

国家计量技术规范

《激光式高速弯沉测定仪校准规范》

编制说明

(征求意见稿)

规范编制组

2023年8月

目 录

一、任务来源.....	1
二、编制背景.....	1
1. 概要.....	1
2. 制定意义.....	1
3. 国内外概况.....	2
4. 发展趋势及研究基础.....	2
5. 参考文献.....	3
三、编制过程.....	4
1. 编制原则.....	4
2. 工作进程.....	4
3. 人员分工.....	4
四、编制依据.....	5
五、主要技术内容.....	5
1. 范围.....	6
2. 计量性能要求.....	6
3. 复校时间间隔.....	11
六、试验验证分析.....	11
七、其它应予说明的事项.....	12

一、任务来源

2021年12月，全国公路专用计量器具计量技术委员会发布了《关于公路计量领域2022年国家计量技术规范项目申报工作的通知》，公路院及计量站积极响应，结合实际工作开展情况，开展了《激光式高速弯沉测定仪校准规范》的申报工作。

二、编制背景

1. 概要

弯沉是反映路面结构性能的一个重要指标，它不仅反映路面各结构层及土基的整体强度和刚度，而且与路面的使用状态存在一定的内在联系。随着现代化交通的快速发展，在役道路上的运行车辆越来越多，以拉克鲁瓦自动弯沉仪（Lacroix Deflectograph）和落锤式弯沉仪（FWD）的测试效率（检测速度约为5km/h）已远远不能满足我国现有公路保有量条件下的试验检测需求。

激光式高速弯沉测定仪（以下简称高速弯沉仪）作为一种全新的检测装备，其采用的检测原理为通过激光多普勒效应来测试路面在荷载作用下的垂直下沉速度来反演路面弯沉值，可以实现正常行车速度下的弯沉检测，极大的提高了路面弯沉检测的效率。

2. 制定意义

高速弯沉仪作为一种全新的非接触、无损检测装备，其采用的检测原理为通过激光多普勒效应来测试路面在荷载作用下的垂直下沉速度，利用加速度和陀螺仪传感器记录多普勒激光传感器的振动情况和运动姿态，用于修正计算，并由相关的数学模型计算得到路面弯沉值，因而此类设备得到的路面弯沉值与以前弯沉检测得到的静态贝克曼量弯沉值或冲击式的落锤弯沉值均有所不同。经过十余年的推广应用，当前国内高速弯沉仪也有一定的保有量（包含两台进口设备），其检测效率是传统方法的10倍以上，可在正常交通流下完成检测任务。当前该类设备行业标准单一，在计量标准规范以及系统化、规范化的量值溯源体系方面尚属空白。这些不利现状限制了这种检测设备的迅速推广应用。因此，迫切需要制定一套标准技术规范来规范该类设备的计量检定，以推动其大规模行业应用。

3. 国内外概况

自 2000 年始，此类设备逐步成熟应用于路面弯沉检测。在国外，2000 年前后，以丹麦格林伍德公司为代表的公司研发出高速弯沉测量原型系统 TSD (Traffic Speed Deflectometer)，检测速度可达到 90km/h。在国内，武汉光谷卓越科技股份有限公司基于 TSD 的测量原理于 2010 年研发了首套国产“激光动态弯沉测量系统(LDD)”，打破了发达国家在公路弯沉快速检测技术上的垄断^[1]。交通运输部公路科学研究院在 2011 年提出并研制了高速弯沉检测仪器 HD-T 型^[2]。重复性试验、速度变异性试验及相关性试验表明^[1-5]，国产研发仪器已经可以实现路面弯沉的高效、安全检测，从而替代传统的静态或走-停式弯沉测试仪器。

目前，国内公路养护检测企业所采用的高速弯沉测定仪以国产设备为主。随着公路交通专业计量站对该仪器与落锤式弯沉仪的比对试验的大量开展，该仪器的高速弯沉测量能力得到行业的广泛认可。由于该仪器在检测速度方面具有突出优势，检测过程不需要阻断交通，很好得保证了检测人员的作业安全，预期今后一段时间内将迎来快速发展。

