

文章编号:1671-8879(2014)06-0070-09

非接触式路面构造深度量值溯源技术

窦光武

(交通运输部公路科学研究院,北京 100088)

摘要:为了实现非接触式构造深度量值溯源,提升路面构造深度测量结果准确性及路面抗滑性能评价可靠性,采用高精度激光测距传感器作为主标准器,利用相对运动原理,从理论分析了用静态测量代替动态测量的科学合理性,克服了构造深度测量对象无法复制的难题。并在此基础上,从分析硬件组成和论述关键技术问题两方面,提出了一套由构造深度标准盘、高精度激光传感器和位移驱动及速度匹配装置 3 个核心部件组成的硬件装置,并通过实测数据评价了其不确定度。分析结果表明:应用提出的方法,复现量值的不确定度为 0.3%,对激光构造深度仪进行了检验后,检测试验道路构造的深度为 0.93 mm,与应用铺砂法的测量结果一致。提出的方法为提高路面抗滑性能的可靠性评价提供了有效途径。

关键词:道路工程;路面抗滑性能;构造深度;非接触式;量值溯源

中图分类号:U416.03

文献标志码:A

Contactless metrological traceability technology of pavement texture depth

DOU Guang-wu

(Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to realize contactless pavement texture depth metrological traceability, promote accuracy of pavement texture depth measurement and reliability of pavement anti-slide performance evaluation, the paper adopted high precision laser sensor as the primary standard, analysed scientificity and rationality of static measurement instead of dynamic measurement by use of the relative movement theory, and solved the problem that measured object of texture depth can not be copied. On this basis, analysing hardware constitution and discussing some technology problems, the paper put forward a set of hardware device constructed by standard texture disc, high precision laser sensor and drive, and speed matching unit, and evaluated the measurement uncertainty by data. The research results show that by use of the proposal method, the uncertainty of reiteration value is 0.3%, and the tested pavement texture depth measured by laser texture depth device is 0.93 mm, which are consistent with the results by use of sand patch method. The proposed method provides effective way for improving the reliability of evaluation on pavement anti-slide performance. 6 tabs, 7 figs, 17 refs.

Key words: road engineering; pavement anti-slide performance; texture depth; contactless; metrological traceability

收稿日期:2014-07-10

基金项目:交通运输部计量质量研究项目(2012 318 223 250)

作者简介:窦光武(1981-),男,安徽郎溪人,高级工程师,E-mail:gw.dou@rioh.cn。

0 引 言

路面抗滑性能是涉及行车安全的重要参数,目前中国评价路面抗滑性能的技术指标有摩擦因数和构造深度,其中构造深度的测量方法主要有铺砂法和激光构造深度仪法。铺砂法是一种纯手工的试验方法,目前仍是中国路面构造深度检测的标准方法。但是,由于其测试效率低、人为因素对试验结果影响大等缺陷,一定程度影响了中国路面抗滑性能评价的可靠度^[1]。自 20 世纪 90 年代以来,中国从国外引进了激光构造深度仪,并逐步国产化,在工程测量中应用后,大大提高了中国路面构造深度的测试效率和准确性,据不完全统计,目前中国在役路面激光构造深度仪超过 100 台,在路面抗滑性能评价中发挥了重要作用^[2-4]。

然而,由于路面构造深度作为被测量对象,具有鲜明的不可复现性,使得路面构造深度的测量结果无法得到验证,准确性得不到有效评判,从而大大降低了现有路面构造深度测量方法的可靠度。具体来说,铺砂法的测量对象是路面上某个具体点位,相邻位置的构造深度量值与该点位并不具有确定的相关性;而激光法等非接触式路面构造深度测量方法,无法保证两次测量完全在同一纵向测线上,二者测量结果的准确性均难以得到有效考量。为此,本文研究了路面构造深度量值的复现及保存技术,为保证路面构造深度测量结果的准确,提升路面抗滑性能评判可靠性提供了有效途径。

激光构造深度仪等非接触式测量仪器的出现,改变了路面宏观纹理传统的接触式测量方式,虽然提高了测量精度,但却给其量值溯源带来困难。国外关于此类仪器设备的量值溯源,绝大多数采用比对的方式,这种方式虽然能从一定程度上统一量值,但与真值的符合性无法衡量,因此并非真正的量值溯源,也不符合中国《计量法》的规定和要求^[5-7]。要解决非接触式路面激光构造深度量值溯源问题,一是要确定构造深度的理论计算模型,二是要实现构造深度量值的复现与保存。

周兴林基于三角法测量原理建立了激光视觉三维数学模型,根据测量需要提出了通用的图像处理方法,采用断面 MPD 估算实现构造深度测量,并进行了铺砂法对比试验。朱朝辉等以沥青路面中的细度模数、最大粒径、沥青质量分数和 4.75 mm 筛孔通过率作为模型输入参数,通过灰色特征加权 ELM 对模型参数数据进行预处理,以减小训练样本本身存在的孤

立点和噪音对预测结果的影响,再代入 ELM 预测模型进行路面构造深度的预测^[8];Masad 等分别探讨了混合料级配、油石比、试验测试温度对构造深度的影响,并采用耐久性测试方法,获得了经不同轮载作用次数、不同光、水老化条件的构造深度衰减情况^[9];Cooper 等研究了 SMTD 计算模型,并通过现场试验分析论证了其与铺砂法测值具有良好的线性关系,相关系数可达 0.9 以上^[10-11]。

