

# 基于比分数和比率值的 NDT 实验室 检测能力验证方法

张小海<sup>1</sup>, 李 坚<sup>1</sup>, 刘二军<sup>2</sup>, 王 超<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

2. 江苏申港锅炉有限公司, 张家港 215627)

**摘要:**无损检测(NDT)实验室或机构的检测能力直接影响检测的可靠性和一致性。将 $Z$ 比分数和 $E_n$ 比率值两种统计方法应用于无损检测实验室的检测能力比对,验证其检测能力。结合无损检测实验室的特点,以常用的焊缝超声检测为实例,设计了模拟比对试验。应用两种统计方法对比对的结果进行了分析,并对各模拟实验室的能力进行了评价。比对结果表明, $Z$ 比分数和 $E_n$ 比率值两种不同的比对方法得出的评价结果相似,均可应用于无损检测实验室或机构的检测能力比对。

**关键词:**无损检测实验室;超声检测;实验室比对;能力验证

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)10-0014-04

## Proficiency Testing Method for Nondestructive Testing Laboratory Based on Z Score and $E_n$ Ratio

ZHANG Xiao-Hai<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, LIU Er-Jun<sup>2</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of NDT, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Jiangsu Sunco Boiler Co Ltd, Zhangjiagang 215627, China)

**Abstract:** The inspection proficiency of nondestructive testing laboratory can affect directly the reliability and consistence of inspection results. In the paper, two statistical methods of  $Z$  score and  $E_n$  ratio are used for the proficiency comparison in nondestructive testing laboratory to verify their inspection ability. According to the characteristics of nondestructive testing laboratory and based on welding ultrasonic testing, the simulated comparison tests are designed. Using the two statistical methods, the comparison results are analyzed, and the inspection ability of every simulated laboratory is evaluated. The comparison results show that the evaluation conclusions obtained from  $Z$  score and  $E_n$  ratio methods are similar, and both of the two statistical methods can be used for testing the proficiency of non-destructive testing laboratory.

**Keywords:** Nondestructive testing laboratory; Ultrasonic testing; Inter-laboratory comparison; Proficiency testing

近年来,在无损检测技术不断发展下,无损检测实验室无论从数量还是规模上都得到了快速发展。究其原因,一方面是由于人们对产品质量,特别是工程质量方面的要求越来越高;另一方面,随着无损检

测技术的发展,检测仪器越来越智能化和便携化,检测方法也更加简单与直观,使各检测实验室或机构对外检测业务的开展变得更方便。无损检测实验室作为第三方质量控制的主体,主要应用超声、射线、磁粉、渗透等无损检测方法对钢结构、在役压力容器、核设备等进行无损探伤,并向委托方提供具有法律效力的检测报告,即是以自身的检测能力向社会提供公正、客观的检测数据及结果的技术服务组织。

收稿日期: 2013-04-20

基金项目: 江西省教育厅科技资助项目(GJJ10533)

作者简介: 张小海(1966—), 男, 教授, 主要从事无损检测及质量控制研究。

因此,对实验室检测能力的验证就显得尤为重要。能力验证(Proficiency Testing)是利用实验室间比对确定实验室的检测能力的活动。它是为确定某个实验室进行某项特定检测的能力以及监控其持续能力而进行的一种实验室间比对,也是我国对实验室计量认证及满足ISO/IEC 17025—2005《检测和校准实验室能力的通用要求》标准的规定<sup>[1]</sup>。同时,能力验证是维持国际互认的技术基础,是认可机构确定实验室能力的重要技术手段。虽然无损检测实验室的规模近年来发展迅速,但对无损检测实验室的检测能力的评价方法研究及应用显得较为薄弱,对检测能力验证的数理统计方法应用甚少。因此,通过超声检测的应用实例,将Z比分数和 $E_n$ 比率值两种统计方法应用于无损检测实验室的检测能力比对,研究能力验证方法在无损检测实验室的应用,有利于对无损检测实验室的检测能力作出正确的评价,使实验室的检测能力得到提高。