4. 发展趋势及研究基础

丹麦 Green Wood 在标定 TSD 时，首先去除了车辆的配重，并测量水泥路面的弯沉速度，随后基于测量速度与行驶车速的投影关系估计了第 i 个多普勒激光传感器与参考传感器之间的相对角度^[1,6]。英国 Transport Research Laboratory (TRL)在 2007 年通过在水泥路面里埋设高精度加速度计从而提出一种计算激光传感器的绝对安装角度的方法^[7]。该方法主要记录了 TSD 通过时路面的弯沉速度(对加速度信号积分)，并根据速度(位移)的分解原理计算了各个激光传感器的绝对安装角度。Ferne 等人^[7]提到该方法可能会过度校正测量激光器的角度数据，但至少确保不会产生负的弯沉斜率值。然而，受标定场地不可移动、不具便携性的限制，这种标定方法的应用推广受到了影响。此外，无论是 Green Wood 还是 TRL 提出的标定方法都存在工作量大、耗时的问题，整个标定时间通常都在 3 h 以上^[1]。

国内学者基于 TSD 的测量原理提出了一些新的标定方法，如巩建等^[4]通过移动横梁，使固定在横梁上的多普勒激光传感器置于弯沉盆范围外来达到安装角度

的标定。这与澳大利亚目前采用的标定方法一致,Wix 等人^[8]称该方法为抵消法。试验结果^[4]显示该标定方法在相关性、Pearson 相关系数和实测弯沉盆斜率曲线等评价指标上都优于现存的其他标定方法。该标定方法所需标定时间短,可操作性强,具有较好的实用性。但该方法也存在一些缺点,如需要额外的空间以便横梁可以沿行车方向移动,这会导致 TSD 车身较长。Li 等人^[1]提出采用相对运动的方法对多普勒激光测振仪的相对安装角度进行标定,将标定时间从 3h 以上减少到 2h,其主要手段是在横梁的下方引入一个可以控制的、沿直线运动的平板。

值得注意的是,传感器安装角度、测振仪速度等的标定只是在某一程度上提高了反演弯沉值的精度,但不能解决弯沉值的溯源问题。在国内公路领域,目前尚无激光高速弯沉仪的计量检定规程,而已有的贝克曼梁式、FWD 等测量仪器的溯源方法也不适用。这是由于激光高速弯沉仪采用非接触测试方式工作,可以真实模拟车辆行驶对路面的碾压过程,这与落锤弯沉仪采用冲击的方式等还是有区别的。

总之,路面高速弯沉测量结果的准确性、可靠性计量测试和评价技术研究是激光高速弯沉测量技术新技术推广应用的基本前提,不依赖于具体实验场地的数字化建模和仿真装置的研究,将成为新一代高速弯沉计量测试技术的主要方向。

项目申报单位交通运输部公路科学研究所国家道路与桥梁工程设备计量站(简称“计量站”)是国家质检总局授权的公路行业唯一一家国家级法定计量技术机构,具备支撑公路交通领域测试计量技术及仪器学科前瞻性研究的科研条件及实验环境。已开展了近 20 台(次)高速弯沉仪的计量测试技术服务工作,积累了丰富的计量测试工作经验,提出了一整套计量技术方案,为本规范的制定奠定了较好的技术基础。

5. 参考文献

- [1] Li Qingquan, Zou Qin, Mao Qingzhou, et al. Efficient calibration of a laser dynamic deflectometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(4): 806-813.
- [2] 侯君辉, 田士强, 单通, 等. 高速激光弯沉仪在国省干线公路检测中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(02): 36-37.
- [3] He Li, Lin Hong, Zou Qin, et al. Accurate measurement of pavement deflection velocity under dynamic loads[J]. Automation in Construction, 2017, 83: 149-162.
- [4] 巩建, 常成利, 张智勇, 等. 高速激光弯沉仪标定方法[J]. 北京工业大学学报, 2015,

41(08): 1200-1205.

[5] 张德津, 李清泉, 曹民, 等. 基于路面变形速度的弯沉测量方法[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(2): 220-226, 231.

[6] Simonin J-M, Lièvre D, Rasmussen S, et al. Assessment of the Danish high speed deflectograph in France. Trondheim, Norway: 2005.

[7] Ferne B-W, Langdale P, Round N, et al. Development of a calibration procedure for the U.K. highways agency traffic-speed deflectometer[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2093(1): 111-117.

[8] Wix Richard, Murnane Chad, Moffatt Michael. Experience gained investigating, acquiring and operating the first traffic speed deflectometer in Australia[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 143060-3069.

