{L141} 、 A_{M13} 、 A_{M14} 、 A_{N12} 和 A_{N13} 分别为组件 L141、M13、M14、N12 和 N13 的功率密度变化率, $A_{\phi(R, \theta)}$ 为 RPV 中最大快中子注量率的变化率。当知道各组件的功率密度变化率时, 可直接通过以上的经验公式近似得出 RPV 中最大快中子注量率的变化率。

5. 结论

本文基于 CAP1400 反应堆模型及其堆本体设计参数, 结合使用二维离散纵标法程序 DORT 的正向输

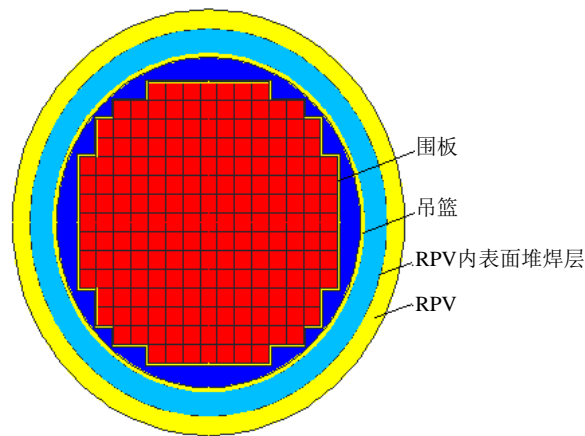


Figure 2. Horizontal cross-section diagram of DORT(R, θ) calculation model
 图 2. DORT(R, θ)计算模型水平剖面简图

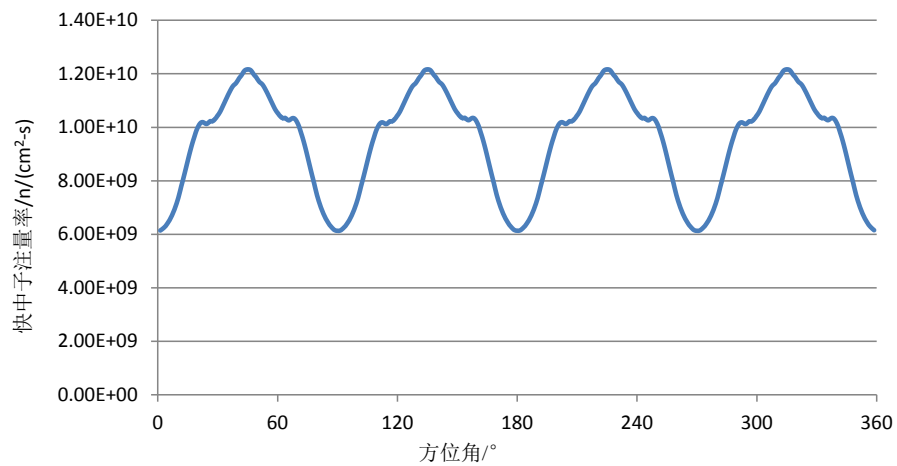


Figure 3. The circumferential distribution of fast neutron flux on RPV inner surface
 图 3. RPV 内表面快中子注量率的周向分布

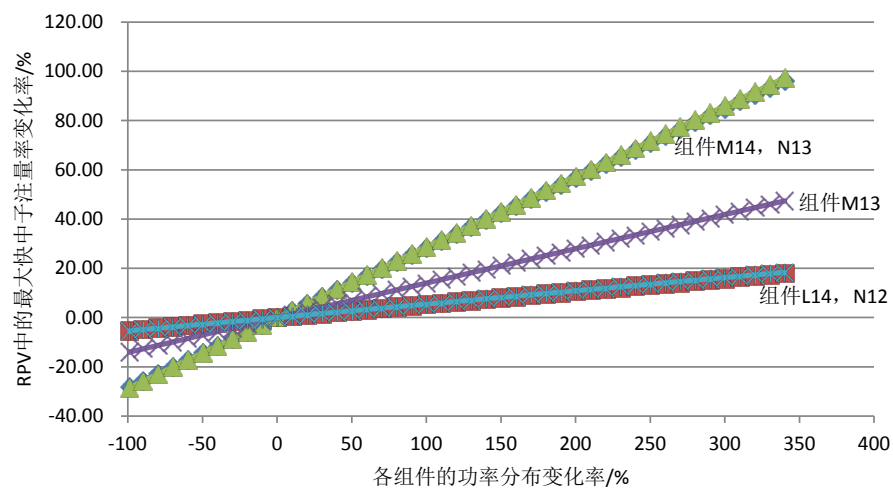


Figure 4. The influence of change of assembly power density on RPV maximum fast neutron flux
 图 4. 组件功率密度变化对 RPV 中最大快中子注量率的影响

