

# 应用抽样统计方法计算 DNBR 限值

王煦嘉

(上海核工程研究设计院, 上海 200233)

**摘要:**应用根据 Wilks 公式发展的抽样统计方法及 VIPRE-W 程序计算 DNBR 和出口含汽率的参数不确定性,再结合模型与 DNB 关系式不确定性,得到 DNBR 的设计限值为 1.220。与 RTDP 方法得到的 DNBR 限值进行比较,得出此方法能得到更多的 DNBR 裕度。

**关键词:**Wilks 公式;抽样统计;DNBR 限值;含汽率限值

中图分类号:TL333

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)04-0448-05

## DNBR Limit Calculation by Sampling Statistical Method

WANG Xu-jia

(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** The parametric uncertainties of DNBR and exit quality were calculated using sampling statistical method based on Wilks formula and VIPRE-W code. Then the DNBR design limit and exit quality limit were got by combining with the uncertainties of models and DNB correlation. This method can gain the more DNBR margin than RTDP methodology which is developed by Westinghouse by comparison of these two methods.

**Key words:** Wilks formula; sampling statistical method; DNBR limit; quality limit

反应堆热工设计的目的是为了提供与堆芯产热量相匹配的足够的传热能力,保持堆芯的完整性。其中,偏离泡核沸腾(DNB)设计基准为热工设计中的一个重要准则,即在 95% 置信度水平下,堆芯内极限燃料棒在 I、II 类事故中至少有 95% 的概率不会发生 DNB。如果事故过程中堆芯最小偏离泡核沸腾比(DNBR)大于 DNBR 限值,则认为此类事故满足 DNB 设计准则的要求。

西屋公司应用 VIPRE-W 程序和修正的热工水力设计方法(RTDP)得到 AP1000 核电厂 WRB-2M 经验关系式两个 95% 下的 DNBR 设

计限值(1.25)(不包括 15% 的美国用户要求 URD 裕量要求)及含汽率限值(22.6%)<sup>[1]</sup>。本工作应用相同的子通道程序,并根据非参数性偏差限值统计学方法(Wilks 公式)发展的统计学最佳估算方法,计算 WRB-2M 经验关系式的两个限值(简称抽样统计方法)。

## 1 抽样统计方法

### 1.1 Wilks 公式

Wilks 公式由 Wilks 于 1941 年提出。这种方法表明,对于多个不确定性参数组合产生的随机数分布,其在特定区间内的分布概率与

参数个数无关,只取决于选择的区间。同样,由此区间的分布概率也可反推出所需的不确定性参数的抽样次数。

### 1.2 抽样次数求解

根据 Wilks 公式,对于单边 95%限值的分布,其抽样次数计算如下:

$$\beta = 1 - \gamma^N \quad (1)$$

其中: $\gamma$ 为置信度; $\beta$ 为指定单边 95%的分布概率; $N$ 为抽样次数。

Guba 于 2003 年对 Wilks 公式进行应用扩展,获得对多重结果参数概率统计的计算方法。对本文中两种分布, DNBR 和含汽率(或 DNBR 偏差和含汽率偏差)的单边分布,其抽样次数计算<sup>[2-3]</sup>如下:

$$\beta = 1 - \gamma^N - N(1 - \gamma)\gamma^{N-1} \quad (2)$$

### 1.3 RTDP 方法

目前,在工程上使用的最先进的 DNBR 计算方法为美国西屋公司的 RTDP 方法。RTDP 方法将关键的核电厂运行参数(堆芯功率、反应堆冷却剂流量和温度及系统压力)、功率峰值因子、子通道和瞬态程序及 DNBR 经验关系式的不确定性进行统计考虑,确定总的堆芯 DNBR 不确定性,并在 DNBR 经验关系式名义值基础上通过两个 95%(95%置信度下 95%的概率)求解最终的堆芯 DNBR 限值。

堆芯 DNBR 不确定性计算关系式为:

$$\left(\frac{\sigma_y}{\mu_y}\right)^2 = s_1^2\left(\frac{\sigma_1}{\mu_1}\right)^2 + s_2^2\left(\frac{\sigma_2}{\mu_2}\right)^2 + \dots + s_m^2\left(\frac{\sigma_m}{\mu_m}\right)^2 \quad (3)$$

其中: $\sigma/\mu$ 为变化系数; $y$ 为堆芯 DNBR 不确定性因子; $s_m$ 为敏感性因子,代表单个参数变化引起的 DNBR 计算值相对变化率。

式(3)说明,堆芯 DNBR 不确定性因子  $y$  的变化系数可由敏感性因子  $s_m$  和堆芯 DNBR 相关的设计参数  $x_m$  的变化系数  $\sigma_m/\mu_m$  两项共同决定。