三、编制过程

1. 编制原则

项目是通过调研国内外高速弯沉仪设备, 对相关测量原理进行深入研究, 明确了校准参数和校准用器具, 形成校准方法, 最终形成了该类设备的国家计量技术规范, 编制原则如下:

(1) 科学性

规范的编制, 应在理论分析及试验验证的基础上, 科学规定高速弯沉仪的相关计量技术指标及校准方法。

(2) 适用性

本规范针对提出了一种简易适用的校准方法, 根据实际项目的需要, 提出相关的技术指标, 适度控制规程的技术边界, 对国产设备和进口设备具有共同的适用性。

(3) 经济性

合理的选取与设备计量性能最相关的关键参量, 对于设备的固有结构参数, 主要由厂家进行控制, 一旦设备出厂后即相对固定, 简化对此类参数的计量需求, 节约相应的资源浪费。

2. 工作进程

2022年1月~2022年6月, 成立标准编写组, 组织开展标准编制工作。开展国内外高速弯沉仪原理、标定方法等调研工作。

2022年7月~2022年10月, 根据设备的技术特点, 结合行业实际应用要求,

分析弯沉测值的各种测量不确定度影响因素，研究确定主要技术指标。

2022年11月~2023年3月，选定高速弯沉校准装置实验方法，确定弯沉量值溯源路径研究方案，研究分析各种关键影响因素对量值溯源结果的定量影响，评估其测量不确定度。

2023年4月~2023年9月，开始组装校准装置，对高速弯沉仪计量技术指标及其校准方法进行系统性试验验证，修改完善标准草案，形成征求意见稿，报送公路计量委员会进行审核。

3. 人员分工

本规范人员分工情况如下表所示。

表 1 主要起草人承担工作情况表

序号	单位	姓名	项目分工
1	交通运输部公路科学研究所	李孝兵	规范统筹，规范起草、修改
2	交通运输部公路科学研究所	罗营超	资料搜集、校准方法研究
3	交通运输部公路科学研究所	荆根强	理论分析、校准方法研究
4	武汉光谷卓越科技股份有限公司	曹民	协助进行试验验证
5	中路高科交通检测检验认证有限公司	侯君辉	协助进行试验验证
6	北京市路兴公路新技术有限公司	王超	协助进行试验验证
7	山西路桥智慧交通信息科技有限公司	熊晋华	协助进行试验验证

四、编制依据

本规范主要依据 JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》进行编写，并在编写中参考了 JTG 3450《公路路基路面现场测试规程》和 JT/T 1170《激光式高速弯沉测定仪》。

五、主要技术内容

按照 JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》要求，本规范包括九个章节和三个附录：1 范围、2 引用文件、3 术语、4 概述、5 计量特性、6 校准条件、7 校

准项目和校准方法、8 校准结果、9 复校时间间隔，以及附录 A 校准记录表格式，附录 B 校准证书信息及内页式样，附录 C 高速弯沉仪校准不确定度评定示例。

1. 范围

本校准规范适用于高速弯沉仪的计量性能要求、通用技术要求、计量器具控制等内容。本规程适用于高速弯沉仪的校准。

高速弯沉仪作为一种全新的检测装备，其采用的检测原理为通过激光多普勒效应来测试路面在荷载作用下的垂直下沉速度来反演路面弯沉值，可以实现正常行车速度下的弯沉检测，极大的提高了路面弯沉检测的效率。然而针对高速弯沉仪仅有一份该类设备的行业标准，缺乏相关的计量标准，其量值溯源工作主要通过和落锤弯沉仪设备进行相关性分析来确认其测值的准确性，但这两种设备检测原理存在本质区别，因而高速弯沉仪设备的量值溯源工作的有效性也难以得到保证。

为了能正确、全面的检验激光弯沉仪的整体计量性能，为路面承载能力提供可靠的技术保证，需要对高速弯沉仪的计量校准装置开展研究，通过试验研究形成可靠的校准方法，并编写高速弯沉仪的校准规范。

2. 计量性能要求

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。承载平台内部一根刚性横梁上安装有若干个激光多普勒传感器，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。

本校准规范的编写主要参照 JTG 3450-2019《公路路基路面现场测试规程》和 JT/T 1170《激光式高速弯沉测定仪》，对高速弯沉仪的温度测量误差、距离测量相对误差、弯沉示值误差、弯沉测值重复性以及弯沉测值速度变异性等关键性能提出计量要求。

本校准规范提出的主要性能要求如下表所示。

表 2 计量性能要求表

序号	项目	要求
1	温度测量误差 (°C)	$\leq \pm 2^{\circ}\text{C}$
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 (mm)	≤ 0.03
5	弯沉测值速度变异性 (%)	≤ 5