Table 1. Relative contributions of different assemblies in core to RPV maximum fast neutron flux
表 1. 堆芯内不同位置各组件对 RPV 中最大快中子注量率的相对贡献

编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1					2.77-15	7.28-15	2.01-14	5.21-14	1.23-13	2.70-13	5.22-13				
2			1.43-15	5.03-15	1.41-14	3.67-14	1.03-13	2.83-13	7.10-13	1.64-12	3.44-12	6.76-12	1.19-11		
3		1.43-15	6.01-15	2.25-14	7.77-14	2.16-13	5.81-13	1.67-12	4.49-12	1.07-11	2.28-11	4.63-11	8.64-11	1.40-10	
4		5.04-15	2.26-14	1.02-13	3.97-13	1.31-12	3.53-12	1.06-11	2.90-11	7.17-11	1.61-10	3.35-10	6.53-10	1.12-09	
5	2.78-15	1.42-14	7.80-14	3.97-13	1.82-12	6.76-12	2.07-11	6.39-11	1.87-10	4.83-10	1.15-09	2.51-09	5.00-09	8.57-09	1.45-08
6	7.38-15	3.70-14	2.17-13	1.31-12	6.77-12	2.99-11	1.12-10	3.82-10	1.21-09	3.40-09	8.43-09	1.91-08	3.98-08	7.05-08	1.07-07
7	2.04-14	1.04-13	5.86-13	3.56-12	2.08-11	1.12-10	5.07-10	2.31-09	8.09-09	2.41-08	6.29-08	1.48-07	3.22-07	6.17-07	8.28-07
8	5.30-14	2.88-13	1.69-12	1.07-11	6.44-11	3.84-10	2.32-09	1.24-08	5.15-08	1.72-07	4.74-07	1.16-06	2.65-06	5.23-06	7.16-06
9	1.25-13	7.25-13	4.58-12	2.95-11	1.89-10	1.23-09	8.15-09	5.16-08	2.25-07	9.58-07	3.35-06	8.96-06	2.17-05	4.46-05	6.52-05
10	2.76-13	1.68-12	1.10-11	7.32-11	4.92-10	3.45-09	2.44-08	1.73-07	9.61-07	4.14-06	1.84-05	6.57-05	1.81-04	4.04-04	6.82-04
11	5.39-13	3.56-12	2.35-11	1.66-10	1.19-09	8.63-09	6.41-08	4.80-07	3.38-06	1.85-05	8.94-05	4.47-04	1.56-03	3.63-03	7.34-03
12		7.02-12	4.80-11	3.51-10	2.59-09	1.97-08	1.52-07	1.18-06	9.13-06	6.66-05	4.50-04	2.61-03	1.26-02	3.49-02	
13		1.24-11	9.12-11	6.80-10	5.20-09	4.14-08	3.34-07	2.71-06	2.24-05	1.86-04	1.59-03	1.27-02	8.35-02	3.91-01	
14			1.46-10	1.17-09	8.97-09	7.37-08	6.44-07	5.36-06	4.64-05	4.21-04	3.77-03	3.59-02	3.98-01		
15					1.53-08	1.12-07	8.68-07	7.24-06	6.83-05	7.14-04	7.71-03				

注：2.77-15 表示科学计数法 2.77E-15，表中所有数据表述法相同。

运和共轭输运方法，研究了得到了一种能快速判断堆芯功率分布变化对 RPV 中最大快中子注量率影响的分析方法。该分析方法避免了以往需要进行反复输运计算的分析模式，只需进行一次正向输运和共轭输运计算、并辅以简单的数据处理过程，便可完成堆芯功率分布对 RPV 辐照影响的敏感性分析，能大大提高计算分析效率。

针对其它类似堆型，可采用同样的方法给出相应的经验公式，从而可以快速定量判断组件径向功率分布变化对 PRV 中最大快中子注量率的影响，以减少计算量，提高计算分析效率。

参考文献 (References)

[1] DORT, a Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code. ORNL/TM-11778.
 [2] U.S. (2001) Nuclear Regulatory Commission. Regulatory Guide 1.190 Calculation and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence. Office of Nuclear Regulatory Research.
 [3] 丁谦学, 夏春梅, 梅其良. CAP1000 核电厂堆外探测器响应函数计算方法研究[J], 核科学与工程, 2016: 36(2): 257-262.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>