

# I、II类工况下堆芯预计发生DNB燃料棒数量的统计学计算方法

严亚伦, 毛玉龙

中广核研究院有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2023年1月12日; 录用日期: 2023年2月1日; 发布日期: 2023年3月9日

## 摘要

偏离泡核沸腾(DNB, Departure from Nucleate Boiling)设计准则用于确保在I、II类工况下, 极限燃料棒表面不发生DNB。然而DNB设计准则考虑了95/95原则, 因此即使验证了堆芯在特定工况下满足DNB设计准则, 堆芯发生DNB燃料棒数量的期望值仍然可能大于1根。为了验证满足DNB设计准则的I、II类工况下堆芯发生DNB燃料棒数量的期望值小于1根, 一种全新的用于计算I、II类工况下堆芯发生DNB燃料棒数量的统计学方法被建立。CPR1000堆型的一种典型II类事故工况通过这种方法进行了分析。结果显示堆芯预计发生DNB燃料棒数量的期望值小于1, 即从统计学角度认为在该工况下堆芯不会发生DNB。

## 关键词

偏离泡核沸腾, 统计法, 燃料棒

# Statistical Calculation Methodology of the Expected Number of Fuel Rods Experiencing DNB in Core under Condition I and Condition II

Yalun Yan, Yulong Mao

China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Jan. 12<sup>th</sup>, 2023; accepted: Feb. 1<sup>st</sup>, 2023; published: Mar. 9<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Departure from nucleate boiling (DNB, Departure from Nucleate Boiling) design basis is used to

文章引用: 严亚伦, 毛玉龙. I、II类工况下堆芯预计发生DNB燃料棒数量的统计学计算方法[J]. 核科学与技术, 2023, 11(2): 103-109. DOI: 10.12677/nst.2023.112011

ensure that DNB does not occur on fuel rods under condition I and condition II. However, 95/95 principle is used in DNB design basis, so that the expected number of fuel rods experiencing DNB may still be greater than 1, even if the core meets DNB design basis under a specific condition. In order to verify that the expected number of fuel rods experiencing DNB in core which meets DNB design basis under condition I and condition II is less than 1, a new statistical methodology for calculating the expected number of fuel rods experiencing DNB under condition I and condition II is established. And a typical condition II of CPR1000 unit is analyzed with this methodology. The result shows that the expected number of fuel rods experiencing DNB under this typical condition is less than 1, which means that DNB does not occur in core from a statistical point of view.

## Keywords

DNB, Statistical Methodology, Fuel Rod

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在反应堆热工水力设计中, 为了确保堆芯的安全性, 在设计上必须满足一定的设计准则, 其中包含了 DNB 设计准则: 在正常运行、运行瞬态以及由中等频率故障引起的任何瞬态(I、II 类工况)中, 极限燃料棒不发生 DNB 的概率至少为 95%, 并具有 95%的置信度(简称 95/95 原则) [1]。进而根据 DNB 设计准则设计出 DNBR (Departure from Nucleate Boiling Ratio)设计限值。

目前对于 I、II 类工况, 只需验证堆芯最小 DNBR 大于 DNBR 设计限值即可认为堆芯满足 DNB 设计准则。由于 DNB 设计准则考虑了 95/95 原则, 当某根燃料棒表面的最小 DNBR 接近 DNBR 设计限值时, 这根燃料棒的表面在 95%置信度水平下仍然有接近 5%的概率会发生 DNB。当足够多的燃料棒处于或者接近极限功率时(燃料棒表面最小 DNBR 接近 DNBR 设计限值时), 在 95%置信度水平下, 堆芯预计发生 DNB 燃料棒数量的期望值仍然可能大于 1, 即从统计学角度认为堆芯仍然可能发生 DNB。