由于要与铺砂法测量结果保持良好的相关性,故衍生出很多构造深度的计算模型。目前国际上构造深度的技术模型主要有两类:一类是出自国际标准化组织(ISO)ISO 13473,断面法测量路面构造深度(MPD)计算模型^[3];另一类出自英国运输和道路研究所(TRRL)1974 年第 639 号技术文件,非接触式传感器构造深度(SMTD)计算模型。中国路面激光构造深度仪引自国外,其相应的计算模型也来源于国外。随着仪器的产地不同,其采用的计算模型也大相径庭,有采用英国 BS 标准,也有采用 ASTM、ISO 标准的,有的即使引用同一个标准体系,由于选用的具体技术方法和采用的特种参数不同,计算结果也存在很大差异。比如 ISO13473 中提出了 MTD、PD、MPD、ETD 4 种计算方法,而 ASTM E1845—96 中也阐述了 MPD、ETD2 种计算方法,还有英国 SCANNER 测量系统则提供了 SMTD、MPD、RMST 3 种计算方法。由于计算模型的差异,极有可能出现相同的断面数据,得出不同的构造深度值,这就造成中国路面构造深度检测数据可信度低,可比性差,已经严重影响中国路面抗滑性能的评价。中国《多功能路况快速检测设备》(GB/T 26764—2011)中,关于路面构造深度的有关规定等效采用了英国 SCANNER 测量系统的方法,但未给出其量值溯源方法,还远达不到统一量值、规范仪器设备生产目的。国外诸如车载仪器设备的量值溯源大多采用比对的方式开展,主要原因是由于计算模型不统一、测量对象和量值难以复现等问题。澳大利亚仪器设备制造商 ARRB 公司采用齿轮套组,进行激光构造深度仪出厂标定试验的装置,但垂直安装旋转时不稳定、测试时更换齿轮困难,以及量值溯源链不清晰等缺陷仍未克服。可见,目前国内外还没有关于路面构造深度量值溯源的系统论述。

中国对计量器具的管理方式吸纳前苏联计量检定体制,仪器设备必须具有严密的量值溯源链。因此,本文根据交通运输行业标准《车载式路面构造深度仪》(JT/T 840—2012)的编制科研工作,确定合

理的构造深度理论计算模型,提出激光构造深度仪测量值溯源技术方法,建立可行的量值溯源途径,复现和保存路面构造深度量值,确保其准确和统一,从而规范激光构造深度仪生产和使用,提高中国路面抗滑性能评价的可靠性。

1 研究方法

按照中国《计量法》的有关要求,仪器设备测量结果的准确性要靠能够覆盖其测量范围,且优于其测量不确定度的计量检定装置来评判,而计量检定装置的测量准确性则要靠测量精确度更高的装置来评价,从而逐级溯源至国家最高精度的基(标)准装置。计量检定装置须具有复现和保存被测量值的能力^[7],而且其复现和保存量值的范围要能覆盖该仪器设备,并且测量不确定度也要优于它。而各行业的专用仪器设备的计量检定不仅要符合上述要求,更要考虑仪器设备的实际使用场合,解决好一些关键技术问题,而后确定量值溯源技术方案。

1.1 理论模型

在众多路面构造深度理论计算模型中^[12-17],本文选择了受单点高程影响极小的传感器构造深度(SMTD)计算模型,如图1所示。该模型与中国交通运输行业标准《车载式路面构造深度仪》(JT/T 840-2012)关于构造深度的定义是一致的^[6]。但是,文献[6]是从描述数学角度给出了路面构造深度(SMTD)的定义,而国家标准《多功能路况快速检测设备》(GB/T 26764-2011)则是以给定数学公式的方式说明 G_{SMTD} 的计算方法,前者极易被理解和接受,但直接操作性较差,而后者恰恰相反。二者形式的差异引发了工程界的质疑,导致非接触式路面构造深度的计算模型至今仍悬而未决,严重影响了激光构造深度仪的制造和使用,其量值溯源更是无从谈起。为此,本文从理论上论证二者的关系,以确定研究采用的理论模型的合理性。

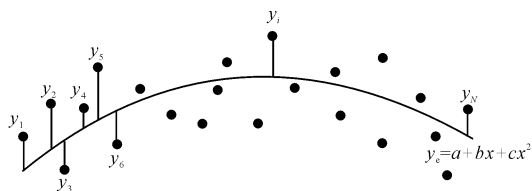


图1 传感器测量构造深度的计算模型

Fig. 1 Calculation model of SMTD

$$G_{\text{SMTD}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_e)^2}{n}} \quad (1)$$

式中: G_{SMTD} 为SMTD计算参量; y_i 为第*i*个点的测量高程; y_e 为高程的拟合值; n 为测点数量。

1.1.1 曲线拟合

高度数据列的曲线拟合首先采取正交多项式回归设计理论,对高度数列进行二次抛物线拟合,即 $y_e = a + bx + cx^2$ 为一元二次回归问题, x 为采样距离自变量, a, b, c 均为参数。在满足正交条件下,可将其变为对应的二元一次项方程

$$y_e = b_0 \lambda_0 \varphi_0(x) + b_1 \lambda_1 \varphi_1(x) + b_2 \lambda_2 \varphi_2(x)$$

