



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××—202×

激光式高速弯沉测定仪校准规范

Calibration Specification for Laser High Speed Deflectometer

(征求意见稿)

202×-××-××发布

202×-××-××实施

国家市场监督管理总局 发布

激光式高速弯沉测定仪

Calibration Specification for Laser High
Speed Deflectometer

JJF××××—202×

归口单位：全国公路专用计量器具计量技术委员会

主要起草单位：交通运输部公路科学研究所

参加起草单位：武汉光谷卓越科技股份有限公司

中路高科交通检测检验认证有限公司

北京市路兴公路新技术有限公司

山西路桥智慧交通信息科技有限公司

本规范委托全国公路专用计量器具计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

目 录

1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语.....	(1)
4 概述.....	(1)
5 计量特性.....	(2)
6 校准条件.....	(2)
6.1 试验环境条件.....	(2)
6.2 校准设备.....	(2)
7 校准项目和校准方法.....	(4)
7.1 校准项目.....	(4)
7.2 校准方法.....	(4)
8 校准结果.....	(8)
8.1 校准记录.....	(8)
8.2 校准证书.....	(8)
8.3 校准结果不确定度评定.....	(8)
9 复校时间间隔.....	(8)
附录 A 激光高速弯沉仪弯沉计算模型及实例.....	(10)
附录 B 激光式高速弯沉测定仪校准记录表.....	(11)
附录 C 激光式高速弯沉测定仪校准结果内页格式.....	(12)
附录 D 激光式高速弯沉测定仪距离测量结果不确定度评定示例.....	(14)

引 言

JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF1059《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑校准规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次制定。

激光式高速弯沉测定仪校准规范

1 范围

本规范规定了激光式高速弯沉测定仪的计量性能要求、通用技术要求、计量器具控制等内容。本规程适用于激光式高速弯沉测定仪的校准。

2 引用文件

本规程引用下列文件：

JJF1059.1 测量不确定度评定与表示

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规程；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规程。

3 术语

激光式高速弯沉测定仪 laser high speed deflectometer

通过预设在不同位置的若干个激光多普勒传感器以正常的车流速度采集标准轴载下路面的变形速度，并结合车辆行驶速度、横梁姿态等信息反演路面弯沉及弯沉盆等数据的一种路面结构强度测量仪器（系统、设备），以下简称高速弯沉仪。

4 概述

高速弯沉仪主要用于高速公路、普通公路和城市道路的路面结构强度检测。

高速弯沉仪的测量原理如图 1 所示。在车轮轴载荷的作用下，路面产生盆状形变。高速弯沉仪通过安装在横梁上的一组多普勒激光传感器测量路面弯沉盆内不同位置（图中 x_i 处）的变形速度，并结合行驶速度反演出动态荷载作用下路面的弯沉值。

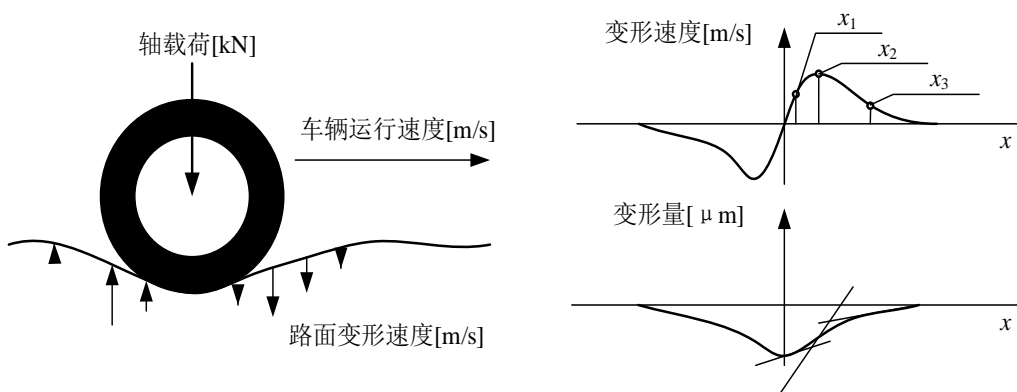


图 1 测量原理示意图

高速弯沉仪主要由牵引装置、承载平台、激光多普勒传感器、距离测量系统、横梁惯性修正系统、温度传感器、环境温度控制装置和中央数据处理系统等部分组成，装备结构示意图见图 2 所示。

