

文章编号:1671-8879(2017)01-0017-07

基于高密度数据和聚类分析的 独立车辙识别和评价

丁梦华,蔡宜长,刘晓芳

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:现行规范《公路技术状况评定标准》(JTG H20—2007)以一定长度内车辙检测的平均值作为车辙评价值,而均值会对实际的车辙深度产生平滑作用。为量化现行规范车辙评价方法对车辙评价的误差,充分挖掘高密度检测数据,更加准确地对车辙进行评价,定义独立车辙,提出了基于高密度数据和聚类分析的独立车辙识别和评价方法。研究了不同数据密度识别独立车辙的结果,并利用实际 1 km 和 20 km 的自动化车辙检测数据,说明所提方法识别和评价独立车辙的严重程度及分布位置的有效性和准确性,将结果与现行规范车辙评价方法所得结果进行对比,对 2 种结果的误差进行了量化。研究表明:所提方法适用于所有等间隔的高密度车辙检测数据,而现行规范采用 1 km 车辙深度平均的评价方法所得结果已不能准确反映车辙的严重程度及位置。1 km 路段中,利用所提方法能够找到 3 条独立车辙,并确定其位置和严重程度,对独立车辙的评价结果较现行规范车辙评价结果更加准确;20 km 路段中,利用现行规范车辙评价方法只有 25.1% 的车辙被识别出,其中仅 18.52% 的车辙能够正确判断严重程度。而利用所提方法可识别全部车辙,且车辙严重程度判断正确率达到 82.3%。结果显示现行规范采用 1 km 车辙深度平均的评价方法不适用于分布不均匀的车辙评价,且车辙严重程度越高,分布不均匀程度越大,评价误差越大。

关键词:道路工程;车辙评价;聚类分析;独立车辙;高密度数据

中图分类号:U418.6 **文献标志码:**A

Isolated rutting identification and evaluation based on high-density data and clustering analysis

DING Meng-hua, TSAI Yi-chang, LIU Xiao-fang

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The average detected rutting value in a certain length was regarded as the rutting evaluation value according to the current specification of "Highway Performance Assessment Standards" (JTG H20—2007). However, average data can smooth the actual rutting depth. To quantify the error in current rutting evaluation, mine the high-density data sufficiently, evaluate rutting more accurately, isolated rutting was defined in this paper, and a rutting identification and evaluation method was proposed based on high-density data and clustering analysis. Isolated

收稿日期:2016-09-16

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);内蒙古自治区交通运输科技项目(NJ-2015-31);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821153104,310821151006)

作者简介:丁梦华(1989-),女,山东日照人,工学博士研究生,E-mail:dingmenghua@outlook.com。

通讯作者:蔡宜长(1963-),男,台湾台中人,教授,博士研究生导师,E-mail:james.tsai@ce.gatech.edu。

rutting identification results obtained using rutting measurement data with different density in driving direction were studied. Case studies, using 13-point laser bar data collected on 1 km and 20 km roadways, respectively, demonstrated the effectiveness and accuracy of the proposed method for identifying and evaluating the severity level and location of isolated rutting. The results were compared with those obtained using the current 1 km average method and the error of these two methods for evaluating rutting were quantified. The results show that the proposed method can be used for all equally-spaced and high-density data, but the current specification using the average rutting depth of 1 km is not able to identify the rutting severity level and location accurately. In a 1 km section, using the proposed method, three isolated ruts are identified, the locations and the severity levels are identified correctly, and the evaluation results are more accurate compared with those using the current method. In a 20 km section, using the current method, 25.1% rutting are identified, among which 18.52% can be accurately evaluated its severity level. However, using the proposed method, all rutting are identified and the accuracy of severity level identification reaches to 82.3%. Current method using the average rutting depth of 1 km is not suitable for evaluating non-uniform rutting. The higher the rutting severity level, the more non-uniform of rutting distribution is, and the higher the rutting identification error is. 3 tabs, 7 figs, 23 refs.