## 1 能力验证的常用统计方法

### 1.1 稳健统计Z比分数

该统计方法是当前国际上实验室能力验证中最常用的方法。它是一种不易受到异常值影响的统计方法,以中位值代替平均值,以标准化IQR代替标准偏差来评价各实验室的检测能力。在数据处理过程中,通常不需剔除异常值,因此能准确反映数据的统计特征。该统计方法采用Z值来评定参加能力验证的实验室的检测能力<sup>[2-3]</sup>。Z的计算公式为:

$$Z = \frac{\text{观察值} - \text{中位值}}{\text{标准化四分位间距}} \quad (1)$$

式中:中位值是指一组按大小顺序排列的数据的中间值,若N为奇数,则以 $X_{(N+1)/2}$ 的结果数值为中位值;若N为偶数,则两个中心值的平均值为中位值,即 $(X_{N/2} + X_{N/2+1})/2$ 。

以标准化四分位间距(NIQR)作为允许离散度。设 $A=(N-1)/4$ , $B=3(N-1)/4$ ,用 $\lceil \rceil$ 表示整数部分,则下四分位为:

$$Q_1 = X_{[A]+1} + \{A - \lceil A \rceil\} \cdot \{X_{[A]+2} - X_{[A]+1}\} \quad (2)$$

上四分位为:

$$Q_3 = X_{[B]+1} + \{B - \lceil B \rceil\} \cdot \{X_{[B]+2} - X_{[B]+1}\} \quad (3)$$

四分位间距IQR为:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (4)$$

标准化四分位间距为:

$$NIQR = 0.7413IQR \quad (5)$$

从计算公式可以看出,在稳健统计法中,中位值只与数据列中间的一个或两个数据有关。下四分位 $Q_1$ 与 $X_{[A+1]}, X_{[A+2]}$ 两个数据有关(当A为整数时,只与 $X_{[A+1]}$ 一个数据有关)。同样,上四分位 $Q_3$ 也只与一个或两个数据有关。因此,在稳健统计法中直接决定统计参数的数据不超过6个,特别是从 $X_1$ 到 $X_{[A]}$ 以及从 $X_{[B]}$ 到 $X_N$ 数据列两端的数据均不参与计算,对统计参数没有贡献。所以稳健统计法是将极端数据对统计结果的影响降至最低的统计方法。目前,稳健统计法是检测实验室能力验证中较常采用的方法<sup>[4-7]</sup>。

在检测实验室间比对中,Z比分数表明了实验室的测试接近给定值(比如中位值)的程度。正常情况下,Z值将大致呈正态分布,Z值评估落在 $|Z| \leq 3$ 之外的概率仅为0.3%,所以 $|Z| > 3$ 是非常少见的,可以认为是小概率事件,并依此作为检测能力离群与否的判定依据。用Z比分数对参加实验室间比对、能力验证结果的评定按以下方法进行,如表1所示。若一个结果的Z值的绝对值越接近于0,则表示该结果与其它实验室的结果符合得越好。Z值的正负号表示结果是太高或是太低。

表1 Z比分数法的结果评定

$ Z $	检测能力	对策
$\geq 3$	离群	要求实验室开展纠正措施
$2 \sim 3$	可疑	鼓励实验室复查结果
$\leq 2$	满意	无

### 1.2 $E_n$ 比率值法

在测量比对中,对于实验室间的能力验证计划结果的统计设计也通常采用国际上普遍接受的 $E_n$ 比率值来进行评价。尤其是在计量比对,特别是量值比对中, $E_n$ 比率值是一致性判别的首选因子。可以使用 $E_n$ 比率值来评价某一实验室的每一个单独的结果。其定义为:

$$E_n = \frac{x_{\text{lab}} - x_{\text{ref}}}{\sqrt{U_{\text{lab}}^2 + U_{\text{ref}}^2}} \quad (6)$$

式中: $x_{\text{lab}}$ 为参加实验室的结果; $x_{\text{ref}}$ 为参考实验室的结果或参考值; $U_{\text{lab}}$ 为参加实验室报告的不确定度; $U_{\text{ref}}$ 为参考实验室报告的不确定度或参考值。

因此,利用 $E_n$ 比率值评定测量结果的前提是必须正确评定该实验室对该项测量的不确定度。从

式(6)可知,  $E_n$  比率值表明参加实验室是否是在参考值(给定值)的特定测量不确定度中。 $E_n$  比率值并不表明哪个参加实验室的结果最接近参考值(因为  $E_n$  比率值的计算与分母中的合成不确定度大小有关, 所以  $E_n$  值大或小, 都有可能表明参加实验室的测量结果与参考值接近), 它只表明其测量结果是否符合对实验室要求的不确定度。因此, 当  $E_n$  值的绝对值不大于 1 时为满意结果(越接近零越好), 当  $E_n$  绝对值大于 1 时为不满意结果, 如表 2 所示。