(1) 温度测量误差

高速弯沉仪的温度测量值是指设备检测时测量的空气温度和地面温度值,根据 JTG 3450-2019《公路路基路面现场测试规程》T 0957—2019 中规定,高速弯沉仪测值的结果需要按照 T0951 及 T0952 的方法进行温度修正,因此需要对该类设备的温度传感器的测值进行校准。

通过对该类设备中配置的测温传感器进行调研及试验发现,绝大多数的相关产品出厂标称的温度偏差为 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 左右。但根据实际使用的情况,一般传感器量程较大($0^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$),在整个量程范围内很难满足温度均处于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 范围内,特别是在运营一段时间后,温度传感器的测值偏差会更大,无法满足 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 的误差要求。

根据 JTG 3450-2019 的规定“当温度超过 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 时,应对弯沉值进行修正”,说明温度偏差超过 2°C 将对弯沉值产生严重影响。

因此,在本规范中将温度测量偏差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内。

(2) 距离测量相对误差

一方面,距离测量用于计算检测的里程,另一方面还需要将检测到的弯沉值与道路实际桩号进行对应。当距离测量误差较大时,会造成检测点数据与实际位置不符,从而影响后期的路面综合性能评价。

JTG 3450-2019《公路路基路面现场测试规程》和 JT/T 1170《激光式高速弯沉测定仪》中对于此类设备距离测量相对误差的要求均为 $\leq \pm 0.1\%$;在通过对高速弯沉仪进行 30 余次的数据统计分析,测距误差均能满足该要求。因此,本规范对于距离测量相对误差的最大允许误差定位 $\leq \pm 0.1\%$ 。

(3) 弯沉示值误差

弯沉示值误差是反映高速弯沉仪测值准确性的一个重要指标。该类设备采用的检测原理与以往的弯沉检测设备均不同，缺少与之对应的溯源方法，因此，本项目组通过研究该类设备的检测原理，提出了一种基于模拟路面变形的校准装置。通过模拟路面不同位置在标准轴载作用的变形速度，达到模拟在实际路面变形的目的。当改变校准装置上不同位置转盘的转速时，可以模拟出不同弯沉值或弯沉盆的道路，实现该类设备的原位静态校准。

由于激光多普勒传感器激光束入射倾斜角的准确性对计算路面弯沉值的影响较大，本项目组先后经历了多轮结构设计、多次旋转电机测试以及多种角度验证试验，从最初的带有斜坡面的转盘修改到平面盘、控制电机从无刷电机升级到伺服控制电机，经过反复试验与验证最终确定了适用于不同传感器数量、不同测点位置的激光高速弯沉仪的高精度弯沉模拟与校准装置。

高速弯沉仪校准装置的结构示意图如下图所示。

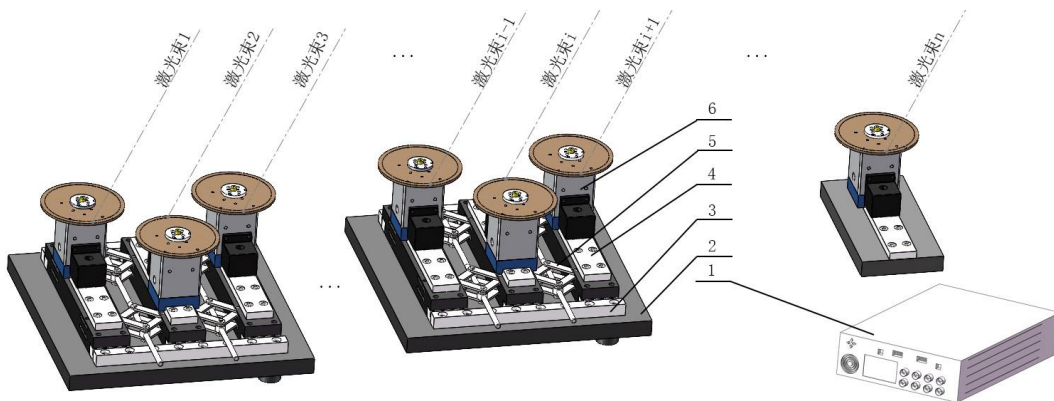


图 1 高速弯沉仪校准装置结构示意图

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

高速弯沉仪校准装置包括控制系统、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。旋转盘由驱动电机驱动，可持续稳定工作运转，是校准装置的核心。测试时通过调整不同位置旋转盘的转速，即可模拟弯沉盆内不同位置路面变形速度的差异。

