

文章编号：0258-0926(2017)03-0081-04；doi:10.13832/j.jnpe.2017.03.0081

核电厂核岛设备凹坑损伤测量 不确定度的分析

陈 航，邱振生

深圳中广核工程设计有限公司，广东深圳，518000

摘要：针对压水堆核电厂核岛机械设备安装及在役过程中表面凹坑的测量方法，主要分析焊缝检验尺检验技术和拓膜检验技术在测量过程中误差的产生原因。通过蒸汽发生器管子管板焊缝凹坑测量实例，分别对这 2 种测量技术提出了测量不确定度的评定方法，分析不确定分量，计算二者的标准合成不确定度。计算结果表明：这 2 种测量技术的不确定度分量均来自于重复测量导致测量结果变化的随机不确定度分量和由于系统修正不完善引入的系统不确定度分量。

关键词：凹坑；深度；拓膜；焊缝检验尺；不确定度

中图分类号：TL48 **文献标志码：**A

Analysis of Measurement Uncertainty for Dent Depth of Nuclear Equipment

Chen Hang, Qiu Zhensheng

China Nuclear Power Design Engineering Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract: The measurement methods for dent depth on nuclear mechanical component were discussed during the installation and service of pressurized water reactors. The origins for the measurement errors in the welding inspection by calipers and moulding film were analyzed. Based on the measurement data from dents on the steam generator plate, the evaluation methods for the measurement uncertainty of the above two techniques were provided, and the uncertainty component was analyzed. The combined standard uncertainty was calculated. The calculated result indicated that the uncertainty of two methods come from the random uncertainty component of repeated measurement and system uncertainty component of system correction imperfection.

Key words: Dent, Depth, Moulding, Calipers, Uncertainty

0 前 言

表面凹坑损伤是核电厂核岛机械设备建造和在役运行中经常出现的一种损伤形式，其原因有很多，如摔落、异物砸伤，表面缺陷打磨、在役过程中意外损伤等。当出现表面损伤后，需要进行力学评价，判定剩余壁厚能否满足原设计要求。在力学评价中，凹坑损伤处最小厚度是最重要的外部输入，但是不同测量方法得到的检测结果，其准确性或者测量误差也不同，这种误差也是力学评定者和核安全监管人员关注的焦点。不同领

域的工程人员对测量误差处理方法往往不同，评定误差方法也不尽相同，不同测量结果之间缺乏可比性。在这种背景下，现在国际上通行做法是采用测量不确定度的概念来评价测量结果的质量。

测量不确定度是 1993 年由 7 个国际组织联合发布的《测量不确定度表示指南》（Guide to the expression of uncertainty in measurement，简称 GUM）和第 2 版《国际通用计量学基本术语》提出的；在进行测量结果不确定度评定时各国实验

室均以 GUM 为基础^[1]。我国原则上等同采用了 GUM 制定了 JJF1059 《测量不确定度评定与表示》^[2]，把“测量误差”概念推向了基于误差理论、测量统计学的“测量不确定度”评定^[3]。法国《压水堆核电站核岛机械部件在役检查规则》(RSE-M)中对缺陷测量结果的验收，明确提出缺陷的相关测量尺寸应为最大可能数值加上标准测量不确定度偏移量^[4]。在核电厂在役阶段检测评价时，给出测量结果的同时应给出测量不确定，以使用户能够合理的利用该测量结果进行分析。下面以某核电厂蒸汽发生器(SG)管子管板焊缝上的凹坑损伤作为案例，采用 2 种测量方法，并对检测结果进行不确定度分析。

1 测量不确定度和测量误差

测量不确定度是用来表征合理赋予被测值的分散性。因此，不确定度表示一个区间及被测值可能的分布区间。

测量误差是检测量值与参考量值之差；参考量值可以是真值，也可以是测量的或给定的量值；当采用测量不确定度可以忽略的测量值或采用给定约定值作为参考量值时，误差是已知的。误差是一个差值，而非区间。测量结果大于参考量值时误差为正，小于参考值时误差为负^[5]。

误差和不确定度是 2 个完全不同但相互联系的概念。

2 凹坑深度测量工具和方法

核岛机械设备的凹坑测量方法主要有 2 种：

利用焊缝检验尺直接测量；通过拓膜的方法，对胶膜进行测量，间接获得凹坑的深度。

2.1 焊缝检验尺测量

2.1.1 检测工具 焊缝检验尺主要结构形式分为 型、 型、 型、 型，比较典型的为 型，结构见图 1。

2.1.2 主要测量参数 根据凹坑的位置和检验尺的可达性，通常选用高度尺或咬边深度尺进行测量。根据焊接检验尺鉴定规程 JJG 704—2005 标准的规定，高度尺和咬边深度尺的零值误差(测得值为零值时的基值测量误差)和示值最大允许误差见表 1^[6]。

