

线纹钢直角尺垂直度和线纹示值结果的分析

李凌梅 戴庆生 张欣 杨佳 王宜

(天津市计量监督检测科学研究院 天津 300192)

摘要: 线纹钢直角尺是一种简易、基础的长度计量器具,但是其作用却十分广泛。为保证线纹钢直角尺量值传递的准确性与一致性,依据JJG7-2004《直角尺》检定规程,介绍了线纹钢直角尺量值溯源方法,并对线纹钢直角尺的垂直度和线纹示值的结果进行分析,包括最大允许误差和不确定度的评估。其中,不确定度评估详细论述了测量原理,评估的步骤与方法,按照数学模型、方差和传播系数、测量不确定度来源分析、测量不确定度分量计算、合成和扩展测量不确定度计算的顺序完成。

关键词: 线纹钢直角尺;垂直度;不确定度

中图分类号: TH711; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Analysis of the verticality and line scale result of scale steel square

Li Lingmei Dai Qingsheng Zhang Xin Yang Jia Wang Yi

(Tianjin Institute of Metrological Supervision and Testing, Tianjin 300192, China)

Abstract: Scale steel square is simple, basal length measurement equipment. But it is widely used in our lives. In order to ensure the accuracy and consistence of value transmitting, this article introduces the scale steel squares value tracing method, and analyses the verticality and line scale result which contains the analysis of maximum permissible error and uncertainty. The uncertainty is related to the measurement principle, step and method, according to the sequence of mathematics model, variance and transmission co-efficient, sensitivity coefficient, measurement uncertainty source analysis, measurement uncertainty calculation, combined and extended measurement uncertainty calculation.

Keywords: scale steel squares; verticality; uncertainty

1 引言

直尺和圆规是长度计量的基础。中国坊间传说直尺和圆规是伏羲和女娲发明的。山东东汉武梁祠石室留有“伏羲氏手执矩,女娲手执规”的塑像。后来在鲁班曲尺的基础上经过改造,发明了刻度直角钢尺^[1]。刻度直角钢尺是由两把垂直度符合要求的钢直尺铸造在一起制成。巧妙的设计使小小的一把尺,同时兼具测量垂直度和长度的功能,并且可以部分代替圆规来画圆。

我国智慧的劳动人民发明了精准方便的计量器具,更需要精准方便的方法对其进行检定校准,以保证其准确度。刻度直角钢尺作为长度计量中一种较为普遍的计量器具,同时能测量垂直度和线纹示值误差,使用广泛。作为一名长度计量人,我们首先要保证线纹钢直角尺量值传递的准确性和一致性,才能更好地保障计量器具使用者的利益。JJG7-2004《直角尺》检定规程中规定,刻度直角钢尺又称线纹钢直角尺,其测量面的垂直度用不低于2级的宽座直角

尺或标准角尺和相应的塞尺在被检全部测量范围内进行检定^[2]。线纹钢直角尺的线纹示值误差可用钢直尺进行比较检定。本文以检定规程作为依据,对线纹钢直角尺进行结果分析,依据规程得出最大允许误差并在文中按照数学模型和系数、测量不确定度来源分析和计算几个方面进行不确定度评估,作为符合性判定的依据^[3]。

2 线纹钢直角尺外角的不确定度评估

2.1 测量原理、方法和依据

依据JJG7-2004《直角尺》检定规程,线纹钢直角尺外角偏差值是用平板作基准面与标准圆柱角尺作间隙比较而获得的^[4]。将被测量的线纹钢直角尺放在平板工作面上,观察两者之间的光隙以塞尺塞入法测量线纹钢直角尺外角偏差值^[5]。