在压水堆安全分析中, 对于部分 III、IV 类工况, 需要评估堆芯发生 DNB 的燃料棒份额[2] [3]。本文借鉴 III、IV 类工况下堆芯发生 DNB 的燃料棒份额的计算方法, 推导了计算堆芯燃料棒发生 DNB 概率的公式, 建立了 I、II 类工况堆芯发生 DNB 燃料棒数量的统计学计算方法。此外, 本文采用保守的假设条件, 针对 CPR1000 核电厂的一个典型 II 类事故工况进行分析, 论证了该工况下堆芯预计发生 DNB 的燃料棒数量的期望值小于 1。

## 2. 统计学方法论

### 2.1. 方法论主要步骤

堆芯预计发生 DNB 燃料棒数量计算的统计学方法论主要分为以下几个步骤:

- 1) 选取需要分析的特定工况, 确定堆芯各个功率水平的燃料棒数量;
- 2) 使用堆芯热工水力子通道程序计算该工况下堆芯各处燃料棒表面的最小 DNBR;
- 3) 使用统计学方法计算 95%置信度水平下每根燃料棒表面最小 DNBR 处发生 DNB 的概率;
- 4) 计算堆芯预计发生 DNB 燃料棒数量的期望值。

此统计学方法论的核心步骤在于计算 95%置信度水平下最小 DNBR 处发生 DNB 概率。

## 2.2. DNB 概率计算

如果将真实 DNBR 记为  $z$ , 那么  $z$  可以写为以下形式:

$$z = \frac{\text{CHF}_M}{\Phi} \quad (1)$$

其中:  $\text{CHF}_M$  是试验测得的临界热流密度(CHF, Critical Heat Flux);  $\Phi$  是实际热流密度。

$z$  是一个随机变量, 包含了以下几个方面不确定度:

- 1) CHF 关系式的不确定度;
- 2) 热工参数的不确定度;
- 3) 瞬态的不确定度;
- 4) 程序的不确定度。

其中热工参数的不确定度主要考虑以下热工参数:

- 1) 堆芯功率;
- 2) 一回路压力;
- 3) 反应堆压力容器(RPV, Reactor Pressure Vessel)入口冷却剂温度;
- 4) 核焓升热管因子;
- 5) 工程焓升热管因子。

对于给定的不确定度  $U_i$ , 其对应的标准差  $\sigma_i$  由不确定度的分布类型决定:

-正态分布:

$$\sigma_i = \frac{U_i}{1.645} \quad (2)$$

-均匀分布:

$$\sigma_i = \frac{U_i}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

CHF 关系式的不确定度与热工参数的不确定度一并计算。CHF 关系式与参数的不确定度、瞬态的不确定度和程序的不确定度彼此独立。因此, 总的确定度所对应的标准差  $\sigma_z$  可以写为以下形式:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{\text{参数-关系式}}^2 + \sigma_{\text{程序}}^2 + \sigma_{\text{瞬态}}^2} \quad (4)$$

其中:  $\sigma_{\text{参数-关系式}}$  是 CHF 关系式和参数的标准差;  $\sigma_{\text{程序}}$  是程序的标准差;  $\sigma_{\text{瞬态}}$  是瞬态的标准差。

对于选定的工况,  $\sigma_{\text{参数-关系式}}$  通过以下统计方法计算:

- 1) 以选定工况的热工参数初始值为平均值, 按照热工参数的分布类型和标准差, 采用拉丁超立方的方法随机生成  $n$  (例如 1000)个热工参数组(新的工况);
- 2) 使用堆芯热工水力子通道程序计算选定工况和第 1 步随机生成的  $n$  个工况的最小 DNBR;
- 3) 为了考虑 CHF 关系的不确定度, 需要对第 2 步随机生成的  $n$  个工况的最小 DNBR 按以下算法进行修正:

$$\text{DNBR}_{\text{修正}} = \text{DNBR} \times [\mu_c + \sigma_{\text{关系式}} \times C] \quad (5)$$

