

文章编号 : 0258-0926(2015)02-0024-04; doi: 10. 13832/j. jnpe. 2015. 02. 0024

# CPR1000 核电站堆芯出口冷却剂 过冷度测量不确定度评定

王振营, 孙 晨, 吴 蓓

中广核工程有限公司, 广东深圳, 518172

摘要: 中国百万千瓦级先进压水堆 (CPR1000) 核电站反应堆通过堆芯冷却监测系统 (CCMS) 测量堆芯出口冷却剂的过冷度。本文分析了堆芯出口冷却剂过冷度测量过程中的各种误差来源, 对饱和状态下堆芯出口冷却剂温度测量的不确定度进行评定, 得到不确定度区间边界随一回路压力变化的曲线, 给出了用于判断堆芯冷却状态的堆芯出口冷却剂过冷度测量的误差  $\varepsilon$  曲线的确定方法, 该方法已在 CPR1000 核电站中得到实际应用。

关键词: 堆芯冷却; 过冷度; 测量不确定度; 误差; 状态导向

中图分类号: TL363 文献标志码: B

## Estimation of Measurement Uncertainties for Subcooling Margin of Coolant at Core Outlet in CPR1000 NPPs

Wang Zhenying, Sun Chen, Wu Bei

China Nuclear Power Engineering CO., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518172, China

Abstract: The core cooling and monitoring system (CCMS) is installed in CPR1000 nuclear power plants to measure the subcooling margin of the coolant at the core outlet. Every error origin in the process of the measurement was investigated in this paper. The uncertainties of the subcooling margin measurement was estimated in saturation condition for the case of the distribution of the coolant temperature at the core outlet is heterogeneous or homogeneous, and the curves of uncertainty interval boundaries changing with primary pressure were obtained, based on which the method for determination of the error ( $\varepsilon$ ) curve of the subcooling margin measurement which is used in CCMS to diagnose the cooling state of the core is developed. The acquired results have been practically implemented in CPR1000 nuclear power plants.

Key words: Core cooling, Subcooling margin, Uncertainty of measurement, Error, State oriented

### 0 前 言

中国百万千瓦级先进压水堆 (CPR1000) 核电站堆芯出口冷却剂的过冷度  $T_{\text{sat}}$  监测由堆芯冷却监测系统 (CCMS) 实现。  $T_{\text{sat}}$  为一回路绝对压力下饱和温度  $T_{\text{sat}}$  和堆芯出口冷却剂温度的差值, 是状态导向法事故处理程序 (SOP) 表征

堆芯冷却状态<sup>[1]</sup>的参数。堆芯冷却状态有 3 种:

$T_{\text{sat}} < -\varepsilon$ : 过热 (冷却不充分);  $-\varepsilon < T_{\text{sat}}$   
 $\varepsilon$ : 饱和 (两相状态冷却);  $T_{\text{sat}} > \varepsilon$ : 过冷  
(充分冷却)。  $\varepsilon$  为考虑  $T_{\text{sat}}$  测量不确定度从保守角度确定的  $T_{\text{sat}}$  的测量误差, CCMS 选用该测量误差作为判断堆芯冷却状态的阈值, 其随一回

收稿日期: 2014-03-27; 修回日期: 2014-06-25

作者简介: 王振营 (1980—), 男, 高级工程师, 现从事核电站事故分析及事故处理程序设计工作

路压力而变化。本文分析  $T_{\text{sat}}$  测量的各种误差来源,对  $T_{\text{sat}}$  的测量不确定度进行评定,并给出 CCMS 使用的  $\varepsilon$  曲线的确定方法。

## 1 $\Delta T_{\text{sat}}$ 测量原理

在机组正常或事故运行状态下,由于堆内中子注量率分布和堆芯冷却状态的变化以及其他因素的影响,很难确定某一时刻堆芯最热的区域。CCMS 将堆芯冷却剂温度  $T_{\text{RIC}}$  的测量装置安装于堆芯燃料组件的出口处;这里被认为是在可预见事故工况下,最可能达到最高温度的区域。燃料组件出口处的冷却剂温度分布可能会呈现均匀或不均匀状态,因此,CCMS 安装 19 只铠装热电偶以获得有代表性的燃料组件顶部的温度分布情况。根据堆芯出口热电偶所测得的最高温度  $T_{\text{RICmax}}$ ,可计算出  $T_{\text{sat}}$ :

$$T_{\text{sat}} = T_{\text{sat}}(P) - T_{\text{RICmax}} \quad (1)$$

$$T_{\text{sat}}(P) = 99.63 + 64.37x + 12.98x^2 + 1.93x^3 + 0.935x^4$$

$$x = \log(P) \quad (2)$$

式中, $P$  为一回路绝对压力,其值为一回路相对压力  $P_{\text{RCP}}$  与安全壳内环境压力  $P_{\text{con}}$  之和<sup>[2]</sup>。

