

文章编号:1671-8879(2016)03-0001-06

检测车辆横向偏移对车辙深度计算误差分析

惠 冰^{1,2}, 李甜甜³, 王 迪¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为研究检测车辆横向偏移对车辙深度计算结果的影响,根据实测 13 点激光数据构建车辙曲线,运用 MATLAB 软件编制了相应的横向偏移模拟程序,以偏移前后车辙深度的绝对误差和相对误差为指标,分析轻、重 2 个严重等级车辙在不同偏移距离和左、右 2 个偏移方向的深度误差变化规律与原因。研究表明:检测车辆横向偏移距离越大,车辙深度的绝对误差和相对误差均逐渐增大;车辙深度的绝对误差最大低估 6.4 mm,相对误差达到 29.2%,横向偏移产生的绝对误差会造成车辙严重等级的低估,可能导致路况评价与养护决策的误判;车辙深度误差主要受最深辙槽位置、槽壁坡度和隆起高度、宽度等横断面形态特征的影响。检测车辆行驶应偏向最深辙槽和槽壁坡度大的方向以全面获取最深辙槽形态,减少横向偏移对车辙深度计算结果的影响。

关键词:道路工程;车辙;检测;车辆偏移;误差分析

中图分类号:U411 **文献标志码:**A

Calculation error analysis of detecting lateral offset of vehicle on rut depth

HUI Bing^{1,2}, LI Tian-tian³, WANG Di¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the impact of vehicle lateral offset on the rut depth, transverse rut profiles were established based on 13-point laser data. Through MATLAB programming, the vehicle lateral offset was simulated. Absolute errors and relative errors of rut depth before and after vehicle wandering were used as indexes to analyze the changing law and reason of rut depth errors with low and high severity levels when lateral offset happens in different directions and with different distances. The results show that with the distance of vehicle lateral offset increases, the value of absolute and relative errors will become as much as 6.4 mm and 29% respectively. The depth absolute error resulted from lateral offset will underestimate rut severity levels, and may lead to the mistake of road condition assessment and pavement maintenance decision. The degree of rut depth errors are mainly influenced by the location of deeper rut, rut

收稿日期:2015-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51508034);陕西省交通运输科技项目(12-15K);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821153104,310821151006)

作者简介:惠 冰(1982-),男,陕西米脂人,讲师,工学博士,E-mail:hubing323@qq.com。

slop and hump width/height. Therefore, the vehicle lateral offset should be detected in the direction of deeper rut and bigger slope so as to obtain the shape of deeper rut and then minimize the impact of vehicle lateral offset on rut depth measurement accuracy. 3 tabs, 6 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; rut; detection; vehicle lateral offset; error analysis

0 引言

准确、可靠的车辙深度检测结果是路况评价与养护决策的重要依据之一^[1-3]。传统的人工直尺法因检测效率低且危险性高,已逐渐被非接触、自动化的多点激光检测设备取代^[4-9]。目前中国普遍采用 13 点激光设备进行国省干线公路的车辙检测,但是在检测过程中受驾驶人疲劳、道路线形与沿线环境等主、客观因素影响,检测车辆难以始终沿车道中心线行驶,将不可避免地产生横向偏移^[10-11],导致无法采集完整的车辙形态,影响车辙深度计算结果的准确性与可靠性^[12-15]。国内外学者针对检测车辆横向偏移对车辙深度计算结果的影响进行了研究。Simpson 利用 5 点检测设备获取的车辙横断面形态,模拟计算了偏移 $\pm 50 \sim \pm 250$ mm 范围内的车辙深度,结果表明横向偏移会使检测结果出现误差,并且激光点越多误差影响越小^[16];Bennett 等利用 30 点激光检测设备,对比了右偏移 50、100、150 mm 后的车辙深度,发现随着偏移距离的增加,车辙深度误差逐渐增大,车辙横断面形状会对偏移误差造成影响^[10];Mallela 等研究发现偏移误差存在高估或低估,并指出实际横向偏移距离可达 500 mm^[11];马荣贵等模拟了等间距 l 分布的 n 个传感器获取的对称 W 形车辙,得出了向右偏移时的最大偏移误差发生在采样点 $l/2$ 处的结论^[17]。

