

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.03.04

表面洛氏硬度 HR15YW 与 HR15TW 换算关系的研究

李杨, 石伟

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 目前, 常用的硬度换算表中均没有表面洛氏硬度 HR15YW 标尺与其它硬度标尺的换算关系。随着 HR15YW 硬度标尺的广泛应用, HR15YW 标尺与其他硬度标尺的关系研究非常必要。通过对不同硬度值的三种材料进行了大量的试验, 并对试验结果进行相关性分析, 得到 HR15YW 与 HR15TW 之间存在强正相关关系, 利用最小二乘估计原理进行曲线回归分析得到 HR15YW 与 HR15TW 的换算关系, 从而将 HR15YW 与其余硬度单位联系起来。

关键词: 表面洛氏硬度; 换算; 相关性分析; 曲线回归分析

中图分类号: TB938.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)03-0024-05

Study of Surface Rockwell Hardness about the Conversion Relationship between HR15YW and HR15TW

LI Yang, SHI Wei

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: So far most common conversion tables do not include the conversion relation between Surface Rockwell hardness HR15YW and other hardness. It is urgent to find the relation with the HR15YW and other hardness. This paper will focus on the conversion relation between HR15YW and HR15TW through a large number of experiments on three kinds of materials with different hardness values and correlation analysis, and curvilinear regression analysis. In this paper, there is a strong positive correlation relationship between HR15YW and HR15TW through a lot of experiments and correlation analysis, and the conversion relation between HR15YW and HR15TW is got by using curvilinear regression analysis of the least squares estimate principle. The existing conversion tables are supplemented and the HR15YW could be converted to other hardness values.

Key words: surface rockwell hardness; conversion; correlation analysis; curvilinear regression analysis

0 引言

硬度试验方法有很多, 包括洛氏硬度、布氏硬度、维氏硬度、努氏硬度、里氏硬度、韦氏硬度、巴氏硬度等, 每种试验方法还包括不同的试验条件, 如试验力的大小和加载方式、压头的类型和材料等^[1]。这就造成了在不同国家、行业和单位中采用的硬度单位不统一的问题。为了从一种硬度单位换算成另一种硬度单位, 就需要借助硬度换算表或硬度换算工具。目前常用的硬度换算表有 GB/T 1172-1999《黑色金属硬度及强度值》^[2]、ASTM E140-12b《Standard Hardness

Conversion Table for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness》^[3] 和 ISO 18265: 2013《Metallic materials — Conversion of hardness values》^[4]。这三个换算表中均没有表面洛氏硬度 HR15YW 标尺与其它硬度单位换算的关系。

表面洛氏硬度中, HR15YW 标尺主要应用于发动机导向器叶片、封闭环等材料和零件, 进口的 2014-T4XXX, 6061-T42 等裸露变形铝合金原料生产的连接件、铆钉、挤压件、焊接件等诸多零部件的硬度测试以及扇段、机匣、机翼、高压涡轮外环等涂层的硬度测试。随着 HR15YW 硬度标尺的广泛应用, 研究 HR15YW 标尺硬度与其他硬度的关系非常必要。

收稿日期: 2017-05-11; 修回日期: 2017-05-15

作者简介: 李杨(1990-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事硬度计量及科研相关工作。

由于之前对 HR15YW 标尺的考虑较少, 很多实际测试现场无试验条件进行 HR15YW 试验, 只能进行其余常用硬度试验, 故需要将 HR15YW 标尺与其余硬度标尺联系起来。

硬度试验中与 HT15YW 标尺最为相近的为表面洛氏硬度中的 HR15TW 标尺, 其试验方法相同, 只是压头直径不同, 在换算关系研究中引入的影响因素最少, 故选用 HR15TW 标尺作为 HR15YW 标尺与其余硬度标尺联系的中间量。

本文通过对不同硬度值的三种材料进行大量的试验并对试验结果进行相关性分析, 得到 HR15YW 与 HR15TW 之间存在的关系。针对不同硬度值的三种材料, 分别利用最小二乘估计原理进行曲线回归分析得到 HR15YW 与 HR15TW 的换算关系。本文试图将 HR15YW 与其余硬度单位联系起来。