Key words: road engineering; rutting evaluation; clustering analysis; isolated rutting; high-density data

0 引言

车辙是沥青路面主要病害之一,直接影响到行车的舒适性和安全性,准确、可靠的车辙分布与严重程度评价是制定科学、合理的养护计划的依据^[1-3]。目前国内外广泛采用车辙深度指标评价其严重程度,中国现行规范(《公路技术状况设定标准》(JTG H20—2007))车辙评价以1 km路段作为基本单元,以1 km内所有检测点车辙深度的平均值评价其严重程度^[4]。这种方法以里程桩为界,与各种测试、评定规程保持一致,使得实际检测和评价工作规范化,易于操作和管理^[5-6]。

实际路段由于施工质量控制等差异,车辙在1 km范围内是不均匀存在的,同一车辙深度可能对应不同车辙状况^[7]。许多道路研究人员认识到采用1 km车辙深度平均值进行车辙评价不够全面和合理,所以构建了全面表征路面车辙形态的多维度评价指标。1976年 Oteng-Seifah 等首次提出了车辙横断面参数的概念^[8];随后 Simpson 等根据车辙仪检测数据,提出了包括车辙填充面积在内的7个指标^[9];侯相深等考虑车辙断面形态分别提出了最大可能积水面积、凹凸体积变形量、车辙辙槽的平均曲率半径等指标用以描述车辙的特征^[10-12]。尽管这些多维度指标能够更加全面地对车辙进行描述,但它们都是针对某一车辙横断面的车辙特征评价,不

能用于道路整体的车辙评价,而且由于这些指标对检测设备要求较高,某些指标计算难度较大,因此也很难用于实际大规模的车辙养护评价中。

国内外采用深度指标进行车辙评价符合大多数道路工程师的评价习惯,但是仅采用1 km车辙平均深度无法准确反映该路段范围内车辙的分布状况和严重程度,无法掌握车辙最严重路段的准确位置与长度^[13]。并且将非车辙路段与车辙路段的深度值平均,造成车辙路段深度被低估。车辙深度低估会掩盖严重车辙路段信息,导致车辙严重等级的误判,造成局部车辙养护维修被忽视,增加了行车风险^[14]。虽然有研究通过组织专家进行现场评价,说明了现行规范车辙评价结果对车辙存在严重低估,但是目前并没有研究通过真实检测数据进行说明,也缺乏对评价结果误差的量化研究^[15]。

另外,目前中国广泛采用13点激光车辙检测设备进行车辙深度检测,获得了大量最小间隔20 cm的高密度车辙深度数据,但是现行采用1 km车辙深度平均的评价方法没有对检测数据进行数据挖掘,不能充分利用调查数据,耗费了测量工作的具体效果^[16]。

为了研究现行规范车辙评价结果误差,充分挖掘自动化检测设备获取的高密度检测数据,准确了解车辙位置,掌握其严重程度和分布比例,本文针对独立车辙,提出了一种基于高密度数据和聚类分析

的路面车辙评价方法。首先定义独立车辙,利用高密度数据和聚类分析对独立车辙进行识别,进而对车辙状况进行评价。在此基础上探讨了不同数据密度对独立车辙的识别结果,结合江苏省某高速公路的实测数据进行车辙评价,并将评价结果与现行规范评价结果进行对比分析,对现行规范车辙评价结果的误差进行了量化。本文基于独立车辙识别的路面车辙评价方法,能够利用自动化激光车辙检测设备获取的海量数据,更加准确地识别车辙,为车辙及时养护、避免错过最佳养护时机提供保障。准确地进行车辙严重程度的判断可以更好地对路段进行针对性的养护措施、更精细化的养护作业。因此,基于独立车辙识别的路面车辙评价方法为高密度车辙检测数据的挖掘与应用以及未来检测大数据的分析提供了参考,对车辙的合理评价、养护需求判断和决策选择也都具有十分重要的意义。

1 独立车辙的定义

中国标准中没有对车辙最小长度进行定义,根据 AASHTO 标准,车辙最小长度定义为 100 ft (30.48 m)^[17],Li 研究提出当车辙间距小于 20 ft (6.096 m)时,即将相邻车辙进行合并,认为属于同一车辙^[18]。本文采用 AASHTO 车辙最小长度定义,参考文献对车辙合并的研究结果,定义独立车辙为:超过中国规范车辙阈值 10 mm 的相邻车辙深度检测点连成的长度大于车辙最小长度 30.48 m 的路段,当两车辙路段间距小于合并间距 6.096 m 时,将相邻车辙路段进行合并视为同一车辙(最小车辙长度及合并间距的具体取值精度根据实际分析时数据的精度进行近似取值)。图 1 为利用 10 m 间隔的车辙数据绘制的独立车辙示意图,图中 A、B、C 为 3 段独立车辙。