但是上述研究没有针对中国广泛采用的非等间

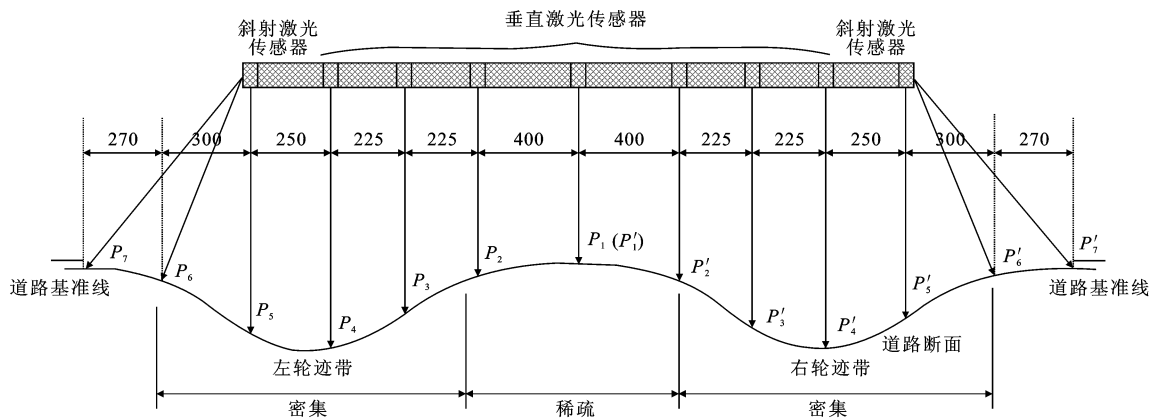
距 13 点激光检测设备,没有考虑车辙形态与严重等级的影响,并且横向偏移距离较小无法涵盖实际的偏移范围。为此,本文针对 13 点激光检测设备获取的实测路段车辙形态,分轻、重 2 个严重等级,共选择了 10 个典型车辙断面,计算偏移不同距离和方向后的车辙深度,分析检测车辆横向偏移对车辙深度计算误差的规律与原因,为提升车辙检测结果的准确性和可靠性提供参考。

1 横向偏移造成车辙深度计算误差的原因

1.1 车辙检测设备与深度计算方法

本文采用的 13 点激光车辙检测设备,检测横梁宽度为 2 300 mm,沿横梁方向非均匀布设有 9 个垂直激光传感器,其分布间距如图 1 所示,在轮迹带处密集,而非轮迹带处稀疏,左、右两端各布设 2 个斜射激光传感器,有效检测宽度可达 3 600 mm。图中 $P'_1, P'_2, \dots, P'_7, P_1, P_2, \dots, P_7$ 为激光车辙照射点。

激光位移传感器所采集的车辙横断面相对高程原始数据见下页表 1。第 1 行 G 代表国道,311 表示道路编号;A 表示上行线(若为 B 则表示下行线),19640 表示检测点的桩号,185 和 182 分别表示左、右辙槽的车辙深度(单位 0.1 mm);第 2 行为 13 点激光位移传感器量测的路面各点相对高程数据(单位 0.1 mm);第 3 行为 13 个激光点在路面的横向分布坐标(单位 mm)。



单位:mm

图 1 激光位移传感器横向分布

Fig. 1 Lateral distribution of laser displacement sensor

表 1 13 点激光车辙检测设备原始数据	
Tab. 1 Raw data of 13 points based laser rut detection equipment	
第 1 行	G311A,19640,185,182
第 2 行	169,112,0,15,70,124,158,105,46,69,108,225,257
第 3 行	761,1 115,1 400,1 650,1 875,2 100,2 500,2 900,3 125,3 350,3 600,3 891,4 259