## 2 $\Delta T_{\text{sat}}$ 测量不确定度评定

### 2.1 $T_{\text{sat}}$ 测量不确定度的确定方法

在低压环境下,公式(2)具有很强的非线性,在依据  $P$  的标准不确定度  $u(P)$  确定  $T_{\text{sat}}$  的测量不确定度时,用常规的线性增长计算方法<sup>[1-3]</sup> 计算所得结果与实际情形呈现较大偏差,不具有代表性。故直接使用公式(1)评价  $P$  的测量不确定度对  $T_{\text{sat}}$  测量不确定度的贡献。

考虑机组运行时安全壳内实际的物理状态,出现一回路绝对压力  $P$  低于标准大气压力(0.1 MPa)的情形可能性很小,如果 CCMS 计算得到  $P$  小于 0.1 MPa,在计算中自动取值为 0.1 MPa;在评价  $T_{\text{sat}}$  测量不确定度时需考虑此现象。

假设  $P - 2u(P)$  小于 0.1 MPa 时“负”的测量不确定度随着压力线性减小,直至为 0 MPa ( $P = 0.1$  MPa 时),定义  $P$  的测量不确定度函数  $u'(P)$  如下:

$$u'(P) = \begin{cases} P - 0.1 & P - 0.1 \leq 2u(P) \\ 2u(P) & P - 0.1 > 2u(P) \end{cases} \quad (3)$$

将  $P$  的测量值看作为正态分布,依据公式

(1), $T_{\text{sat}}$  测量不确定度置信水平为 95% 的置信区间如下:

$$[T_{\text{sat}}(P) - T_{\text{sat}}(P_{\text{max}}), T_{\text{sat}}(P_{\text{min}}) - T_{\text{sat}}(P)] \quad (4)$$

式中, $P_{\text{max}} = P - u'(P)$ 、 $P_{\text{min}} = P + 2u(P)$  是一回路压力的最小值和最大值。

由于  $T_{\text{sat}}$  由公式(1)近似计算得到,公式(1)所呈现的曲线与理想的水物性曲线之间的偏差将给  $T_{\text{sat}}$  测量引入系统误差,以  $b_a(P)$  表示:

$$b_a(P) = T_{\text{sat}}(P)_f - T_{\text{sat}}(P)_w \quad (5)$$

式中, $T_{\text{sat}}(P)_f$  表示公式(1)的计算结果, $T_{\text{sat}}(P)_w$  表示水的理想物性曲线给出的结果<sup>[3]</sup>。

### 2.2 $T_{\text{RICmax}}$ 测量不确定度的确定方法

当堆芯出口冷却剂温度不均匀分布时,可以近似认为堆芯出口处的最高温度仅由一只热电偶测得;则  $T_{\text{RICmax}}$  的测量不确定度等同于单只热电偶的测量不确定度  $u(T_{\text{RIC}})$ 。

当堆芯出口冷却剂温度均匀分布时,假设每只热电偶测量服从正态分布,则多个独立正态分布最大值的分布服从极值 I 型分布<sup>[4]</sup>,期望值相对于单只热电偶测量的期望值的偏差  $E(T_{\text{RICmax}})$  等于  $T_{\text{RIC}}$  测量引入造成的系统误差,其标准差等于该情形下  $T_{\text{RIC}}$  测量的标准不确定度。

$E(T_{\text{RICmax}})$  随着测量  $T_{\text{RIC}}$  的可用热电偶数量的增加而变大。依据 CPR1000 核电站运行技术规格书要求,用于计算  $T_{\text{RICmax}}$  的最大的热电偶数量为 19,最小为 5。在确定  $T_{\text{RICmax}}$  测量不确定度区间的下限时,为了使  $E(T_{\text{RICmax}})$  最小,保守考虑 5 只热电偶可用;在确定  $T_{\text{RICmax}}$  测量不确定度区间的上限时,为了使  $E(T_{\text{RICmax}})$  最大,考虑 19 只热电偶全部可用。计算得到在 5 只热电偶可用时,期望值的偏差和标准差分别为:

$$E_5(T_{\text{RICmax}}) = 1.16u(T_{\text{RIC}})$$

$$s_5(T_{\text{RICmax}}) = 0.67u(T_{\text{RIC}})$$

在 19 只热电偶全部可用时,期望值的偏差和标准差分别为  $E_{19}(T_{\text{RICmax}}) = 1.92u(T_{\text{RIC}})$ ,  $s_{19}(T_{\text{RICmax}}) = 0.51u(T_{\text{RIC}})$ 。

