

# Research on the Uncertainty Evaluation of Reactor Pressure Vessel Water Level Measurement

Jianmin Zhu, Sheng Zhou, Yousen Hu

China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen Guangdong  
Email: zhujianmin@cgnpc.com.cn

Received: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2017; accepted: Jan. 18<sup>th</sup>, 2017; published: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2017

Copyright © 2017 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

Pressure vessel water level is one of the key parameters in nuclear power plant design and operation. This paper researched on general uncertainty analysis model of pressure vessel water level measurement, based on the standard uncertainty analysis method. And the CPR1000 nuclear power plant RPVL measurement system and data were used to elaborate the specific uncertainty analysis method of water level measurement. This uncertainty analysis method could be retained as reference and guidance to pressure vessel water level measurement design, maintenance and performance improvement.

## Keywords

Water Level Measurement, Uncertainty

---

# 反应堆压力容器水位测量不确定度评定研究

朱建敏, 周 胜, 胡友森

中广核研究院有限公司, 广东 深圳  
Email: zhujianmin@cgnpc.com.cn

收稿日期: 2017年1月3日; 录用日期: 2017年1月18日; 发布日期: 2017年1月23日

## 摘要

压力容器水位是核电厂设计和运行关注的重点参数之一, 本文利用标准不确定度评定方法, 结合CPR1000核电厂RPVL测量方法及相关数据, 建立了压力容器水位测量不确定度评定模型, 为压力容器水位测量不确定度评定提出了具体的方法。为今后核电厂压力容器水位设计和运行, 以及进行性能改进提供了理论依据和指导方向。

## 关键词

水位测量, 不确定度

## 1. 引言

近年来, 我国核电工业在通过国外核心设备技术引进、国内技术重点消化及研究开发的前提下得到了全面的发展。未来的十几年内, 将有大批的第三代百万千瓦级及小型模块化核电机组开工建设, 面对着越来越多的核电机组的相继投入运行, 机组全方位安全可靠设计与运行成为严峻的课题。

压力容器水位是核电厂设计和运行关注的重点参数之一, 例如反应堆压力容器水位测量是核电厂堆芯冷却监视系统[1] (Core Cooling Monitoring System, CCMS)的重要功能之一, 主要用于在失水事故发生时监测堆芯淹没情况, 为操作员选择事故处理规程提供依据。国内大型商用压水堆核电厂采用面向状态的事故规程后, CCMS 系统的地位和重要性更是大大提高, 对反应堆压力容器水位测量的精确性提出了更高的要求。因此, 压力容器水位测量能否达到设计要求, 如何准确评估压力容器水位测量质量成为解决以及指导设计与运行的一个重要而且必要的步骤。虽然学者们对 CCMS 系统开展过诸多研究[2] [3] [4], 但作为水位测量设计中的关键技术——不确定度评定, 并没有学者进行过系统研究。不确定度是测量结果不确定的程度, 用以表征被测量值的分散性, 能够定量地表征测量结果的质量, 测量不确定度评定的合理性将直接影响测量系统的设计。本文结合反应堆压力容器水位测量原理, 对压力容器水位测量不确定度评定方法进行研究, 为压力容器水位测量研究和设计提供参考依据。

## 2. 反应堆压力容器水位测量原理

核电厂正常运行时, 反应堆压力容器内是充满水的, 失水事故发生时, 压力容器上部充满蒸汽, 这时压力容器水位测量才有必要进行。假设失水事故发生时, 压力容器上部蒸汽密度为  $\rho_v$ , 冷却剂密度为  $\rho_l$ , 压力容器内流体的平均密度为  $\rho$ , 则压力容器内流体之间存在以下关系:

$$\rho gH = \rho_v g(H-h) + \rho_l gh \quad (1)$$

其中,  $h$  为压力容器内液态冷却剂的高度,  $H$  为压力容器总高度。

此时, 压力容器内冷却剂体积比例或者水位  $\tau$  可表达为:

$$\tau = \frac{h}{H} = \frac{\frac{\rho - \rho_v}{\rho_l - \rho_l}}{1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}} \times 100\% \quad (2)$$