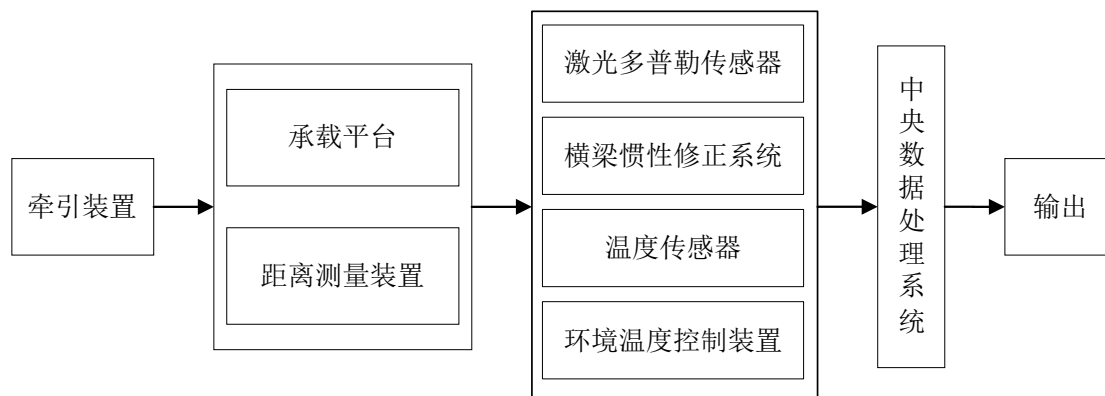


图 2 高速弯沉仪结构示意图

5 计量特性

高速弯沉仪性能要求见表 1。

表1 高速弯沉仪性能要求

序号	项目	要求
1	温度测量误差	$\leq \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$
2	距离测量相对误差	$\leq \pm 0.1 \%$
3	弯沉示值相对误差	$\leq \pm 5 \%$
4	弯沉测值重复性	$\leq 0.03 \text{ mm}$
5	弯沉测值速度变异性	$\leq 5 \%$

6 校准条件

6.1 试验环境条件

试验环境条件主要包括：

a) 环境温度： $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ；

b) 试验路段：平直、无严重破损、无积水、无污染、无交叉口，路段长度不小于 800m，路面弯沉值分布较为均匀，弯沉区间： $0.1\text{mm} \sim 0.5\text{mm}$ 。

