

三维线激光国际平整度指数计算原理及测试评估

吕润华¹, 徐 粒², 彭慧婷², 曹志坚¹, 耿靖杰²

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 新疆大学 建筑工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘 要: 该文介绍了三维线激光轮廓仪纵向布置架构及工作原理, 开发了基于线激光的移动参考算法, 可用于 20~100 km/h 时速下连续获取道面纵向轮廓线, 设备布置于左右轮迹带, 线激光调查长度为 270 mm, 垂直精度达 0.01 mm。通过该调查系统获取了 2 段不同质量状况沥青路面轮廓高程并用于计算 10、100 m 步距国际平整度指数(international roughness index, IRI), 测试结果表明: 变速情况下获取的 IRI 值与手动测量相对误差不超过 3%, 低速情况下的左、右轮廓仪标准差不超过 0.3, 变速情况下不超过 0.6; 数字检测车在快速启动过程中导致的悬架上移以及受黄金车 1/4 车动力学响应模型初值影响, 起始段约 50 m 的数据会出现失真现象, 剔除起始段前 50 m 低质量数据后, 右轮廓仪 91.4% 的数据变异系数小于 5%, 8.6% 的数据变异系数小于 15%, 左轮廓仪 94.2% 的数据变异系数小于 5%, 5.8% 的数据变异系数小于 10%。其中 1 号和 2 号站点路段调查的 IRI 评价结果符合实际路面服役状况。综合测试结果表明: 开发的动态检测系统在低速和变速情况下采集 IRI 数据质量良好, 预计未来可以为区域化的网级路面服役状况评估提供有效技术支撑。

关键词: 沥青路面; 国际平整度指数; 三维线激光; 移动参考算法; 变异系数

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2021)11-1316-09

DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2020.26.041

Pavement roughness index measurements with a 3D line laser

GUO Runhua¹, XU Li², PENG Huiting²,
CAO Zhijian¹, GENG Jingjie²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University,
Beijing 100084, China;

2. College of Construction Engineering, Xinjiang University,
Urumqi 830047, China)

Abstract: This paper describes the longitudinal layout and working principle of a 3D line laser profilometer with a moving reference

algorithm based on the line laser design which can continuously measure the longitudinal contour of a track plane at 20~100 km/h. The device is placed on the left and right wheel track belts. The line laser survey path is 270 mm long and the vertical accuracy is 0.01 mm. The system was used to measure two sections of different quality asphalt pavement contours over distances of 10 m and 100 m to determine the international roughness index (IRI) for each section. The results show that the IRI at various speeds had a relative measurement error less than 3%. At low speeds, the left and right contour graph standard deviations were less than 0.3 and less than 0.6 at higher variable speeds. Measurements using a digital test vehicle gave poor results for quick starts with distorted data over the first 50 m. Thus, the initial values for the standard gold car model were taken from the first quarter of the dynamic response model results as the initial value. For the right contour graph, 91.4% of the data had coefficients of variation less than 5% and 8.6% of the coefficients of variation were less than 15%. For the left contour graph, 94.2% of the coefficients of variation were less than 5% and 5.8% of the coefficients of variation were less than 10%. The IRI results at sites 1 and 2 were in line with the actual service conditions of the road surfaces. The evaluations show that this dynamic monitoring system can accurately measure the IRI at both low speeds and variable speeds. This system can be used for pavement flatness surveys and pavement service status assessments.

Key words: asphalt pavement; international roughness index; three-dimensional line laser; mobile reference algorithm; coefficient of variation

路面是车辆轮胎直接相互作用的载体, 不同波长范围路面纹理将会在一定程度上影响路面抗滑安全、噪声、排水、油耗、行车舒适度等性能^[1]。道面纹理包含轮廓波长光谱信息, 这些波长被分为 4 个等级^[2-3]: 0~0.5 mm 为微观纹理, 0.5~50 mm 为

收稿日期: 2020-09-16

基金项目: 交通基础设施全自动数据采集及智能分析平台建设
(20203910013)

作者简介: 吕润华(1975—), 男, 副教授。

E-mail: guorh@tsinghua.edu.cn

宏观纹理, 50~500 mm 为巨观纹理, 500 mm 以上为不平整。

1970 年世界银行定义了国际平整度指数 (international roughness index, IRI)^[4], 它由黄金车 1/4 模型模拟时速 80 km/h 沿道路剖面纵向行驶方向累积垂直动力学响应计算得到^[4], IRI 也可以解释为道路剖面的平均绝对斜率^[5], 通过数学滤波来修改计算得到的不同波长振幅; 研究表明贡献 IRI 的纹理波长主要集中在 1~30 m^[6], 并且该指标被广泛用于评价世界各地网级路面行驶状况、行车舒适度、油耗成本等分析^[7-8]。

IRI 的获取分为直接法和间接法。直接法通过精密水准仪、单点多点激光、线激光、激光雷达等获取道面横纵剖面轮廓离散高程^[9], 通过 250~300 mm 反移动平滑数字滤波、输入 1/4 黄金车动力学模型进行响应输出道路剖面的平均绝对斜率^[10]; 通过数学理论证明道路轮廓一维功率谱密度 (power spectral density, PSD) 与 IRI 之间存在直映射函数关联^[11-12], 因此二者之间可以相互转换。传统轮廓仪通常采用车载式点激光、多点激光辅以线阵相机或线激光辅以线阵或面阵 CCD 相机的形式进行数据采集工作^[13-15], 由于搭载轮廓仪设备的汽车在行进过程中存在颠簸振动, 对此设计人员通常会采用安装惯性加速度计的方法用以消除平整度仪由于振动产生的误差, 从而为平整度检测提供惯性参考系^[16]。但目前行业中的平整度仪存在几个问题: 1) 低速状态 (30 km/h 以下) 采集数据无效。2) 车载式传统惯性加速度计在行进过程中由于汽车横梁和悬架系统的扰动会不同程度地受到影响, 导致测量数据失真。3) 基于点激光和多点激光传感器在测试道面过程中是对道面离散点位的调查, 很难反映道面轮廓的真实样貌, 且在进行调查道面轮廓时需要保持等速行驶, 也就意味着起始加速阶段和减速停止阶段测得失真数据。4) 一维 PSD 推导出的 IRI 系数是基于经验回归得到, 普适性较差。尽管有学者基于以上问题提出了改进方法, 但目前平整度测量计算方法弊端尚不能得到有效根治^[17-18]。

