

文章编号:1671-8879(2006)02-0038-04

激光路面平整度检测系统

马荣贵¹, 宋宏勋¹, 来旭光²

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 河南省公路管理局, 河南 郑州 450001)

摘要:为提高路面平整度检测水平,提出了基于基准传递原理的路面平整度检测方法,给出了采用 5 个激光位移传感器检测路面纵断面相对标高的计算公式,在不同等级路面上与精密水准仪测量方法进行了对比试验。结果表明,依据基准传递原理的路面平整度激光检测系统不受检测速度限制,可给出被测道路的纵断面曲线和国际平整度指数(IRI)。

关键词:道路工程;路面;平整度;国际平整度指数(IRI);纵断面;激光位移传感器
中图分类号:U416.06 **文献标识码:**A

Pavement Roughness Measurement System Based on Laser Displacement Sensors

MA Rong-gui¹, SONG Hong-xun¹, LAI Xu-guang²

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Department of Highway Administration, Henan Province Government, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: To improve the level of road roughness measurement, a method based on the principle of datum transfer with laser displacement sensors is presented. The computation formulae of profile are derived. Tests on different road surfaces by this method are carried out, the results are compared with the one of rigid survey. The results indicate that the developed system on datum transfer can give the road profiling and international roughness index without any velocity restraint. 4 figs, 6 refs.

Key words: road engineering; pavement; roughness; international roughness index (IRI); road profiling; laser displacement sensor

0 引言

路面平整度无论是在道路施工过程中,还是在质量验收和养护管理中都是一项必检的重要指标,它直接影响到行车的舒适性和安全性^[1-2]。目前,规范中规定的平整度评定方法有多种:3 m 直尺给出的是最大间隙值;连续式平整度仪给出的是均方差;颠簸累积仪使用的是颠簸累积值^[3];激光平整度仪

给出的是国际平整度指数(IRI)。为研究各项指标之间的关系,交通部和各省交通部门都曾立项^[4],以期实现各种评价指标的统一。早在 20 世纪 80 年代,世界银行组织就为确立平整度评价指标的唯一性提出了国际平整度指数(IRI)指标^[5]。国际平整度指数仅与路面的纵断面标高有关,具有客观性和唯一性,它已经在国外实施了多年。

目前中国的规范中已经引进了国际平整度指数

指标,同时很多单位也引进了能够测量路面纵断面、输出国际平整度指数的激光平整度仪^[6]。路面纵断面的测量可分为惯性原理和非惯性原理。国外的激光检测仪一般采用惯性原理,即在检测系统中利用惯性元件(加速度计)校正车辆本身的振动。该方法的不足之处是由于频率响应的原因为,行驶车速不能低于 30 (km · h⁻¹),并对车辆的质量有严格的要求。为了克服惯性基准中的缺点,本文在光学检测技术的基础上,提出了基于双对称结构的非惯性基准传递原理,该原理的最大特点是不受行驶速度的影响,甚至可以采用人力推动行车来进行施工过程平整度的控制。

1 检测原理

如图 1 所示,在一标准刚性梁上,分别安装了 5 个激光位移传感器 1、2、3、4、5(为了分析方便,传感器 2、4 用虚线表示),其中传感器 2 和 4 以 3 为中点,间隔 2 δ ,传感器 1 和 5 以 3 为中点,间隔 2 $N\delta$ ($N > 2$),由此形成了步长分别为 δ 和 $N\delta$ 的小步长和大步长双对称系统。

X 轴是测量过程中的标高基准线,在整个行驶测量过程中,该坐标系一直保持不变的。

1.1 大步长(1、3、5)检测纵断面原理

图 1 中,传感器 1、3、5 组成了步长为 $N\delta$ 的大步长测量系统。 $H_1^{(1)}$ 、 $H_3^{(1)}$ 、 $H_5^{(1)}$ 为车行驶到位置 1 时传感器 1、3、5 输出的各传感器到路面的距离。 $H_1^{(2)}$ 、 $H_3^{(2)}$ 、 $H_5^{(2)}$ 为车行驶一个步长 $N\delta$ 到位置 2 时,传感器 1、3、5 输出的各传感器到路面的距离。 $Y(1)$ 、 $Y(2)$ 、 $Y(3)$ 、 $Y(4)$ 为路面纵断面上各点(间距 $N\delta$)到相对标高基准线的高度值(消除振动后)。