2.2 建立数学模型

2.2.1 数学模型

$$H = h + h_0$$

式中: H 位被检线纹钢直角尺 90° 的外角偏差值, 单位 mm; h 为塞尺的测量值, 单位 mm; h_0 标准圆柱角尺母线垂直度偏差, 单位 mm。

2.2.2 方差和灵敏度系数

依 $u_c^2(y) = \sum \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)$ 得:

$$u^2(H) = c^2(h_0)u^2(h_0) + c^2(h)u^2(h)$$

式中: $c(h_0) = 1, c(h) = 1$, 则: $u^2(H) = u^2(h_0) + u^2(h)$ 。

2.3 测量不确定度分析

外角偏差部分测量不确定度来源分析如表 1 所示。

表 1 外角偏差部分测量不确定度来源分析

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度分量来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	$c = \partial f / \partial x_i$	$ c_i \times u(x_i) / \mu\text{m}$
$u(h)$	标准圆柱角尺比较差值	0.030		0.030
$u(h_1)$	测量重复性	0.030	1	0.030
$u(h_2)$	塞尺示值误差	0.030		0.030
$u(h_3)$	定位误差	0.000		0.000
$u(h_0)$	标准圆柱角尺角值不确定度	0.003		0.003
$u(h_{01})$	标准圆柱角尺垂直度误差	0.001	1	0.001
$u(h_{02})$	标准圆柱角尺直线度误差	0.003		0.003

2.4 测量不确定度分量计算

2.4.1 与标准圆柱角尺比较差值估算的不确定度分量 $u(h)$

1) 由测量重复性得到的分量 $u(h_1)$

测量重复性是对长边尺寸 150~500 mm 的直角尺外角与相应圆柱角尺在平板上比较测量角度, 连续 10 次而得到的标准差^[6]。

$$S \leq 0.04 \text{ mm}$$

$$u(h_1) = 0.04 / \sqrt{2} = 0.03 \text{ mm}$$

2) 由塞尺示值误差得到的分量 $u(h_2)$

依据 JJG62-2007《塞尺》检定规程规定: 塞尺厚度在 0.02~0.50 mm 示值误差为 ± 0.008 mm, 取 $k=3$, 则:

$$u(h_2) = 0.008 / 3 = 0.003 \text{ mm}$$

3) 定位误差估算的分量 $u(h_3)$

由于受支撑平板的平面度影响, 是被测直角尺偏离垂直位置。由于比较测量圆柱角尺也受到相同方向的垂直度偏离影响, 故该误差可忽略不计^[7]。

$$u(h_3) = 0$$

$$u^2(h) = u^2(h_1) + u^2(h_2) + u^2(h_3) = 0.03^2 + 0.003^2 + 0^2$$

$$u(h) = 0.03 \text{ mm}$$

2.4.2 标准圆柱角尺角值不确定度估算的分量 $u(h_0)$

1) 标准圆柱角尺母线垂直度误差估算的分量 $u(h_{01})$

依据 JJG7-2004《直角尺》检定规程规定, 0 级圆柱角尺测量面相对于基面的垂直度为 ± 0.008 mm/500 mm, 取 $k=3$, 则:

$$u(h_{01}) = 0.008 / 3 = 0.003 \text{ mm}$$

2) 标准圆柱角尺母线的直线度误差估算的分量 $u(h_{02})$

依据 JJG7-2004《直角尺》检定规程规定, 0 级圆柱角尺母线的直线度为 0.003 mm, 取 $k=3$ 则:

$$u(h_{02}) = 0.003 / 3 = 0.001 \text{ mm}$$

$$u^2(h_0) = u^2(h_{01}) + u^2(h_{02}) = 0.003^2 + 0.001^2$$

$$u(h_0) = 0.003 \text{ mm}$$

2.5 合成测量不确定度计算 u

根据上述标准不确定度分量间互不相关性^[8], 合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u^2(h_0) + u^2(h)}$$

$$u_c = \sqrt{0.03^2 + 0.003^2} = 0.03 \text{ mm}$$

2.6 扩展不确定度的计算 U

取 $k=2$, 则:

$$U = 2 \times u_c = 2 \times 0.03 = 0.06 \text{ mm}$$

即线纹钢直角尺外角扩展不确定度为:

$$U = 0.06 \text{ mm}, k = 2$$

3 线纹钢直角尺的线纹直尺的不确定度评估

3.1 测量原理、方法和依据

根据 JJG1-1999《钢直尺》检定规程的规定, 钢直尺示值误差的是将三等标准金属线纹尺或直角尺和被检尺进行比较测量。两者之差即为被检尺的示值误差^[9]。

3.2 建立数学模型

3.2.1 数学模型

$$\Delta L = L - L_s - L_s(\alpha \Delta t - \alpha_s \Delta t)$$

式中: ΔL 为被检尺的示值误差, 单位 mm; L 为被检尺的示值, 单位 mm; L_s 为标准尺的示值, 单位 mm; α 为被检尺的线膨胀系数, 单位 $1/^\circ\text{C}$; α_s 为标准尺的线膨胀系数, 单位 $1/^\circ\text{C}$; Δt 为环境温度与 20°C 的偏差, 单位 $^\circ\text{C}$ 。

