

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.03.02

水平仪检定器准确度性能的探讨

张卫东¹, 姚爽², 聂金玲¹

(1. 河南省计量科学研究院, 河南 郑州 450000; 2. 重庆建设工业(集团)有限责任公司, 重庆 400054)

摘要: 水平仪检定器是用于校准钳工水平仪、框式水平仪分度值误差的主要计量标准器具, 其准确度直接影响水平仪的量值溯源质量。通过分析水平仪检定器工作原理, 指出了示值误差是表征水平仪检定器准确度性能的指标, 提出了水平仪检定器示值误差数学模型, 分析了水平仪检定器示值误差的测量关键。

关键词: 水平仪检定器; 准确度; 分度值误差; 示值误差

中图分类号: TB921

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)03-0007-04

Discussion of Accuracy Performance of Calibrators for Levels

ZHANG Weidong¹, YAO Shuang², NIE Jingling¹

(1. Henan Institute of Metrology, Zhengzhou 450000, China; 2. Chongqing Jianshe Industry (Group), Ltd. Co., Chongqing 400054, China)

Abstract: The calibrators for levels are used for calibrating the division value error of the shaft levels and frame levels. The accuracy of the level calibrator directly affects the traceability quality of the level. Based on the analysis of working principle of the level calibrators, it is pointed out that the indication error is an index to characterize the accuracy of the level calibrator, and a general mathematical model of the indication error is put forward. The key to measuring the indication error of the calibrators for levels is analyzed.

Key words: level calibrator; accuracy; division value error; indication error

0 引言

水平仪检定器是一种采用正弦原理设计, 利用工作面两端的高度差变化形成小角度, 以刻线或数显方式读数的小角度测量仪器。在 JJG 191-2018《水平仪检定器》中, 规定了以分度值误差作为评定水平仪检定器准确度性能的主要指标, 并定义分度值误差为标称分度值与实际分度值的差。本文通过对水平仪检定器工作原理进行分析, 从示值误差的定义出发, 指出水平仪检定器示值误差是仪器小角度示值与仪器产生的标准角度值的相对误差, 提出水平仪检定器示值误差是评定水平仪检定器准确度性能的一个重要指标。同时阐述了分度值误差和示值误差的区别, 给出了水平仪检定器示值误差的计算数学模型, 讨论了水平仪检定器示值误差的测量关键。

1 准确度性能指标

测量仪器的准确度性能指标是表征测量仪器特性的指标, 常用的指标主要有示值误差、重复性、分辨力等^[1-2]。JJG 191-2018《水平仪检定器》以分度误差作为表征水平仪检定器准确度性能的主要指标, 定义

分度值误差是标称分度值与实际分度值的差^[3]。并规定分度值误差用立式光学计和四等量块组合标准或直接用光栅式测微仪为标准器, 根据分度值 θ 选择测量轴线与检定器工作台回转轴线的距离(即标准弦长 L_1) (见表1), 取10个分度间隔的标准弦高构建标准角度, 计算等间隔分度值的平均值作为实际分度值, 以10个分度为测量间隔进行检定, 按式(1)求解分度值误差。

$$\Delta \varepsilon_i = 1 - \frac{N_i - N_{i-1}}{10} \quad (1)$$

式中: $\Delta \varepsilon_i$ 为水平仪检定器的分度值误差; N_i 为正行程上第 i 点的读数平均值; N_{i-1} 为正行程上第 $i-1$ 点的读数平均值。

JJG 191-2018《水平仪检定器》将分度间隔指定为10, 主要是基于标准角值的正切原理, 受标准角值的非线性影响, 有取值的局限性。本文根据 JJF 1001-2011《通用计量名词术语及定义》的测量仪器性能指标术语示值误差规定, 和 JJG 2057-2006《平面角计量器具检定系统表》规定, 提出以示值误差作为水平仪检定器的准确度性能指标^[4], 具有定义共识性和可溯性优点。

2 示值误差的数学模型

目前水平仪检定器的型式包括杠杆螺旋副式、螺旋副式、电感数显式、光栅数显式和斜块式^[5]。水平仪检定器结构原理是采用正弦原理以工作台转轴为旋转中心,工作台面长度为半径,旋转产生(0~300)°的圆心度,复现的是平面角度(见图1)。以杠杆螺旋副式水平仪检定器为例,其读数装置为鼓轮式测微器,标尺分划、螺旋副结构和杠杆放大机构,一旦通过机械加工并安装完成,仪器的分度值就确定了,但由于仪器设计原理偏差、零部件制造公差和传动机构安装配合不到位等因素,会引起仪器示值与参考量值存在一定偏差。