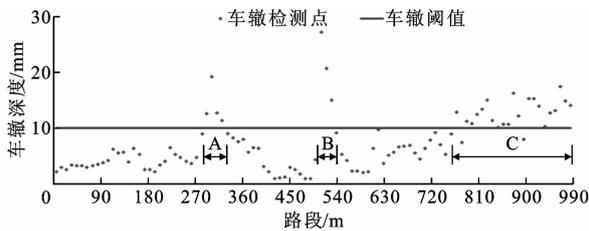


图 1 独立车辙
Fig. 1 Isolated rut

2 独立车辙识别与评价方法

为挖掘自动化检测设备得到的海量高密度检测数据,更精确地对实际车辙进行评价,准确地判断车辙位置,本文提出了基于高密度数据和聚类分析的

独立车辙识别和评价方法。技术路线如图 2 所示。

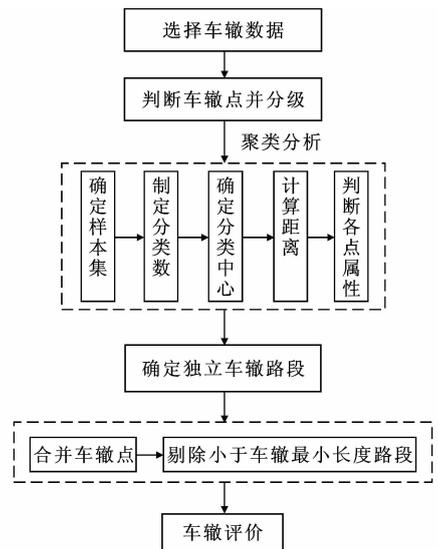


图 2 基于聚类分析的独立车辙评价方法
Fig. 2 Isolated rutting evaluation method based on clustering analysis

2.1 选择车辙数据

目前广泛采用自动化方法进行车辙检测(图 3 为交通运输部公路科学研究院研发的路况快速检测系统(CiCS)传感器分布示意图)^[16],根据检测设备精度的不同,每隔 1 m、20 cm 或更短距离采集 1 次横断面数据^[19](图 3 所示设备每隔 20 cm 采集 1 次),采用下页图 4 包络线法计算车辙深度,最终计算 10 m 路段车辙深度平均值并长期保存。车辙评价过程为:以 1 km 路段为评价单元,通过 100 个 10 m 车辙数据平均得到 1 km 路段的左右车辙深度(RD₁, RD₂),并将其中大值作为 1 km 路段的车辙深度评价价值,因此每条道路有 20 cm、1 m、10 m、100 m 和 1 km 间隔等几种车辙数据,可以根据拥有的数据类型,选择要分析的车辙数据。

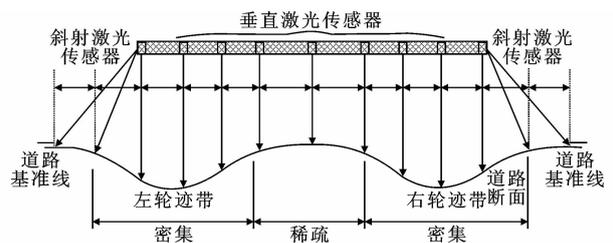


图 3 检测横梁传感器分布

Fig. 3 Detection beam sensor distribution

2.2 判断车辙点并分级

CDA^[20]、聚类分析^[5-6]、贝叶斯^[21]等不同方法都可以用于养护路段的划分。本文并未对数学方法进行创新,仅选用聚类分析来说明所提的基于独立

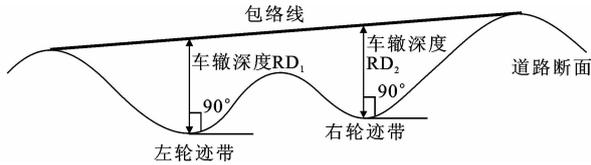


图4 包络线法计算车辙深度原理

Fig. 4 Envelope method to compute rutting depth

车辙识别的路面车辙评价方法的有效性。聚类分析是一种定量确定样品亲属关系,客观分型划类的多元分析方法,它能够将若干样本划分为不同的类别,使具有相似属性的样本分到同一类中^[22]。本文利用聚类分析的思想,根据有无车辙及车辙严重程度分级制定分类数,并根据现行规范中轻重车辙的阈值标准确定分类中心。采用聚类分析进行车辙点判断和严重程度分级的具体步骤如下。