3.2.2 方差和灵敏度系数

取 $\Delta \alpha = \alpha_s - \alpha$, 则 $L = L - L_s + L_s \Delta \alpha \Delta t$ 依 $u_c^2(y) = \sum \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)$ 得:

$$u_c^2 = u_c^2(\Delta L) = c^2(L)u^2(L) + c^2(L_s)u^2(L_s) + c^2(\Delta \alpha)u^2(\Delta \alpha) + c^2(\Delta t)u^2(\Delta t)$$

式中: $c(L) = 1, c(L_s) \approx -1, c(\Delta \alpha) = 0, c(\Delta t) = L_s \Delta \alpha, u_c^2 = u^2(\Delta L) = u^2(L) + u^2(L_s) + (L_s \cdot \Delta \alpha)^2 u^2(\Delta t)$

3.3 测量不确定度分析

线纹直尺部分测量不确定度分析如表 2 所示。

表2 线纹直尺部分测量不确定度分析

表示方法	不确定度分量来源	数值/mm		
		L=150	L=300	L=500
$u(L_{s1})$	三等线纹米尺的标准不确定度	0.005	0.005	0.005
$u(L_{s2})$	年稳定性给出的不确定度	0.004	0.004	0.004
$u(L_1)$	对零误差给出的不确定度分量	0.006	0.006	0.006
$u(L_2)$	测量重复性	0.02	0.02	0.02
$u(\Delta t)$	温度偏离20℃的不确定度分量	0.001	0.002	0.004

3.4 测量不确定度分量计算

3.4.1 由三等标准线纹尺示值误差估算的不确定度分量 $u(L_s)$

1) 检定三等标准线纹尺,其结果的不确定度分量 $u(L_{s1})$

按检定规程 JJG71-2005《三等标准金属线纹尺》,其三等标准线纹尺检定结果的不确定度为 0.015 mm, $k=3$,故其标准不确定度为^[10]:

$$u(L_{s1}) = 0.015/3 = 0.005 \text{ mm}$$

2) 由年稳定度给出的不确定度分量 $u(L_{s2})$

标准尺送检,计量院3年检定本所的标准尺年变化量不超过 0.01 mm,其界限内接近于三角分布^[11],故:

$$u(L_{s2}) = 0.01/\sqrt{6} = 0.004 \text{ mm}$$

所以,标准尺的测量不确定度分量为:

$$u^2(L_s) = u^2(L_{s1}) + u^2(L_{s2})$$

$$u(L_s) = \sqrt{0.005^2 + 0.004^2} = 0.006 \text{ mm}$$

3.4.2 由被检钢直尺给出的不确定度分量 $u(L)$

1) 对零误差估算的分量 $u(L_1)$

被检尺端无刻线,要与标准尺零线纹对准有一定难度,其对准误差为:

$$\Delta = \beta \cdot \varphi / (e \cdot M)$$

式中: β 为人眼的明视距离,为 250 mm; φ 为尺端对半线的分辨角 $60''$; e 为弧、秒换算系数,为 206265; M 为标准尺上放大镜倍数,为 7 倍。 Δ 在 0.010 mm 变化限范围内有相等的概率^[12]。

$$\text{则 } \Delta = (250 \times 60) / (206265 \times 7) = 0.010 \text{ mm},$$

$$u(L_1) = \Delta / \sqrt{3} = 0.010 / \sqrt{3} = 0.006 \text{ mm}.$$

2) 重复性估算的分量 $u(L_2)$

实验给出,检定读数重复 10 次,得到的标准偏差一般 $S=$

0.02 mm,所以, $u(L_2) = \sqrt{0.006^2 + 0.02^2} = 0.02 \text{ mm}.$

3.4.3 由温度偏离 20℃ 估计的分量 $u(\Delta t)$

本装置的三等标准线纹尺由黄铜制成其线膨胀系数为 $17.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 钢直尺由不锈钢制成线膨胀系数为 $11.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 两者的线膨胀系数相差为 $6.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[13],按钢直尺检定规程,示值误差检定时,被检尺与标准尺温度应在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 进行等温。其偏离 20℃ 的估计分量 $u(\Delta t)$ 服从