2.2 拓膜测量

2.2.1 拓膜过程 检测结果可靠性依赖于拓膜

样本制作的精细程度，一方面拓膜样本能准确反映凹坑尺寸信息，另一方面拓膜样本能较便利的借助光学显微镜进行观察和测量。一般而言，拓膜检测涵盖 4 个关键步骤：清洗过程、制备拓膜胶、固化胶膜、脱离胶膜。图 2 是某核电厂 SG 管子管板焊缝上的凹坑切膜示意图。

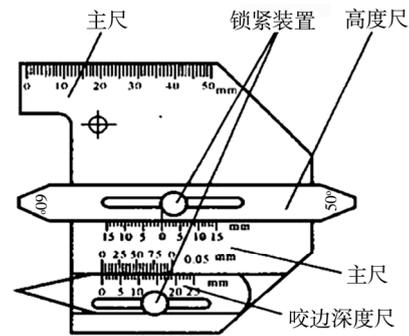


图 1 型焊缝检验尺

Fig. 1 Type Welding Inspection Calipers

表 1 零值误差和示值误差要求

Table 1 Zero Error and Indication Error

项目	零值误差/mm	示值最大允许误差/mm
高度尺	±0.1	±0.3
咬边深度尺	±0.05	±0.1



图 2 拓膜切片

Fig. 2 Moulding Film Chip

2.3 拓膜法相关测量参数

拓膜制作过程中与测量相关的参数有：变形回复比应不小于 99.5%；万能工具显微镜自身的最大允许误差为： $\pm(1+L/70) \mu\text{m}$ (L 表示被测量物体的长度)。

3 测量不确定度评定

对某核电厂 SG 管子管板焊缝凹坑损伤进行评估，分别选用焊接检验尺直接测量和拓膜后利用万用工具显微镜间接测量。

3.1 焊缝检验尺测量结果的不确定度

3.1.1 测量灵敏度系数和测量结果

计算灵敏度系数 C_1 、 C_2 ：

$$C_1 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial L_c}; C_2 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial L_b} \quad (1)$$

式中, σ_1 为焊缝检验尺的示值误差; L_c 为焊缝检验尺的示值 (20 条件下); L_b 为量块的实际尺寸 (20 条件下)。

在凹坑最深点位置进行 6 次独立重复测量, 凹坑深度的测量结果见表 2。

表 2 焊缝检验尺凹坑测量结果

Table 2 Measured Dent Depth Value by calipers

测量次数 n	1	2	3	4	5	6
第 n 次测量值 X_i/mm	0.35	0.30	0.25	0.35	0.35	0.30

3.1.2 测量不确定度分量

(1) 测量重复性引起的不确定度分量

根据 JJF1059.1-2012 标准, 当测量满足正态分布, $n=9$ 时, 用极差法计算测量重复性引起的不确定度见式 (2) 和式 (3):

$$S(X_k) = R/C \quad (2)$$

$$U_1 = S(X_k)/C\sqrt{n} \quad (3)$$

式中, X_k 为单次测量结果; $S(X_k)$ 为试验标准差; R 为 n 次测量结果中的最大值和最小值之差; C 为极差系数, 当 $n=6$ 时, 取 2.53。得到测量重复性引起的不确定度分量 $U_1=0.0161$ mm。

(2) 测量尺线性误差不确定度分量

咬边深度尺分度值为 0.05 mm, 线性误差区间半宽 0.025 mm, 三角分布, 其标准不确定度见式 (4):

$$U_2 = a/k \quad (4)$$

式中, a 为可能值分布区间的半宽, 三角分布时取 0.025 mm; k 为包含因子, 取 $\sqrt{6}$; 得到测量尺线性误差不确定度分量 $U_2 = 0.102$ mm。