(1) 确定样本集

选择分析路段,分析路段中车辙检测数据构成样本集 X

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_i]^T, i = 1, 2, \dots$$

(2) 制定分类数

根据车辙识别及判断其严重程度的目的,制定分类数为3,即无车辙、轻车辙、重车辙。

(3) 确定分类中心

根据现行规范中对车辙的定义及严重程度划分^[4],10~15 mm 为轻车辙,15 mm 以上为重车辙,因此3种分类的车辙深度范围为 $[0, 10)$, $[10, 15)$, $[15, \infty)$,从而确定3种分类的聚类中心 $Z: z_1 = 7.5, z_2 = 12.5, z_3 = 17.5$ 。

(4) 计算距离

计算每个样本与每个聚类中心的距离 D_{ir}

$$D_{ir} = x_i - z_r \quad i = 1, 2, \dots; r = 1, 2, 3$$

(5) 按最小距离原则确定每个点的类别。

2.3 确定独立车辙路段

(1) 合并车辙点

国外研究对间隔 20 ft(6.096 m)的相邻车辙进行合并,认为属于同一车辙,并利用 3D 激光检测技术得到的高密度数据进行了分析^[23]。根据中国数据的特点并参考国外 20 ft(6.096 m)的标准,当采用 20 cm 或 1 m 间隔的数据进行分析时,对间距小于 6 m 的车辙点进行合并,当采用 10 m 数据分析时,对间距 10 m 及相邻的车辙点进行合并。

(2) 剔除小于车辙最小长度的路段

本文采用 AASHTO 车辙最小长度 30.48 m 的定义,车辙路段长度应符合车辙最小长度定义,剔除

合并后不满足车辙最小长度的路段,剩余的路段即被识别为独立车辙^[17]。

2.4 评价独立车辙

根据上述独立车辙的识别结果,对每条独立车辙进行单独评价,采用每条独立车辙路段内所有检测数据的平均值作为此独立车辙的车辙评价价值。

3 不同数据密度的独立车辙识别

利用独立车辙识别方法,分别采用 20 cm、1 m、10 m、100 m 和 1 km 间隔的车辙数据进行独立车辙识别,结果如表 1 和下页图 5 所示。

表 1 不同密度数据识别独立车辙结果信息

Tab. 1 Isolated rutting identification results using different density data

数据间隔		20 cm	1 m	10 m	100 m	1 km
第 1 段独立车辙	桩号	284.30~338.51	290~338	290~330	800~1 000	无
	长度/m	54.21	49	40	200	
2 条车辙间距/m		171.39	173	180		
第 2 段独立车辙	桩号	509.90~548.05	511~544	510~540		
	长度/m	38.15	34	30		
2 条车辙间距/m		218.09	223	230		
第 3 段独立车辙	桩号	766.14~784.69	767~855	770~1 000		
	长度/m	18.55	89	230		
2 条车辙间距/m		6.47	18			
第 4 段独立车辙	桩号	791.16~854.75	873~1 000			
	长度/m	63.59	127			
2 条车辙间距/m		17.10				
第 5 段独立车辙	桩号	871.85~999.86				
	长度/m	128.01				

从图 5 和表 1 可以看出,本文所提方法适用于所有等间隔的高密度车辙检测数据,数据密度越高,识别的精确度越高。然而 100 m 和 1 km 间隔的数据由于在较长路段内进行了数据的平均,已不能够准确反映车辙在路面的分布状况和严重程度,因此难以用于独立车辙的识别和评价。利用前 3 种密度的数据都能够找到路段内的独立车辙,区别在于后 3 条车辙是否合并。通过 20 cm 间隔的车辙数据可以看到,后面 3 条车辙之间间隔较小,当数据密度越高,能识别出的间隔也就越小。但是,并不是将车辙路段划分的越细越好,零散的路段不利于养护的实施,会增加开工启动及