堆芯 DNBR 限值计算关系式为:

$$DL_R = \frac{1}{\mu_{M/P}(1 - 1.645\sigma_y/\mu_y)} \quad (4)$$

其中: $DL_R$ 为堆芯 DNBR 设计限值; $\mu_{M/P}$ 为 DNBR 经验关系式的名义值。

### 1.4 抽样统计方法

抽样统计方法与 RTDP 方法相同,在

DNBR 设计限值中应考虑以下不确定性:1) 参数不确定性;2) 关系式不确定性;3) 模型不确定性;4) 用户不确定性。

DNBR 限值计算抽样统计方法如下:1) 确定用于 DNBR 限值计算的状态点,要求这些状态点选取能够覆盖各类 DNBR 事故计算的范围;2) 计算对应状态点(此为名义工况)下的最小 DNBR 和最大出口含汽率,并作为名义值;3) 确定参数的取值方向考虑,包括名义值加不确定性(此为抽样参数)和保守值两种;4) 获得抽样参数的不确定性和分布;5) 应用抽样程序对不确定参数进行抽样,形成计算矩阵,抽样次数根据式(2)计算;6) 应用于通道程序和计算矩阵输入,获得 1 组最小 DNBR 分布和最大出口含汽率分布;7) 根据 DNBR 和含汽率分布,分别选取与对应名义值偏差最大的(95%概率),并作为由于参数不确定性引起的目标值不确定性;8) 上述不确定性、关系式和模型不确定性统计结合,得到最终的 DNBR 和含汽率不确定性;9) 计算 DNBR 限值。

由于 VIPRE-W 程序稳态模型无不确定项,因此无须考虑用户不确定性。

由于技术原因,这里未将模型不确定性和关系式不确定性归入抽样参数组,这样是保守的。

### 1.5 抽样统计方法的优势

同 RTDP 方法相比,抽样求解方法在某些方面具有一定的优势。

1) RTDP 方法推导过程中,需进行一阶傅里叶展开,即假设各参数相互独立,这是较为保守的。在抽样求解方法中,充分考虑了各种参数组合,非线性考虑,可获得一定的裕量。

2) RTDP 方法中,假设各参数的敏感性在其他不确定参数任意组合下均相同,这种假设存在一定误差,有可能是保守的,也有可能是冒进的。抽样求解方法更加真实。

3) RTDP 方法中,由于方法的繁琐及局限性,所能考虑的不确定参数受到限制,尤其是只能保守考虑不规则分布的参数(如功率分布)。抽样求解方法在程序帮助下可顺利解决这些难题。

## 2 DNBR 限值计算

### 2.1 工况及基准参数选择

本工作选取 AP1000 核电厂作为分析对象。

DNBR 代表性工况包括堆芯限制线保护工况、全失流/卡转子、静态失步、意外降压、落棒事故及次临界下失控提棒等。其中,全失流工况为最极限的基准工况,本工作以全失流工况为例描述抽样求解方法:1) 获得最小 DNBR 状态点;2) 搜索温度,使 DNBR 限值接近关系式均值或出口含汽率达到关系式限值。得到的基准工况参数列于表 1。

表 1 基准工况参数

Table 1 Parameters of base case

参数	数值	参数考虑
堆芯出口压力,MPa	15.582	需要不确定性考虑
入口温度,℃	271.11	需要不确定性考虑
入口流速,m/s	2.96	需要不确定性考虑
棒功率,MW	82.030 5	需要不确定性考虑
旁通流量,%	4.9	需要不确定性考虑
核焔升因子 FdHN	1.587	需要不确定性考虑
工程焔升因子 FdHE	1.0	需要不确定性考虑
轴向功率分布 (截断余弦)	1.70cosine	保守考虑
参数	计算值	搜索目标
最小 DNBR	1.326	1.000 8
出口含汽率	0.29	0.29

## 2.2 抽样参数

根据式(2)可知,当  $N=93$  时,可得到 95% 置信度下,具有 95% 概率的最大 DNBR 和出口含汽率偏差,并将其作为由参数不确定性引起的目标值的不确定性。

需进行抽样的参数及其分布列于表 2。参数不确定性分布类型根据仪表厂商提供的仪表设备不确定性分布类型决定,不确定性由参数相关测量仪表不确定性综合后得到。旁通流量由于无法测量,故采用保守的平均分布。标准偏差  $\sigma$ =绝对误差/分布因子。其中,绝对误差即相对误差(表中的不确定性)乘以其名义值。分布因子由参数的分布类型决定。双边正态分布的分布因子(如堆芯功率、入口温度、压力、流量等)为 2;平均分布的分布因子(旁通流量)为  $\sqrt{3}$ 。