6.2 校准设备

校准设备主要包括如下几部分：

a) 高速弯沉仪动态弯沉校准装置

校准装置的结构示意图见图 3。

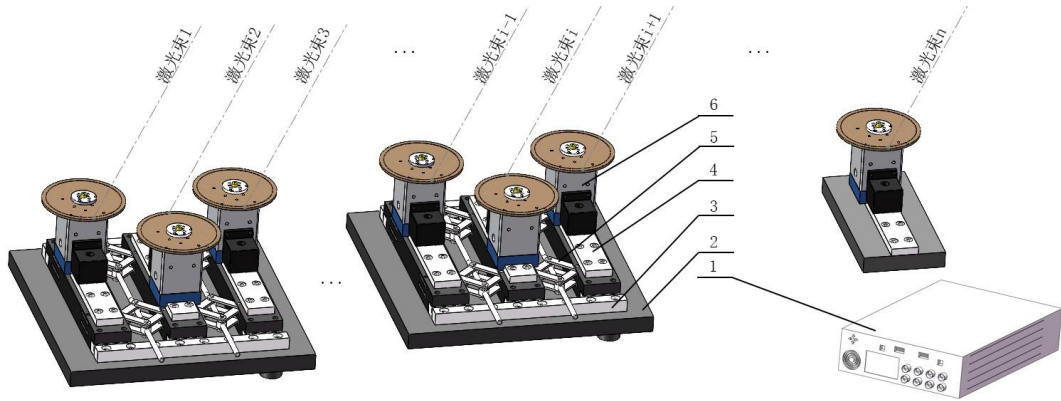


图 3 高速弯沉仪动态弯沉校准装置

1-校准装置控制系统；2-底座；3-导轨 1；4-导轨 2；5-剪叉机构；6-旋转盘系统

高速弯沉仪动态弯沉校准装置主要包括控制系统、支撑底座、导轨 1、导轨 2、剪叉机构和旋转盘系统。旋转盘系统的数量与高速弯沉仪配备的激光多普勒传感器相同。校准使用时，通过剪叉机构和双向导轨调整各旋转盘系统的位置，使各激光多普勒传感器发射的激光束在旋转盘上预设的测点处。

测试时通过预设和调整多点位旋转盘的转速，模拟替代了弯沉盆内不同位置有差异的路面变形速度。基于这些有差异的标准速度值，实现路面弯沉的模拟复现。

校准装置可布置于地面上，也可置于地面掩体内。当选择后者时，校准装置与地面之间的位置关系如下图 4 所示。在校准时，需要将检高速弯沉仪停靠在地面上的刚性支撑上。刚性支撑加工有狭缝，激光束可透过并打在校准装置的旋转盘上。

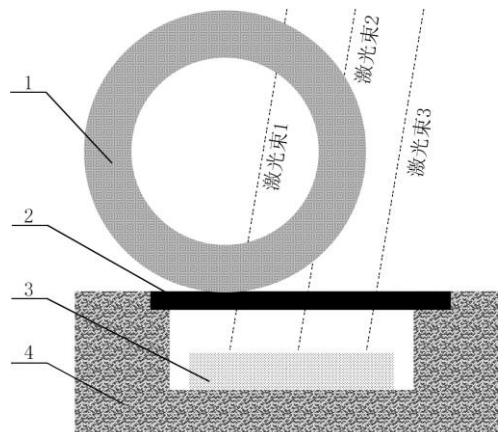


图 4 高速弯沉仪校准装置置于地面下方时的示意图

1-高速弯沉仪后轴双胎；2-刚性支撑；3-校准装置；4-地面

b) 数显倾角仪

测量范围 $-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ，角度测量精度不超过 $\pm 0.005^{\circ}$ ；

c) 信号发生器

脉冲频率输出范围 0Hz~25MHz；

d) 钢卷尺或测距仪

钢卷尺：测量范围 0m~50m，准确度等级 I 级；

测距仪：测量范围 0m~1000m，准确度等级 II 级；

e) 温度模拟器

量程 $-10^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ ，最大允许误差不超过 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 1，校准记录表格式见附录 A。

表 1 校准项目一览表

校准项目	首次校准	后续校准	使用中检查
温度测量误差	+	+	-
距离测量相对误差	+	+	+
弯沉示值误差	+	+	-
弯沉测值重复性	+	+	+
弯沉测值速度变异性	+	+	+

注：凡需校准的项目用“+”表示，不需校准的项目用“-”表示。

7.2 校准方法

7.2.1 通用技术要求

通过目测和手感检查高速弯沉仪外观及各部件功能进行检查。

7.2.2 温度测量误差

温度测量误差试验步骤如下：

a) 将温度模拟器的测温区对准高速弯沉仪的温度传感器测点位置；

b) 在温度模拟器上分别设置 4 组温度值（ 5°C 、 25°C 、 45°C 、 65°C ）并保持稳定，分别记录模拟温度器的示值 t_{wi} ($i=1, 2, 3, 4$)。在 1 分钟内记录 3 次高速弯沉仪测温测值，并取其平均值作为该组温度的测量结果，记为 \bar{t}_i ($i=1, 2, 3, 4$)。按