从图 1 中可以看出,由于车辆振动,检测梁的位置向上移动了一个距离。每当检测梁向前移动一个步长 $N\delta$ 时,新位置(2)中传感器 1 和 3 都重复测量移动前 3 和 5 测量过的测点 $Y(2)$ 、 $Y(3)$ 。根据两点决定一条直线原理,不但可以计算出检测梁向上的振动位移,还可以计算出新测点 5 相对于基准线的标高 $Y(4)$ 。

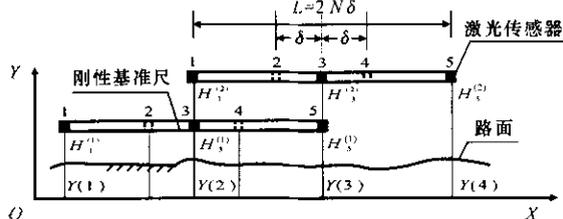


图 1 平整度基准传递检测原理图

由图 1 中的几何关系可以得出

$$\frac{1}{2}(H_1^{(1)} + Y(1) + H_5^{(1)} + Y(3)) = H_3^{(1)} + Y(2) \quad (1)$$

$$\frac{1}{2}(H_1^{(2)} + Y(2) + H_5^{(2)} + Y(4)) = H_3^{(2)} + Y(3) \quad (2)$$

由式(1)、(2)得

$$Y(3) = 2H_3^{(1)} - H_1^{(1)} - H_5^{(1)} + 2Y(2) - Y(1) \quad (3)$$

$$Y(4) = 2H_3^{(2)} - H_1^{(2)} - H_5^{(2)} + 2Y(3) - Y(2) \quad (4)$$

式中:下标对应传感器序号;上标对应检测梁移动的次數;Y 对应间隔为 $N\delta$ 的道路纵断面相对于标高基准线的相对标高。

由式(3)、(4)可知,路面纵断面标高的计算是一个递推公式,任意点的标高可表示为

$$Y(n) = 2H_3^{(n-2)} - H_1^{(n-2)} - H_5^{(n-2)} + 2Y(n-1) - Y(n-2) \quad (n \geq 3) \quad (5)$$

以 $Y(n)$ 为 Y 轴,以 $nN\delta$ 为 X 轴,即可描绘出由大步长传感器 1、3、5 测得的被测路面纵断面形状。

1.2 小步长(2、3、4)检测纵断面原理

图 1 中,传感器 2、3、4 同样组成了一个步长为 δ 的小对称系统,根据以上分析,小步长系统的相对标高计算公式可表示为

$$y(m) = 2h_3^{(m-2)} - h_2^{(m-2)} - h_4^{(m-2)} + 2y(m-1) - y(m-2) \quad (m \geq 3) \quad (6)$$

式中: $h_2^{(m-2)}$ 、 $h_3^{(m-2)}$ 、 $h_4^{(m-2)}$ 为车行驶 $m-2$ 个步长 δ 时,传感器 2、3、4 输出的各传感器到路面的距离; $y(m)$ 为消除振动后计算出的纵断面上间隔 δ 的各点距标高基准线的相对高度。

同样,每当检测梁向前移动一个步长 δ 时,新位置中传感器 2、3 都重复测量移动前 3、4 测量过的测点。根据两点决定一条直线原理,不但可以计算出检测梁向上的振动位移,还可以计算出新测点 4 相对于基准线的标高。

以 $y(m)$ 为 Y 轴,以 $m\delta$ 为 X 轴,同样可以描绘出由小步长传感器 2、3、4 测得的被测路面纵断面形状。

1.3 相对纵断面

大步长对称系统和小步长对称系统分别以不同的步长给出了同一个纵断面的标高曲线,但是大步长对称系统只能给出波长大于 $2N\delta$ 的路面波长,无法给出纵断面局部更准确的标高信息;而小步长对

称系统却可以给出波长大于 2δ 的路面纵断面信息。由于测量误差的存在,随着测量里程的增加,误差累计将呈幂级数递增,因此最终相对纵断面应由大步行长和小步行长叠加而成,测量间隔由小步行长 δ 决定。