## 2.3 抽样程序

由抽样程序生成随机数,组成子通道程序

DNBR 计算矩阵。抽样程序要求随机数周期参数设置足够大,以尽量避免出现重复的随机值。

抽样程序包括几个随机数产生模块,例如正态分布及平均分布。

对于平均分布,随机数模块每次返回 1 个介于  $-1\sim 1$  的随机数(RND),其参数值 VALUE 计算如下:

$$\text{VALUE} = (a + b)/2 + (b - a)\text{RND} \quad (5)$$

其中: $a$  和  $b$  分别为平均分布范围内的最小值和最大值。

表 2 参数分布

Table 2 Distributions of parameters

参数	分布类型	不确定性/%
堆芯压力	正态分布	$\pm 2.6$
入口温度	正态分布	$\pm 1.1$
入口流速	正态分布	$\pm 2.5$
棒功率	正态分布	$\pm 2.0$
旁通流量	平均分布	$\pm 1.0$
FdHN	正态分布	$\pm 4.0$
FdHE	正态分布	$\pm 2.9$
参数	名义值 $\mu$	标准偏差 $\sigma$
VIPRE 程序	1	0.02
瞬态程序	1	0.005
WRB-2M 经验关系式	1.000 8	0.065 2

对于正态分布,随机数模块每次返回 1 个具有正态分布特征的随机数,其参数值计算如下:

$$\text{VALUE} = \text{RND} \cdot s + c \quad (6)$$

其中: $c$  和  $s$  分别为正态分布的平均值和标准偏差。

应用抽样程序得到 93 组随机数分布,其中 10 组详细情况列于表 3。

## 2.4 子通道程序

上述计算矩阵将作为子通道程序输入,计算由上述参数不确定性引起的 DNBR 和出口含汽率偏差。本工作采用 VIPRE-W 程序,并利用其 STACK CASE 功能进行相关计算。VIPRE-W 程序为基于 EPRI(美国电力研究院)开发的 VIPRE-01 程序的美国西屋公司改进版本,其稳态模型可用于堆芯 DNBR 及堆芯通道间横向流的计算。相对于 VIPRE-01 程序版本,VIPRE-W 程序扩展了对压水堆核电厂的应用范围,包括加入西屋公司开发的 DNB 经验关系式、发生 DNB 后燃料温度计算

表 3 计算矩阵  
Table 3 Run matrix

运行号	压力/MPa	温度/℃	流量/(m·s <sup>-1</sup> )	棒功率/MW	FdHN	FdHE
1	15.906	273.022	2.878	89.348	1.584	1.029
2	15.690	266.615	2.948	90.496	1.589	0.997
3	15.608	268.813	2.907	89.840	1.545	1.001
4	15.585	271.801	2.951	89.897	1.615	0.981
5	15.824	271.559	2.943	90.660	1.590	0.994
6	15.640	268.726	2.934	89.011	1.607	0.974
7	15.630	270.009	2.856	89.257	1.532	0.981
8	15.489	270.060	2.954	90.521	1.604	0.992
9	16.104	271.229	2.997	89.618	1.566	1.010
10	15.906	273.022	2.878	89.348	1.584	1.029

中的传热关系式及用于燃料性能评价的冷却剂质量蒸发率模型等。

### 3 分析结果

#### 3.1 程序计算结果

VIPRE-W 程序运行得到 93 组最小 DNBR 和最大出口含汽率结果(图 1、2)。由于输入参数的不确定性均为正态分布或平均分布,因此,计算得到的 DNBR 与出口含汽率应是正态分布的。同理,DNBR 偏差和出口含汽率偏差也是相同情况。

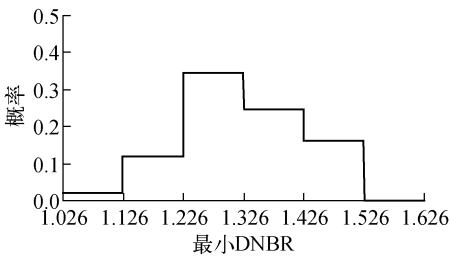


图 1 最小 DNBR 概率分布

Fig. 1 Probability distribution of minimum DNBR

#### 3.2 DNBR 与含汽率限值计算

计算得到的与 DNBR 名义值(1.326)偏差最大的极限工况为工况 93: 最小 DNBR 为 1.116, 偏差为 0.210, 并将其作为参数引起的 DNBR 不确定性(为 15.8%)。假设 DNBR 名义值在限值附近的不确定性是相同的(由于工程原因,不能将此工况的最小 DNBR 计算到关