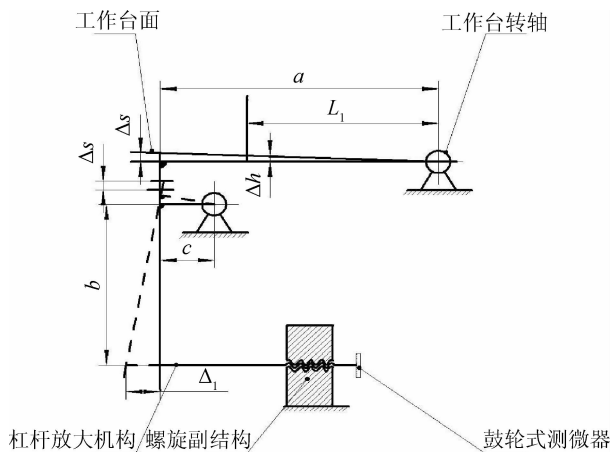


图1 水平仪检定器设计原理图

示值误差是测量仪器示值与对应输入量的参考量值之差^[6]。有绝对误差和相对误差两种形式。水平仪检定器示值误差以相对误差形式呈现。

$$\text{示值误差} = \frac{\text{示值} - \text{标准(理论)角度值}}{\text{标准(理论)角度值}} \quad (2)$$

鉴于水平仪检定器检定采用正切原理发生标准角度,可知

$$\begin{aligned} \text{标准(理论)角度值} &\approx \frac{\text{标准弦高 } \Delta h}{\text{标准弦长 } L_1} \\ &= \frac{\text{测量位置弦高 } h_i - \text{起始位置弦高 } h_0}{\text{标准弦长 } L_1} \quad (3) \end{aligned}$$

取标准(理论)角度值 \approx 示值,将式(3)代入式(2),则水平仪检定器示值误差的计算公式

$$e \approx \frac{\text{示值} - \frac{\text{标准弦高}}{\text{标准弦长}}}{\text{示值}} = 1 - \frac{h_i - h_0}{n \times L_1 \times \theta} \quad (4)$$

式中: e 为示值误差; h_i 为测量位置的弦高; h_0 为起始位置的弦高; n 为取样间隔数; L_1 为标准弦长; θ 为被

检测仪器的标称分度值(或显示装置的分辨力,以下简称分辨力)。

3 示值误差与分度值误差的区别

3.1 分度值误差计算公式说明

根据分度值误差定义,当分度值误差取相对分度值 θ 的百分比,则分度值误差的公式为

$$\Delta \varepsilon = 1 - \frac{N \text{ 个分度间隔标准角度的平均值}}{\text{分度值}} \quad (5)$$

$$\Delta \varepsilon = 1 - \frac{h_i - h_0}{N \times L_1 \times \theta}$$

式中: $\Delta \varepsilon$ 为分度值误差取相对分度值的百分比; N 为分度间隔数,取10个分度,对于分辨力 θ 为0.001 mm/m的水平仪检定器取50格。

按照JJG 191-2018规程的检定方法设置规定,用公式(5)可以导出分度值 θ 为0.005, 0.01 mm/m和分辨力 θ 为0.001 mm/m的水平仪检定器分度值误差公式,见表1。

表1 各种水平仪检定器分度值误差的简化公式

序号	水平仪检定器 $\theta / (\text{mm} \cdot \text{m}^{-1})$	检定方法设置 N	L_1 / mm	计算公式
1	0.005	10	200	$1 - \frac{h_i - h_0}{10 \times 200 \times 0.005} = 1 - \frac{h_i - h_0}{10}$
2	0.001	50	200	$1 - \frac{h_i - h_0}{50 \times 200 \times 0.001} = 1 - \frac{h_i - h_0}{10}$
3	0.01	10	100	$1 - \frac{h_i - h_0}{10 \times 100 \times 0.01} = 1 - \frac{h_i - h_0}{10}$

由此可以看出,水平仪检定器分度值误差曲线,是一个以10分度或0.05 mm/m为间隔的折线。为了提高水平仪检定器准确度性能,可以利用此误差曲线进行仪器误差修正,或将此误差曲线用于水平仪的分度值计算,以期获得更准确的水平仪分度值。由于水平仪检定器的非线性设计原理,此曲线对分度值不小于0.05 mm/m的水平仪是有益的,但对于分度值小于0.05 mm/m的水平仪则参考意义不大。

3.2 示值误差计算公式说明

由于取样间隔数 n 的可选择性,在不改变标准弦长 L_1 的前提下,按示值误差公式(4)可获取不同取样间隔数的误差曲线,以分度值为0.005 mm/m的水平仪检定器为例,见表2。

表2 0.005 mm/m 水平仪检定器示值误差的变化公式

序号	水平仪检定器 $\theta / (\text{mm} \cdot \text{m}^{-1})$	检定方法设置		计算公式
		n	L_1 / mm	
1	0.005	4	200	$1 - \frac{h_i - h_0}{4 \times 200 \times 0.005} = 1 - \frac{h_i - h_0}{4}$
2	0.005	10	200	$1 - \frac{h_i - h_0}{10 \times 200 \times 0.005} = 1 - \frac{h_i - h_0}{10}$
3	0.005	20	200	$1 - \frac{h_i - h_0}{20 \times 200 \times 0.005} = 1 - \frac{h_i - h_0}{20}$