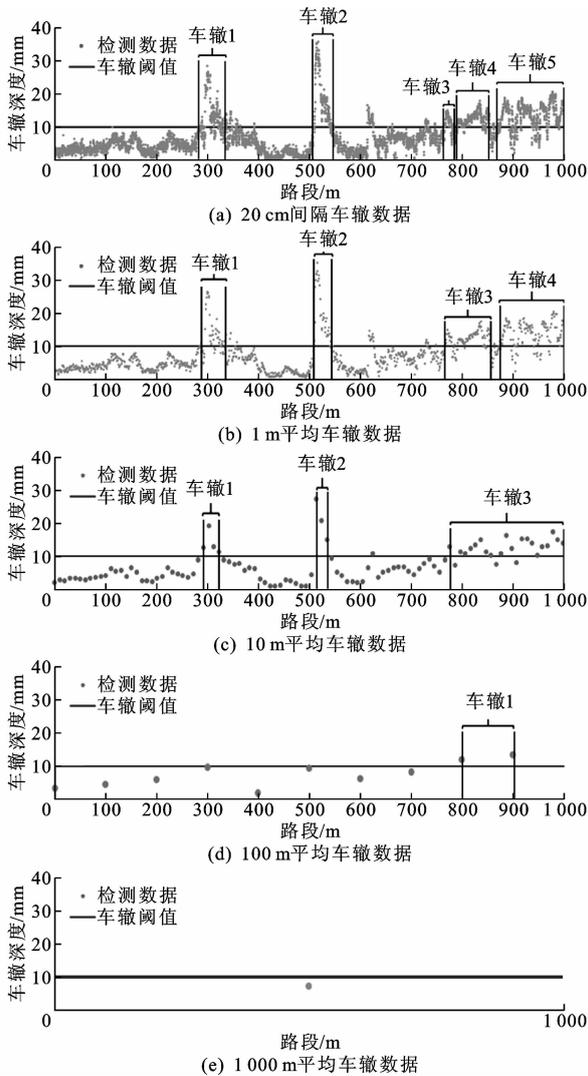


图 5 不同密度数据识别独立车辙结果

Fig. 5 Isolated rutting identification results using different density data

机械人员材料等的迁移费用。本方法适用于所有等间隔的高密度检测数据,具体采用何种密度的数据进行车辙评价,需要根据养护部门实际拥有的数据类型及当地车辙养护费用与开工启动等费用的具体实际确定。另外,如果想要对车辙的成因进行分析,特别是涉及地质条件等与具体位置相关的因素,更加高密度的数据可以提供更加具体的信息。

根据目前中国车辙评价的情况,车辙检测数据以 10 m 为单位进行长期保存,利用 10 m 间隔的数据进行分析具有很强的代表性和推广意义。另外由图 5 和表 1 可以看到,10 m 数据能够较准确地识别出路段中的独立车辙,也能够保证识别出最小车辙长度 30 m 的独立车辙。因此,后文将选择 10 m 间隔的数据说明本文所提方法的有效

性及准确性。

4 1 km 路段车辙评价分析

以江苏省某高速公路 1 km 路段为例,说明基于高密度数据和聚类分析进行独立车辙识别和评价对提高 1 km 内独立车辙识别和评价精度的有效性。

利用聚类分析进行车辙点判断并分级,对车辙点进行合并,剔除小于车辙最小长度的路段得到独立车辙识别结果,见表 2。

表 2 独立车辙信息

Tab. 2 Isolated rutting identification results

序号	起点桩号	终点桩号	车辙长度/m	车辙比例/%	不同严重程度比例/%	
					低	高
A	K09+290	K09+330	40	30	21	9
B	K09+510	K09+540	30			
C	K09+770	K10+000	230			

由表 2 可知,此 1 km 路段内出现了 A、B、C 这 3 段独立的车辙,3 条车辙在路段中的分布及严重程度示意图如图 6 所示,这与车辙原始检测数据(图 7)是一致的,另外还得到了每条车辙的起起点及具体长度和所占比例。