其中: DNBR 为随机生成工况的最小 DNBR 计算值;  $\mu_c$  为随机变量  $\frac{\text{CHF}_M}{\text{CHF}_p}$  的平均值,  $\text{CHF}_p$  是依据 CHF 关系式预测得到的 CHF;  $\sigma_{\text{关系式}}$  为 CHF 关系式的标准差;  $C$  为符合标准正态分布的随机变量;  $\text{DNBR}_{\text{修正}}$

为修正之后的 DNBR 值。

- 1) 基于  $n$  个修正之后的 DNBR 值, 计算出随机变量  $\text{DNBR}_{\text{修正}}$  样本的标准差  $\sigma_{all}$ ;
- 2) 基于随机变量  $\text{DNBR}_{\text{修正}}$  样本的标准差  $\sigma_{all}$ , 保守计算出 CHF 关系式与参数的标准差:

$$\sigma_{\text{参数-关系式}} = \left( \sqrt{(n-1)/\chi_{n-1,95}^2} \right) \times \sigma_{all} \quad (6)$$

其中:  $\chi_{n-1,95}^2$  是 95% 概率和  $n-1$  自由度对应的卡方分布值[4]。

$z$  符合平均值为  $\mu_z$ , 标准差为  $\sigma_z$  的正态分布:

$$z \sim N(\mu_z, \sigma_z^2) \quad (7)$$

基于堆芯热工水力子通道路程和 CHF 关系计算得到的 DNBR 的定义如下:

$$\text{DNBR} = \frac{\text{CHF}_p}{\Phi} \quad (8)$$

在堆芯热工水力子通道路程和 CHF 关系式确定之后, DNBR 的计算结果只取决于上述热工参数的取值。依据中心极限定理可知, 无论上述热工参数符合何种分布, DNBR 都符合正态分布。而 DNBR 分布的均值  $\overline{\text{DNBR}}$  就等于当各个热工参数都取其最佳估算值时计算得到的 DNBR。

由(1)式和(8)式可知,  $z$  可以写为以下形式:

$$z = \frac{\text{CHF}_M}{\text{CHF}_p} \times \text{DNBR} \quad (9)$$

根据 CHF 试验能够得到  $\frac{\text{CHF}_M}{\text{CHF}_p}$  的数据库。 $\frac{\text{CHF}_M}{\text{CHF}_p}$  数据库的平均值  $m_c$  和标准差  $s_c$  直接计算即可。然而随机变量  $\frac{\text{CHF}_M}{\text{CHF}_p}$  真实的平均值  $\mu_c$  和标准差  $\sigma_c$  则是基于  $m_c$  和  $s_c$  计算得到。在 95% 置信水平下,  $\mu_c$  和  $\sigma_c$  可以按照以下公式保守计算得到:

$$\mu_c = m_c - \left( |t_{n-1,95}| / \sqrt{n} \right) s_c \quad (10)$$

其中:  $t_{n-1,95}$  是 95% 概率和  $n-1$  自由度对应的 Student 分布值[5]。

$$\sigma_c = \left( \sqrt{(n-1)/\chi_{n-1,95}^2} \right) s_c \quad (11)$$

当一根燃料棒表面的最小真实 DNBR 为  $z$  时, 这根燃料棒表面发生 DNB 的概率  $P(\text{DNB})$  有如下形式:

$$P(\text{DNB}) = P(z < I) \quad (12)$$

其中:  $I$  是燃料棒弯曲的设计惩罚因子,  $I$  大于 1。

由(7)式可知随机变量  $\frac{z - \mu_z}{\sigma_z}$  符合标准正态分布:

$$\frac{z - \mu_z}{\sigma_z} \sim N(0, 1) \quad (13)$$

由于  $\sigma_z$  是非 0 正数, 所以(12)式可以转化为如下形式:

$$P(\text{DNB}) = P\left( \frac{z - \mu_z}{\sigma_z} < \frac{I - \mu_z}{\sigma_z} \right) \quad (14)$$

标准正态分布的概率密度函数如下:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} \tag{15}$$