由表2可以发现, 序号1的误差曲线可以用于分度值为0.02 mm/m的水平仪分度值计算修正, 同理, 序号2和序号3的公式可分别用于分度值为0.05, 0.10 mm/m水平仪的分度值计算修正。这样, 检定员可以根据水平仪检定器的使用对象, 有选择性地给出有效的水平仪检定器示值误差曲线, 而不是仅仅判定水平仪检定器合格与否。同时可根据生产企业的软件修正需求, 调整水平仪检定器示值误差曲线的取样间隔数 n , 获得更为准确的修正曲线。按照JJG 191-2018规程规定选取标准弦长 L_1 和取样间隔数 n , 示值误差公式(4)也可以简化为表1公式。

3.3 示值误差和分度值误差的差别分析

示值误差和分度值误差的差异有以下几点:

1) 简化的示值误差数学模型与分度值误差数学模型在外形上相似, 但公式(5)表达的分度值误差是相对分度值 θ 的百分比, 公式(4)表达的示值误差是相对误差, 两者定义不同, 有本质的区别。

2) 从分度值误差计算公式(5)可以看出, 分度间隔数 N 代表的是使用 N 个分度间隔标准角度的平均值作为实际分度值, 由于标准器标准角度发生原理的非线性, 导致分度间隔数 N 的取值直接影响实际分度值的准确度, 因此分度间隔数 N 的取值是限定的, 在规程中取值为10。

3) 从示值误差计算公式(4)可以看出, 取样间隔数 n 的取值不影响标准角度值, 只影响使用角度的代表性和检定劳动强度。可以根据不同的使用需求, 灵活选取取样间隔数 n , 获得有效的水平仪检定器示值误差曲线。

综上所述, 无论从术语定义、使用范围还是标准角度设计考虑, 用示值误差表征准确度性能, 相比于分度值误差, 既有理论优势, 又有测量上的可操作性, 更具科学性、合理性。

4 示值误差的测量关键

根据水平仪检定器的设计原理和标准角度的产生原理可知, 水平仪检定器示值误差的测量关键是产生标准角度的标准弦长 L_1 、标准弦高 $(h_i - h_0)$, 测量取样间隔数 n 以及读数重复性 s 。由于读数重复性与人员操作熟练程度以及被检对象有关, 具有随机性, 因此在制定和选择水平仪检定器示值误差测量方法时, 更多地考虑产生标准角度的标准弦长 L_1 、标准弦高 $(h_i - h_0)$ 、取样间隔数 n 的设置。

4.1 标准弦长

由公式(4)可知, 加长标准弦长 L_1 , 可以减小标准弦长 L_1 对示值误差的影响, 但由于标准弦长 L_1 加长, 伴随着标准弦高 $(h_i - h_0)$ 加高, 对测量标准弦高 $(h_i - h_0)$ 用标准器测量范围要求加大, 因此应综合考虑被检仪器的工作台面长度和取样间隔以及测量弦高用标准器的分度值(分辨力), 不能随意设置标准弦长 L_1 。建议在水平仪检定器工作台面长度允许的前提下, 尽量加长标准弦长 L_1 取值, 同时根据用于测量标准弦高 $(h_i - h_0)$ 的标准器和被检仪器的分度值(分辨力)以及测量间隔综合考虑, 确定标准弦长 L_1 。从表3可以看出, 随着被检仪器分度值(分辨力)的减小, 标准弦长 L_1 普遍要求加长。

4.2 标准弦高

依据公式(4), 测量标准弦高 $(h_i - h_0)$ 的仪器示值误差将直接影响检定结果, 使用示值误差越小的测量标准弦高 $(h_i - h_0)$ 的仪器, 检定结果的不确定度越小。但由于水平仪检定器的测量范围为 $(0 \sim 300)''$, 要求测量标准弦高 $(h_i - h_0)$ 的仪器具有大量程, 小分度值(分辨力)的特点。结合表3的统计数据, 测量标准弦高 $(h_i - h_0)$ 的仪器通常选用分度值不大于 $1 \mu\text{m}$ 光学计或准确度等级不低于 $0.2 \mu\text{m}$ 级的光栅式测微仪^[5-6]。

表3 分度值(分辨力)与标准弦长 L_1 的积值表

序号	规范/标准编号	分度值 (分辨力)/ ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$)	标准弦长 L_1 / mm	分度值(分辨力) × 标准弦长 L_1 / mm
1	JJG 191-2018	0.01	100	0.001
2	JJG 191-2018	0.005	200	0.001
3	JB/T 12197-2015	0.004	250	0.001
4	JB/T 12197-2015	0.0025	400	0.001
5	JJG 191-2018	0.001	200	0.0002