核电厂反应堆压力容器水位测量采用差压测量原理, 即通过差压测量反应压力容器内流体的重量, 进一步获得冷却剂体积或者水位的大小。压力容器内流体的平均密度与差压存在如下近似关系:

$$\frac{\rho}{\rho_l} \approx \frac{\Delta P_{\text{RPV}}}{\Delta P_{\text{RPV}}^{100}} \quad (3)$$

其中,  $\Delta P_{\text{RPV}}$  为压力容器内底部与顶部之间的差压,  $\Delta P_{\text{RPV}}^{100}$  为满水状态下压力容器内底部与顶部之间的差压。

根据密度与差压的关系, 压力容器内水位测量可转化为差压的测量, 即

$$\tau = \frac{\frac{\Delta P_{\text{RPV}}}{\Delta P_{\text{RPV}}^{100}} \frac{\rho_v}{\rho_l}}{1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}} \times 100\% \quad (4)$$

此外, 当反应堆处于充排水阶段时, 需要水位测量系统用于监测压力容器内水装量的变化, 此时压力容器上部空间不存在蒸汽, 水位的计算可简化为  $\tau = \frac{\Delta P_{\text{RPV}}}{\Delta P_{\text{RPV}}^{100}} \times 100\%$ , 即通过当前状态下差压与满水状态下差压的比值即可获得水位的信息, 以上水位计算关系式(4)仍然适用。

由于核电厂在不同状态下, 压力容器内的冷却剂和蒸汽的密度随压力和温度变化。因此, 反应堆压力容器水位的测量函数可以进一步表达为

$$\tau = f(\Delta P_{\text{RPV}}, \Delta P_{\text{RPV}}^{100}, P_{\text{RCS}}, T_{\text{RICmax}}) \quad (5)$$

其中,  $\Delta P_{\text{RPV}}$  根据反应堆的实际运行状态测量获得;  $\Delta P_{\text{RPV}}^{100}$  可通过核电厂调试试验时测量获得, 与反应堆不同主泵运行数量有关, 并需要考虑核电厂实际运行状态与调试试验之间的修正;  $P_{\text{RCS}}$  为实际运行状态下的一回路压力;  $T_{\text{RICmax}}$  为实际运行状态下的堆芯出口最大温度, 用以表征反应堆压力容器内冷却剂的温度状态。

### 3. 反应堆压力容器水位测量不确定度评定

#### 3.1. 不确定度评定方法

由于测量的不完善, 通过测量不可能得到真实值, 由测量获得的值仅仅是被测量的估计值, 并且这个被测量的估计值是个统计值, 具有概率分布, 测量不确定度就是表征该分布分散性的参数。国际上通用的做法是用测量不确定度来表示测量结果的可信程度, 带有测量不确定度的测量结果才是完整的和有意义的。

在一个测量模型中, 当被测量  $y$  是由  $n$  个其他输入量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  通过测量函数  $f$  确定时, 被测量的估计值  $y$  为:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (6)$$

则被测量  $y$  的合成标准不确定度<sup>[5]</sup>  $u_c(y)$  为

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j)} \quad (7)$$

其中,  $x_i$ 、 $x_j$  为第  $i$  个和第  $j$  个输入量的估计值;  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  为测量函数  $f$  对第  $i$  个输入量的偏导数, 称为敏感因子;  $u(x_i)$ 、 $u(x_j)$  为输入量的标准不确定度;  $r(x_i, x_j)$  为输入量之间的相关系数。