2018 年, 本文团队开发的一体化数字检测车^[19], 行驶速度为 20~100 km/h, 搭载的线激光垂直精度为 0.01 mm, 能以 4.5 kHz 采样频率连续获取纵向 270 mm 道面剖面轮廓, 获取的纵向剖面

信息将用于道面 IRI 计算; JTG5210—2018 规范新增 10 m 步距 IRI 指标, 本文将详细介绍基于三维线激光的国际平整度指数计算原理及测试评估方法。

1 设备介绍及算法开发

1.1 设备系统架构介绍

调查系统由高速三维相机、线激光发射器、轴编码器、千兆网信号传输线、控制中心组成如图 1 所示, 脉冲激光以线形呈现在靶材上, 长 270 mm (有效计算长度为 250 mm), 相机图像帧 2 048×512, 如图 2a 和 2b 所示, 激光分散到像素点间距为 0.12 mm。通过高速移动 3D 相机捕捉激光线, 随着靶材高度的变化, 表面激光亮条纹在相机网格阵中与原来的位置发生相对移动, 激光条纹与背景存在明显强度差, 采用门限处理将其与背景进行二值化, 通过重心算法^[20] (获取激光条纹中心) 和数字图像滤波技术计算出每个目标点与预设零位面之间的距离, 从而得到线激光扫描过的道面轮廓高程信息。

在实际的采集过程中, 高速 3D 相机图像帧采集模式分为静态模式和距离触发模式, 静态模式由控制中心发出采集信号, 该模式通常在室内模拟不同速度的采集状况, 距离触发模式由数字轴编码器 DMI (固定于车轮轴) 触发采集信号。

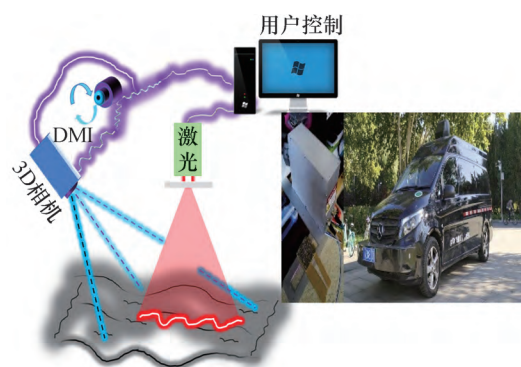


图 1 (网络版彩图) 三维线激光轮廓仪 (纵向布置)

线激光光条覆盖多行像素, 需要计算出线激光在相机平面中的精确位置如图 2a 和 2b 所示, 列 (图像帧 2 048×512) 像素中所含有的激光条纹遵循 Gauss 分布, 特点如图 2c 所示, 对此采用内置的灰度重心算法计算光条质心在列像素中的精确位置, 再根据相机激光坐标转换及其与零位面的差值算得断面相对高程如图 2d 所示。

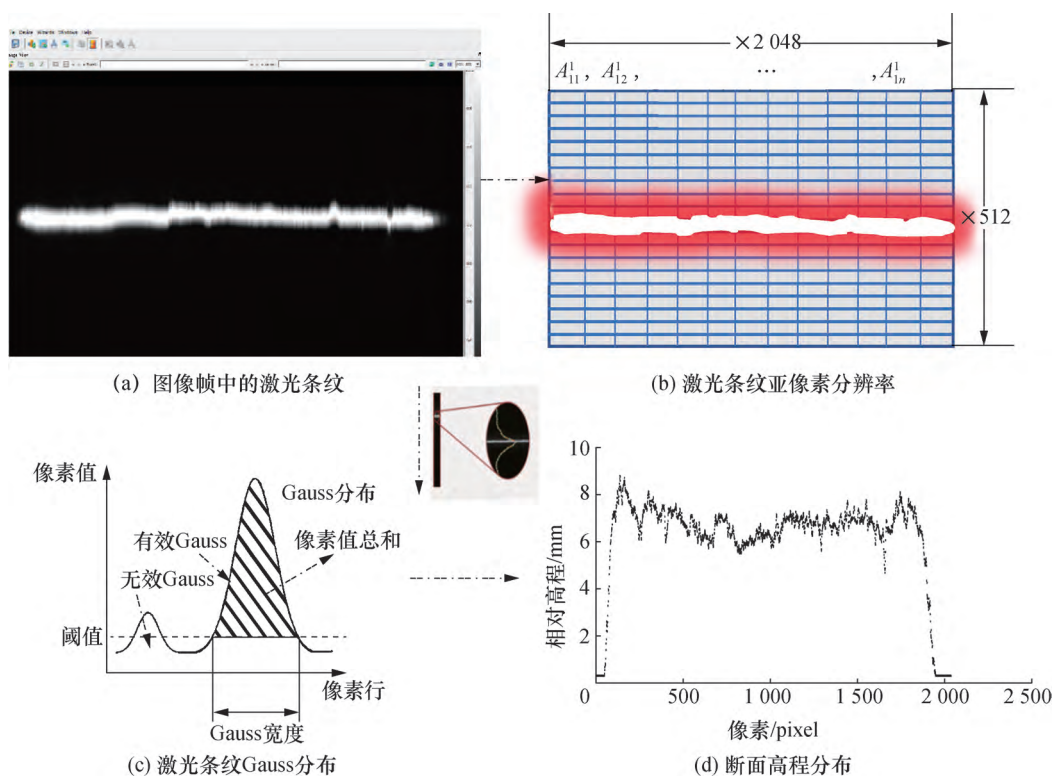


图2 (网络版彩图)激光光条中心提取流程

通过质心算法垂直分辨率可以近似为:

