

国家计量技术规范

《激光式高速弯沉测定仪校准规范》

测量不确定度报告

规范编制组

2023年11月

一、概述

激光式高速弯沉测定仪(以下简称高速弯沉仪)主要由牵引机构、承载平台、激光多普勒传感器、距离测量系统、数据采集及控制系统、温度控制系统等组成,通过测量在标准轴载作用下距离轴载中心不同位置上传感器测得的速度值,结合横梁上的一套惯性修正系统,得到道路上各点的路面变形速度,经过专用的系统软件计算得到路面弯沉值。

二、测量温度校准结果的不确定度评定

2.1 测量模型

温度偏差的测量模型如下:

$$\Delta = t_i - t_s$$

式中:

Δ ——温度偏差, $^{\circ}\text{C}$ 。

t_s ——标准器测量温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

t_i ——测量装置设定温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 灵敏系数

由测量模型可以得到,灵敏系数 $c(t_i) = \frac{\partial \Delta}{\partial t_i} = 1$, $c(t_s) = \frac{\partial \Delta}{\partial t_s} = -1$ 。

2.3 不确定度分量的评定

(1) 温度测量过程引入的不确定度 $u(t_1)$;

在重复性条件下,对设定温度 10°C 进行 10 次测量,所得数据为表 1 所示:

表 1 10 次温度测值记录表

温度设定值 / $^{\circ}\text{C}$	温度测量值 / $^{\circ}\text{C}$									
10	10.7	10.3	9.5	9.3	10.6	10.4	10.3	10.7	10.6	9.4

用贝塞尔公式法计算标准差 $S_t = 0.56^{\circ}\text{C}$

$$u(t_1) = \frac{S_t}{\sqrt{10}}$$

代入计算得 $u(t_1) = 0.18^\circ\text{C}$ 。

(2) 辐射温度计引入的不确定度 $u(t_0)$ 。

辐射温度计的最大允许误差不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，因此引入的标准不确定度为：

$$u(t_0) = \frac{a}{\sqrt{3}} = 0.58^\circ\text{C}$$

2.4 合成标准不确定度的计算

(1) 不确定度分量的汇总

不确定度分量汇总见表 2 所示。

表 2 温度测量结果的不确定度分量汇总表

序号	不确定度来源	不确定度分量	类别	分布
1	温度测量过程的不确定度	$u(t_1) = 0.18^\circ\text{C}$	A	-
2	辐射温度计引入的不确定度	$u(t_0) = 0.58^\circ\text{C}$	B	正态分布

(2) 不确定度的合成

合成标准不确定度为： $u_c = \sqrt{u^2(t_1) + u^2(t_0)}$

计算得： $u_c = 0.61^\circ\text{C}$

2.5 扩展不确定度的计算

取 $k = 2$ ，则

$$U = 1.2^\circ\text{C} , k = 2$$

2.6 不确定度的描述

温度测量不确定度的描述：

$$U = 1.2^\circ\text{C} , k = 2$$

三、纵向距离测量结果的不确定度评定

3.1 测量模型

$$\Delta l = \frac{l_i - l_0}{l_0} \times 100$$

式中：

Δ ——纵向距离传感器示值相对误差，%；

l_i ——被检设备测得的纵向距离，m；

l_0 ——标准装置测得的纵向距离，m。

3.2 不确定度分量的评定

(1) 由设备分辨力或测量重复性引入的不确定度

1) 由设备分辨力或测量重复性引入的不确定度

a) 由设备分辨力引入的不确定度

被校准设备为数字式显示设备，分辨力为 0.01m，则区间半宽度为 0.005m，可假设为均匀分布，查表得 $k = \sqrt{3}$ ，

由分辨力引起的标准不确定度分量为

$$u_1 = \frac{0.005\text{m}}{\sqrt{3}} = 0.0029\text{m} = 2.9\text{mm}$$

b) 测量重复性引入的不确定度

选取典型设备，设置测量长度为 500m，重复性条件下进行三次测量，所得数据为：500.04m，500.03m，500.05m。

用极差法计算标准差（3 次 C_n 取 1.69）

$$S_l = \frac{l_{\max} - l_{\min}}{C_n}$$

代入计算得：

$$S_l = 0.0118\text{m} = 11.8\text{mm}$$

$$u_1 = \frac{S_l}{\sqrt{n}}$$

代入计算得 $u_1 = 6.8\text{mm}$ 。

(2) 由标准装置引入的不确定度 u_2 ；

查 JJG 703-2003 光电测距仪检定规程，I 级全站仪标准差为 1.5mm，测量 9 次，不确定度为 $u_2 = 1.5 / \sqrt{9} = 0.5\text{mm}$ 。