1 理论关系

HR15YW 与 HR15TW 均为表面洛氏硬度。表面洛氏硬度指在初试验力 F_0 和总试验力 $(F_0 + F_1)$ 先后作用下, 将规定的压头压入试样表面, 在主试验力 F_1 作用下保持规定的时间后, 卸除主试验力 F_1 , 测量保留初试验力 F_0 时的残余压痕深度 h , 用以表征硬度的高低, 残余压入深度值越大, 硬度值越低, 反之亦然^[1]。其硬度试验原理如图 1 所示, 其中, F_0 为初试验力, F_1 为主试验力, h_0 为初试验力作用下的压入深度, h_1 为总试验力 $(F_0 + F_1)$ 作用下的压入深度, h_2 为卸除主试验力, 保持初试验力作用下的压入深度, h 为残余压痕深度, $h = h_2 - h_0$ 。计算公式如式(1)所示^[1]。

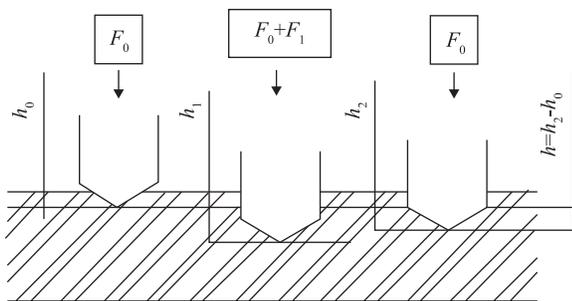


图 1 表面洛氏硬度试验原理图

$$H = 100 - \frac{h}{0.01} \quad (1)$$

式中: H 为硬度值。

HR15YW 与 HR15TW 的试验原理与计算公式均同上所述, 初试验力与主试验力一致, 分别为 29.4

N(3 kgf) 与 147.1 N(15 kgf), 并且两种硬度的压头均为碳化钨球, 唯一的区别在于 HR15YW 所用压头直径为 12.7 mm, 而 HR15TW 所用压头直径为 1.5875 mm^[1]。

2 硬度试验

2.1 试验制备

采用均匀度较好且硬度值范围为 65~92 HR15TW 的标准表面洛氏硬度块, 其中 65~69 HR15TW 为铝制标准硬度块, 根据其硬度值大小编号为 1#~9#; 69~78 HR15TW 为铜制标准硬度块, 根据其硬度值大小编号为 10#~22#; 78~92 HR15TW 为钢制标准硬度块, 根据其硬度值大小编号为 23#~59#。

2.2 试验方法

在国防最高标准 NRVB-1 表面洛氏硬度标准装置上进行试验, NRVB-1 表面洛氏硬度标准装置经过校准, 量值可溯源到国家基准。按照检定规程的要求, 夹装 HR15TW 所需直径为 1.5875 mm 的碳化钨球, 在标准硬度块上压出 6 个压痕, 其中第一个压痕忽略不计, 其余 5 个从圆心向外, 依据阿基米德螺旋线方式均匀分布, 计算 5 个点硬度值的平均值, 即为标准硬度块的 HR15TW 硬度值^[5]。更换直径 12.7 mm 的压头, 在试块上试压 15 次后, 依照 HR15YW 标尺的试验方法进行试验, 以求出所有硬度块 HR15YW 标尺的硬度值。

2.3 试验结果

经试验以及计算, 得到铝制、铜制、钢制标准硬度块的 HR15YW 硬度值与 HR15TW 硬度值, 如表 1~3 所示。

表 1 铝制标准硬度块的 HR15TW 标尺与

HR15YW 标尺硬度值

编号	HR15TW 硬度值	HR15YW 硬度值
1#	65.8	93.8
2#	65.8	93.9
3#	66.3	94.1
4#	67.1	94.2
5#	67.5	94.3
6#	67.5	94.3
7#	68.5	94.5
8#	68.9	94.6
9#	69.0	94.8