$$\Delta Z = \frac{\Delta X}{\sin a}, \quad (1)$$

$$X = \frac{L}{P}. \quad (2)$$

其中: ΔZ 表示高度分辨率, X 表示水平像素分辨率, a 表示激光平面与相机光学平面夹角, L 表示调查宽度, P 表示相机像素。

由式(1)和(2)可知,设备安装高度越高则调查宽度越大,垂直分辨精度越低。通过内置的重心算法可以检测到相机像素分辨率的 1/16 的激光线位置,也就是说提供的最终系统高度分辨率可达传统像素级激光线检测方法的 16 倍,使得垂直检测精度达到 0.01 mm。

1.2 移动参考算法

在设备进行道面调查过程中,由于脉冲激光的高频率,相邻两次采样存在重复区间如图 3a 所示,假设不存在振动,则重叠采集区间的轮廓数据会完全一致,区间内相邻两次采样轮廓线将出现重叠。但实际行驶过程由于路面不平整,相邻轮廓线将产生垂直和水平偏移如图 3a 和 3b 所示。

假设在一个采样间隔内,设备从 i 点位移到相邻 j 点,则有:

$$v_{ij} = \int_{t_i}^{t_j} \omega_t R_t d_t, \quad (3)$$

$$L_{ij} = \frac{v_{ij}}{\lambda_n}, \quad (4)$$

$$L_{\text{overlap}} = L_{\text{laser}} - L_{ij}. \quad (5)$$

其中: v_{ij} 表示检测车移动速度; ω_t 表示轮轴转动角速度; R_t 表示车轮半径,与胎压有关; λ_n 表示采样频率; L_{ij} 表示采样间隔过程中位移的距离; L_{laser} 表示激光线长度; L_{overlap} 表示理论覆盖区域长度。

在 0~120 km/h 行驶过程中,若将每次采集的纵断面曲线都计入数据库势必会造成叠加数据冗余,因此 DMI 触发采样间隔设置为 10 mm,也就是说车辆每前进 10 mm 将会储存一条轮廓线信息,假设行驶过程完全平稳,则采集道面轮廓如图 3c 所示,但由于车辆行驶过程中的横纵振动将导致采样间隔在 0~20 mm 之间波动,但即便如此,重叠区域也不会少于 250 mm,如图 4 所示(根据式(3)~(5)计算得到),这样可依次选择相邻两条曲线进行垂直和水平振动误差的消除如图 3b 和 3d 所示。