当各输入量之间不相关时, 即相关系数  $r(x_i, x_j) = 0$ , 被测量估计值的合成标准不确定度计算公式可以简化为

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2} u^2(x_i) \quad (8)$$

### 3.2. 反应堆压力容器水位测量不确定度研究

根据反应堆压力容器水位的测量原理和不确定度评定方法，并认为水位测量相关的各个物理量之间相互独立，则水位测量的标准不确定度为：

$$u(\tau) = \sqrt{\left( \frac{\partial \tau}{\partial \Delta P_{RPV}} u(\Delta P_{RPV}) \right)^2 + \left( \frac{\partial \tau}{\partial \Delta P_{RPV}^{100}} u(\Delta P_{RPV}^{100}) \right)^2 + \left( \frac{\partial \tau}{\partial P_{RCS}} u(P_{RCS}) \right)^2 + \left( \frac{\partial \tau}{\partial T_{RICmax}} u(T_{RICmax}) \right)^2} \quad (9)$$

式中， $u(\Delta P_{RPV})$ 、 $u(\Delta P_{RPV}^{100})$ 、 $u(P_{RCS})$ 、 $u(T_{RICmax})$  分别为各个物理量对应的标准测量不确定度，与核电厂的具体仪表配置有关；偏导数  $\frac{\partial \tau}{\partial \Delta P_{RPV}}$ 、 $\frac{\partial \tau}{\partial \Delta P_{RPV}^{100}}$ 、 $\frac{\partial \tau}{\partial P_{RCS}}$ 、 $\frac{\partial \tau}{\partial T_{RICmax}}$  分别为各物理量对水位测量的敏感因子，表征了各物理量对水位的影响程度。

1) 水位与差压的关系

$$\frac{\partial \tau}{\partial P_{RPV}} = \frac{\partial \tau}{\partial \Delta P_{RPV}} + \frac{\partial \tau}{\partial \Delta P_{RPV}^{100}} \cdot \frac{\partial \Delta P_{RPV}^{100}}{\partial \Delta P_{RPV}} + \frac{\partial \tau}{\partial \rho_l} \cdot \frac{\partial \rho_l}{\partial \Delta P_{RPV}} + \frac{\partial \tau}{\partial \rho_v} \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial \Delta P_{RPV}} \quad (10)$$

由于差压测量与流体密度之间互不相关，并且满水状态下的差压测量与当前状态的差压测量不相关，上式中后三项偏导计算可忽略，因此有：

$$\frac{\partial \tau}{\partial \Delta P_{RPV}} = \frac{1}{\Delta P_{RPV}^{100} \left( 1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \Delta P_{RPV}^{100}} = - \frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100,2} \left( 1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)} \quad (12)$$

2) 水位与堆芯出口温度、一回路压力的关系

$$\frac{\partial \tau}{\partial P_{RCS}} = \frac{\partial \tau}{\partial \Delta P_{RPV}} \frac{\partial \Delta P_{RPV}}{\partial P_{RCS}} + \frac{\partial \tau}{\partial \Delta P_{RPV}^{100}} \frac{\partial \Delta P_{RPV}^{100}}{\partial P_{RCS}} + \frac{\partial \tau}{\partial \rho_l} \cdot \frac{\partial \rho_l}{\partial P_{RCS}} + \frac{\partial \tau}{\partial \rho_v} \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial P_{RCS}} \quad (13)$$

由于堆芯出口温度、一回路压力的测量与差压测量不相关，上式中前两项偏导计算可忽略，有：

$$\frac{\partial \tau}{\partial P_{RCS}} = \frac{\partial \tau}{\partial \rho_l} \cdot \frac{\partial \rho_l}{\partial P_{RCS}} + \frac{\partial \tau}{\partial \rho_v} \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial P_{RCS}} = \frac{\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100}} - 1}{\left( 1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^2} \frac{1}{\rho_l} \cdot \frac{\partial \rho_l}{\partial P_{RCS}} - \frac{\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100}} - 1}{\left( 1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^2} \frac{\rho_v}{\rho_l^2} \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial P_{RCS}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau}{\partial T_{RICmax}} &= \frac{\partial \tau}{\partial \rho_l} \cdot \frac{\partial \rho_l}{\partial T_{RICmax}} + \frac{\partial \tau}{\partial \rho_v} \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial T_{RICmax}} \\ &= \frac{\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100}} - 1}{\left( 1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^2} \frac{1}{\rho_l} \cdot \frac{\partial \rho_l}{\partial T_{RICmax}} - \frac{\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100}} - 1}{\left( 1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^2} \frac{\rho_v}{\rho_l^2} \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial T_{RICmax}} \end{aligned} \quad (15)$$