表2 铜制标准硬度块的 HR15TW 标尺与 HR15YW 标尺硬度值

编号	HR15TW 硬度值	HR15YW 硬度值
10#	69.4	94.7
11#	71.0	94.6
12#	71.7	94.6
13#	72.1	94.8
14#	72.5	94.8
15#	73.3	94.9
16#	73.7	94.9
17#	73.8	95.0
18#	75.2	95.3
19#	75.4	95.4
20#	77.3	95.7
21#	77.5	95.7
22#	78.0	95.8

表3 钢制标准硬度块的 HR15TW 标尺与 HR15YW 标尺硬度值

编号	HR15TW 硬度值	HR15YW 硬度值	编号	HR15TW 硬度值	HR15YW 硬度值
23#	78.5	95.7	42#	83.8	96.6
24#	78.7	95.7	43#	84.0	96.7
25#	78.7	95.9	44#	85.5	97.0
26#	78.9	95.9	45#	86.4	97.6
27#	78.9	95.8	46#	87.7	97.6
28#	79.0	95.8	47#	88.6	97.8
29#	79.2	96.3	48#	89.1	97.5
30#	79.4	96.3	49#	89.9	98.3
31#	79.5	95.9	50#	90.0	98.4
32#	80.9	96.6	51#	90.1	98.0
33#	81.4	96.6	52#	90.1	97.9
34#	81.5	96.9	53#	90.1	98.2
35#	81.7	96.7	54#	90.2	98.2
36#	81.8	96.2	55#	90.8	98.1
37#	81.9	96.6	56#	91.0	98.3
38#	81.9	96.6	57#	91.2	98.5
39#	82.0	96.8	58#	91.5	98.7
40#	82.3	96.4	59#	91.6	98.5
41#	82.4	96.5			

3 试验结果分析

3.1 HR15YW 与 HR15TW 的相关性分析

进行曲线回归分析前需确定两变量是否相关，根据试验结果，各标准硬度块的 HR15TW 标尺与 HR15YW 标尺硬度值如图 2 所示，无论铝制标准硬度块、铜制标准硬度块还是钢质标准硬度块，两变量 HR15TW 与 HR15YW 为正相关关系。经计算三种标准硬度块 HR15TW 与 HR15YW 的相关系数分别为 0.983, 0.949, 0.938，即三种标准硬度块的两变量均为强正相关关系^[6]。

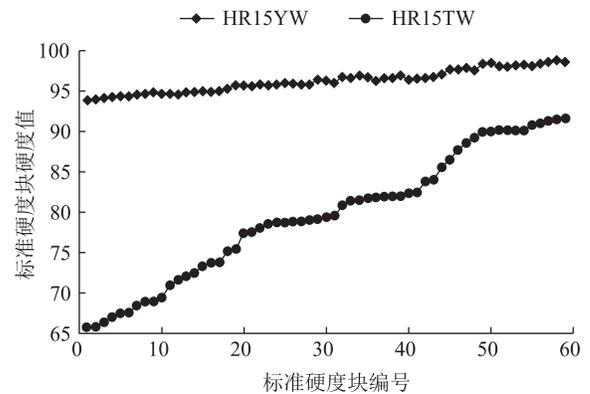


图2 各标准硬度块的 HR15TW 标尺与 HR15YW 标尺硬度值曲线图

3.2 HR15YW 与 HR15TW 的曲线回归分析

3.2.1 最小二乘估计原理

最小二乘估计通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配。利用最小二乘估计可以简便地求得未知的数据，并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小^[6]。将其回归模型为式(2)。

$$\begin{cases} y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \\ E_{\varepsilon} = 0, D(\varepsilon) = \sigma^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中： x 为因变量； y 为自变量； β_0 和 β_1 为回归系数； ε 为误差项； E 为误差项 ε 期望； D 为误差项 ε 方差； σ 为常数。 β_0 和 β_1 的估计 $\hat{\beta}_0$ 和 $\hat{\beta}_1$ ，其回归方程为 $\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$ ，带入一个 x 值即可得到对应的 y 的均值的预报值。用最小二乘法来估计模型中的未知参数 β_0 和 β_1 ，假设有 n 组独立观测值 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ，则

$$\begin{cases} y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \\ E_{\varepsilon_i} = 0, D(\varepsilon_i) = \sigma^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 相互独立。