式中:

$$b_0 = \sum y_i / n$$

$$b_1 = 12 \sum x_i y_i / (n(n^2 - 1))$$

$$b_2 = \frac{180 \sum x_i^2 y_i - 15(n^2 - 1) \sum y_i}{n(n^2 - 1)(n^2 - 4)}$$

式中: $b_0 \sim b_2, \lambda_0 \sim \lambda_2$ 为待定参数; $\varphi_0(x) \sim \varphi_2(x)$ 为 $b_0 \sim b_2$ 对应的函数; x_i 为第*i*个点的测量采样距离。

所以

$$y_e = \frac{\sum y_i}{n} + \frac{12 \sum x_i y_i}{n(n^2 - 1)} x + \frac{180 \sum x_i^2 y_i - 15(n^2 - 1) \sum y_i}{n(n^2 - 1)(n^2 - 4)} \left(x^2 - \frac{n^2 - 1}{12} \right)$$

1.1.2 拟合残差的计算

由文献[6]对路面构造深度的定义可知,路面构造深度为曲线拟合后的计算残差,即由

$$G_{\text{SMTD}}^2 = \frac{\sum (y_i - y_e)^2}{n}$$

可以推导得出

$$G_{\text{SMTD}}^2 = n \sum (y_i - y_e)^2 = n \sum y_i^2 - 2n \sum y_i y_e + n \sum y_e^2$$

令 P 为中间变量,以上分析可得

$$n^2 G_{\text{SMTD}}^2 = n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 - \frac{12(\sum x_i y_i)^2 + P}{n^2 - 1}$$

那么

$$G_{\text{SMTD}} = \sqrt{\frac{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 - [12(\sum x_i y_i)^2 + P]/n^2 - 1}{n^2}}$$

这正是文献[5]给出的路面构造深度计算公式。

综上,本文通过正交法一元二次回归设计理论推演,论证了文献[5]和文献[6]对路面构造深度计算模型的内在联系。因此,本文认为从技术通用性和可操作性角度,中国非接触式路面构造深度计算模型应采用交通行业标准的规定^[6]。

1.2 工程应用

激光构造深度仪目前普遍安装在机动车上,实际检测过程中,承载车辆一般以 30~80 km/h 的速度行驶,仪器在高速移动的同时,要随着承载车产生

振动。如果选择与仪器实际测量状态同样的方式进行计量检定,测量对象几何尺寸的量值溯源又将成为新的问题。而如果利用相对运动原理,激光测距传感器在静止状态下测量,使被测物体(相当于实际道路)处于高速移动状态,通过速度驱动方式来精确控制采样位置,达到测量构造深度的目的,则可以很方便地按照长度量的检定系统表进行溯源。但是,测量方式发生了变化,实际测量过程中有车辆颠簸对垂直测距的影响,是否会影响构造深度的测量结果?这种复现和保存的量值与实际检测结果是否具有可比性?

按照文献[6],路面构造深度的计算区间为 300 mm,根据 300 mm 内等间距采样点的高度数列,所谓高度数列,就是本区间内各采样点的相对高差,国外也有采用 250 mm 的^[4]。以检测速度 50 km/h 为例,仪器经过一个计算区间长度的持续时间约为 0.02 s,车辆行驶过程中,在减震器的作用下,车架的振动频率一般在 0.5~25 Hz 的范围内,0.02 s 的持续时间内承载车的振动次数不足 1 次,也就是说在一个构造深度采样区间内,车架不发生振动,或者说振动产生的位移是相同的,由于构造深度所需的采样点数据是相对高差,而非绝对高程,因此一个采样区间内采样点的高度数列值不受车辆颠簸的影响,这一点也是激光构造深度仪无需安装加速度计的主要原因。因此,采用激光测距传感器静止状态下测量,虽与激光构造深度仪的实际检测状态不相同,但并不影响构造深度量值的测量和计算结果。

1.3 技术方法

根据本文的研究方法,本文提出了激光构造深度仪的量值溯源技术方法,即采用测量精确度远高于工程用激光构造深度仪的激光测距传感器,在静态情况下测量具有规则形状的移动介质,根据移动速度与采样间距的匹配关系,通过上述理论模型,计算其构造深度标准量值,这种量值溯源方式与长度量值的国家检定系统一致^[8],量值溯源路径如图 2 所示, u 与 l 分别为扩展不确定度与测量距离。

2 试验方案

为了验证该量值溯源技术方法的适用性,本文确定了以下试验方案,即选择稳定的车载式路面激光构造深度仪,利用本文提出的量值溯源技术方法对其进行计量校准,根据计量校准结果同步进行硬件改造和软件算法的调整,然后经校准后的仪器在试验道路上进行路面构造深度检测,检测结果与试

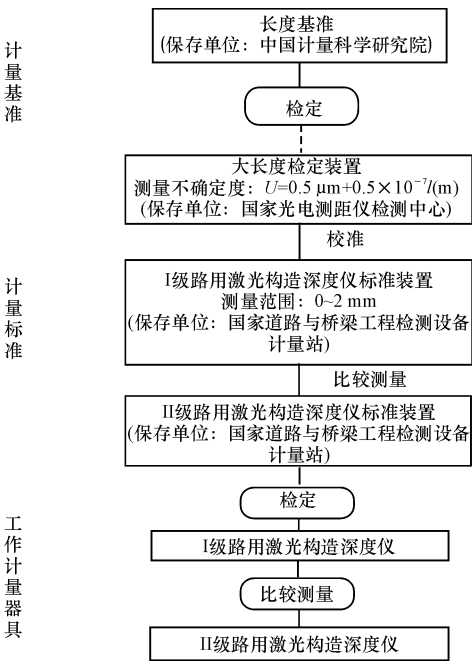


图 2 量值溯源示意图

Fig. 2 Metrological traceability of pavement texture depth
验道路设计值进行比较,从而验证本文技术方法的适应性。