通过激光位移传感器获取的相对高程数据无法直接得到车辙深度,需将 13 点激光在路面的横向分布坐标(表 1 中第 3 行)及其量测的离散点高程数据(表 1 中第 2 行)还原成近似连续的车辙形态,再按《公路路基路面现场测试规程》(JTG E60—2008)(以下简称《规程》)中“T0973-3”规定的包络线法,计算得出两侧轮迹处横断面包络线与道路表面间的最大垂直距离,即为车辙深度^[18]。

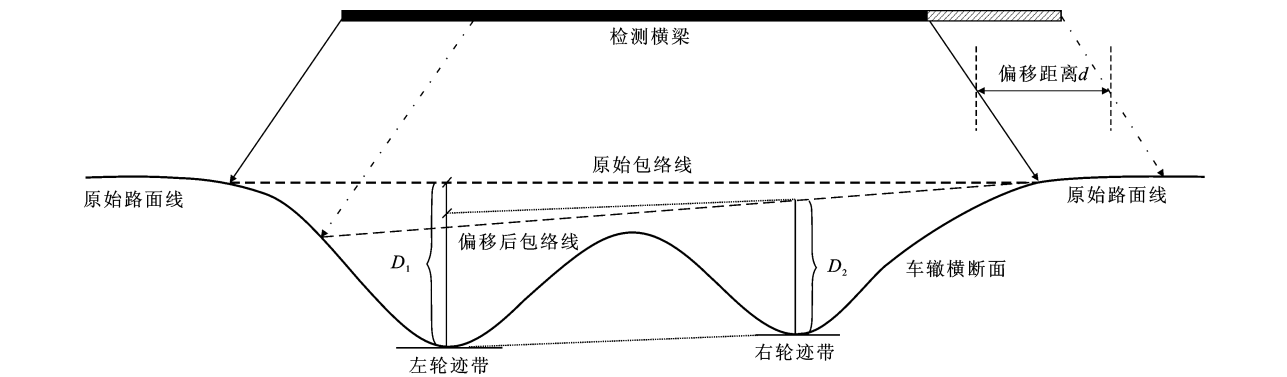


图 2 横向偏移造成车辙深度计算误差
Fig. 2 Calculation error of rut depth caused by lateral offset

2 模拟试验设计

2.1 实测车辙断面选择

采用 2013 年 G311 上行 K0~K19 路段的车辙实测数据。利用 13 点激光在路面的横向分布坐标和量测获取的离散点相对高程坐标,建立近似连续车辙横断面形态,再按照《规程》建议的包络线法计算车辙深度^[19]。通过对实测路段车辙形态分析发现,主要存在 2 类车辙形态,分别如图 3 所示。图 3(a)车辙的中部与两侧均没有隆起,左右车辙槽深度 D 相近,即无隆起车辙;图 3(b)车辙右侧产生隆起,最大车辙深度位于左车辙槽内,即右侧隆起车辙。

中国《公路技术状况评定标准》(JTG H20—2007)将轮迹处深度大于 10 mm 的纵向带状凹槽定义为车辙,轻度车辙的深度为 10~15 mm,重度车辙深度大于 15 mm^[20]。本文采用上述标准分轻、重 2 个严重等级,共筛选出 10 组数据,用以分析不同严重等级车辙受横向偏移的影响。

1.2 横向偏移对车辙深度计算结果影响

由于 13 点激光设备的有效检测宽度小于 3.75 m 车道宽度,同时激光点数量有限且非等间距分布,检测车辆横向偏移导致无法采集完整的车辙横断面形态,造成偏移后的车辙形态变化,会对在此基础上计算得出的车辙深度结果产生影响。图 2 为偏移前后车辙深度计算结果对比。图中偏移前 13 点激光可获取完整的车辙横断面形态,此时按照包络线法计算得出的车辙深度为 D_1 ;当向右偏移距离 d 后,检测设备无法获取左侧最深辙槽的完整形态,在此基础上计算的车辙深度为 D_2 。可见,偏移前后的车辙深度存在较明显差异,直接影响检测结果的准确性和可靠性。