照公式(1)计算各组温度的测量误差 Δt_i ($i=1, 2, 3, 4$)；

$$\Delta t_i = \bar{t}_i - t_{si} \quad (1)$$

式中： Δt_i ——第 i 组温度值的测量误差，℃；

\bar{t}_i ——第 i 组温度下 3 次温度测量值的平均值，℃， $i=1, 2, 3, 4$ ；

t_{si} ——第 i 组温度下温度模拟器的示值，℃， $i=1, 2, 3, 4$ ；

c) 取 Δt_i 中绝对值最大者作为温度测量误差。

7.2.3 距离测量相对误差

距离测量相对误差试验步骤如下：

a) 选择一条平直、平整、坚硬、无破损的道路作为试验路，在试验路段确定起点并作标记，用钢卷尺或测距仪沿路量出 500m，在终点作标记，起终点间直线上做行驶轨迹标记；

b) 将高速弯沉仪安装有距离测量装置的车轮中轴对齐起点标记，启动距离测量装置，检测车沿标记好的行驶轨迹标记驶向终点。当安装有距离测量装置的车轮中轴与终点标记对准时停车并停止距离测量，记录检测系统输出的行驶距离测量值；

c) 按 a)、b)方法连续测试 3 次，计算 3 次测量值的算术平均值作为行驶距离测量值 L_2 ，按照公式(2)计算距离测量相对误差 ΔL 。

$$\Delta L = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中： ΔL ——距离测量相对误差；

L_1 ——500m 长度标准值，m；

L_2 ——3 次距离测量值的算术平均值，m。

7.2.4 弯沉示值相对误差

弯沉示值相对误差试验步骤如下：

a) 将高速弯沉仪校准装置布设在高速弯沉仪激光多普勒传感器的下方。对于横梁可移动的高速弯沉仪可将横梁推移出弯沉盆外，而对于不可移动横梁的高速弯沉仪需要将校准装置的局部放置在预先设置的地下掩体中，其中激光束可穿过地表的刚性支撑的狭缝照射在旋转盘上；

b) 采用高精度倾角仪及校准装置的底部调平结构对整个校准装置进行调平操作；

c) 由校准装置的交叉机构及双向导轨调整旋转盘系统的位置, 确保各个激光多普勒传感器的激光点均落在对应旋转盘预设的测点位置上, 其中, 测点距离旋转盘回转中心的距离记为 r , $r=47.5\text{mm}\pm 2\text{mm}$; 记录各测点到参考旋转盘(远离弯沉盆的一个)测点的距离 x_i , $i=1, 2, 3, \dots, n$;

d) 将所有旋转盘的转速均设置为 $\omega=3500\text{rpm}/\text{min}$, 并启动所有旋转盘的驱动电机。待旋转盘工作稳定后由高速弯沉仪的激光多普勒传感器采集记录时间长度为 1 分钟的数据, 其均值记为 V_{mi} , $i=1, 2, 3, \dots, n$;

e) 根据公式(3)计算当前状态下被测试激光多普勒传感器激光束的入射角度 β_i ;

$$\beta_i = \arcsin\left(\frac{V_{mi}}{\omega r}\right), i=1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

f) 重复步骤 c)-e) 5 次, 并调整半径 r 及转速 ω , 获得 β_i 的重复性测量值, 并取这 5 次测量值的均值作为 β_i 的标定结果, 随后停止各旋转盘系统;

g) 基于欧拉-伯努利梁模型设置待模拟弯沉盆曲线为 $D(x)$, 其中最大弯沉值为 D_0 , 并根据微分关系反演对应的弯沉盆斜率曲线 $S(x)$ 。提取弯沉盆内 x_i 处激光多普勒传感器测点的弯沉斜率 S_i , $i=1, 2, 3, \dots, n$;

h) 根据公式(4)计算 x_i 处旋转盘需要模拟的弯沉速度 V_{di} ;

$$V_{di} = S_i \times V_k \quad (4)$$

式中, V_k 表示校准装置的模拟车速, 可通过信号发生器传输到高速弯沉仪的采集系统中, 并通过调整输出频率获得不同的待模拟车速。

i) 根据公式(5)计算第 i 个旋转盘系统的转速 ω_i ;