记 $Q = Q(\beta_0, \beta_1) = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2$, 称 $Q(\beta_0, \beta_1)$ 为偏离真实直线的偏差平方和。最小二乘法就是选择 β_0, β_1 的估计 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$, 使得 $Q(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) = \min Q(\beta_0, \beta_1)$ 。为此分别对 β_0, β_1 求偏导数得式(4)。

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$\hat{\beta} = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}$$

式中: $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ 为 x 与 y 的协方差; $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 为 x 的方差; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 。用这种方法求出的估计 $\hat{\beta}_i (i = 0, 1)$ 称为 β_i 的最小二乘估计。

3.2.2 铝制标准硬度块曲线回归分析

将实验数据画散点图, 选用常用函数, 利用计算机软件对数据进行曲线回归分析^[7]。铝制标准硬度块得到拟合曲线结果如图3所示, 拟合程度如表4所示。

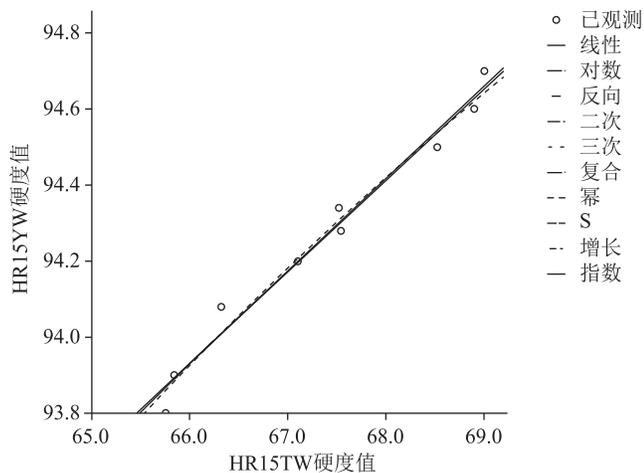


图3 铝制标准硬度块函数曲线拟合图

表4 铝制标准硬度块拟合函数拟合程度表

函数名称	拟合程度	函数名称	拟合程度
线性函数	0.952	复合函数	0.952
对数函数	0.951	幂函数	0.952
倒数函数	0.951	S型函数	0.952
二次函数	0.953	增长函数	0.952
三次函数	0.976	指数函数	0.952

表4中, 铝制标准硬度块拟合程度最高的为三次函数, 其回归函数如式(5)所示。

$$y_1 = -0.0725x_1^3 - 14.641x_1^2 + 986.08x_1 - 22045 \quad (5)$$

式中: y_1 为表面洛氏 HR15YW 硬度值; x_1 为表面洛氏 HR15TW 硬度值。

针对上述曲线回归函数进行误差分析, 其计算结果如表5所示。

表5 铝制标准硬度块拟合函数的偏差统计表

函数名称	最大绝对偏差	平均偏差	偏差的平方和	偏差平方的均方根	偏差平方的最大值	偏差平方的最小值
二次	0.18	0.08	0.09	0.10	0.01	3.11×10^{-5}
三次	0.12	0.04	0.03	0.06	0.00	1.68×10^{-4}