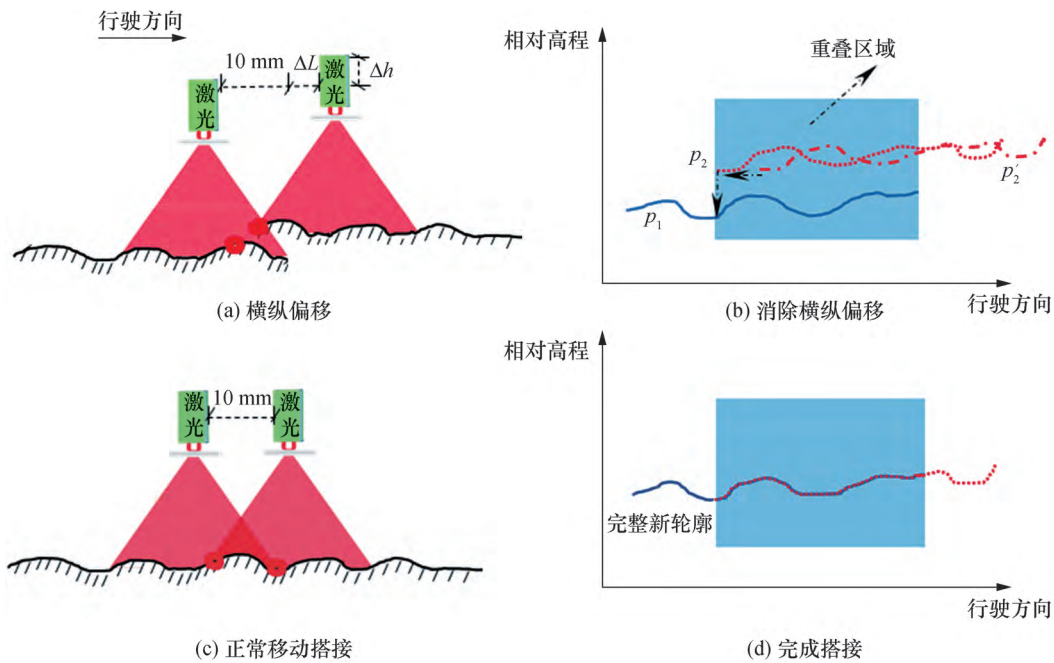


图3 (网络版彩图)移动参考算法原理

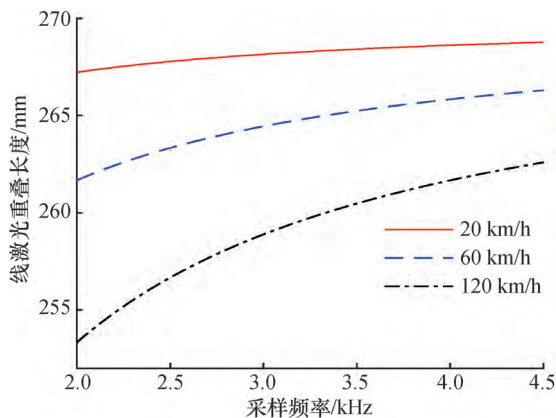


图4 (网络版彩图)变速条件下线激光重叠长度

任取2条轮廓,计前一条为 p_j^i ,后一条记为 p_j^{i+1} ,如图3b和3d所示。

$p_j^i = \{p_1^i, p_2^i, \dots, p_n^i\}$, $p_j^{i+1} = \{p_1^{i+1}, p_2^{i+1}, \dots, p_n^{i+1}\}$, p_n^i 表示第 i 条轮廓中的第 n 个高程点。

将相邻轮廓线从端点开始依次递推对应作差,记高差为 d_j^i :

$$d_1^i = \frac{1}{n} [(p_1^{i+1} - p_1^i) + (p_2^{i+1} - p_2^i) + \dots + (p_n^{i+1} - p_n^i)] = \frac{1}{n} [\Delta_1^i + \Delta_2^i + \dots + \Delta_n^i], \quad (6)$$

$$d_2^i = [(p_1^{i+1} - p_2^i) + (p_2^{i+1} - p_3^i) + \dots + (p_{n-1}^{i+1} - p_{n-2}^i)] = \frac{1}{n-1} [\Delta_1^i + \Delta_2^i + \dots + \Delta_{n-1}^i], \quad (7)$$

$$d_2^i = \frac{1}{n-j+1} [\Delta_1^i + \Delta_2^i + \dots + \Delta_{n-j+1}^i]$$

$$D_j^i = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_n^j - d_j^i)}{j}}, D_j^i \leq \sigma_{\min}. \quad (8)$$

其中: D_j^i 表示对应高程点作差的标准偏差, σ_{\min} 表示所有 D_j^i 标准差中的最小值。当标准差 $D < \sigma_{\min}$ 时即确定搭接点 $P_1^{i+1} \sim P_n^i$,将前一条轮廓搭接点之后的所有值以后一条轮廓减去 d_j^i 取代。

上述算法流程如图5所示。

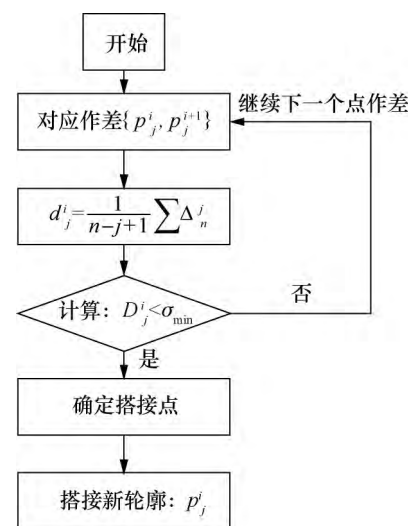


图5 移动参考算法流程

将获取的连续轮廓与单点激光调查的纵向轮廓作一个简单对比,单点激光采集的相邻两个点高程

几乎在一水平线上,中间区域明显遗漏了起伏轮廓,如图6a所示,也就是说遗漏区域未计入黄金车动力学响应,这将会导致计算出的IRI值明显小于真实值^[6]。而纵向布置的线激光如图6b所示,采用了移动参考算法后将独立于速度获取连续轮廓,也就意味着它能轻松获取整个道面轮迹带的纵向波长光谱信息。

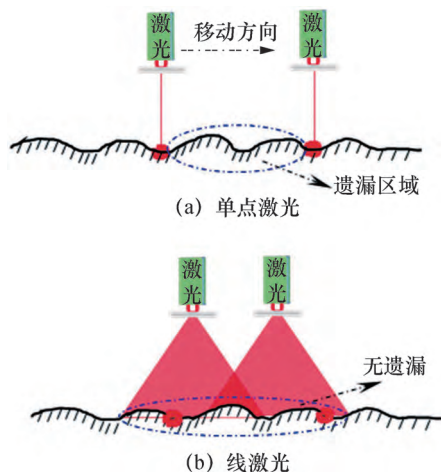


图6 (网络版彩图)点激光与线激光采集轮廓对比

1.3 国际平整度指数IRI计算

在采集的连续纵向轮廓进行Fourier变换后可以得到其波长频谱分布,但是研究发现^[6]贡献IRI的有效增益波段在1~30 m,间隔为0.12 mm的高程轮廓包含较多无效高频信息,如果将这些高频波段的轮廓高程代入动力学响应模型则会造成计算的IRI值偏大。并且不同大小轮胎在同一轮廓上以相同速度行驶时其颠簸振动程度是不同的,研究表明以250 mm胎路接触长度 B 为宜^[21],如图7所示。