$$\omega_i = (V_k + V_{di} / (\sin(\beta_i))) / r \quad (5)$$

j) 重新启动校准装置, 分别设定第 i 个旋转盘的转速为 ω_i 。此时, 校准装置能够模拟出实际路面上不同位置的路面下沉速度 V_{di} 。基于欧拉-伯努利梁模型计算该校准装置模拟的理论弯沉值为 $D_{1,1}$ ($D_{1,1}=D_0$); 基于积分法计算该校准装置模拟的理论弯沉值为 $D_{2,1}$

k) 启动待校准高速弯沉仪的弯沉测量及计算分析软件, 并以 10m 距离为间隔输出弯沉值。记录模拟行驶距离不小于 1km 时高速弯沉仪的输出弯沉值, 取其平均值作为输出测量弯沉值 d_0 ;

l) 通过改变步骤 g) 中 $D(x)$ 及 D_0 , 分别模拟 D_0 处于 0.1mm~0.2mm, 0.2mm~

0.3mm, 0.3~0.4mm, 0.4~0.5mm 和大于 0.5mm 范围的 5 组路面弯沉值, 结合待模拟行驶车速计算各组转盘的旋转速度后重复步骤 j) 和 k), 记录第 i 组校准装置模拟的理论弯沉值 $D_{1,i}$ 、 $D_{2,i}$ 和待校准高速弯沉仪的测量弯沉值 d_i , 其中 $i=1, 2, 3, 4, 5$;

m) 根据公式(6)计算第 i 次的弯沉示值相对误差。

$$\delta_D = \frac{d_i - D_i}{D_i} \times 100\% \quad (6)$$

式中: δ_D ——弯沉示值相对误差;

d_i ——第 i 次高速弯沉仪测量的弯沉值, mm, $i=1, 2, 3, 4, 5$;

D_i ——第 i 次校准装置模拟出的理论弯沉值, mm, $i=1, 2, 3, 4, 5$ 。对于基于公式法的待校准设备, D_i 取 $D_{1,i}$; 对于基于面积积分法的待校准设备, D_i 取 $D_{2,i}$ 。

n) 计算 5 组弯沉值示值相对误差, 取最大值作为弯沉示值相对误差。

7.2.5 弯沉测值重复性

弯沉测值重复性步骤如下:

a) 选择一段长度不小于 800m、弯沉值在 0.1mm~0.5mm 左右的试验路段, 并记录起点位置;

b) 使用钢卷尺或测距仪等测量设备, 以 10m 为间隔从 300m 开始对试验路段逐点标记;

c) 高速弯沉仪的前轮中轴对齐起点的标记, 并以 50km/h 的速度沿着标记的测点开始测试, 至测试结束;

d) 测试过程中, 需保证高速弯沉仪各激光点的测点位置处于以标记点为中心, 直径不超过 0.20m 的圆形范围内;

e) 按照 a) ~d) 步骤, 每间隔 10 min 对试验路段进行一次检测, 重复测试 10 次;

f) 按照 JTG 3450 中提供的方法计算每次测试数据的代表弯沉值;

g) 根据公式(7)计算该路段 10 次测量结果代表弯沉值的标准差 s 。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

式中: s ——代表弯沉值标准差, mm;

x_i ——第*i*次测量的数据结果，mm， $i=1, 2, \dots, 9, 10$ ；

\bar{x} ——10次代表弯沉值的平均值，mm。

7.2.6 弯沉测值速度变异性

弯沉测值速度变异性检验步骤如下：

a) 路段的选择及试验线路的标记同 7.2.5 a)和 7.2.5 b)；

b) 高速弯沉仪以 30km/h 的速度沿着标记的测点开始测试，至测试结束，计算路段代表弯沉值 L_{30} ；

c) 间隔 30min，高速弯沉仪以 70km/h 的速度沿着标记的测点测试同一路段，至测试结束，计算路段代表弯沉值 L_{70} ；

d) 按照上述步骤，重复测试 3 次，计算该路段 3 次测值代表弯沉值的平均值 \bar{L}_{30} 和 \bar{L}_{70} ；

e) 根据公式(8)计算弯沉测值速度变异系数。

$$L_{spd} = \left| \frac{\bar{L}_{30} - \bar{L}_{70}}{\bar{L}_{70}} \right| \times 100\% \quad (8)$$