由(14)式和(15)式可知:

$$P(\text{DNB}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1-\mu_z}{\sigma_z}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \tag{16}$$

由(9)式可知:

$$\mu_z = \mu_c \times \overline{\text{DNBR}} \tag{17}$$

将(17)式代入(16)式可得:

$$P(\text{DNB}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1-\mu_c \times \overline{\text{DNBR}}}{\sigma_z}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \tag{18}$$

根据以上推导, 当一根燃料棒表面的最小 DNBR 值(最佳估算值)确定时, 将其带入(18)式即可计算对应的此根燃料棒表面发生 DNB 的概率。

当堆芯内每一根燃料棒表面的最小 DNBR 值确定时, 堆芯预计发生 DNB 燃料棒数量的期望值  $E(\text{DNB})$  表达式如下:

$$E(\text{DNB}) = \sum_i P_i(\text{DNB}) \tag{19}$$

其中  $i$  为燃料棒的编号,  $P_i(\text{DNB})$  为编号为  $i$  的燃料棒发生 DNB 的概率。

### 3. 典型工况分析

本文针对 CPR1000 核电厂的一个 II 类典型事故工况, 按照第 2 章的统计学方法论计算了预计表面发生 DNB 的燃料棒数量。

#### 3.1. 运行参数及不确定度

选取的典型工况为 I、II 类工况中非常恶劣的工况。该工况的运行参数如下表 1 所示。

**Table 1.** Operating conditions of typical condition

**表 1.** 典型工况运行参数

一回路压力(MPa)	RPV 入口温度(°C)	相对功率	热工设计流量份额	旁流份额
15.5	294.5	1.2	1.0	6.5%

各种热工参数的分布类型和不确定度如下表 2 所示。

**Table 2.** Distribution type and uncertainty of thermal parameters

**表 2.** 热工参数的分布及不确定度

参数名称	分布类型	不确定度	标准差
堆芯功率	正态分布	2.0%	1.22%
一回路压力	均匀分布	0.069 MPa	0.040 MPa
RPV 入口冷却剂温度	正态分布	1.11 °C	0.68 °C
核焓升热通道因子	正态分布	4.0%	2.43%
工程焓升热通道因子	正态分布	2.1%	1.28%

### 3.2. 功率分布

堆芯轴向功率分布采用峰值为 1.55 的截尾余弦分布。

堆芯径向功率分布采用一种包络的参考堆芯径向功率分布，热组件在堆芯中心，热组件及其相邻组件的  $F_{\Delta H}$  为 1.52，子通道的峰值  $F_{\Delta H}$  为 1.59。

### 3.3. 燃料统计曲线

燃料棒统计曲线反映了堆芯内高于某一种棒功率水平的燃料棒份额。与典型工况分析采用的堆芯径向功率分布对应的燃料棒统计曲线如图 1 所示。图中横坐标表示  $F_{\Delta H}$  数值，纵坐标表示堆芯中功率高于该  $F_{\Delta H}$  数值的燃料棒份额。