2.1 试验道路

量值溯源技术方案的优劣关键取决于其测量不确定度,根据上述技术方案,本文研制了路面激光构造深度检定装置,并按照《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1—2012)的有关规定,选用性能稳定的车载式路面激光构造深度仪,在新建的交通部试验场计量标准验证试验路进行了验证试验,路面结构如下页图 3 所示。

2.2 试验装置

根据 1.3 节所述量值溯源技术方法,本文设计并研制了试验装置,如下页图 4 所示。该试验装置由高精度激光测距传感器、位移驱动及速度匹配及保存构造深度量值的标准盘 3 个主要部分组成。以下将就这 3 个组成部分进行必要阐述。

2.2.1 高精度激光测距传感器

由于反射面的多样性,基于三角测量原理的激光测距技术在工程界大量应用。配置相应数据采集装置,即可方便地得到有关距离信息数据。根据使用需求,在激光测距传感器的选择方面,主要考虑光斑直径、垂直测距示值误差、采样频率及分辨率 4 项指标。为满足构造深度量值的复现精度,本文推荐工作时速在 60~80 km/h 下,可达到的采样间距不应大于 1 mm,光斑直径小于等于 0.3 mm,垂直测距示值误差小于等于 0.03 mm。

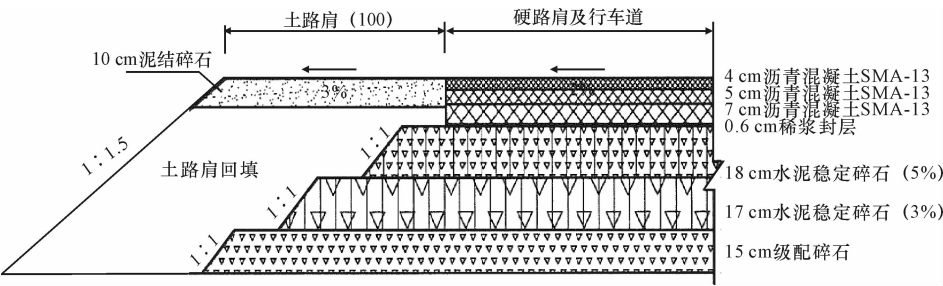


图 3 计量标准验证试验路沥青路面结构示意图

Fig. 3 pavement structure of test road

2.2.2 位移驱动及速度匹配

位移驱动和速度匹配决定激光传感器采样位置的准确性,同样影响采样高程的真实性,位移驱动及速度匹配装置不仅要有驱动功能,更需要反馈和调节速度的能力。此部分需要的主要部件有电机、变频器及里程编码器。

2.2.3 保存构造深度量值的标准盘

通过 1.1 节的分析,本文选定了正弦波作为测量断面形状,并通过波长和振幅的组合来设置构造深度水平。如图 5 所示。

其数学模型可简化为 $y_i = A \sin(\omega x_i + \varphi) + B$ 。设系数 $B=0, \varphi=0$, 则系数 $A=h/2 (h>0)$, $T=\frac{2\pi}{\omega}=\lambda$, 则 $\omega=\frac{2\pi}{\lambda}$ 。测线上各采集点高度数列 (x_i, y_i) , 其中 $y_i = \frac{h}{2} \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x_i)$, 由测点高度数列, 根据文献[6]关于激光法路面构造深度的定义, 可以计算出不同水平的构造深度值, h, λ, T 分别为波峰与波谷间的高度、波长、周期。

本文选用了 6061 铝材, 材料线膨胀系数不超过 $7.2 \times 10^{-5}/K$, 保证其几何形状的温度稳定性, 有效地保存构造深度量值, 如下页图 6 所示。为满足旋转需要, 采用直径约为 360 mm 的圆盘, 最大厚度不超过 20 mm。沿辐向由里向外分为 4 个台阶状构造深度区域, 各台阶宽度为 25 mm, 其构造深度值应分布在 0~0.5、0.5~1.0、1.0~1.5、1.5~2.0 mm 这 4 个区间, 圆截面为标准正弦曲线^[9]。其几何尺寸参数如表 1。

这种在同一圆盘上分台阶设置不同水平构造深度的方式, 相比于国外采用齿轮套组保存构造深度的方法具有明显的优越性, 克服了齿轮垂直于水平面安装, 旋转过程中受重力影响时, 易发生偏心, 造成测量结果重复性不佳, 以及多次更换齿轮以满足不同水平段构造深度的测试等缺陷。

表 1 标准盘几何尺寸

Tab. 1 Geometric parameters of standard disc

构造深度 水平/mm	半径范 围/mm	圆盘厚 度/mm	波长范 围/mm	波峰谷 高差/mm
0~0.5	80~105	19.8	5.71~7.50	1.15
0.5~1.0	105~130	18.5	6.05~7.50	2.08
1.0~1.5	130~155	16.3	6.28~7.50	3.62
1.5~2.0	155~180	12.5	6.50~7.50	4.90