式中： L_{spd} ——弯沉测值速度变异系数；

\bar{L}_{30} ——速度为 30km/h 的代表弯沉值，mm；

\bar{L}_{70} ——速度为 70km/h 的代表弯沉值，mm。

8 校准结果

8.1 校准记录

高速弯沉仪的校准记录应信息齐全、内容完整，校准记录式样见附录 B。

8.2 校准证书

高速弯沉仪的校准结果以校准证书的形式表达，校准证书内页格式见附录 C。

8.3 校准结果不确定度评定

高速弯沉仪校准结果的不确定度评定按照 JJF1059.1 测量不确定度评定与表示进行，不确定度评定示例见附录 D。

9 复校时间间隔

高速弯沉仪的复校时间间隔建议为 1 年。由于复校时间间隔的长短

是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的，因此送校单位可根据实际情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

激光高速弯沉仪弯沉计算模型及实例

在本规范中，激光高速弯沉仪的弯沉模型选用基于欧拉-伯努利梁模型的计算方法。弯沉盆曲线 $d(x)$ 的表达式见公式 (A-1)，弯沉斜率曲线 $s(x)$ 的表达式见公式 (A-2)，最大弯沉值 $d(0)$ 的计算方法见公式 (A-3)。

$$d(x) = -\frac{A}{2B} e^{-Bx} (\cos(Bx) + \sin(Bx)) \quad (\text{A-1})$$

$$s(x) = A \sin(Bx) e^{-Bx} \quad (\text{A-2})$$

$$d(0) = -\frac{A}{2B} \quad (\text{A-3})$$

选定不同的参数A和B可获得任意形式的弯沉盆曲线以及最大弯沉值。表A-1列出了5组A和B值，及对应的最大弯沉值供参考。5组参数对应的弯沉盆曲线及弯沉斜率曲线见图A-1和图A-2。

表 A-1 弯沉模型实例参数表

序号	A	B	d/0.01mm
1	0.0015	8.627	8.69
2	0.0027	7.566	17.84
3	0.0036	7.003	25.70
4	0.0044	6.374	34.51
5	0.0051	4.714	54.09