据此，水位与堆芯出口温度、一回路压力的关系可转化为流体密度与压力和温度的关系。流体密度采用 IAPWS 1997 标准水表关系计算，本文不再进行流体密度相关偏导数的详细推导。

综合以上关系，最终反应堆压力容器水位的标准测量不确定度可通过以下关系式进行计算评定：

$$u(\tau) = \sqrt{\left( \frac{1}{\Delta P_{RPV}^{100} \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}\right)} \cdot u(\Delta P_{RPV}) \right)^2 + \left( -\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100} \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^2} \cdot u(\Delta P_{RPV}^{100}) \right)^2 + \left( \frac{\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100}} - 1}{\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^2} \frac{1}{\rho_l} \cdot \frac{\partial \rho_l}{\partial P_{RCS}} - \frac{\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100}} - 1}{\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^2} \frac{\rho_v}{\rho_l^2} \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial P_{RCS}} \right) \cdot u(P_{RCS}) \right)^2 + \left( \frac{\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100}} - 1}{\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^2} \frac{1}{\rho_l} \cdot \frac{\partial \rho_l}{\partial T_{RICmax}} - \frac{\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100}} - 1}{\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^2} \frac{\rho_v}{\rho_l^2} \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial T_{RICmax}} \right) \cdot u(T_{RICmax}) \right)^2} \quad (16)$$

### 3.3. 结果与分析

为了进一步论述本文所提出的水位测量不确定度评定方法，论文以 CPR1000 核电厂反应堆压力容器水位(RPVL)测量系统为研究对象进行计算分析。CPR1000 核电厂是我国自主品牌核电技术，其主要示范工程岭澳二期核电厂，是在大亚湾核电厂、岭澳一期核电厂的建造和运行经验的基础上进行设计和改进的。CPR1000 核电厂 RPVL 测量系统包含在 CCMS 系统之中，该系统利用差压原理进行水位测量，并利用堆芯饱和裕度测量与水位测量进行相互校验，以进一步保证水位测量的可靠性。

根据本文 3.2 节水位测量不确定度评定方法，当核电厂发生失水事故时，假设反应堆三台主泵处于可用状态，一回路压力为 15.5 MPa，并且压力容器内冷却剂达到饱和状态，即冷却剂温度为饱和温度 344.8℃。此时，水位测量的不确定度计算公式(16)可简化为

$$u(\tau) = \sqrt{\left( \frac{1}{\Delta P_{RPV}^{100} \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}\right)} \cdot u(\Delta P_{RPV}) \right)^2 + \left( -\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100} \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^2} \cdot u(\Delta P_{RPV}^{100}) \right)^2 + \left( \frac{\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100}} - 1}{\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^2} \frac{1}{\rho_l} \cdot \frac{\partial \rho_l}{\partial P_{RCS}} - \frac{\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100}} - 1}{\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^2} \frac{\rho_v}{\rho_l^2} \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial P_{RCS}} \right) \cdot u(P_{RCS}) \right)^2} \quad (17)$$

当反应堆处于充排水阶段时，压力容器上部空间不存在蒸汽，水位测量仅与  $\Delta P_{RPV}$ 、 $\Delta P_{RPV}^{100}$  相关，水位测量的不确定度计算公式(16)可简化为

$$u(\tau) = \sqrt{\left( \frac{1}{\Delta P_{RPV}^{100}} \cdot u(\Delta P_{RPV}) \right)^2 + \left( -\frac{\Delta P_{RPV}}{\Delta P_{RPV}^{100} \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^2} \cdot u(\Delta P_{RPV}^{100}) \right)^2} \quad (18)$$