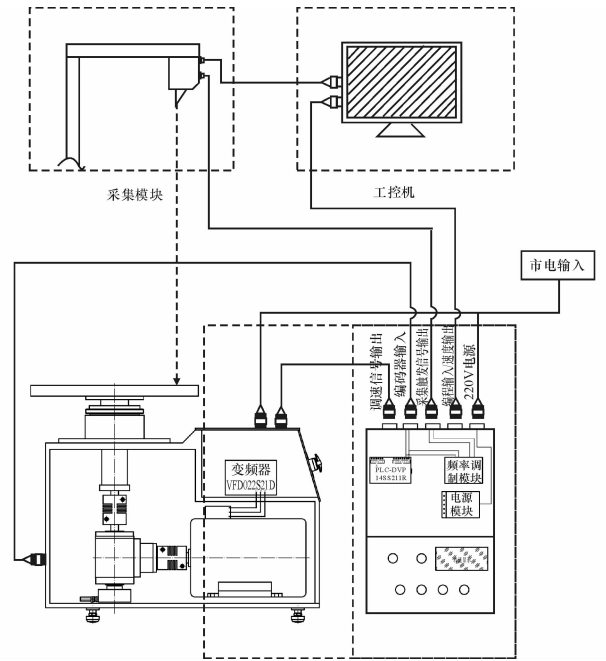


图 4 试验装置

Fig. 4 Technical proposal of metrological traceability

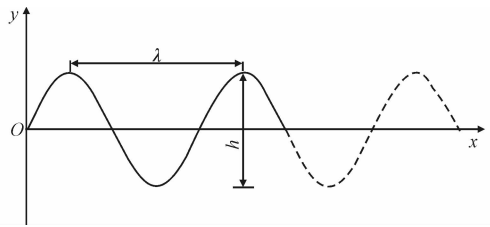


图 5 标准圆盘断面几何形状

Fig. 5 Profile of standard disc

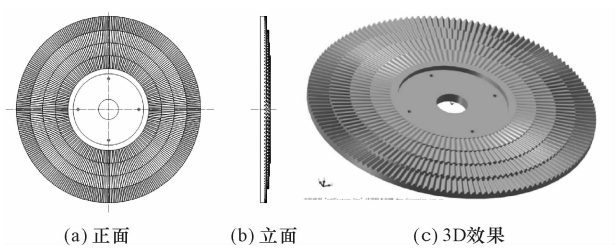


图 6 标准盘示意图
Fig. 6 Shape of standard disc

2.3 试验过程

仪器设备的量值溯源技术的科学性关键在于 2 个方面,一是对工程测量的适应性,即与工程实际情况的一致性。就本文内容来讲,具体表现为采用本文量值溯源技术方法计量校准合格的仪器设备,用于实际路面构造深度检测时,检测结果与实际情况的符合性;另一方面则是量值溯源技术方法本身的不确定度评定情况。本文选用 Roadware ARAN9000 型激光断面综合检测车,利用本文设计研制的试验装置进行计量校准,分别对 0~0.5、0.5~1.0、1.0~1.5、1.5~2.0 mm 这 4 个水平段(台阶)的标准构造深度圆盘进行 10 次重复测量,根据测量结果,对检测车的采集方式和计算模型进行了调整。而后,该检测车在新建试验道路上,保持试验道路一定的交通量,分 4 个不同时期进行路面构造深度检测,每期进行 10 次重复测量,以最后稳定的平均值作为测量结果,该平均值与试验道路设计值及铺砂法测值进行比较,评价其工程适应性。

3 结果分析

根据 2.3 节所述,本文将从工程适应性和测量不确定度 2 个方面来分析试验结果。

3.1 工程适应性分析

在标准盘的 4 个台阶进行 10 次重复性试验,取 10 次测量的算数平均值 \bar{x} 作为测量值,则 \bar{x} 的标准差即为重复性测量引入的不确定度。

构造深度 D 的标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} \tag{2}$$

则构造深度平均值 \bar{D} 的标准差为

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{\sigma}{\sqrt{10}} \tag{3}$$

按照式(2)、式(3)计算,得到的标准圆盘的 4 个台阶的标准不确定度(即构造深度 D 的标准差)分别为 $\sigma_{\overline{m}_1}$ 、 $\sigma_{\overline{m}_2}$ 、 $\sigma_{\overline{m}_3}$ 、 $\sigma_{\overline{m}_4}$ 。取 4 个值的最大值作为标准圆盘的测量

重复性引入的不确定度分量。对标准圆盘 4 个台阶的构造深度进行 10 次重复测量,结果见表 2。

表 2 标准圆盘测试数据
Tab. 2 Measurement data of standard disc

测试次数/次	测试位置及水平/mm			
	第 1 台阶 0~0.5	第 2 台阶 0.5~1.0	第 3 台阶 1.0~1.5	第 4 台阶 1.5~2.0
1	0.405 7	0.735 6	1.276 6	1.732 5
2	0.407 6	0.735 1	1.279 0	1.729 4
3	0.406 0	0.735 3	1.277 7	1.729 7
4	0.406 2	0.735 8	1.277 7	1.728 8
5	0.406 7	0.735 6	1.277 5	1.731 4
6	0.406 8	0.735 1	1.278 2	1.734 1
7	0.406 6	0.734 9	1.276 6	1.734 5
8	0.407 1	0.736 1	1.276 9	1.740 6
9	0.406 9	0.734 7	1.276 2	1.730 3
10	0.406 8	0.734 7	1.276 9	1.732 0
平均值	0.406 6	0.735 3	1.277 3	1.732 3
标准差	0.000 56	0.000 49	0.000 85	0.003 50