3.2.3 铜制标准硬度块曲线回归分析

分析方法如 3.2.2^[7]。铜制标准硬度块得到拟合曲线结果如图4所示, 拟合程度如表6所示。

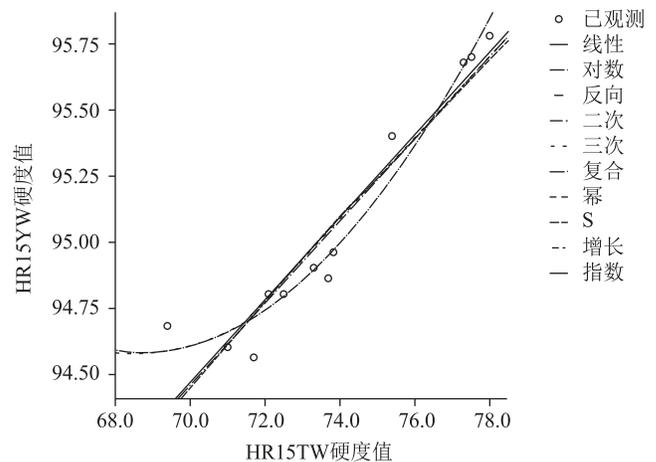


图4 铜制标准硬度块函数曲线拟合图

表6 铜制标准硬度块拟合函数拟合程度表

函数名称	拟合程度	函数名称	拟合程度
线性函数	0.912	复合函数	0.912
对数函数	0.904	幂函数	0.904
倒数函数	0.904	S型函数	0.895
二次函数	0.964	增长函数	0.912
三次函数	0.965	指数函数	0.912

表6中, 铜制标准硬度块拟合程度最高的为三次函数, 但二次函数的拟合程度与三次函数的拟合程度相差无几, 故分析两者回归函数, 如式(6)、式(7)所示。

$$y_2 = 6.622 \times 10^{-5} x_2^3 - 0.933 x_2 + 137.186 \quad (6)$$

$$y_3 = -0.0147x_3^2 - 2.0229x_3 + 164.08 \quad (7)$$

式中： y_2, y_3 为表面洛氏 HR15YW 硬度值； x_2, x_3 为表面洛氏 HR15TW 硬度值。

针对上述两种曲线回归函数进行误差分析，其计算结果如表 7 所示。

表 7 铜制标准硬度块拟合函数的偏差统计表

函数名称	最大绝对偏差	平均偏差	偏差的平方和	偏差平方的均方根	偏差平方的最大值	偏差平方的最小值
二次	0.08	0.11	0.23	0.14	0.02	4.79×10^{-4}
三次	0.03	0.06	0.08	0.08	0.01	8.27×10^{-6}

由表 7 可见，对于铜制标准硬度块，HR15YW 与 HR15TW 关系的回归曲线，三次曲线函数曲线的最大绝对偏差、平均偏差、偏差平方和均小于二次曲线函数，故选定二次曲线函数作为其回归曲线函数，如式(6)所示。

3.2.4 钢制标准硬度块曲线回归分析

分析方法如 3.2.2^[7]。钢制标准硬度块得到拟合曲线结果如图 5 所示，拟合程度如表 8 所示。

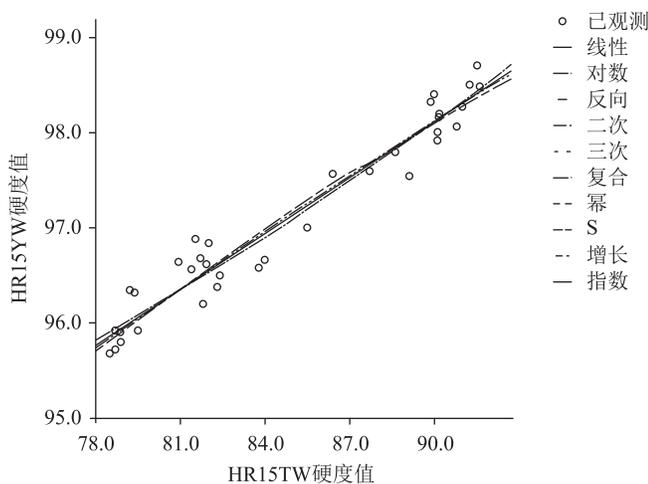


图 5 钢制标准硬度块函数曲线拟合图

表 8 钢制标准硬度块拟合函数拟合程度表

函数名称	拟合程度	函数名称	拟合程度
线性函数	0.949	复合函数	0.949
对数函数	0.948	幂函数	0.948
倒数函数	0.946	S 型函数	0.946
二次函数	0.955	增长函数	0.949
三次函数	0.955	指数函数	0.949