CPR1000 核电厂不同工况下水位测量的不确定度分析结果如表 1 和表 2 所示。从本文计算结果可以

**Table 1.** Uncertainty of reactor pressure vessel water level measurement during LOCA**表 1.** 失水事故时反应堆压力容器水位测量不确定度

反应堆压力容器水位	测量不确定度
100%	13.4%
85%	12.0%
66%	10.3%
50%	8.9%
35%	7.8%

**Table 2.** Uncertainty of reactor pressure vessel water level measurement during makeup or letdown phase**表 2.** 充排水阶段反应堆压力容器水位测量不确定度

反应堆压力容器水位	测量不确定度
100%	11.06%
85%	9.91%
66%	8.50%
50%	7.38%
35%	6.40%

看出, a) CPR1000 核电厂对 RPVL 测量的设计要求为不确定度低于 15%, 当前设计中无论是充排水阶段或是失水事故发生时, 水位测量设计均可以满足不确定度要求; b) 充排水阶段的水位测量不确定度低于失水事故工况下的不确定度, 因此保证失水事故工况下的水位测量不确定度满足设计要求即可; c) 不同水位状态下水位测量不确定度不同, 主要是由差压变送器的测量特性造成的, 当前设计中保证高水位状态下的水位测量不确定度满足设计要求即可。

当然, 核电厂在发生失水事故时, 反应堆冷却剂温度和压力会随着事故进程的演变而变化, 以上计算考虑的典型状态不能包络所有事故工况, 仅作为不确定度评定计算的示例参考, 本文以不确定度评定方法论探讨为主, 实际工程设计中会更加全面的分析考虑事故后反应堆所面临的各种状态, 例如事故中不同主泵运行数量的影响等, 不确定度评定模型和方法相同, 本文不再进行详细论述。

另外, 本文所述水位测量原理基于压力容器水位通用计算方法推导, 因此其不确定度评定方法, 不仅适用于反应堆压力容器水位测量, 对于核电厂其他压力容器的水位测量, 例如稳压器、蒸汽发生器等, 同样采用差压原理进行测量水位, 该不确定度评定方法也是适用的。在进行水位测量的不确定度评定时, 根据不同压力容器的具体运行和设计特点进行适应性分析即可。

#### 4. 结语

核电作为电力发展“十三五”规划的重要组成部分, 是国家能源战略安全和结构调整、推进社会绿色发展的核心保障。近年来, 国内各核电设计单位均在积极开展第三代核电以及模块化小型堆等新堆型的研究设计工作。在这些新堆型研发设计阶段均面临着压力容器水位测量设计的问题, 而其中水位测量的不确定度评定是其设计的关键问题之一。

本文利用标准的不确定度评定方法, 结合 CPR1000 核电厂 RPVL 测量方法及相关数据, 建立了不确定度评定模型, 最终得到 RPVL 测量不确定度计算公式, 为压力容器水位测量不确定度评定提出了具体

的方法。本文提出的水位测量不确定度评定方法同样适用于核电厂其他压力容器水位测量的不确定度评定，填补了相关研究领域的空白，为今后核电厂设计和运行，以及进行性能改进提供了理论依据和指导方向。

## 基金项目

受国家科技部 863 《核电压水堆反应堆材料性能优化研制与模拟环境设计》课题经费支持。

## 参考文献 (References)

- [1] 中广核工程有限公司. 压水堆核电厂核岛系统设计·核岛仪控系统[M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
- [2] 陈良, 王群峰, 王刚, 董伟鹤, 王天军. CPR1000 堆芯冷却监视系统整体架构剖析[J]. 自动化博览, 2013(3): 96-98.
- [3] 李刚, 谢逸钦, 刘春明, 左新. 压水堆核电厂堆芯冷却监视系统的数字化改造方案研究[J]. 核科学与工程, 2012, 32(2): 206-211.
- [4] 何正熙, 李白, 吴峻, 张帆. 秦山核电二期扩建工程堆芯冷却监视系统设计[J]. 核动力工程, 2008, 29(1): 5-9.
- [5] 叶培德. 测量不确定度理解评定与应用[M]. 北京: 中国质检出版社, 2013.

### 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>

期刊邮箱: [nst@hanspub.org](mailto:nst@hanspub.org)