则测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1 = \frac{0.003\ 5}{\sqrt{10}} = 0.001\ 11$,按满量程计算相对不确定度为 0.055%。

利用此套装置对选用的车载式路面激光构造深度仪进行现场测试,得出转换公式为 $G_{\text{SMTD}} = 0.997\ 6G_{\text{SMTD0}} + 0.008$,判定系数 $R^2 = 0.985\ 3$, G_{SMTD0} 为实测值。可见具有良好的线性相关性。用该仪器在计量标准验证试验路(沥青路段)进行 10 次构造深度重复检测,经 $G_{\text{SMTD}} = 0.12 + 0.59G_{\text{D}}^{[4]}$ 转换后, G_{D} 为铺砂法测值,试验数据见下页表 3。

从试验路上构造深度测试结果看,虽然重复测量具有一定的变异性(由承载车行驶轨迹的变化有关),但平均值与试验路构造深度的设计期望值为 0.90 mm,以及铺砂法测值 0.93 mm 能够很好吻合,同时也侧面证明了 TRRL 转换公式具有一定的适用性。

3.2 不确定度分析

路面激光构造深度检定装置的不确定度来源主要包括理论模型、长度测量及环境等因素,以下将逐一分析。

3.2.1 理论模型的不确定度分析

由计算模型引入的不确定度是由采样点起始位置造成。根据本文的量值溯源技术方法,在一个波长范围内起始采样点的位置不同,测线的高度数列也将不同,所计算的构造深度值也将有所差异。以

表 3 激光构造深度仪测试数据
Tab. 3 Measurement data of laser texture-meter

试验序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
构造深度/mm	0.96	0.94	0.95	0.97	0.92	0.95	0.93	0.98	0.96	0.95	0.951
	0.93	0.93	0.95	0.91	0.9	0.95	0.92	0.93	0.92	0.93	0.927
	0.91	0.87	0.92	0.92	0.88	0.89	0.93	0.94	0.92	0.92	0.910
	0.93	0.96	0.94	0.89	0.86	0.87	0.89	0.97	0.89	0.92	0.912

0.5~1.0 mm 水平段的构造深度为例, $h=1.75$ mm, $\lambda=6$ mm,采样间距为 1 mm。起始采样点 $x_0=0$ 时,根据文献[4],得到抛物线回归曲线如下: $y_{ei}=-0.000\ 007\ 697x_i^2+0.002\ 228x_i-0.132\ 49$,回归曲线及采样点数据见图 7。

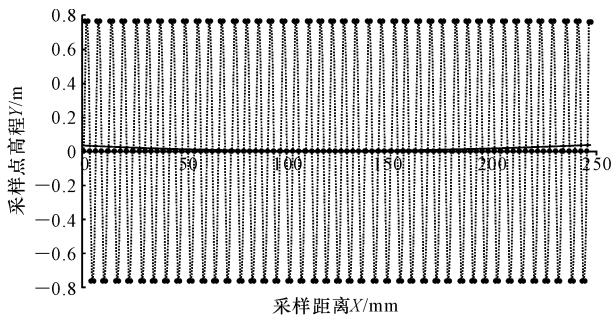


图 7 采样点数据
Fig. 7 Sampling points data

则复现的构造深度 G_{SMTD} 为 0.618 539 mm。以 0.6 mm 的间隔,则一个波长范围内有 10 个不同采样起始点,计算构造深度如表 4。

表 4 构造深度(SMTD)计算(0.5~1.0 mm)
Tab. 4 Calculation data of SMTD (0.5~1.0 mm)

序号	深度 h/mm	波长 λ/mm	起始采样 点 x_0/mm	$G_{\text{SMTD}}/\text{mm}$	差值 $\gamma_i =$ $G_{\text{SMTD}} - \Delta$
1	1.75	6.00	0.0	0.618 539	-5.98×10^{-5}
2			0.6	0.618 482	-11.70×10^{-5}
3			1.2	0.618 586	-1.28×10^{-5}
4			1.8	0.618 708	10.92×10^{-5}
5			2.4	0.618 679	8.02×10^{-5}
6			3.0	0.618 539	-5.98×10^{-5}
7			3.6	0.618 482	-11.70×10^{-5}
8			4.2	0.618 586	-1.28×10^{-5}
9			4.8	0.618 708	10.92×10^{-5}
10			5.4	0.618 679	8.02×10^{-5}
平均值 Δ				0.618 599	

同样,可计算 1.0~1.5 mm 水平段的构造深度, $h=3.62$ mm, $\lambda=6.5$ mm,采样间距为 1 mm,则复现的构造深度 G_{SMTD} 为 1.278 275 mm。以 0.6 mm 的间隔,1 个波长范围内有 11 个不同采样起始点,计算构造深度见表 5。

表 5 构造深度(SMTD)计算(1.0~1.5 mm)

Tab. 5 Calculation data of SMTD (1.0~1.5 mm)