另外,在热电偶测得的电压信号转化为温度信号的过程中,会引入系统误差。该误差与被测温度有关,在饱和温度下可视为压力的函数  $b_{\text{conf}}(P)$ ,可由式(6)计算:

$$b_{\text{conf}}(P) = g[F(T_{\text{sat}})] - T_{\text{sat}} \quad (6)$$

式中, $F$  为铠装热电偶的温度-电压转换函数; $g$  为电压信号转换成温度信号时的函数。这些函数

由热电偶相关标准给出<sup>[5]</sup>。

### 2.3 $\Delta T_{\text{sat}}$ 测量不确定度的确定方法

在得到  $T_{\text{sat}}$  和  $T_{\text{RICmax}}$  测量不确定度的基础上, 依据 B 类不确定度评定方法, 综合考虑随机效应和系统效应导致的不确定度, 可以得到  $T_{\text{sat}}$  的测量不确定度计算公式<sup>[6]</sup>。

对堆芯出口冷却剂温度不均匀分布情形, 置信水平为 95% 的  $T_{\text{sat}}$  测量不确定度区间的下限  $U^-(\Delta T_{\text{sat}})_D$  和上限  $U^+(\Delta T_{\text{sat}})_D$  分别由式 (7) 和式 (8) 决定:

$$U^-(\Delta T_{\text{sat}})_D = -\sqrt{\{T_{\text{sat}}(P) - T_{\text{sat}}(P_{\text{max}})\}^2 + [2u(T_{\text{RIC}})]^2} + b_a(P) - b_{\text{conf}}(P) \quad (7)$$

$$U^+(\Delta T_{\text{sat}})_D = \sqrt{\{T_{\text{sat}}(P_{\text{min}}) - T_{\text{sat}}(P)\}^2 + [2u(T_{\text{RIC}})]^2} + b_a(P) - b_{\text{conf}}(P) \quad (8)$$

对堆芯出口冷却剂温度均匀分布情形, 置信水平为 95% 的  $T_{\text{sat}}$  测量不确定度区间的下限  $U^-(\Delta T_{\text{sat}})_S$  和上限  $U^+(\Delta T_{\text{sat}})_S$  为:

$$U^-(\Delta T_{\text{sat}})_S = -\sqrt{\{T_{\text{sat}}(P) - T_{\text{sat}}(P_{\text{max}})\}^2 + [1.02u(T_{\text{RIC}})]^2} - 1.92u(T_{\text{RIC}}) + b_a(P) - b_{\text{conf}}(P) \quad (9)$$

$$U^+(\Delta T_{\text{sat}})_S = \sqrt{\{T_{\text{sat}}(P_{\text{min}}) - T_{\text{sat}}(P)\}^2 + [1.34u(T_{\text{RIC}})]^2} - 1.16u(T_{\text{RIC}}) + b_a(P) - b_{\text{conf}}(P) \quad (10)$$

## 3 工程应用

### 3.1 基本不确定度的确定

对某 CPR1000 机组,  $P_{\text{RCP}}$  压力传感器标定范围为 0~20 MPa, 精度 1.15%, 压力传感器的压力标定量程为 0.6 MPa, 精度 2%。DCS 数据采集卡件的精度为 0.2%。假设传感器测量本身服从正态分布, 保守假设采集卡件测量服从矩形分布, 可以得到  $u(P)=0.1162$  MPa。

热电偶测量通道的不确定度主要考虑, 热电偶本身的精度:  $\pm 1.5$  (窄量程: 0~400),  $\pm 4.8$  (宽量程: 400~1200); 补偿电缆的精度:  $\pm 1.5$ ; 补偿电缆延长线的精度:  $\pm 1.5$ ; DCS 测量通道精度:  $\pm 0.5\%$  标定量程。计算得到: 窄量程不确定度为 1.74; 宽量程不确定度为 4.40。

### 3.2 $T_{\text{sat}}$ 测量不确定度的计算

依据式 (5)~式 (10), 计算随一回路压力变化的饱和状态下的  $T_{\text{sat}}$  的置信水平为 95% 的不确定度区间的上限和下限, 并考虑堆芯出口冷却剂均匀分布和不均匀分布两种情形, 得到结果如图 1 所示。