由式(5)、(6)可以看出,基于双对称结构的基准传递系统消除了车辆颠簸振动的影响,同时,由于没有惯性元件,测量结果与测量时的行车速度无关。

通过式(5)、(6)叠加,可计算出被检测路面的纵断面相对高程,再按照 1/4 车辆数学模型振动方程的求解方法,就可以得出被测路面的国际平整度指数。

2 系统结构

根据以上的理论分析及其相关技术,我们研制开发了拖挂式的激光路面平整度检测系统(图 2)及配套的计算机采集、分析软件。该系统主要包括激光位移传感器、接口控制器、系统电源、刚性检测梁、专用检测车架、牵引架、行走轮、防尘遮光板、警示灯牌等。该系统采用 5 个激光探头,激光探头安装固定在刚性检测梁上,彼此间隔距离成比例。激光探头采集的数据由系统接口控制器预处理后传输到牵引车上的计算机中,完成数据的存储仪检测和处理。系统开发的处理软件可直接计算国际平整度指数,也可进行路面相对纵断面的分析和功率谱分析。为减小检测梁在运输及行驶检测过程中由于路面颠簸、振动、冲击引起的变形,检测梁用弹簧悬浮在车架中间。

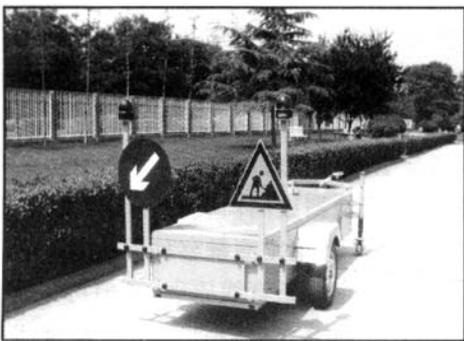


图 2 激光路面平整度检测系统

3 应用与检测结果

为了对激光平整度检测系统进行标定,我们通过目视法在河南许昌确定了 8 个路段。先用精密水准仪在 300 m 的路段上每隔 250 mm 测出纵断面高程,然后运用程序计算路面的国际平整度指数,再用激光平整度检测系统在选取路段进行测试,取先后 3 次测试的平均值作为测试结果。试验结果见图 3。

经回归分析可知,激光检测结果 $[IRI_c]$ 和精密水准检测 $[IRI_s]$ 之间存在以下关系

$$[IRI_s] = 0.97[IRI_c] + 0.09 \quad (7)$$

两者之间的相关系数为 0.99,相对误差不超过 4%,测试结果达到了世界银行组织规定的一类平整度检测仪器标准。

图 4 为激光路面平整度检测系统和精密水准仪对同一段路面检测得到的路面相对纵断面曲线。从图 4 中可以看出,两种检测仪器的测量结果比较吻合,坑洼和凸起一一对应。图 4(a)、(b)曲线局部的差别,主要是由于两种检测方法的采样间隔不一致(精密水准仪每间隔 250 mm 采 1 个点,激光平整度检测系统每间隔 247 mm 采 5 个点取平均值)、检测行走路线不重合等因素引起的,因而也造成两种检测方法计算的国际平整度指数有差别,精密水准仪的检测结果 $[IRI_s] = 4.72$,激光平整度检测系统检测结果 $[IRI_c] = 4.65$ 。

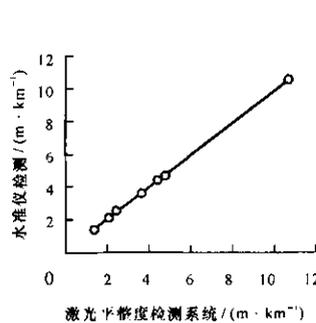


图 3 激光平整度检测和水准仪检测结果对比

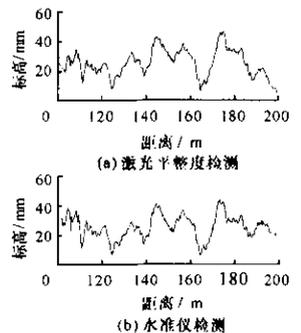


图 4 路面相对纵断面检测结果

4 结 语

通过对比试验,并经过西安—潼关、潼关—三门峡、安阳—鹤壁、武威—高台等上千公里高速公路的检测试验,可以得出以下结论:

(1) 基于双对称基准传递原理的激光平整度检测系统可以准确给出被测路面的局部纵断面曲线,测量间隔为 247 mm。

(2) 检测系统克服了惯性基准的缺点,检测结果不受检测速度、路面颠簸的影响。检测速度可快可慢,比较适合中国的道路实际情况。

参考文献:

References:

- [1] 严志刚,盛洪飞,陈彦江. 桥面平整度对大跨度钢管混凝土拱桥车辆振动的影响[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 41-44.