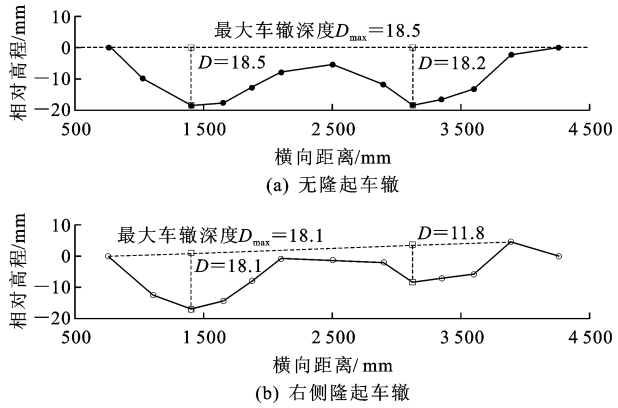


图 3 实测两类车辙形态
Fig. 3 Two shapes of real rut section

2.2 模拟方法与评价指标

以偏移前的车辙横断面形态为实际路表保持固定,当偏移水平距离 d 时,保持 13 点激光横向分布间距不变,将各点沿偏移前的车辙形态移动相同水平距离 d ,得到偏移后的横向分布与相对高程数据;在此基础上,建立偏移后的车辙横断面形态并计算车辙深度 D_2 。本文采用 MATLAB R2010a 软件通

过自编程序实现上述模拟方法。图 4 为无隆起车辙的横向偏移模拟结果,图中虚线为偏移前车辙形态,实线为向右偏移 200 mm 后的车辙形态。

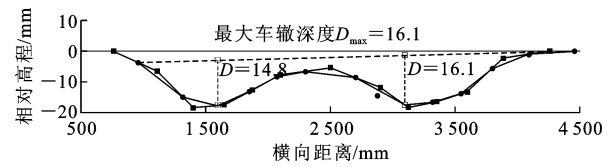


图 4 横向偏移模拟算法

Fig. 4 Simulation algorithm of lateral offset

为全面评价横向偏移对车辙深度计算结果的影响,本文采用绝对误差 ΔD 和相对误差 δD 评价横向偏移前后车辙深度的变化情况。

表 2 无隆起车辙的绝对误差和相对误差

Tab. 2 Absolute and relative errors of symmetrical rut shape

断面编号	严重等级	实测深度/mm	左 偏 移									
			+ 100 mm		+ 200 mm		+ 300 mm		+ 400 mm		+ 500 mm	
			$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$
6	轻	10.5	-0.9	8.6	-0.3	2.9	-0.9	8.6	-0.8	7.6	-1.2	11.4
7	轻	12.9	-0.8	6.2	-0.5	3.9	-0.9	7.0	-0.6	4.7	-1.7	13.2
8	轻	14.3	-0.5	3.5	-0.4	2.8	-0.7	4.9	-0.8	5.6	-1.1	7.7
9	重	18.5	-0.7	3.8	-0.8	4.3	-1.2	6.5	-0.8	4.3	-2.8	15.1
10	重	21.9	-1.4	6.4	-1.0	4.6	-2.3	10.5	-2.6	11.9	-4.2	19.2

断面编号	严重等级	实测深度/mm	右 偏 移									
			- 100 mm		- 200 mm		- 300 mm		- 400 mm		- 500 mm	
			$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$
6	轻	10.5	-1.1	10.5	-1.6	15.2	-2.3	21.9	-2.6	24.8	-2.8	26.7
7	轻	12.9	-1.2	9.3	-1.8	14.0	-2.0	15.5	-2.9	22.5	-3.6	27.9
8	轻	14.3	-1.7	11.9	-2.6	18.2	-2.9	20.3	-3.5	24.5	-4.0	28.0
9	重	18.5	-1.6	8.6	-2.4	13.0	-2.9	15.7	-4.3	23.2	-5.2	28.1
10	重	21.9	-1.5	6.8	-2.1	9.6	-2.7	12.3	-5.2	23.7	-6.4	29.2

从表 2 可以得出以下结论。

(1)随着横向偏移距离的增加,绝对误差和相对误差均逐渐增大;向左偏移的绝对误差和相对误差均小于向右偏移;随着车辙严重程度的增加,偏移造成的绝对误差逐渐增大,但对相对误差的影响较小。在实际检测过程中,不仅要尽量减小横向偏移距离,同时应尽量偏向深度误差较小的方向,尤其在车辙严重等级较高的路段。