表 2  $E_n$  比率值法的结果评定

$ E_n $	检测能力	对策
$>1$	不满意	要求实验室开展纠正措施
$\leq 1$	满意	无

用  $E_n$  比率值法对参加实验室间比对、能力验证结果的评定按以下方法进行。从式(6)可知,  $E_n$  比率值与测量参数的不确定度有关, 不确定度的计算可根据不确定度传播定律<sup>[8]</sup>:

$$u_c^2(y) = \sum_{k=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_k} \right)^2 u^2(x_k) \quad (7)$$

式中:  $u_c(y)$  为被测量的合成不确定度,  $u(x_k)$  为输入分量的不确定度, 可以由 A 类、B 类不确定度评定获得;  $\frac{\partial f}{\partial x_k}$  为在其它分量不变时,  $x_k$  变化单位量时引起的  $y$  的变化值, 称为灵敏度系数。扩展不确定度为:

$$U_c = k_p u_c(y) \quad (8)$$

式中:  $k_p$  为在置信概率  $p$ (一般取 95%) 下的包含因子。根据式(7)、(8)可以计算出  $U_{\text{lab}}$  和  $U_{\text{ref}}$ 。再应用式(6)得到测量参数的  $E_n$  值。

## 2 能力比对试验方案

通过上述对能力验证、实验室间比对基本方法的介绍, 根据无损检测实验室的特点及能力验证的内容设计试验方案, 对无损检测实验室检测能力进行评价。试验采用模拟实验室的方法进行, 即以来自不同检测室的 10 台超声检测仪模拟 10 家不同的无损检测实验室参加能力比对活动, 并对超声检测结果进行处理分析。

焊缝的超声探伤是各检测实验室在日常的检测过程中遇到比较多的, 特别是在钢结构检测方面, 主要是检测钢柱、钢梁的焊缝。故实验样品采用对接焊钢板, 并选择焊板厚度  $T=25$  mm。由权威机构制作, 焊缝内有一缺陷。为保证试验的公平性, 所检测的对象为同一焊板。超声仪为各单位日常开展对

外业务所用的仪器, 具有一定的代表性。仪器的各项参数的设计与校准应与平时使用时相同。本次模拟试验中采用常用的探神系列仪器及 PXUT-27 型超声仪, 使用 2.5PK2.0 探头。检测参数的选择是实施能力验证重点考虑的因素, 应具有代表性。根据焊缝探伤检测报告的要求, 其结果一般会记录缺陷深度、缺陷当量、缺陷指示长度、缺陷最高波幅距基准面的水平距离等参数, 并根据这些参数依照检测标准的要求对焊缝的质量进行评定<sup>[9]</sup>。综合这些因素, 试验选用探伤所得缺陷的深度参数作为比对的对象。

## 3 试验结果比对分析

### 3.1 稳健统计 Z 比分数分析

此次能力验证计划采用的是单个样品, 故直接采用 Z 比分数的方法对结果进行计算分析, 其计算公式如式(1)。表 3 为参加比对的各个模拟实验室的测量结果。中位值和标准化 NIQR 由 10 个模拟实验室的测量结果, 根据上述中位值的计算公式计算所得, 如表 3 所示。根据所得到的中位值和标准化 NIQR, 依照式(1)对各个模拟实验室的测量参数的 Z 比分数进行计算, 并根据能力评价的要求进行评价, 得到如表 4 的评价结果。

表 3 缺陷埋深的中位值和标准化 NIQR

实验室	缺陷埋深/mm	缺陷埋深中位值	NIQR
01	10.8		
02	14.6		
03	8.0		
04	10.0		
05	10.1	10.05 mm	0.85 mm
06	11.5		
07	9.8		
08	10.5		
09	9.5		
10	9.1		

### 3.2 $E_n$ 比率值法分析

根据统计方法的要求, 在利用  $E_n$  比率值对数据结果进行处理时, 要计算各参量的测量不确定度。试验中进行比对的参数是缺陷埋深, 故各模拟实验室在测量过程中对该参数的不确定度均要按式(7)和(8)进行计算。根据稳健统计技术, 对于检测能力, 统计量中位值具有稳健性。因此, 采用中位值为

参考值  $x_{\text{ref}}$  进行计算,在试验中  $x_{\text{ref}}=10.05 \text{ mm}$ ,  $U_{\text{ref}}=1.22 \text{ mm}$ 。根据测量数据得到计算结果如表 5。