- YAN Zhi-gang, SHENG Hong-fei, CHEN Yan-jiang. Effects of Bridge Deck Roughness on Vibration of Long-span Concrete Filled Steel Tube Arch Bridge due to Vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 41 - 44.
- [2] 王新明,王秉纲. 高速公路路面功率谱[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(2): 53 - 56.
WANG Xin-ming, WANG Bing-gang. Expressway Pavement Power Spectral Density[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(2): 53 - 56.
- [3] 周波,朱先祥,孙文. 车载式颠簸累积仪在路面平整度检测中的应用[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2004, 27(9): 1095 - 1098.
ZHOU Bo, ZHU Xian-xiang, SUN Wen. Application of Vehicular Bump-integrator in the Pavement Regularity Inspection[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2004, 27(9): 1095 - 1098.
- [4] 蔚晓丹. 国际平整度指数 IRI 作为路面平整度评价指标的研究[J]. 公路交通科技, 1999, 16(增 1): 9 - 13.
WEI Xiao-dan. Research on the International Roughness Index (IRI) as the Pavement Roughness Index [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1999, 16(Sup. 1): 9 - 13.
- [5] Michel W Sayers, Thomas D Gillespie, William D O Paterson. Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements [R]. World Bank Technical Paper Number 46. The World Bank, Washington DC, January, PB86-165263, 1986.
- [6] 马 磊,王选仓,王秉纲,等. DYNATEST 5051 RSP 道路激光平整度测试车[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2003, 23(1): 23 - 26.
MA Biao, WANG Xuan-cang, WANG Bing-gang, et al. DYNATEST 5051 RSP Road Laser Roughness Testing Vehicle[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(1): 23 - 26.

~~~~~  
(上接 33 页)

等特征没有进行深入分析和定量评价,只是对公路类型及其区域差进行了简化处理。

(3)通过对 43 个调查点的调查资料和公路分布特征的定量分析,认为陕西北部山丘区公路开挖侵蚀数量较大,该区年均边坡侵蚀量为  $510\ 710\ (\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$ ,而且区域差异明显,对公路边坡稳定性和生态环境均有较大影响。

(4)建议相关部门,在对道路建设引起的水土流失进行综合治理的同时,应该加强道路边坡侵蚀观测,以提高公路边坡稳定性,预防和减轻其道路安全引起的危害。

参考文献:

References:

- [1] 王 飞,李 锐,杨勤科. 公路建设水土流失过程研究[J]. 公路, 2003(8): 148 - 152.  
WANG Fei, LI Rui, YANG Qin-ke. A Study on Soil Erosion and Soil Water Conservation of Highway Construction[J]. Highway, 2003(8): 148 - 152.
- [2] 汪益敏,王秉纲. 公路土质路基边坡面冲刷稳定性的模糊综合评价[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 24 - 29.  
WANG Yi-min, WANG Bing-gang. Fuzzy Evaluation Method of Scouring Stability on Soil Subgrade Slope [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 24 - 29.
- [3] 水利部国际合作与科技司. 水利技术标准汇编(水土保持卷)[G]. 北京:中国水利水电出版社, 2002.  
Department of International Cooperation and Science and Technology, Ministry of Water Resources. Compilation of Criterion of Technology of Water (Resources Soil and Water Conservation) [G]. Beijing: China Water Power Press, 2002.
- [4] 王 飞. 人类活动对区域水土流失影响的定量评价[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2004.  
WANG Fei. Regional Impact of Human Activities on Soil Loss[D]. Shaanxi Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2004.
- [5] 杨晓平. 现代地貌过程中的人类作用[J]. 宁波大学学报:理工版, 1998, 11(2): 100 - 104.  
YANG Xiao-ping. On the Human Action to the Present Geomorphic Processes[J]. Journal of Ningbo University: Edition of Science and Technology, 1998, 11(2): 100 - 104.
- [6] 李家春,田伟平. 黄土路堤坡顶及土路肩暴雨冲蚀破坏机理试验[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004, 24(2): 27 - 29.  
LI Jia-chun, TIAN Wei-ping. Rainfall Erode Mechanism on Loess Road Shoulder and Top of Side-slope [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 27 - 29.