注：表 A-1 中参数仅用作本规范的示例，在实际校准时以实际情况为准。

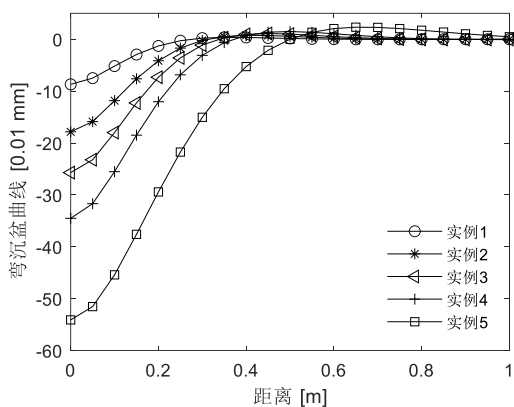


图 A-1 弯沉盆曲线

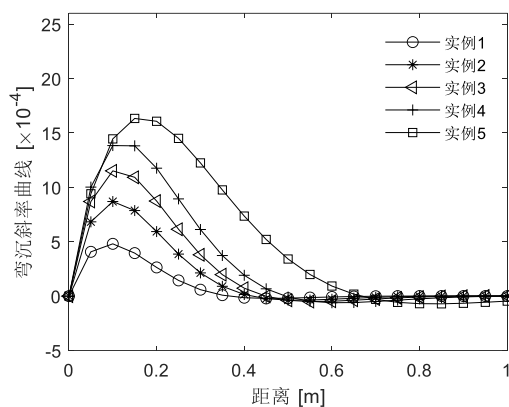


图 A-2 弯沉斜率曲线

附录 B

激光式高速弯沉测定仪校准记录表

记录编号：

第 页 共 页

样品名称		样品编号					
型号规格		出厂编号					
生产厂家		校准依据					
校准时间		校准地点					
校准环境	温度：_____ °C 湿度：_____ %RH						
所用测量标准 或主要设备	名称	测量范围	不确定度/准确度/ 最大允许误差	证书编号	证书有效期至		
校准项目							
序号	校准项目	校准结果					
1	温度测量 误差 (°C)	温度值	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	最大温度测 量误差
		设备测值					
		模拟器示值					
2	距离测量 相对误差 (m)	标准值	第 1 次 测量值	第 2 次 测量值	第 3 次 测量值	3 次 平均值	示值相对 误差
3	弯沉示值 相对误差 (0.01mm)	弯沉值	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	最大示值相 对误差
		测量值					
		校准值					
4	弯沉测值 重复性 (0.01mm)	第 1 次 测量值	第 2 次 测量值	第 3 次 测量值	第 4 次 测量值	第 5 次 测量值	第 6 次 测量值
		第 7 次 测量值	第 8 次 测量值	第 9 次 测量值	第 10 次 测量值	10 次 平均值	重复性 标准差
5	弯沉测值 速度变异性	L_{30}			L_{70}		速度变异系数

校准人：

核验人：

校准时间：

附录 C

激光式高速弯沉测定仪校准结果内页格式

校准证书第 2 页

证书编号××××××-××××				
校准机构授说明				
校准依据				
校准环境条件及地点：				
温度	℃	地点		
相对湿度	%	其他		
校准使用的校准装置/主要仪器				
名称	测量范围	不确定度/准确度/最大允许误差	证书编号	证书有效期至
第 2 页 共 3 页				

证书编号××××××-××××

校准结果

序号	校准项目	校准结果
1	温度测量误	
2	纵向测距传感器误差	
3	弯沉测值准确性	
4	弯沉测值重复性	
5	弯沉测值速度变异性	

注：

- 1 本证书校准结果仅对该计量器具有效；
- 2 本证书未加盖“校准专用章”无效；
- 3 下次校准时请携带（出示）此证书。

未经授权，不得部分复印本证书。

以下空白

附录 D

激光式高速弯沉测定仪距离测量结果不确定度评定示例

D.1 概述

激光式高速弯沉测定仪是一种用于快速测量路面弯沉值的检测仪器，一般由牵引机构、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、温度控制系统等等组成，计量技术参数包括：温度测量误差，距离测量相对误差，弯沉示值误差，弯沉测值重复性以及速度变异性。

下面以距离测量结果的不确定度评定为例，计算该项校准结果的不确定度。

D.2 距离测量结果的不确定度

D.2.1 测量模型的建立

$$\Delta l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 \quad (\text{D-1})$$

式中：

Δl ——纵向距离传感器示值相对误差，%；

l_1 ——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。

D.2.2 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

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 Cn 取 1.69）

$$S_l = \frac{l_{\max} - l_{\min}}{Cn} \quad (\text{D-2})$$

代入计算得 $S_l = 0.0118\text{m} = 11.8\text{mm}$ 。

$$u_l = \frac{S_l}{\sqrt{n}} \quad (\text{D-3})$$

代入计算得 $u_l = 6.8\text{mm}$ 。

由测量重复性引入的相对标准不确定度远大于由设备分辨力引入的相对标准不确定度，因此取测量重复性引入的标准不确定度作为合成不确定度的分量。

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 $u_2 = 1.5/\sqrt{9} = 0.5\text{mm}$ 。

D. 2. 3 合成标准不确定度的计算

1) 不确定度分量的汇总

高速弯沉仪纵向距离测量结果的不确定度分量汇总见表 2。

表 2 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	$u_l = 6.8\text{mm}$	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：

$$u_c = \sqrt{u_l^2 + u_2^2} \quad (\text{D-4})$$

计算得： $u_c = 6.818\text{mm}$ ，取 $u_c = 7\text{mm}$ 。

D. 2. 4 合成相对扩展不确定度的计算

取 $k = 2$ ，则 $U = 14\text{mm}$ ，

测量长度为 500m 时，相对扩展不确定度为

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

D.2.5 不确定度的描述

纵向距离测量的相对扩展不确定度：

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