表 4 各实验室测得的 Z 比分数及其评价结果

实验室	缺陷埋深/mm	Z	Z	评价结果
01	10.8	0.88	≤2	满意
02	14.6	5.34	≥3	不满意
03	8.0	-2.40	2~3	可疑
04	10.0	-0.06	≤2	满意
05	10.1	0.06	≤2	满意
06	11.5	1.70	≤2	满意
07	9.8	-0.29	≤2	满意
08	10.5	0.53	≤2	满意
09	9.5	-0.65	≤2	满意
10	9.1	-1.14	≤2	满意

表 5 各实验室测得的  $E_n$  比率值及评价结果

实验室	测量结果/mm	$x_{\text{lab}} - x_{\text{ref}}$ /mm	$U_{\text{lab}}$ /mm	$E_n$	$ E_n $	评价结果
01	10.8	0.75	1.18	0.44	≤1	满意
02	14.6	4.55	2.50	1.63	>1	不满意
03	8.0	-2.05	2.00	-0.87	≤1	满意
04	10.0	-0.05	1.10	-0.03	≤1	满意
05	10.1	0.05	1.03	0.03	≤1	满意
06	11.5	1.45	1.70	0.49	≤1	满意
07	9.8	0.25	0.25	0.145	≤1	满意
08	10.5	0.45	1.19	0.26	≤1	满意
09	9.5	-0.55	1.25	-0.28	≤1	满意
10	9.1	0.95	1.30	0.53	≤1	满意

## 4 结果分析

分析以上两种比对方法得出的结果可知,除 3 号实验室评价结果有偏差外,其余实验室的评价结果均一致。Z 比分数法得出 2 号实验室的数据为不满意结果,同样用  $E_n$  比率值法评价的 2 号也为不满意结果。对于 3 号实验室  $|Z|=2.4$ ,处于 2 与 3 之间,为可疑状态,而其  $|E_n|=0.87$ ,虽然按  $E_n$  比率值法评价为满意状态,但其  $|E_n|$  值接近于 1,如果不特别关注,也易变为不满意状态(因为  $E_n$  比值法无中间可疑状态)。由此可见,运用两种方法对无损检测实验室能力比对的比对数据进行统计计算,可以

得到相似的统计结果。故可以采用这两种方法对无损检测实验室的能力进行验证,从而评价各无损检测实验室的检测能力。在实际的实验室能力比对中当遇到这种情况时,此两个实验室均需要依照能力验证纠正活动的要求进行整改,寻找和分析出现离群的原因,开展有效的整改活动,并将详细的整改报告以书面形式,在规定时间内提交审查。对于结果中出现可疑值的实验室,建议其认真开展自我核查并提交核查报告,以确保检测实验室的检测能力可靠、稳定。

## 5 结语

将 Z 比分数和  $E_n$  比率值两种统计方法应用于无损检测实验室的检测能力比对。在比对过程中,两种统计方法均是采用中位值作为参考值进行计算,统计结果更准确,从而对各实验室的能力做出正确的评价。所进行的虽然是模拟实验,但其方法具有一定的参考作用,可应用于无损检测实验室或机构的检测能力比对。在无损检测实验室能力比对试验中,可根据实际情况选择其中一种进行比对试验,采取另一种方法验证评价结果,从而对各无损检测实验室或机构的检测能力作出正确的评价。

## 参考文献:

- [1] ISO/IEC 17025—2005 检测和校准实验室能力的通用要求[S].
- [2] 马冲先.能力验证及其评价[J].理化检验·化学分册,2005,41(11):861-870.
- [3] 符颖操,罗茜.实验室间比对结果分析统计方法的探讨[J].理化检验·物理分册,2006,42(6):295-299.
- [4] 刘启敏.校准实验室如何进行比对[J].计量与测试技术,2009,36(6):55-56.
- [5] 陈钧.能力验证结果统计处理中几种改进的稳健算法[J].计量技术,2010(12):71-73.
- [6] 邢小茹,马小爽,田文,等.实验室间比对能力验证中的两种稳健统计技术探讨[J].中国环境监测,2011,27(4):4-8.
- [7] 郭亚帆.稳健统计以及几种统计量的稳健性比较分析[J].统计研究,2007,24(09):82-85.
- [8] JJF 1059—1999 测量不确定度评定与表示[S].
- [9] 夏纪真.超声波无损检测技术[M].广州:广东科技出版社,2009.