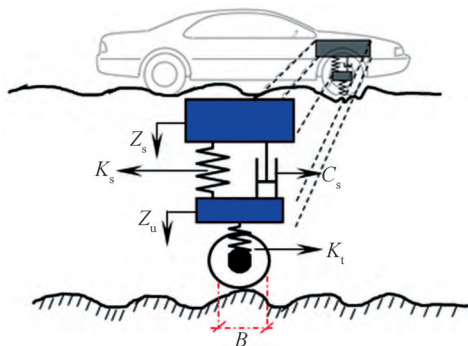


图7 (网络版彩图)1/4黄金车响应悬架模型

1/4车模型动力学解析方程^[21]:

$$M_s \ddot{Z}_s + c_s (\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + K_s (Z_s - Z_u) = 0, \quad (9)$$

$$M_u \ddot{Z}_u + c_s (\dot{Z}_u - \dot{Z}_s) + K_s (Z_u - Z_s) + K_t (Z_u - y) = 0, \quad (10)$$

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^T |\dot{Z}_s - \dot{Z}_u| dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |cX|. \quad (11)$$

其中: L 表示汽车前进距离; $C = [1, 0, -1, 0]^T$ & $[-1, 0, 1, 0]^T$; Z_s 表示簧载质量位移; Z_u 表示非簧载质量位移; M_s 表示载簧质量; M_u 表示非载簧质量; K_s 、 C_s 表示车轮与轴之间简化线刚度及减振器线阻尼; K_t 表示轮轴与地面之间简化线刚度; C 表示系数矩阵; X 表示动力学响应变量数组。

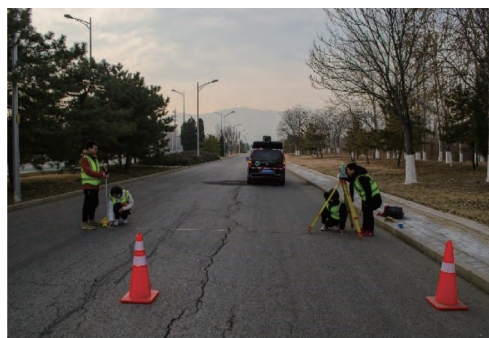
2 实验方法及讨论

2.1 实验条件及环境

实验场地选取两处不同程度的路段,编号为1号、2号,其中1号路段长约117 m,2号路段长约400 m。1号站点采用Dsz-05型水准仪每250 mm步距进行纵向剖面测量,以华星HTS-221全站仪并对DMI距离校准以及对测试纵向剖面区做标记,司机沿参考标记行进确保线激光与水准标尺测试位置在同一轮廓(各重复3次),如图8a所示。2号站点安装左右激光轮廓仪,进行低速和变速测试如图8b所示。测试参数如表1所示。

2.2 实验结果及讨论

采集1号站点117 m长路段相对高程如图9a所示,可知原始道面轮廓带有纵向坡度,通过反移



(a) 1号站点



(b) 2号站点

图8 (网络版彩图)现场试验

动平滑滤波得到沿水平轴上下波动的横断面相对高程如图 9b 所示，该路段的波动起伏较大，尤其是在 100~120 m 出现明显的波动，滤波后的断面可以有效地消除纵坡和高频短波噪声影响，并且保留平整度增益波段的长波信息。

表 1 设备参数及实验条件

技术指标	三维线激光轮廓仪	技术指标	水准仪	全站仪
激光器个数	左右各 1	个数	Dsz-05	HTS-221
图像帧	2048×512	配套设备	塔尺	棱镜、花杆
采样频率/kHz	2~4.5	1 km 往返误差/mm	0.5	3
调查长度/mm	27	垂直精度/mm	0.01	/
采样间隔/mm	0.12	测量步距	250	250
垂直精度/mm	0.01	测量部位	左右轮迹	左右轮迹
行车速度/(km·h ⁻¹)	0~100	天气	晴	晴
曝光时间/μs	5~30	大气压/hPa	998.0	998.0
消耗功率/W	18	胎压/bar	前 2.7 后 3.1	前 2.7 后 3.1
启动功率/W	30	温度/℃	32	32

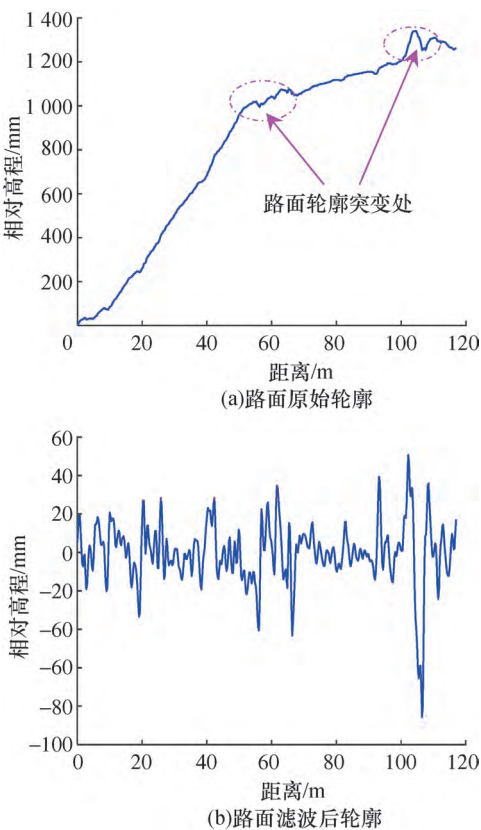


图 9 手动测量道路轮廓高程

将三维线激光轮廓仪测试的轮廓高程进行一维

功率谱密度(PSD)分析如图 10，结果表明：内置的反移动平滑滤波可有效降低 1 m 以下高频噪声以及 30 m 以上的低频噪声，1~30 m 频率波段只有微弱放大。自动采集的平整度结果与手动测量结果对比见表 2，以变速 20~60 km/h 进行测试，手动测量 IRI 为 5.584 m/km，标准差为 0.037 m/km，变异系数为 0.7%，结果表明，三维线激光测试的 IRI 值与手动测量相对误差不超过 3%。