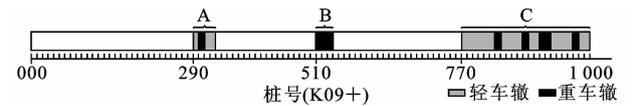


图 6 车辙分布及其严重程度

Fig. 6 Rutting distribution and severity level illustration

分别利用现行规范车辙评价方法和基于独立车辙识别的评价方法进行路面车辙评价,并对 2 种评价结果进行对比分析,结果如图 7 所示。

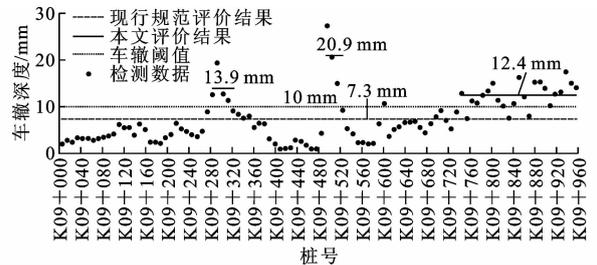


图 7 2 种评价结果与原始车辙深度及车辙阈值对比

Fig. 7 Comparison of two evaluation results, original rutting depth and threshold value of rutting

现行规范车辙评价方法得到整个路段车辙评价值为 7.3 mm,未达到规范 10 mm 车辙阈值,表示路段中没有车辙,不需要养护。而根据独立车辙识别结果,路段中存在 3 条车辙,且车辙在路段中占 30%,其中 90 m 的路段车辙深度已超过 15 mm,形

成了严重车辙。但由于车辙数据在计算过程中被平均,所以现行规范车辙评价不能反映真实车辙深度情况,掩盖了路段中出现的车辙,这将忽略对3条车辙的养护,造成行车安全隐患。另外车辙路段也将错过最佳养护时机,增加后期的养护难度和养护费用。

基于高密度数据和聚类分析,准确识别出了路段中的3条独立车辙,并得到了其分布、严重程度及其比例,对识别出的每条车辙进行评价,得到A、B、C这3条车辙的评价值分别为13.9、20.9、12.4 mm。这种针对单条车辙的评价,其严重程度的评价结果更加准确,能够保证选择适合其严重程度的养护措施进行针对性的养护决策。

5 20 km 路面车辙评价分析

为进一步对比现行规范车辙评价方法和本文所提评价方法得到的车辙评价结果,利用自动化车辙检测设备采集的江苏省某高速公路20 km路段的高密度数据,对2种评价结果的误差进行量化。

由于坑槽、裂缝等一些病害也会造成局部路面检测点高程低于正常路面,因此首先将20 cm间隔的原始数据通过去掉连续长度小于1 m的“车辙点”进行简单人工去噪,尽量避免将坑槽、裂缝等其他病害归入到车辙中。将去噪后的数据筛选出超过车辙阈值的检测点,分为轻重2个等级,计算各严重程度车辙的长度和作为真实车辙严重程度及长度的参考值。进而利用2种评价方法对车辙路段进行识别,评价其严重程度。所得结果与真实车辙情况对比见表3。

由表3可见,不论是轻车辙还是重车辙,利用现行规范车辙评价方法进行评价都会对其造成低估:1 540 m的轻车辙中70.78%被判断为无车辙,严重程度评价正确率仅有29.22%;890 m的重车辙全部被低估,82.02%被判断为无车辙,其他17.98%的重车辙被低估为轻车辙。而利用本文所提基于独立车辙识别的评价方法,轻车辙严重程度评价正确率高达89.61%,重车辙也有69.66%的正确率。综上,现行规范车辙评价方法由于采用整公里车辙深度平均,适用于车辙分布均匀的路面,当车辙在路面分布不均匀时,会对车辙严重程度造成低估,且车辙越严重,不均匀程度越大,低估率越高。而本文所提方法能够解决路面车辙不均匀存在时的车辙评价问题,大幅度减小对车辙严重程度的低估。另外由表3可见,2 430 m的车辙路段中仅有18.52%的路段通过现行规范车辙评价方法可以正确判断车辙严重