序号	深度 h/mm	波长 λ/mm	起始采样 点 x_0/mm	$G_{\text{SMTD}}/\text{mm}$	差值 $\gamma_i =$ $G_{\text{SMTD}} - \Delta$
1	3.62	6.50	0.0	1.278 275	-0.001 430
2			0.6	1.281 153	0.001 443
3			1.2	1.282 353	0.002 643
4			1.8	1.280 433	0.000 723
5			2.4	1.277 688	-0.002 020
6			3.0	1.277 418	-0.002 290
7			3.6	1.279 950	0.000 240
8			4.2	1.282 237	0.002 527
9			4.8	1.281 533	0.001 823
10			5.4	1.278 676	-0.001 030
11			6.0	1.277 094	-0.002 620
平均值 Δ				1.27 971	

同样,计算 1.5~2.0 mm 水平段的构造深度为例, $h=4.90$ mm, $\lambda=7.0$ mm,采样间距为 1 mm,则复现的构造深度 G_{SMTD} 为 1.729 873 mm。以 0.6 mm 的间隔,1 个波长范围内有 12 个不同采样起始点,计算构造深度如表 6。

表 6 构造深度(SMTD)计算(1.5~2.0 mm)

Tab. 6 Calculation data of SMTD (1.5~2.0 mm)

序号	深度 h/mm	波长 λ/mm	起始采样 点 x_0/mm	$G_{\text{SMTD}}/\text{mm}$	差值 $\gamma_i =$ $G_{\text{SMTD}} - \Delta$
1	4.90	7.00	0.0	1.729 873	-0.002 09
2			0.6	1.730 101	-0.001 87
3			1.2	1.732 344	0.000 38
4			1.8	1.734 239	0.002 27
5			2.4	1.733 796	0.001 83
6			3.0	1.731 479	-0.000 49
7			3.6	1.729 725	-0.002 24
8			4.2	1.730 381	-0.001 59
9			4.8	1.732 755	0.000 79
10			5.4	1.734 346	0.002 38
11			6.0	1.733 483	0.001 52
12			6.6	1.731 074	-0.000 89
平均值 Δ				1.731 966	

由以上 3 个表的试验数据可以看出,随着构造深度水平值增大,测量值与重复测量平均值的差值

逐渐增大,最大差值出现在 1.5~2.0 mm 水平段,1 个波长范围(0~7 mm)内 12 个不同起始采样点的构造深度值的标准差为

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i^2}{11}} = 0.001\ 75 \quad (4)$$

以此水平段作为该不确定度分量分析区间,则有理论模型带来的相对不确定度 $u_1 = 0.1\%$ 。

3.2.2 垂直测距的不确定度分析

激光传感器负责采集各等间距点的高程值数据,属于长度测量,其测量准确性对于整个装置的准确度影响很大,本文采用 B 类评定方法进行该项不确定评定。则按照前节所述高精度激光测距传感器的测量重复性为 0.03%,量程内线性度为 0.06%,则满量程综合相对不确定度为

$$u_2 = \sqrt{(0.062\%)^2 + (0.03\%)^2} \approx 0.067\%$$

3.2.3 温度的不确定度分析

标准盘是保存构造深度量值的器具,选用了日标 6061 高强度合金铝,线膨胀系数为 $(22 \sim 24) \times 10^{-6}/K$,温度敏感性很小,本身不易发生变形。在机械加工过程中,为避免温度引起的形变,采用双刀缓慢逐层的加工方法。另外,激光传感器在使用范围内(0℃~60℃)属温度不敏感型器具,因此温度引入不确定度可以忽略, $u_3 = 0$ 。

3.2.4 采样间距的不确定度分析

如前所述,里程编码器的脉冲参数为 5 000 pulse/r。以最外侧台阶,构造深度 1.5~2.0 mm 水平段,采样间距 1 mm 为例分析该不确定度分量,由于半径最大,此台阶为最不利位置。里程编码器的分辨力为 1 pulse,对于最外侧台阶(取中位半径),相当于水平间距的分辨力为

$$\frac{\pi D}{5\ 000} = 0.21\ \text{mm} \quad (5)$$

那么,在一个构造深度计算区间(300 mm)内,每一个采样点的水平步距偏差为 $\Delta x = \frac{0.21}{300} = 0.0007\ \text{mm}$ 。根据前述标准盘几何尺寸,已知该台阶处的断面曲线函数为 $y_i = \frac{h}{2} \sin(\frac{2\pi}{7} x_i)$,上述水平步距的偏差转换为竖向高程分辨力

$$\Delta y = \left[\frac{h}{2} \frac{2\pi}{7} \cos(\frac{2\pi}{7} x) \right] \Delta x \leq 0.001\ 54\ \text{mm} \quad (6)$$

用该竖向高程分辨力作为里程编码器引入的测量不确定度,则按满量程计算相对不确定度 $u_4 = 0.001\ 54/2 = 0.077\%$ 。

3.2.5 平面稳定性的不确定度分析

精密机械设备的各个零部件,都存在加工误差和装配误差,使得整个装置在运转过程中出现不同程度的振动、偏心等情况。为了最大限度地保证标准盘在转动过程中始终处于水平状态,从而使其激光传感器采集的高程信息来自标准盘本身,标准盘在加工过程中虽然严格控制了垂直度误差(垂直度为 0.03 mm),在装配过程中,通过精密测量工具控制。另外,位移驱动与速度匹配装置的设计加工中,将电机通过联轴器与标准盘的底座下部的转轴相连接,转轴选用固定-游动支承方式,选取角接触轴承背对背应用作为固定端,以深沟球作为游动端,保证了标准盘转动的平面度,从而大大降低了转动中不平稳引入的误差^[10]。因此,标准盘转动中的不平稳引入的不确定度可以忽略不计,则 $u_5 = 0$ 。