均匀分布^[14],故:

$$u(\Delta t) = 2 / \sqrt{3} = 1.1547 \text{ } ^\circ\text{C}$$

当检定 150 mm 尺时,温度误差影响为:

$$L_s \cdot \Delta\alpha \cdot u(\Delta t) = 150 \times 6.1 \times 10^{-6} \times 1.1547 = 0.001 \text{ mm}$$

当检定 300 mm 尺时,温度误差影响为:

$$L_s \cdot \Delta\alpha \cdot u(\Delta t) = 300 \times 6.1 \times 10^{-6} \times 1.1547 = 0.002 \text{ mm}$$

当检定 500 mm 尺时,温度误差影响为:

$$L_s \cdot \Delta\alpha \cdot u(\Delta t) = 500 \times 6.1 \times 10^{-6} \times 1.1547 = 0.004 \text{ mm}$$

3.5 合成标准不确定度计算 u_c

根据上述标准不确定度分量间互不相关性,合成标准不确定度为:

$$u_c^2(\Delta L) = u^2(L) + u^2(L_s) + (L_s \cdot \Delta\alpha)^2 u^2(\Delta t), \text{ 当 } L=$$

150 mm 时,

$$u_c^2(\Delta L) = \sqrt{0.006^2 + 0.02^2 + 0.001^2} = 0.02 \text{ mm}, \text{ 当}$$

$L=300 \text{ mm}$ 时,

$$u_c^2(\Delta L) = \sqrt{0.006^2 + 0.02^2 + 0.002^2} = 0.02 \text{ mm}, \text{ 当}$$

$L=500 \text{ mm}$ 时, $u_c^2(\Delta L) = \sqrt{0.006^2 + 0.02^2 + 0.004^2} = 0.02 \text{ mm}$

3.6 扩展不确定度的计算 U

取 $k=2$, $L=150 \text{ mm}$, $U = ku_c(\Delta L) = 2 \times 0.02 = 0.04 \text{ mm}$; $L=300 \text{ mm}$, $U = ku_c(\Delta L) = 2 \times 0.02 = 0.04 \text{ mm}$; $L=500 \text{ mm}$, $U = ku_c(\Delta L) = 2 \times 0.02 = 0.04 \text{ mm}.$

即线纹钢直角尺的线纹直尺扩展不确定度为 $U = 0.04 \text{ mm}$, $k=2$

4 线纹钢直角尺的不确定度结果

经上述评估,对于 $(150 \times 150) \text{ mm} \sim (500 \times 500) \text{ mm}$ 的线纹钢直角尺,其外角的扩展不确定度为 $U=0.06 \text{ mm}$, $k=2$ 。其线纹直尺的扩展不确定度为 $U=0.04 \text{ mm}$, $k=2$ 。

5 结论

依据 JJG7-2004《直角尺》检定规程,经过上述分析和精确计算^[15], $(150 \sim 500) \text{ mm}$ 规格的线纹钢直角尺的测量面相对于基面的垂直度的最大允许误差为 $(0.15 \sim 0.50) \text{ mm}$, 扩展不确定度为 $U=0.06 \text{ mm}$, $k=2$ 。 $(150 \sim 300) \text{ mm}$ 规格的线纹钢直角尺的最大允许误差为 $\pm 0.3 \text{ mm}$, 扩展不确定度为 $U=0.04 \text{ mm}$, $k=2$ 。 $(400 \sim 500) \text{ mm}$ 规格的线纹钢直角尺的最大允许误差为 $\pm 0.5 \text{ mm}$, 扩展不确定度为 $U=0.06 \text{ mm}$, $k=2$ 。

参考文献

- [1] 顾小玲. 量具、量仪与测量技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 编委会. 中华人民共和国国家计量检定规程汇编[S]. 北京:中国计量出版社,2007.