3.1.3 合成标准不确定度 考虑到影响量之间不存在相关性, 采用式 (5) 的方和根法进行合成, 得到合成标准不确定度 $U_c = 0.019$ mm。

$$U_c = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \quad (5)$$

3.1.4 测量结果

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (6)$$

式中, t 为焊缝凹坑深度; 测量次数 $n=6$ 。

带入表 2 中的数据, 得到 $t=0.316$ mm。

3.1.5 扩展不确定度 取 $k=2$, 扩展不确定度 $U(t)$ 为:

$$U(t) = 2U_c \quad (7)$$

3.1.6 测量不确定度报告 SG 管子管板焊缝凹坑深度 $t=0.316 \pm 0.038$ mm。其中扩展不确定度 $U(t)=0.038$ mm 是由标准不确定度 $U_c=0.019$ mm 乘以 $k(k=2)$ 得到。

3.2 拓膜测量结果的不确定度

3.2.1 测量结果 对同一个凹坑进行拓膜测量, 测量结果见表 3。

表 3 拓膜方法凹坑测量结果

Table 3 Measured Dent Depth Value by Moulding Film

n	1	2	3	4	5	6
X_i/mm	0.308	0.314	0.318	0.318	0.302	0.314

3.2.2 测量不确定度分量

(1) 测量重复性引起的不确定度分量

利用式 (2) 和式 (3), 代入表 3 的测量数据, 得到 $U_1=0.0026$ 。

(2) 万能工具显微镜测量误差分量

根据 2.3 节万能工具显微镜自身的最大允许误差公式, 得到万能工具显微镜误差 $E_{MPE} = \pm 0.0054$ mm。

下式中 k 按均匀方式分布取 $k = \sqrt{3}$ 。

根据式 (8), 得到 $U_2 = 0.0031$ mm。

$$U_2 = \frac{E_{MPE}}{k} \quad (8)$$

根据式 (9) 确定拓膜过程中变形回复带来的不确定度分量 U_3 , 得到 $U_3=0.0009$ mm。

$$U_3 = \frac{0.5\%L}{k} \quad (9)$$

3.2.3 合成标准不确定度 考虑到影响量之间不存在相关性, 采用式 (10), 方和根法进行合成, 得到标准不确定度 $U_c=0.0061$ mm。

$$U_c = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2} \quad (10)$$

3.2.4 测量结果 利用式 (6), 取 $n=6$, 带入表 3 中的数据, 得到 $t=0.312$ mm。

3.2.5 扩展不确定度

取 $k=2$, 扩展不确定度 $U(t)$ 为:

$$U(t) = 2U_c \quad (11)$$

3.2.6 测量不确定报告 SG 管子管板的 $t = 0.312 \pm 0.012$ mm。其中 $U(t)=0.012$ mm 是由 $u_c = 0.0061$ mm 乘以 $k(k=2)$ 得到。

3.3 分析

分别采用 2 种检测方法对凹坑进行不确定度的计算。计算结果可以看出:

(1) 焊缝检验尺测量结果的不确定度分量由重复性引起的不确定度和测量尺的线性误差引起的不确定度组成。计算结果表明, 2 个分量对合成不确定度的贡献基本相当。

(2) 拓膜测量的不确定度由测量重复性不确定度分量、万能工具显微镜测量误差分量不确定度、拓膜过程中变形带来的不确定分量构成。其中, 测量重复性引起的不确定度和万能工具显微镜的测量误差分量贡献相当, 而拓膜过程中变形带来的不确定度分量贡献很小, 可以忽略。

4 结束语

通过本案例中核电厂 SG 管子管板焊缝凹坑的实际测量, 运用测量不确定度的方法, 分别计算了两种测量方法得到的测量结果的不确定度, 解决了核岛厂核岛机械设备表面凹坑损伤测量结果不确定计算的问题。

焊缝检验尺测量和拓膜测量的不确定分量均

来自于重复测量导致测量结果变化的随机不确定度分量和由于系统修正不完善引入的系统不确定度分量。为核电厂在凹坑检测测量结果不确定计算提供了有益的参考。

参考文献:

- [1] 倪育才. 实用测量不确定的评定[M]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
- [2] JJF1059.1-2012. 测量不确定度评定与表示[S]. 国家质量监督检验检疫总局.
- [3] 张青松. 测量不确定度的研究及应用进展[J]. 中国建材科技, 2013, 63(04): 63-65.
- [4] RSE-M. In-service inspection rules for mechanical components of PWR nuclear islands[S]. France, AFCEN, 2010.
- [5] 王承忠. 测量不确定度与误差的区别及在评定中应注意的问题[J]. 物理测试, 2004, 03: 1-3.
- [6] JJG 704-2005. 焊接检验尺鉴定规程[S]. 国家质量监督检验检疫总局.

(责任编辑: 刘 君)