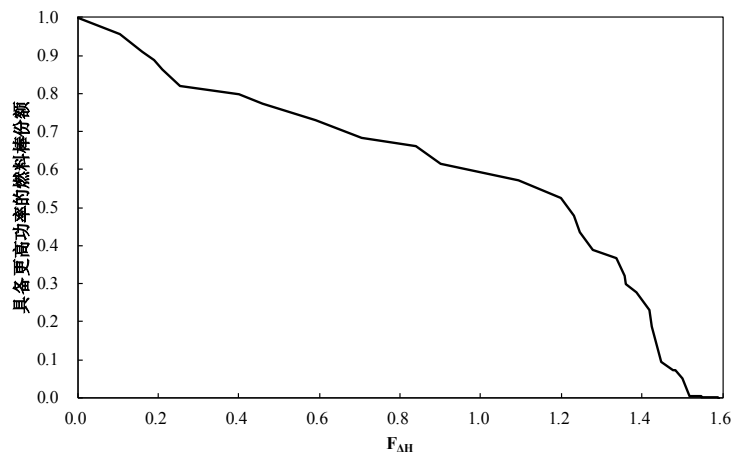


Figure 1. Fuel rod census  
图 1. 燃料棒统计曲线

### 3.4. 计算结果

按照第 2 章介绍的统计学方法结合相关输入，计算了典型工况对应的预计发生 DNB 燃料棒的数量，如图 2 所示。

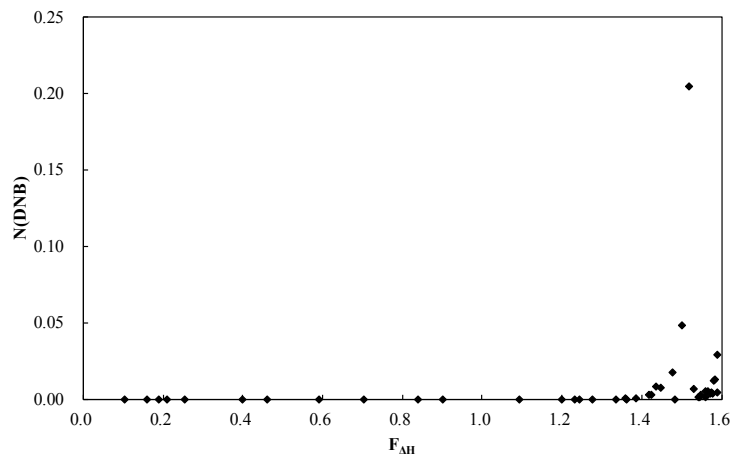


Figure 2. Expected number of fuel rods experiencing DNB  
图 2. 预计发生 DNB 燃料棒的数量

由图 2 可知, 对于此典型工况, 当  $F_{\Delta H}$  为 1.519 时, 预计发生 DNB 燃料棒数量的期望值最大, 为 0.205 根。除此之外, 其他  $F_{\Delta H}$  值对应的预计发生 DNB 燃料棒数量的期望值均小于 0.1 根。图 2 的计算结果取决于各个  $F_{\Delta H}$  值对应的燃料棒表面发生 DNB 的概率和燃料棒的数量。整个堆芯预计发生 DNB 的燃料棒数量的期望值仅为 0.389 根。

#### 4. 结论

本文推导了计算堆芯燃料棒发生 DNB 概率的公式, 建立了 I、II 类工况堆芯发生 DNB 燃料棒数量的统计学计算方法。此外, 本文采用保守的假设条件, 针对 CPR1000 核电厂的一个典型 II 类事故工况进行分析。计算结果显示在该典型工况下, 堆芯预计发生 DNB 燃料棒数量的期望值小于 1, 即统计学角度认为堆芯不会发生 DNB。这种统计学方法也适用于其他压水堆堆型 I、II 类工况下堆芯发生 DNB 燃料棒数量的计算。

#### 参考文献

- [1] 徐良旺, 吕波, 叶杰. 95/95 原则及其在热工设计方法中的应用[J]. 核动力工程, 2014, 35(S1): 128-132.
- [2] 杨小磊, 刘卢果, 何航行. 弹棒事故燃料安全准则研究[J]. 科技视界, 2019(10):16-20.  
<https://doi.org/10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2019.10.005>
- [3] 雷蕾, 靖剑平, 孙微, 安婕铷, 庄少欣. 燃料棒烧毁份额计算方法研究及改进[C]//第十五届全国反应堆热工流体学术会议暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室学术年会论文集. 2017: 205-213.
- [4] Ding, H. and Shi, W.Z. (2013) Fast N-FINDR Algorithm for Endmember Extraction Based on Chi-Square Distribution. *Journal of Remote Sensing*, **17**, 122-137.
- [5] 孙晓雅. 正态总体统计量计算机随机数的生成方法[J]. 大连大学学报, 2006(6): 4-7.