根据上述不确定度分量的计算结果,可以得到合成标准不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 0.14\% \quad (7)$$

本文所述路面构造深度量值复现及保存装置的合成不确定度为 0.14%,扩展不确定度 $U = 0.3\%$ ($k = 2$)

4 结 语

(1)本文提出了非接触式路面构造深度量值溯源技术方案,采用高精度激光测距传感器作为主标准器,溯源至国家长度基标准,具有清晰的量值溯源路径。针对路面构造深度测量对象无法复制的技术难题,利用相对运动的原理,从理论上分析了用静态测量代替动态测量的科学合理性,实现了构造深度量值的复现和保存,为中国激光路面构造深度检测及评价提供了必要的技术支撑。

(2)本文根据所提技术方案,对构造深度标准盘、高精度激光传感器和位移驱动及速度匹配装置等核心部件组成的硬件装置进行了现场试验路验证试验,与设计期望值具有较好的吻合度。并从垂直测距、温度影响、采样间距等方面,对试验结果进行了不确定度分析,结果表明整套装置的扩展不确定度 $U = 0.3\%$ ($k = 2$),能够满足有关标准的要求。

(3)解决路面构造深度量值复现和保存的问题,是实现非接触式构造深度量值溯源的前提,也是提升路面构造深度测量结果准确性,路面抗滑性能评价可靠性的有效途径。

(4)从断面法构造深度与路面抗滑标准的匹配关系角度出发,开展更有针对性的验证试验,将是下

一步的研究方向。

参考文献:

References:

- [1] JTG E60—2008,公路路基路面现场测试规程[S].
JTG E60—2008,Field test methods of subgrade and pavement for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [2] 沈娟.激光测距仪测定构造深度的方法及数据处理方法[J].石油沥青,2008,22(1):57-60.
SHEN Juan. Method of measuring texture depth with laser range finder and method of data processing[J]. Petroleum Asphalt,2008,22(1):57-60. (in Chinese)
- [3] ISO 13473-1. Characterization of pavement texture by use of surface profiles-part1: determination of mean profile depth[S].
- [4] TRRL. Measurement of road surface texture by a contactless sensor[R]. London:TRRL,1974.
- [5] GB/T 26764—2011,多功能路况快速检测设备[S].
GB/T 26764—2011,Multifunctional high-speed highway condition monitor[S]. (in Chinese)
- [6] JT/T 840—2012,车载式路面激光构造深度仪[S].
JT/T 840—2012,Vehicle bearing road laser texture-meter[S]. (in Chinese)
- [7] JJF1001—2011,通用计量术语及定义[S].
JJF1001—2011,General terms in metrology and their definitions[S]. (in Chinese)
- [8] 朱朝辉,张玉斌,甘文宁,等.灰色特征加权 ELM 在构造深度预测中的应用[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2014,37(7):827-830.
ZHU Zhao-hui, ZHANG Yu-bin, GAN Wen-ning, et al. Application of grey feature weighted ELM in the prediction of texture depth[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2014, 37(7): 827-830. (in Chinese)
- [9] Masad E, Muhunthan B, Sha shidhar N, et al. Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(2): 88-95.
- [10] Cooper D. Measurement of road surface texture by a contact less sensor[R]. Washington DC:TRB,1974.
- [11] Gendy A E, Shalaby A. Mean profile depth of pavement surface macrotexture using photometric stereo techniques[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(7): 433-440.
- [12] 倪晓丽.标准物质质量值溯源性初探[J].计量技术,2002(11):45-61.
NI Xiao-li. Research of metrological traceability of reference material[J]. Measurement technique, 2002 (11): 45-61. (in Chinese)
- [13] 文静.数字化技术评价沥青路面构造深度研究[D].西安:长安大学,2009.
WENG Jing. Study on evaluating texture depth of asphalt pavement with digital technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [14] 蒋超.水泥混凝土路面纹理构造表征技术研究[D].西安:长安大学,2009.
JIANG Chao. Research on the evaluation methods for concrete pavement texture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [15] 王端宜,李维杰,张肖宁.用数字图像技术评价和测量沥青路面表面构造深度[J].华南理工大学学报:自然科学版,2004,32(2):42-45.
WANG Duan-yi, LI Wei-jie, ZHANG Xiao-ning. Evaluation and measurement of asphalt pavement surface texture depth with digital image technique[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2004, 32(2): 42-45. (in Chinese)
- [16] 迟凤霞,张肖宁,薛忠军,等.基于激光纹理仪的沥青路面表面离析评价方法[J].中国公路学报,2008,21(5):1-5.
CHI Feng-xia, ZHANG Xiao-ning, XUE Zhong-jun, et al. Evaluation method of surface segregation of asphalt pavement based on laser texture measurer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21 (5): 1-5. (in Chinese)
- [17] 李潘.基于激光视觉的微观形貌检测技术的研究[D].武汉:武汉科技大学,2010.
LI Pan. Study on detection technology of micro morphology based on laser vision[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)