表 8 中，钢制标准硬度块拟合程度最高的为二次

函数与三次函数，其回归函数如式(8)、式(9)所示。

$$y_4 = -7.275 \times 10^{-6}x_4^3 + 0.038x_4 + 89.426 \quad (8)$$

$$y_5 = -0.0018x_5^2 - 0.107x_5 + 93.331 \quad (9)$$

式中： y_4, y_5 为表面洛氏 HR15YW 硬度值； x_4, x_5 为表面洛氏 HR15TW 硬度值。

针对上述两种曲线回归函数进行误差分析，其计算结果如表 9 所示。

表 9 钢制标准硬度块拟合函数的偏差统计表

函数名称	最大绝对偏差	平均偏差	偏差的平方和	偏差平方的均方根	偏差平方的最大值	偏差平方的最小值
二次	0.55	0.122	2.46	0.26	0.30	1.46×10^{-4}
三次	0.42	0.19	1.70	0.21	0.17	2.60×10^{-4}

由表 9 可见，对于 HR15YW 与 HR15TW 关系的回归曲线，三次曲线函数曲线的最大绝对偏差、平均偏差、偏差平方和均小于二次曲线函数，故选定三次曲线函数作为其回归曲线函数，如式(8)所示。

3.3 小结

综上所述，无论是铝制、铜制还是钢制标准硬度块，其回归曲线函数均为三次函数，分别为式(5)、式(6)、式(8)所示，其回归曲线关系如图 6 所示。

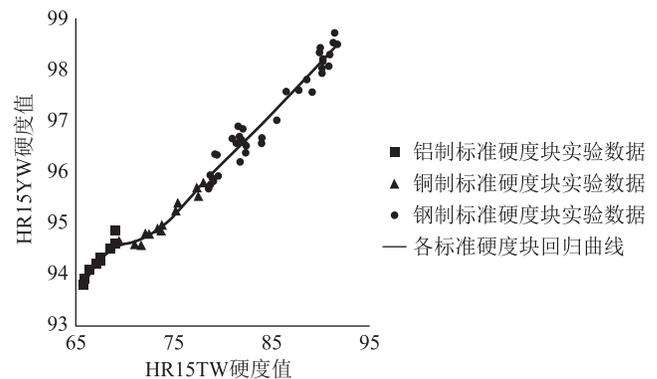


图 6 HR15YW 与 HR15TW 回归曲线关系图

4 结论

经过一系列的试验，分析试验数据后发现：无论是铝制、铜制还是钢制标准硬度块，表面洛氏硬度 HR15YW 标尺与 HR15TW 标尺之间存在强正相关关系。针对不同硬度值的三种材料，分别得到 HR15YW 与 HR15TW 的换算关系函数，对已有换算表进行了补充，从而将 HR15YW 与其他硬度单位联系起来。这对在试验现场中无试验条件进行 HR15YW 试验，但需要得知 HR15YW 硬度值，或已知其余硬度值，需得到 HR15YW

(下转第 12 页)

一部分都随着员工的离职、退休等，淹没在历史的烟尘之中，直接造成了科研浪费和众多低水平重复性的工作。近年来，一些所谓高效的管理方式被盲目推行，如6S，全面清理“多余物”，保密工作的深入开展，每项措施都在限制数据信息的获取与留存，从客观上均加速了科研数据的毁灭与消亡，与大数据发展趋势和理念产生冲突。

为了有效利用社会资源和财富，每一个独立机构，均应进行知识、经验、技术、资源、客户、需求、问题、难点、关键、人才、效率、成本等的综合管理，构建自己的公共数据库，以对于自身运行发展所需要的和所产生的各类数据进行分类，系统性采集和永久留存。不仅是成功案例，那些失败的案例，以及重大事故和灾难性案例更加珍贵，均应一并收存入库，以构建自己的大数据基本环境，并在适当时候向全社会公开，以达到资源共享，服务于社会。

计量性设计，并不仅仅是一个设计准则和理念要求，它的发展与完善将使得所设计制造的产品，在全寿命周期中的各种状态特性参量数据变得透明、可用，并极易实现数据信息的采集、收集和留存，供后续发展及改进产品自身使用。从这个意义上说，计量性是复杂工业产品技术状态控制及大数据管理的基石。

参 考 文 献

[1] 刘春艳, 王卫华, 陈慧宇. 舰艇计量保障初探[J]. 计测技术, 2010, 30(5): 59-60.