测试时，首先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，并将校准装置调平。

为了消除高速弯沉仪停放时横梁与路面在行车方向上的倾角影响，需要通过校准装置先测定出各激光多普勒传感器与各盘面之间的入射角，然后将各入射角代入到校准装置的软件中，按照校准规范 7.2.4 的步骤模拟出不同范围的 4 组路面弯沉值，同时记录校准装置模拟的理论弯沉值和待校准高速弯沉仪的测量弯沉值。

本项目组采用校准装置对 2 台具有代表性的高速弯沉仪开展试验，记录相关测试结果见下表所示。

表 3 高速弯沉仪弯沉测量记录表

序号	设备编号	弯沉值 (0.01mm)	测试结果				
			第 1 次 (0.01mm)	第 2 次 (0.01mm)	第 3 次 (0.01mm)	第 4 次 (0.01mm)	最大示值 相对误差
1	1 号设备	测试值	36.21	50.42	77.55	105.62	-4.3%
		校准值	37.74	52.70	80.75	108.01	
2	2 号设备	测量值	39.34	51.15	84.42	110.76	4.5%
		校准值	37.74	52.70	80.75	108.01	

在新修订的 JTG 3450-2019《公路路基路面现场测试规程》中高速弯沉仪的测值需与落锤式弯沉仪的测值进行相关性试验，参考最新落锤弯沉仪的检定规程的中关于弯沉示值误差的要求，结合校准装置开展的相关测试结果，本规范最终将弯沉的最大相对示值误差定为 $\leq \pm 5\%$ 。

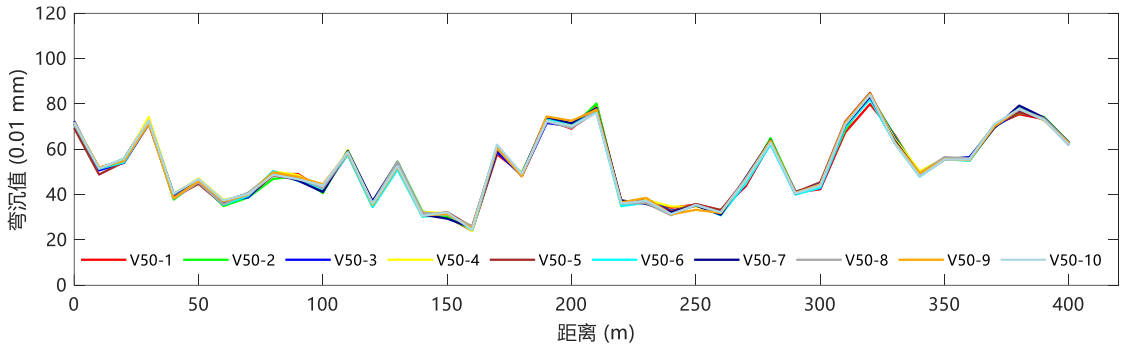
(4) 弯沉测值重复性

弯沉测值重复性是反映高速弯沉仪设备测值稳定性的一项指标。测量仪器的重复性是指在重复性测条件下，对同一或相类似被测对象重复测量，测量仪器提供相近示值的能力。它反映了测量仪器示值的随机误差分量的大小，可以用示值的分散性定量地表示，是衡量测量仪器计量性能的指标之一。

JT/T 1170《激光式高速弯沉测定仪》中对于此类设备弯沉重复性的要求为 $\leq 0.03\text{mm}$ ，而新修订的落锤式弯沉仪弯沉测值的重复性变异系数要求为 $\leq 2\%$ 。

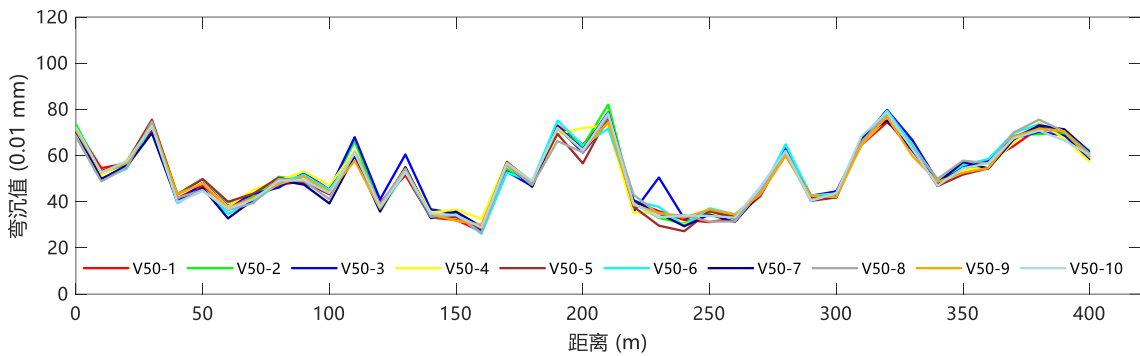
结合开展高速弯沉仪重复性试验的实验，选取 2 台典型设备在 50km/h 速度

下 10 次测试数据见下图所示。



(横坐标为距起始位置的距离, 单位为 m; 纵坐标为弯沉值, 单位为 0.01 mm)