(2)无隆起车辙产生的绝对误差最大为 -6.4 mm,相对误差最大为 29.2%;重度车辙(断面 9)向右偏移 400 mm 时,车辙深度的绝对误差为 -4.3 mm,偏移后车辙深度减小为 14.2 mm,将导致车辙严重等级低估为轻度。轻度车辙(断面 7)向右偏移 500 mm 时,车辙的绝对深度误差为 -3.6 mm,偏移后车辙深度为 9.3 mm,按照文献

$$\Delta D = D_2 - D_1 \tag{1}$$

$$\delta D = \left| \frac{D_2 - D_1}{D_1} \right| \tag{2}$$

式中: D_1 为偏移前车辙深度; D_2 为偏移后车辙深度; ΔD 为偏移后车辙深度偏离真实值的大小,表示偏移后车辙深度计算结果的准确性; δD 为绝对误差与偏移前车辙深度真实值之比,表示偏移后车辙深度计算结果的可靠性。

3 模拟结果与分析

3.1 无隆起车辙的深度计算误差模拟结果
本文对无隆起车辙偏移前后的深度误差进行了计算,结果如表 2 所示。

[18]、[20]不属于车辙;断面 6 向右偏移后车辙深度均小于 10 mm,也存在车辙严重等级的误判。表明横向偏移对无隆起车辙深度计算结果影响显著,产生的绝对误差可能会导致车辙严重等级的误判;从养护管理的角度,严重等级的误判可能造成路况评价与养护决策的失误。

3.2 右侧隆起车辙的深度计算误差模拟结果
本文对右侧隆起车辙偏移前后的深度误差进行了计算,结果如下页表 3 所示。

从表 3 可以得出以下结论。
(1)随着向左偏移距离的增加,车辙深度绝对误差和相对误差均先减小后增大,在 400 mm 时的深度误差最小;左侧偏移的绝对误差和相对误差均小于右侧偏移;随着车辙严重程度的增加,偏移造成的绝对误差逐渐增大,但对相对误差的影响较小。表

表 3 有隆起车辙的绝对误差和相对误差

Tab. 3 Absolute and relative errors of upheave rut shape

断面编号	严重等级	实测深度/mm	左偏移									
			+100 mm		+200 mm		+300 mm		+400 mm		+500 mm	
			$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$
1	轻	12.5	-1.3	10.4	-0.9	7.2	-1.2	9.6	-0.2	1.6	-1.1	8.8
2	轻	14.7	-1.3	8.8	-0.8	5.4	-0.3	2.0	-0.4	2.7	-0.7	4.8
3	重	16.5	-1.8	10.9	-1.2	7.3	-0.9	5.5	-0.5	3.0	-0.9	5.5
4	重	18.1	-2.3	12.7	-1.1	6.1	-0.8	4.4	-0.3	1.7	-0.7	3.9
5	重	21.6	-2.1	9.7	-1.5	6.9	-1.1	5.1	-0.6	2.8	-1.2	5.6

断面编号	严重等级	实测深度/mm	右偏移									
			-100 mm		-200 mm		-300 mm		-400 mm		-500 mm	
			$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$	$\Delta D/\text{mm}$	$\delta D/\%$
1	轻	12.5	-2.0	16.0	-3.6	28.8	-3.0	24.0	-3.3	26.4	-3.8	30.4
2	轻	14.7	-1.9	12.9	-3.2	21.8	-1.8	12.2	-3.1	21.1	-2.5	17.0
3	重	16.5	-3.5	21.2	-4.1	24.8	-2.9	17.6	-4.5	27.3	-4.3	26.1
4	重	18.1	-4.2	23.2	-5.0	27.6	-4.9	27.1	-5.3	29.3	-5.8	32.0
5	重	21.6	-4.4	20.4	-5.1	23.6	-4.0	18.5	-4.9	22.7	-5.6	25.9