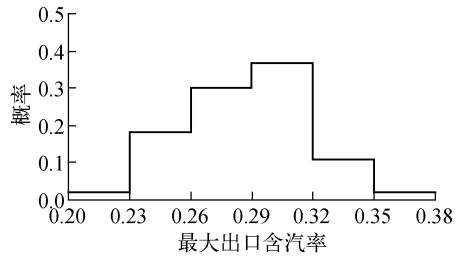


图 2 最大出口含汽率概率分布

Fig. 2 Probability distribution of maximum exit quality

系式限值 1.000 8), 根据 DNBR 设计限值计算原理为以关系式均值为名义值的 DNBR 正态分布, 因此, 可将其参数引起的 DNBR 标准偏差修正为:

$$\sigma_{\text{parameter}} = \frac{u}{2\mu} \times \mu_{\text{correlation}}$$

保守假设参数与模型和关系式是互相独立的, 将标准偏差通过 RMS 方法进行统计整合, 得到最终总的 DNBR 不确定性  $\sigma_{\text{total}}$  为:

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{parameter}}^2 + \sigma_{\text{VIPRE}}^2 + \sigma_{\text{TAcode}}^2 + \sigma_{\text{correlation}}^2}$$

其中:  $u$  为不确定度;  $\mu_{\text{correlation}}$  为 DNB 经验关系式的名义值;  $\sigma_{\text{parameter}}$  为参数 DNBR 不确定性;  $\sigma_{\text{VIPRE}}$  为子通道程序 DNBR 不确定性;  $\sigma_{\text{TAcode}}$  为瞬态程序 DNBR 不确定性;  $\sigma_{\text{correlation}}$  为关系式 DNBR 不确定性。为方便理解, 这里描述的不确定性实际应为标准偏差。

根据  $\sigma_{\text{total}}$  及 DNBR 正态分布假设<sup>[1]</sup>, 即可求得两个 95% 条件下的 DNBR 设计限值:

$$\text{DNBR}_{\text{limit}} = \frac{\mu_{\text{correlation}}}{1 - 1.645 \times \sigma_{\text{total}}}$$

对于出口含汽率(名义值 29%),其极限工况也为工况 93,出口含汽率为 35.6%。

极限工况为工况 93 下 DNBR 和含汽率限值计算结果列于表 4。

表 4 DNBR 和含汽率限值计算

Table 4 Calculation of DNBR and quality limit

参数	参数值
DNBR	
工况 DNBR 值	1.116
参数 DNBR 不确定性	0.079
VIPRE 程序不确定性	见表 2
子通道程序不确定性	见表 2
关系式不确定性	见表 2
总不确定性	0.109
DNBR 限值	1.220
含汽率	
工况含汽率	0.356
不确定性	0.066
含汽率限值	0.224

注:不确定性是指正态分布的标准偏差

### 3.3 与 RTDP 分析结果的比较

抽样统计方法和 RTDP 方法的比较列于表 5。

表 5 计算结果比较

Table 5 Comparison of computing result

计算方法	DNBR 限值	含汽率限值/%
抽样统计	1.220	22.4
RTDP	1.250	22.6

由表 5 可见,抽样统计方法相比 RTDP 方法可获得 2.4%的 DNBR 裕度。含汽率限值会

更加严格,不过结果差别很小,可忽略不计。但也有可能说明 RTDP 在线性假设时存在一定的失真,而抽样统计方法真实地考虑了各种参数的组合情况。

## 4 小结

运用抽样统计方法计算得到的 AP1000 核电站 DNBR 设计限值为 1.220(不包括裕量),含汽率限值为 22.4%。同西屋公司的 RTDP 方法相比,本方法消除了不必要的线性保守性,并真实考虑了各种参数的组合情况,获得 2.4%的 DNBR 裕度。

本方法还有待进一步完善与尝试,并将获得更多的 DNBR 裕度,具体包括以下几方面:1) 扩展抽样参数范围,包括轴向功率形状、热扩散因子等相关保守参数等;2) 尝试抽样考虑模型和关系式的不确定性;3) 抽样程序与子通道程序耦合,对每一事故工况均可直接计算两个 95%条件下的 DNBR,无须进行 DNBR 设计限值计算,避免了在计算中的一些不确定或保守假设,但同时计算时间要求较长。

## 参考文献:

- [1] PARVEZ K. RTDP sensitivity analysis and design limit ANBR for AP1000 units, using WRB-2, WRB-2M and ABB-NV correlations, CN-AP1000-SA-041[R]. USA: Westinghouse Company, 2009.
- [2] Realistic large-break LOCA evaluation methodology using the automated statistical treatment of uncertainty method (ASTRUM), WCAP-16009-P-A[R]. USA: Westinghouse Company, 2005.
- [3] MENDIZABAL R. BEPU methodologies and multiple outputs [C] // The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics. [S. l.]: [s. n.], 2009.