(下转第79页)

- 检测和语音增强[J]. 电声技术, 2006(1):36-39.
- [4] BOLL S. Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 1979, 27(3): 113-120.
- [5] BEROUTI M, SCHWARTZ R, MAKHOUL J. Enhancement of speech corrupted by acoustic noise[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1979: 208-211.
- [6] THOMSON D J. Spectrum estimation and harmonic analysis[C]. Proceedings of the IEEE, 1982, 70(9): 1055-1096.
- [7] 韦晓东, 胡光锐, 任晓林. 应用倒谱特征的带噪语音端点检测方法[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(1): 185-188.
- [8] COHEN I. Noise spectrum estimation in adverse environments: Improved minima controlled recursive averaging[C]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2003, 11(5): 466-475.
- [9] 崔兆国, 周萍. 基于 TEO 能量谱减法的语音增强技术的研究[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(1): 2-3.
- [10] 韩芳, 靳宗信. 低信噪比下的端点检测算法研究[J]. 西北师范大学学报. 2016, 52(5): 988-1001.
- [11] 齐立萍, 孙昊, 杨鹏, 等. 基于参数自适应的改进谱减法[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(3): 2-5.
- [12] 张建伟, 陶亮, 周健, 等. 基于改进谱平滑策略的 IMCRA 算法及其语音增强[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(1): 153-157.
- [13] XU Y, DU J, DAI L R, et al. A regression approach to speech enhancement based on deep neural networks[J]. IEEE Transactions on Audio Speech & Language Processing, 2015, 23(1): 7-19.
- [14] 黎林, 朱军. 基于小波分析与神经网络的语音端点检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6): 528-534.

作者简介

姚远, 1979 年出生, 博士, 副教授, 研究方向为信号处理与感测技术。

E-mail: yaoyuan@mail. ccnu. edu. cn

王秋菊(通讯作者), 硕士研究生, 研究方向为语音信号处理。

E-mail: wqj20100802060@163. com

(上接第 66 页)

- [3] 张伟昆. 测试性分析与评估体系的研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5): 38-43.
- [4] 张曼宁, 赵恒凯, 郑国莘. 毫米波段折射率结构常数的建模及敏感性分析[J]. 电子测量技术, 2016, 39(12): 150-154.
- [5] 韩先平. 大气折射误差快速修正方法研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5): 57-60.
- [6] 陈沛, 贺旭东. 基于灵敏度分析的隔振器模型修正方法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(4): 38-41.
- [7] 宁飞, 贺庚贤, 葛欣宏. 星载设备电源线传导发射的测量不确定度评定方法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 80-83.
- [8] 贾云涛, 胡耀元, 张建永, 等. 基于 MATLAB 的改进仪表测量精度的研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(9): 44-46.
- [9] 刘军. 一种多端口矢量网络分析仪误差校准简化方法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9): 29-33.
- [10] 史永彬, 于蒙, 李迪. 示波器测量脉冲信号测量结果的不确定度分析与评定[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(3): 50-53.
- [11] 王延年, 牛飞婷, 刘婷. 指纹图像质量评估方法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(10): 32-36.
- [12] 邓欣, 刘晓东, 李保军, 等. 隔水管振动导致的 ADCP 流速测量误差分析[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(9): 26-28.
- [13] 王瑞宝. 基于蒙特卡洛法的微波功率测量不确定度评定[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(7): 28-31.
- [14] 周锋, 王瑞宝. 一种选取有效测量点简化测量不确定度计算的方法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6): 37-39.
- [15] 葛欣宏, 刘遒, 蔚素升, 等. 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射的测量不确定度评定方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(7): 43-46.

作者简介

李凌梅, 1982 年出生, 硕士, 工学硕士, 主要研究方向为测试计量技术及仪器、长度几何量计量与检定。

Email: tjllm333@126. com

戴庆生, 1964 年出生, 副高, 主要从事长度几何量计量与检定。

张欣, 1984 年出生, 工程师, 主要从事长度几何量计量与检定。

杨佳, 1964 年出生, 硕士, 主要从事能源计量与检定。

王宜, 1990 年出生, 本科, 主要从事长度几何量计量与检定。