图 2 1 号设备在 50km/h 时的 10 次测量结果



(横坐标为距起始位置的距离, 单位为 m; 纵坐标为弯沉值, 单位为 0.01 mm)

图 3 2 号设备在 50km/h 时的 10 次测量结果

对近两年弯沉重复性测试的数据进行计算分析,发现测量数据的标准偏差基本都能控制在 0.01mm 以内。结合 JT/T 1170《激光式高速弯沉测定仪》中对于此类设备弯沉重复性的要求 ($\leq 0.03\text{mm}$),本规范将弯沉重复性的标准差定为 $\leq 0.03\text{mm}$ 。

(5) 弯沉测值速度变异性

速度变异性主要体现了设备在不同的速度下对同一段测试路面测值的一致性。这也是体现设备在复杂条件道路上测值稳定性的一项指标。测试时,所试设备分别以 30 km/h、50 km/h 和 70 km/h 的速度对所选道路进行若干次独立测量,以 10m 间距输出弯沉值。对每种测试速度,均随机选取 3 次测量结果,按对应位置求平均,形成 3 种速度下的弯沉测量值序列,比较结果如下图所示。

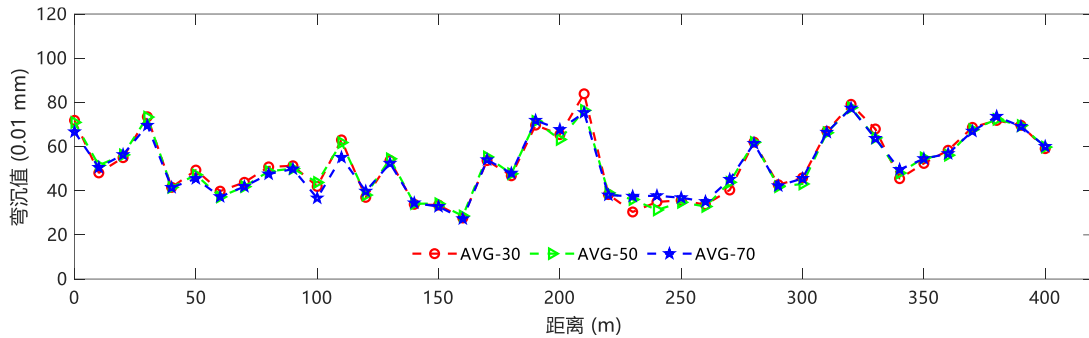


图 4 三种不同速度下高速弯沉仪的测量结果

选取 8 组近几年开展高速弯沉仪测值速度变异性的测试数据，计算时选取 30km/h 和 70km/h 时被测路段的代表值计算所试设备的最大测试速度变异系数，相关结果如下表所示。

表 4 设备不同速度变异性结果数据

设备编号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号
速度变异性	4.32%	2.92%	3.36%	2.47%	2.19%	0.97%	1.2%	0.3%

根据 JTT 1170《激光式高速弯沉测定仪》中的相关要求，结合其他路面指标（平整度、构造深度等）检测设备的速度变异性指标一般为 $\leq 5\%$ 来综合评判，最终确定弯沉测值的速度变异性指标为 $\leq 5\%$ 。

3. 复校时间间隔

高速弯沉仪的复校时间间隔一般不超过 1 年。

复校周期是按照 JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》的相关要求，并综合考虑 JTG 3450《公路路基路面现场测试规程》中 T0957 激光式高速路面弯沉测定仪测试路面弯沉方法的性能、使用环境以及经济合理性等因素，对高速弯沉仪的复校时间间隔进行制定。

六、试验验证分析

规范编写过程中，项目组选取国内三个不同厂商（武汉光谷卓越科技股份有限公司、北京市路兴公路新技术有限公司、中路高科交通检测检验认证有限公司）的三种不同型号的高速弯沉仪进行试验，对高速弯沉仪计量特性所涉及的具体指标进行了试验验证，报告见附件《激光式高速弯沉测定仪试验验证报告》。

七、其它应予说明的事项
无。