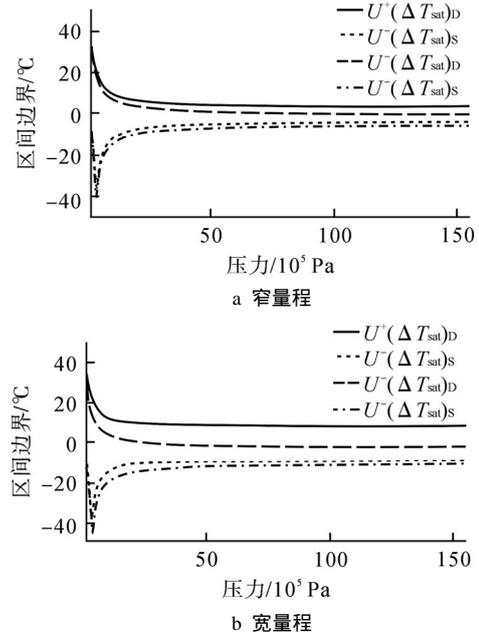


图 1  $T_{\text{sat}}$  测量不确定度区间边界曲线

Fig. 1 Curves of  $T_{\text{sat}}$  Measurement Uncertainty Interval Boundaries

## 4 CCMS 中 $\varepsilon$ 曲线的确定方法

CCMS 曲线用于判断一回路是否处于饱和状态: 当  $T_{\text{sat}} > \varepsilon$  时可以确定堆芯出口冷却剂的过冷边界没有丧失, 当  $T_{\text{sat}} < -\varepsilon$  时可以确定堆芯出口冷却剂处于过热状态。因此, 曲线是 CCMS 软件计算所使用的能包络  $T_{\text{sat}}$  测量不确定度的曲线。图 1 和图 2 所示的不确定度区间上限和下限的变化曲线表明, 压力越低不确定度上限越大, 而不确定度下限存在极点。为了使得提供给操纵员的  $T_{\text{sat}}$  信息更加保守和可靠, 保守考虑, 曲线的确定应满足如下关系:

$$\varepsilon(P_{\text{mea}}) > \max \left[ U^+(\Delta T_{\text{sat}})_S(P_{\text{HL}}), U^+(\Delta T_{\text{sat}})_D(P_{\text{HL}}), \right. \\ \left. |U^-(\Delta T_{\text{sat}})_S(P_{\text{HL}})|, |U^-(\Delta T_{\text{sat}})_D(P_{\text{HL}})|, \right. \\ \left. |U^-(\Delta T_{\text{sat}})_S(P_{\text{LL}})|, |U^-(\Delta T_{\text{sat}})_D(P_{\text{LL}})| \right] \quad (11)$$

式中,  $P_{\text{mea}}$  为测得的一回路压力;

$P_{LL} = P_{mea} - u'(P)$ 、 $P_{HL} = P_{mea} + 2u(P)$  为考虑  $P$  的测量不确定度后参与  $T_{sat}$  计算的一回路压力的最小值和最大值。

为了简化计算过程以便于工程实际应用，对窄量程和宽量程分别选取表 1 所示的一系列数据点用于拟和 曲线。图 2 表明使用这些数据点拟

表 1 确定  $\varepsilon$  曲线的数据点

Table 1 Data Used to Determine  $\varepsilon$  Curve

$P/10^5 \text{ Pa}$	窄量程/	宽量程/
1	42	46
6	42	46
8	24	30
10	20	24
20	12	18
30	10	16
50	8	14
200	8	14

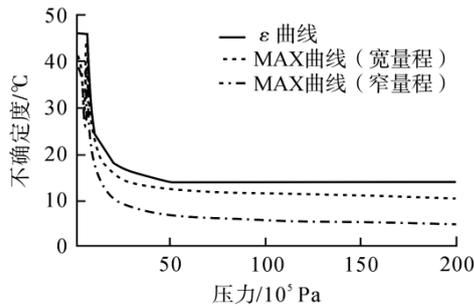


图 2 曲线和 MAX 曲线

Fig. 2 Curve and MAX Curve

和得到的  $\varepsilon$  曲线满足公式 (11) 的要求。

### 5 结束语

本文对 CPR1000 CCMS 堆芯出口冷却剂的过冷度测量不确定度进行了评定，得到饱和温度下随一回路压力而变化的不确定度区间的上下限曲线。在这些曲线的基础上，给出了 CCMS 使用的 曲线的确定方法。本方法已应用于国内 CPR1000 电站的 CCMS 设计。

#### 参考文献：

- [1] 张锦浙. 状态导向法事故处理程序[J]. 大亚湾核电, 2007, 46(4): 45-48.
- [2] 何正熙, 余俊辉, 李小芬, 等. SOP 规程下堆芯冷却监测系统的设计[J].核动力工程, 2012, 33(5): 107-110.
- [3] IAPWS-2007. Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam[S]
- [4] 袁子厚, 何小亚, 梅家斌. 多个独立正态分布随机变量的最大值分布[J]. 武汉科技学院学报, 2004, 17(2): 52-55
- [5] IEC 584-1. Thermocouples – Part 1: Reference tables[S]. 1995.
- [6] JJF1059—1999. 不确定度评定与表示[S]. 1999.

(责任编辑：王中强)