明横向偏移导致的车辙深度计算误差受隆起影响较大,同时控制偏移方向对于降低车辙深度计算误差有重要影响。

(2)右侧隆起车辙受横向偏移影响的深度绝对误差最大为-5.8 mm,相对误差最大为 32.0%;同时,重度车辙(断面 3)向左偏移 100 mm 时,车辙深度绝对误差为-1.8 mm,偏移后车辙深度减小为 14.7 mm,车辙严重等级低估为轻;断面 3、4 向右偏移达到 100 mm 时,产生绝对误差均导致车辙严重程度的低估。轻度车辙(断面 1)向右偏移 200 mm 时,车辙深度的绝对误差为-3.6 mm,偏移后的车辙深度为 8.9 mm,按照文献[18]、[20]不属于车辙。表明横向偏移对右侧隆起车辙深度计算结果的准确性和可靠性影响较大,也可导致车辙严重等级的误判。

3.3 原因分析

通过上述分析,不同偏移方向的车辙深度计算

误差存在明显差异。图 5 为无隆起车辙偏移前后的对比。可以看出,偏移前车辙深度为 18.5 mm,向右偏移 300 mm 后车辙深度为 15.6 mm,绝对误差达到 2.9 mm。这是由于车辙的最大深度在左车辙槽,并且左车辙槽的槽壁坡度较大,向右偏移时左端点高程明显减小,无法获取最深车辙槽的完整形状,导致车辙深度计算误差快速增大。向左偏移时,由于右车辙槽的槽壁坡度平缓并能获取完整的最深车辙槽形状,对车辙深度计算误差影响较小。

下页图 6 为右侧隆起车辙偏移前后对比, h 为隆起高度。可以看出,偏移前的车辙深度为 18.1 mm,向左偏移 500 mm 后车辙深度为 17.4 mm,绝对误差仅为 0.7 mm。这是因为偏移前车辙最大深度在左车辙槽,同时受右侧隆起高度与宽度影响,随着左偏移距离逐渐增大,右端点逐渐接近隆起最高点;偏移达到 400 mm 时与隆起点最接近,此时可完整地获取最深车辙槽形态并在深度