[2] 纪明霞, 陈世夏. 机载 ATS 闭环计量保障模式探讨[J]. 计测技术, 2011, 31(4): 49-51.

[3] 张玉莲, 宋双杰. 试飞测试校准技术及其发展趋势[J]. 计测技术, 2008, 28(4): 1-3.

[4] 范静, 王光发, 荆卓寅, 等. 涡扇发动机试车台推力测量与校准技术概述[J]. 计测技术, 2012, 32(5): 1-4.

[5] 朱崇全. 产业计量学的提出及其研究[J]. 计测技术, 2012, 32(1): 6-9.

[6] 柴振海, 周伟超, 陈云梅. 导弹武器系统计量保障[J]. 宇航计测技术, 2004, 24(5): 60-64.

[7] 郑媛月, 郑保, 王静波, 等. 飞机研制的计量保障探讨[J]. 计测技术, 2010, 30(3): 49-50.

[8] 刘燕虹, 陈强. 关于计量标准化的几点思考[C]//宇航计量技术学会. 国防军工计量测试学术交流会会议文集. 2008, 503-507.

[9] 董锁利, 唐武忠, 高万忠. 航空装备计量保障关键技术分析[J]. 计测技术, 2011, 31(5): 45-48.

[10] 李志强, 朱霞辉, 陈怀艳, 等. 航天测控工程计量保障需求和管理对策研究[J]. 宇航计测技术, 2004, 24(5): 55-59.

[11] 董锁利, 丁颖, 张建兰, 等. 机载设备计量性分析与设计讨论[J]. 计测技术, 2011, 31(3): 46-48.

[12] 孙海燕, 宿亮, 胡艳, 等. 基于产品数据管理平台的计量科研项目信息化管理系统研究[C]//宇航计量技术学会. 国防军工计量测试学术交流会会议文集, 2009, 46-48.

[13] 王海平. 计量保障在装备管理中的作用及未来发展思考[C]//宇航计量技术学会. 国防军工计量测试学术交流会会议文集, 2009, 43-45.

[14] 梁志国. 军事计量的挑战与对策[J]. 计测技术, 2009, 29(6): 1-5.

[15] 段双菊. 浅谈军工产品生产阶段的计量保障[J]. 计测技术, 2010, 30(2): 54-55.

[16] 张学涛, 周世峰, 田阳, 等. 浅谈民用飞机适航性与计量测试之间的关系[J]. 计测技术, 2012, 32(2): 51-54.

[17] 王光发, 荆卓寅, 赵东风. 新一代发动机测试计量保障体系初探[J]. 计测技术, 2011, 31(2): 56-59.



(上接第 28 页)

硬度值的硬度测试工作，将会有较大实际意义。

参 考 文 献

[1] 赵朝前. 力学计量[M]. 北京: 中国计量出版社, 2004.

[2] 国家质量技术监督局. GB/T 1172-1999 黑色金属硬度及强度值[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.

[3] American Society for Testing and Materials. ASTM E140-12b Standard Hardness Conversion Table for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness[S]. West Conshohocken, 2012.

[4] International Organization for Standardization. ISO 18265: 2013 Metallic materials — Conversion of hardness values [S]. Switzerland, 2013.

[5] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 112-2013 金属洛氏硬度计(A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T 标尺)检定规程[S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.

[6] 王穗辉. 误差理论与测量平差[M]. 山东: 同济大学出版社, 2010.

[7] 宇传华. SPSS 与统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

[8] 姚春臣, 汪灿, 肖体安, 等. 关于纯铜的几种硬度值相互关系的初步探讨[J]. 国防技术基础, 2010(6): 23-25.