4.3 取样间隔数

取样间隔数 n 与被检仪器的分度值(分辨力)的乘积即为取样间隔, 取样间隔的选取直接影响使用角度的代表性和实际工作量的繁简程度, 同时从公式(4)可以发现, 取样间隔 ($n \times \theta$) 越大, 测量结果不确定度越小。但取样间隔越大, 则相对 JJF 1084 - 2002《框式水平仪和条式水平仪校准规范》规定的水平仪检定器使用间隔偏离越大, 其使用角度的代表性越差, 因此必须合理、有效地选择取样间隔。

从使用角度的代表性考虑, 水平仪检定器的检定取样间隔应包含水平仪检定器使用时的通常测量间隔。水平仪检定器主要用于框式水平仪和条式水平仪的分度值误差校准。框式水平仪和条式水平仪的分度值误差校准按分度值为测量间隔进行, 框式水平仪和条式水平仪有 0.02, 0.05, 0.10 mm/m 三种分度值^[7]。因此水平仪检定器的检定取样间隔应为 0.02, 0.05 mm/m 的倍数, 或检定点包含 0.02, 0.05 mm/m。

从工作量繁简程度和仪器结构考虑, 以杠杆螺旋副式水平仪检定器为例, 其测量范围为 0 ~ 1.5 mm/m, 需转动鼓轮 5 周, 即鼓轮每转一周, 工作台面转角 0.3 mm/m, 按均匀分布设置, 一般一周取 4 个、6 个和 8 个检定点, 如此, 一台仪器的检定点数分别为 20, 30, 40, 取样间隔分别为 0.075, 0.05, 0.0375 mm/m。因此, 综合考虑, 以取样间隔为 0.05 mm/m 较为合理, 检定水平仪检定器的取样间隔数 n 可以按照取样间隔数与被检仪器的分度值(分辨力)的乘积等于 0.05 mm/m 确定。

随着光栅式测微仪和长度计等大量程、高准确度仪器的广泛使用, 示值误差取样间隔的可选择性为获取数显式水平仪检定器的全行程修正曲线提供了便利, 对分析和评价水平仪检定器准确度性能提供了新方法。

5 结束语

本文从仪器工作原理和测量仪器特性入手, 对水平仪检定器准确度性能指标进行探讨和研究, 可以得出以下结论:

1) JJG 191 - 2018《水平仪检定器》定义的分度值误差是在特定条件下进行仪器检定获得仪器准确度性能的指标, 具有一定局限性。本文采用的示值误差符合

JJG 2057 - 2006《平面角计量器具检定系统表》规定, 通过分析示值误差的测量关键, 比较分度值误差, 认为用示值误差表征仪器准确度性能, 对水平仪检定器生产企业优化仪器检验方法, 提高产品质量具有指导和推广作用。

2) 水平仪检定器的示值误差计算数学模型为

$$e = 1 - \frac{h_i - h_0}{n \times L_1 \times \theta}$$

3) 水平仪检定器示值误差的测量关键是标准弦长 L_1 、标准弦高 ($h_i - h_0$) 和取样间隔数 n 。设置这些参数的原则是在水平仪检定器工作台面长度允许的前提下, 尽量加长标准弦长 L_1 取值, 并考虑与标准弦高 ($h_i - h_0$) 的标准器和被检仪器分度值(分辨力)以及取样间隔的匹配性; 应选用分度值不大于 1 μm 的光学计或准确度等级不低于 0.2 μm 级的光栅式测微仪作为标准弦高 ($h_i - h_0$) 的测量仪器; 一般地可按照取样间隔数与被检仪器的分度值(分辨力)的乘积等于 0.05 mm/m 的要求确定检定水平仪检定器的取样间隔数 n 。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1094 - 2002 测量仪器特性评定[S]. 2002.
- [2] OIML/D15 测量仪器检查用特性的选择原则[S]. 1986.
- [3] 国家市场监督管理总局. JJG 191 - 2018 水平仪检定器检定规程[S]. 北京: 中国质检出版社, 2018.
- [4] 国家市场监督管理总局. JJG 2057 - 2006 平面角计量器具检定系统表[S]. 北京: 中国计量出版社, 2006.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. JB/T 12197 - 2015 水平仪检定器[S]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1001 - 2011 通用计量名词术语及定义[S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1084 - 2002 框式水平仪和条式水平仪校准规范[S]. 2002.

收稿日期: 2020 - 03 - 10; 修回日期: 2020 - 04 - 15

作者简介

张卫东(1969 -), 男, 河北滦南人, 高级工程师, 硕士, 主要从事几何量计量研究与机械工程检测工作。