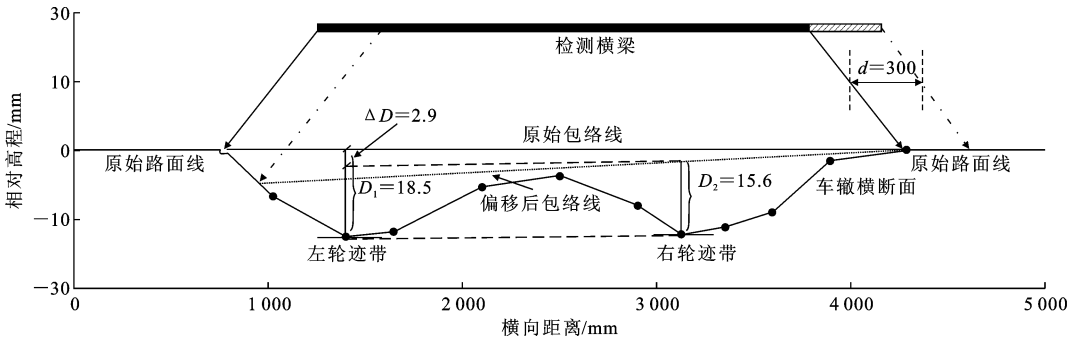


图 5 无隆起时车辙形状特征对横向偏移的影响

Fig. 5 Effect of symmetrical rut shape characteristics on lateral offset

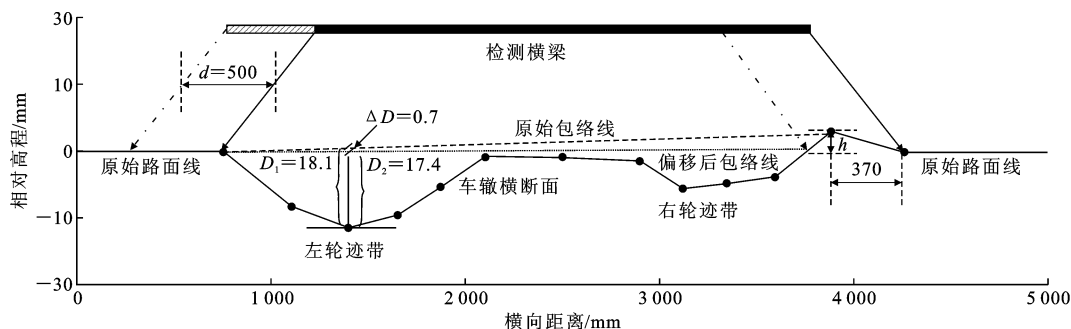


图6 右侧隆起时车辙形状特征对横向偏移的影响

Fig. 6 Effect of right upheaval rut shape characteristics on lateral offset

时不受隆起部分影响;当向左偏移距离继续增大,左端点高程开始降低,车辙深度计算误差逐渐增大。

综上所述,车辙深度计算误差主要受最深车辙槽位置、槽壁坡度和隆起高度、宽度等横断面形态特征影响。在实际检测过程中,车辆行驶应偏向最深车辙槽和槽壁坡度大的方向以全面获取最深车辙槽形态,减少横向偏移对计算结果的影响,保证检测结果的准确性和可靠性。

4 结 语

(1)模拟结果表明检测车辆的横向偏移会造成车辙深度计算结果误差。右侧隆起车辙最大绝对误差为-5.8 mm,最大相对误差为32.0%;无隆起车辙的最大绝对误差为-6.4 mm,最大相对误差为29.2%。偏移距离越大,车辙深度绝对误差和相对误差都逐渐增大;随着车辙严重等级的增大,绝对误差逐渐增大但对相对误差的影响较小。

(2)横向偏移造成的车辙深度计算误差,使得偏移后的车辙深度计算结果明显减小,会导致车辙严重等级的误判。本文模拟分析的2种车辙形态均存在偏移后严重等级被低估的情况,从养护管理的角度来说,偏移产生的严重等级误判可能会造成路况评价与养护决策的失误。

(3)不同偏移方向造成的车辙深度误差主要受最深车辙槽位置、槽壁坡度和隆起宽度与高度等车辙形态特征的影响。如无隆起车辙形态向左偏移后的误差普遍小于向右偏移,这是由于最大车辙深度位于左车辙槽,且左车辙槽的槽壁坡度较大。因此,检测车辆行驶应偏向最深车辙槽和槽壁坡度大的方向,以全面获取最深车辙槽形态,减少横向偏移对车辙深度计算结果的影响。

参考文献:

References:

- [1] 武建民,伍石生. 沥青路面长期使用性能指标[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(3):17-20.
WU Jian-min, WU Shi-sheng. Criteria of long term performance of asphalt pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(3):17-20. (in Chinese)
- [2] XU T, HUANG X M. Investigation into causes of in-place rutting in asphalt pavement [J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1):525-530.
- [3] WANG H Z. Development of laser system to measure pavement rutting [D]. Tampa: University of South Florida, 2005.
- [4] SOLYMAN M E S, SALAMA H. Field investigation of flexible pavement rutting damage using the transverse surface profile [J]. Journal of American Science, 2012, 8(8):44-50.
- [5] 李 强. 高速公路路面车辙检测、评价与预测技术研究 [D]. 南京:东南大学,2007.
LI Qiang. Research on highway rut detection, evaluation and prediction technology [D]. Nanjing, Southeast University, 2007. (in Chinese)
- [6] 马荣贵,马 建,宋宏勋. 路面车辙激光检测技术研究 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(4):30-32.
MA Rong-gui, MA Jian, SONG Hong-xun. Road rut measurement method with multi-laser-sensors [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(4):30-32. (in Chinese)
- [7] KSAIBATI K. Comparison of rut-depth measurements obtained with four different techniques [J]. Road and Transport Research, 1996, 5(2):80-91.
- [8] CHEN D H, BILYEU J, WALKER D, et al. Study of rut-depth measurements [J]. Journal of Transportation Research Record, 2001(1764):78-88.