3.3 合成标准不确定度的计算

(1) 不确定度分量的汇总

纵向距离测量结果的不确定度分量汇总见表 3 所示。

表 3 纵向距离测量结果的不确定度分量汇总

序号	不确定度来源	不确定度分量	类别	分布
1	测量重复性引入的不确定度	$u_1 = 64.9\text{mm}$	A	/
2	标准装置引入的不确定度	$u_2 = 0.5\text{mm}$	B	正态

(2) 不确定度的合成

合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$$

计算得： $u_c = 64.902\text{mm}$ ，取 $u_c = 64\text{mm}$ 。

3.4 相对扩展不确定度的计算

取 $k = 2$ ，则， $U = 128\text{mm}$

测量长度为 500m 时，相对扩展不确定度为

$$U_r = 0.003\% \quad , \quad k = 2$$

3.5 不确定度的描述

纵向距离测量的不确定度描述：

$$U_r = 0.003\% \quad , \quad k = 2$$

四、路面变形速度的不确定度评定

4.1 测量模型

高速弯沉仪校准装置通过设备不同位置的若干组（以 4 组为例）旋转盘（旋

转盘半径 $r=47.5\text{mm}$) 转速不同的转速来实现模拟路面不同置位的下沉速度, 则高速弯沉仪校准装置模拟路面某一点处路面下沉速度的 v_m 为:

$$v_m = \omega \cdot r = 2\pi \cdot n \cdot r$$

其中: v_k ——为激光点处路面下沉速度 (m/s);

ω ——为转盘角速度 (rad/s);

r ——为转盘半径 (m);

n ——为转盘设定的转速 (r/s)。

则测量模型的灵敏度系数分别为:

$$c_1 = \frac{\partial v_m}{\partial n} = r, \quad c_2 = \frac{\partial v_m}{\partial r} = n$$

根据校准装置选取的电机参数说明, 当转速设定为 3600 r/min, 转速的最大偏差为 ± 1 r/min, 即 $\Delta_1 = \pm 0.01667$ r/s。

通过游标卡尺测量转盘上激光点到盘中心的距离 r , 游标卡尺的分度值为 0.02mm, 则 $\Delta_2 = 0.02\text{mm}/2 = 0.01\text{mm}$ 。

4.2 不确定度分量的评定

(1) 测量重复性引入的不确定度

重复性条件下进行 10 次测量, 所得数据见下表 4 所示:

表 4 10 次路面变形速度测值记录表

10 次测量变形速度值 ($\times 10^{-3}\text{m/s}$)									
第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次
4.6002	4.7156	4.3731	4.8106	4.7210	4.3090	5.5992	5.1275	5.0111	5.2550

用贝塞尔公式法计算标准差 $S_v = 0.00041\text{m/s}$,

$$u_1 = \frac{S_v}{\sqrt{10}}$$

代入计算得 $u_1 = 0.000127\text{m/s} = 1.27 \times 10^{-4}\text{m/s}$ 。

(2) 由标准装置引入的相对标准不确定度

根据电机转速最大偏差 $\Delta_1 = \pm 0.01667$ r/s, 则区间半宽度:

$$a_1 = \Delta_1 = 0.01667 \text{ r/s},$$

按照均匀分布计算由转速误差引入的标准不确定度:

$$u_{v1} = a_1 / \sqrt{3} = 0.0096 \text{ r/s}$$

游标卡尺的量化误差 $a_2 = \Delta_2 = 0.01$ mm, 由游标卡尺测量激光点至旋转中心半径引入的标准不确定度为:

$$u_{v2} = a_2 / \sqrt{3} = 0.00577 \text{ mm}$$

则由于测量装置引入的合成标准不确定度为:

$$\begin{aligned} u_2 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial v_m}{\partial x_i} \right]^2} u^2(x_i) = \sqrt{c_{v1}^2 u_{v1}^2 + c_{v2}^2 u_{v2}^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{47.5}{1000} \right)^2 \times 0.0096^2 + \left(\frac{3600}{60} \right)^2 \left(\frac{0.00577}{1000} \right)^2} = 5.72 \times 10^{-4} \text{ m/s} \end{aligned}$$

4.3 合成标准不确定度的计算

(1) 不确定度分量的汇总

路面变形速度结果的不确定度分量汇总见表 5。

表 5 路面变形速度测量结果的不确定度分量汇总

序号	不确定度来源	不确定度分量	类别	分布
1	测量重复性引入的不确定度	$u_1 = 1.27 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	A	/
2	标准装置引入的不确定度	$u_2 = 5.72 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	B	正态

(2) 不确定度的合成

合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$$

计算得： $u_c=5.86\times 10^{-4}\text{m/s}$ 。

4.4 扩展不确定度的计算

取 $k=2$ ，则，

$$U=1.2\times 10^{-3}\text{m/s}, \quad k=2$$

4.5 不确定度的描述

取包含因子 $k=2$ ，路面变形速度测量的不确定度描述：

$$U=1.2\times 10^{-3}\text{m/s}, \quad k=2$$