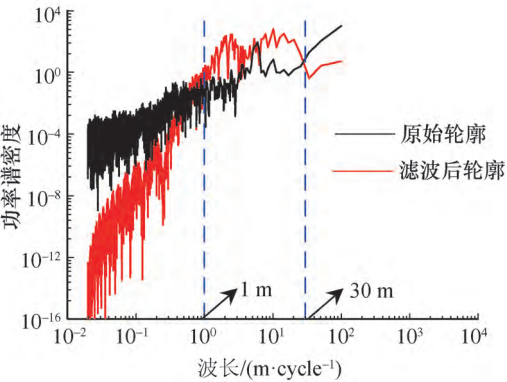


图 10 (网络版彩图)道路轮廓 PSD

表 2 1 号站手动测量与自动测量值对比

测试编号	IRI	绝对误差	相对误差
	m·km ⁻¹	m·km ⁻¹	%
1	5.459	0.125	2.2
2	5.488	0.096	1.7
3	5.415	0.169	3.0

为了测试左右轮廓仪在变速情况下的具体表现，在 2 号站进行了低速、变速条件下的数据采集如图 11 所示。左右轮廓仪在低速情况下采集的 IRI 值非常稳定，在变速 0~60 km 采集的 IRI 值重复性较好且幅值在 1~3 m/km，左轮迹带轮廓仪在起始的前 50 m 左右的数据置信区间上下限值较大，说明在检测车在启动阶段左轮廓仪采数准确性在一定程度上受到悬架上移的影响，而右轮采数质量情况优于左轮，但 JJG075—2010 规范明确要求需要剔除起始阶段的前 50 m，这意味着剔除失真数据段后，左轮廓仪依然满足要求。通过低速重复性按 10 m 步距输出 IRI 值进行重复性验证如图 12 所示，结果表明：在低速情况下的左、右轮廓仪标准差不超过 0.3，变速情况下不超过 0.6，剔除起始段前 50 m 后右轮廓仪 91.4% 的数据变异系数小于 5%，8.6% 的数据变异系数小于 15%，左轮廓仪 94.2% 的数据变异系数小于 5%，5.8% 的数据变异系数小于 10%，这表明三维线激光在调查道路 IRI 每 10 m 步距的指标值具有足够可靠性。变异系数在评价数据重复性及平稳性的时候会受到调查数值本身大小的影响，相同的标准差，原始数值越大，变异系数

越小, 原始数值越小变异系数越大, 因此以上左右轮廓仪采集数据重复性及变异性验证可充分证明开

发的调查系统在低速、变速下的调查 IRI 数据质量良好。

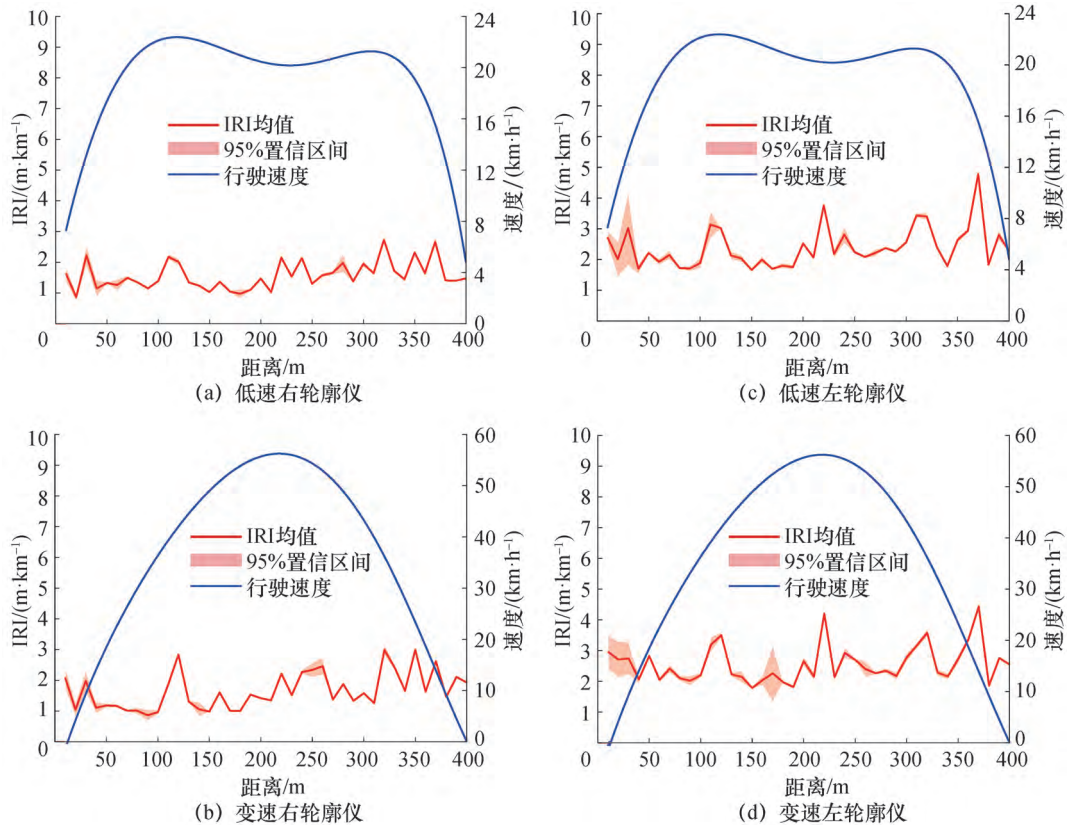


图 11 (网络版彩图) 左右轮廓仪获取平整度数值

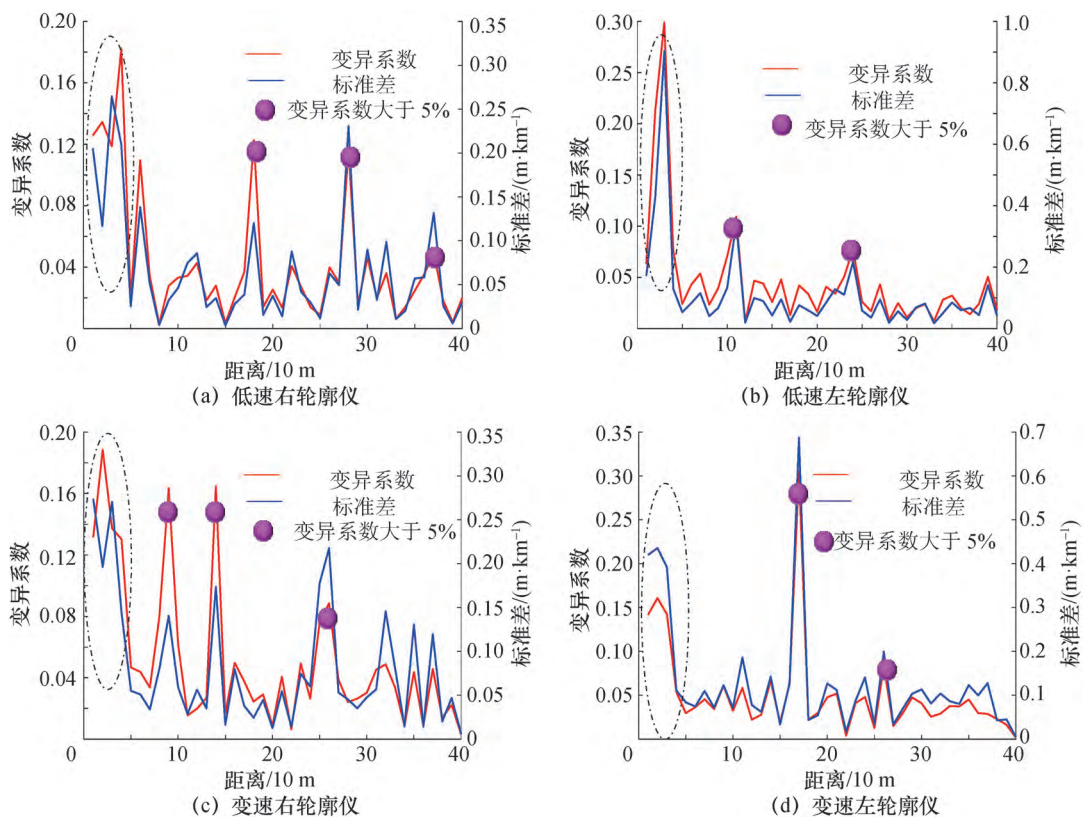


图 12 (网络版彩图) 左右轮廓仪获取平整度变异性

根据 1 号、2 号站的 IRI 调查, 1 号站点 IRI 均值为 5.454 m/km, 2 号站点 IRI 值为 0.9~3 m/km, 美国材料协会 E1926-08 铺面平整度的状况评价如图 13a 所示, 说明 1 号路段属于老旧铺面存在一定

的损坏, 2 号站点属于新修铺面且驾驶舒适度明显优于 1 号站, 如图 13b 所示, 这与现场情况基本一致, 表明开发的三维线激光轮廓仪可有效评估道路铺面平整度状况。

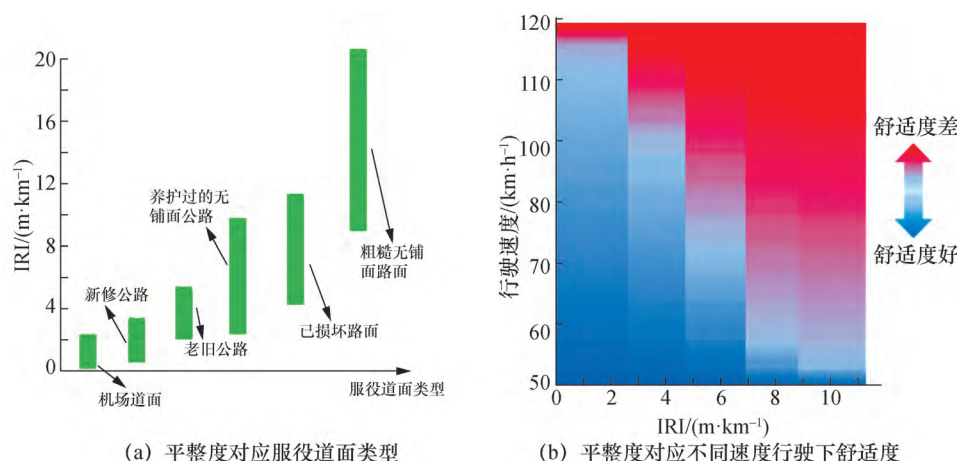


图 13 (网络版彩图)道路平整度质量状况评估

3 结 论

介绍了开发的三维线激光调查系统纵向布置架构及工作原理, 并详细阐述了基于线激光的国际平整度指数计算过程, 本文选取两段不同质量状况道路数据采集实验得出以下结论:

1) 通过道路一维 PSD 分析, 内置的反移动平滑滤波可有效的降低 1 m 以下高频噪声以及 30 m 以上的低频噪声。

2) 基于移动参考算法的三维线激光测试 IRI 值与手动测量相对误差不超过 3%, 表明该自动调查系统可有效替代烦琐的人工测量, 且调查测试可独立与速度进行。

3) 低速情况下的左、右轮廓仪标准差不超过 0.3, 变速情况下不超过 0.6, 剔除起始段前 50 m 后左轮廓仪 91.4% 的数据变异系数小于 5%, 8.6% 的数据变异系数小于 15%, 右轮廓仪 94.2% 的数据变异系数小于 5%, 5.8% 的数据变异系数小于 10%。调查路面平整度状况与实际情况相符, 这表明左右轮廓仪在低速和变速情况下调查的每 10 m 步距 IRI 值可有效满足最新规范。

4) 汽车在启动的前 50 m 左右调查数值会受到算法初始值和悬架上移的影响, 但在实际采集数据过程中注意平稳缓慢起步可以有效解决该问题。

本文开发的三维线激光轮廓仪可以在低速和变速情况下对道面的 IRI 值进行有效评估, 因此该设备除了能适应高速公路的快速调查还可适应于市政

道路拥挤交通的低速调查, 从而为大区域的网级道路平整度状况评估及大数据分析提供技术支撑。

参考文献 (References)

- [1] LOPRENCIPE G, CANTISANI G, DI MASCIO P. Global assessment method of road distresses [Z]. Tokyo: CRC Press, 2015.
- [2] World Road Association. Report of the committee on surface characteristics [C] // XVIII World Road Congress, Brussels, Belgium, 1987.
- [3] HANNA A N. Guide for pavement friction: Background and research [M]. Washington, DC: Nchrp Research Results Digest, 2009.
- [4] SAYERS M, GILLESPIE T D, QUEIROZ C A. International experiment to establish correlation and standard calibration methods for road roughness measurements. Volume 2: Appendices [R]. New York: World Bank, 1986.
- [5] American Association of State and Highway Transportation Officials. Standard practice for accepting pavement ride quality when measured using inertial profiling systems: AASHTO R 54 - 14 [S]. Washington, DC: American Association of State and Highway Transportation Officials, 2014.
- [6] SAYERS M W, KARAMIHAS S M. The little book of profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles [M]. Michigan: The Regent of the University of Michigan, 1998.

- [7] YU J X, CHOU E Y J, YAU J T. Development of speed-related ride quality thresholds using international roughness index [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2006, 1974(1): 47–53.
- [8] XU X, AKBARIAN M, GREGORY J, et al. Role of the use phase and pavement-vehicle interaction in comparative pavement life cycle assessment as a function of context [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 1156–1164.
- [9] MA Y, ZHANG W H, LI S, et al. A rut measuring method based on laser triangulation with single camera [C] // Proceedings of SPIE 9044, 2013 International Conference on Optical Instruments and Technology. Beijing, China: SPIE, 2013.
- [10] 常成利, 荣建, 任福田. 国际平整度指数的计算方法 [J]. 北京工业大学学报, 2012(10): 1543–1547.
CHANG C L, RONG J, REN F T. The calculation method of international flatness index [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012(10): 1543–1547. (in Chinese)
- [11] 周晓青, 颜利, 孙立军. 国际平整度指数与路面功率谱密度关系研究及验证 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(1): 99–104.
ZHOU X Q, YAN L, SUN L J. Study and validation of the relationship between international roughness index and power spectral density [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(1): 99–104. (in Chinese)
- [12] 王大为, 王宠惠, STEINAUER B, 等. 德国不限速高速公路路面平整度评价方法综述 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 105–113, 129.
WANG D W, WANG C H, STEINAUER B, et al. Overview on evaluation methods of pavement evenness for pavements without speed limitations in Germany [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 105–113, 129. (in Chinese)
- [13] 张德津, 李清泉. 公路路面快速检测技术发展综述 [J]. 测绘地理信息, 2015, 40(1): 1–8.
- ZHANG D J, LI Q Q. A review of pavement high speed detection technology [J]. Journal of Geomatics, 2015, 40(1): 1–8. (in Chinese)
- [14] CHOU C P, CHU H J, CHEN A C. Advanced runway groove identification [J]. Measurement, 2020, 152: 107272.
- [15] CAI Z X, LI L, HU Y P, et al. Automated groove identification and measurement using long short-term memory unit [J]. Measurement, 2019, 141: 152–161.
- [16] GROGG M G, SMITH K D. PCC pavement smoothness: Characteristics and best practices for construction [R]. Washington: Office of Acquisition Management, 2001.
- [17] 马荣贵, 宋宏勋. 嵌入式激光路面平整度检测系统研究 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(5): 826–829.
MA R G, SONG H X. An embedded laser road roughness measurement system [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2008, 32(5): 826–829. (in Chinese)
- [18] 赵康, 丁磊, 王金洋. 双激光位移传感器测量路面平整度系统实现 [J]. 汽车实用技术, 2012(5): 61–64.
ZHAO K, DING L, WANG J Y. Double laser displacement sensor measurement of pavement system [J]. Automobile Applied Technology, 2012(5): 61–64. (in Chinese)
- [19] 周游佳, 吴润华. 基于三维技术的道路综合检测车 [J]. 公路工程, 2019, 44(3): 61–64.
ZHOU Y J, GUO R H. Road inspection vehicle based on 3D technology [J]. Highway Engineering, 2019, 44(3): 61–64. (in Chinese)
- [20] HE L Y, WU S S, WU C Y. Robust laser stripe extraction for three-dimensional reconstruction based on a cross-structured light sensor [J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 823–832.
- [21] SAYERS M W. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile [J]. Transportation Research Record, 1995(1501): 1–12.
- (责任编辑 金延秋)