表3 车辙路段2种评价结果对比

Tab. 3 Comparison of two rutting evaluation results

真实车辙严重程度及长度/m	利用2种评价方法得到的严重程度及与真实车辙严重程度的对比		现行规范车辙评价结果		本文所提方法评价结果	
	长度/m	比例/%	长度/m	比例/%	长度/m	比例/%
轻车辙 (1 540)	无车辙	低估	1 090	70.78	0	0.00
	轻车辙	正确	450	29.22	1 380	89.61
	重车辙	高估	0	0.00	160	10.39
重车辙 (890)	无车辙	严重低估	730	82.02	0	0.00
	轻车辙	低估	160	17.98	270	30.34
	重车辙	正确	0	0.00	620	69.66
总车辙 (2 430)	实际有车辙评价为无车辙		1 820	74.90	0	0.00
	实际重车辙评价为轻车辙		160	6.58	270	11.11
	正确评价车辙		450	18.52	2 000	82.30
	实际轻车辙评价为重车辙		0	0.00	160	6.58

程度,而74.90%的车辙由于被判断为无车辙将忽视对这些路段的养护。而利用基于独立车辙识别的评价方法,存在车辙的所有路段都能被识别,严重程度判断正确率达到82.30%。较现行规范车辙评价方法,识别率提高74.90%,严重程度判断正确率提高63.78%。正确的识别出车辙能够避免错过其养护,而严重程度的正确评价能够保证养护过程中选择适用于其严重程度的方法,进而更好地进行精细化养护。因此,基于车辙路段识别的路面车辙严重程度评价,在提高车辙识别率和严重程度判断正确率、保证及时正确地进行车辙养护上具有很好的效果。

6 结 语

(1)本文提出的独立车辙识别和评价方法适用于所有等间隔的高密度车辙检测数据,数据密度越大,得到的独立车辙越精确,利用20 cm、1 m、10 m间隔的数据均可以较准确地识别出路段中的独立车辙,而100 m和1 km间隔的数据由于在较长路段内进行了数据的平均,已不能准确反映车辙的位置和严重程度,难以用于独立车辙的识别和评价。

(2)利用本文提出的独立车辙识别方法,采用10 m间隔的数据准确找到了1 km路段内的3条车辙,车辙路段占总路段30%,而且轻重车辙的比例为21:9,3条车辙深度评价值分别为13.93、20.93、12.43 mm,而现行规范采用1 km平均的车辙评价方法没有充分利用高密度检测数据,不能找到路段中的

独立车辙,平均得到 7.45 mm 的车辙评价结果无法准确反映车辙的具体位置,也不能准确评价车辙的严重程度。

(3)利用 2 种评价方法对江苏省某高速公路 20 km 所有车辙路段进行评价,现行规范车辙评价方法车辙识别率为 25.10%,其中严重程度判断正确率为 18.52%,轻车辙低估率 70.78%,重车辙低估率为 100%;基于独立车辙识别的评价方法车辙识别率为 100%,严重程度判断正确率为 82.30%,轻车辙低估率为 0,重车辙低估率为 30.34%。2 种评价方法相比,现行规范车辙评价方法更适用于评价车辙分布均匀的路段,当车辙分布不均匀时,车辙严重程度越高,不均匀程度越大,评价结果越不准确;而本文所提方法能够用于不均匀分布的车辙评价,且较现行规范车辙评价方法,车辙识别率提高了 74.9%,严重程度判断正确率提高了 63.78%。

(4)今后可进一步研究车辙不均匀程度对车辙评价的影响。

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.
- [2] 刘红瑛,戴经梁. 不同级配对沥青混合料车辙性能的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(5):11-15.
LIU Hong-ying, DAI Jing-liang. Effect of different gradations on asphalt mixture resistance to rut[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(5): 11-15.
- [3] KAMPLADE J. Analysis of transverse unevenness with respect to traffic safety[J]. International Research and Technologies, 1990, 1031: 221-223.
- [4] JTG H20—2007, 公路技术状况评定标准[S].
JTG H20—2007, Highway performance assessment standards[S].
- [5] 白日华. 沥青路面病害检测与养护决策研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
BAI Ri-hua. The research on detecting asphalt pavement disease and maintenance decision making[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [6] 王 佳,胡列格. 养护路段的有序聚类划分[J]. 系统工程, 2008, 26(11): 71-74.
WANG Jia, HU Lie-ge. Ordinal cluster division of

maintenance road sections[J]. Systems Engineering, 2008, 26(11): 71-74.

- [7] 燕海峰. 基于非均匀性的沥青路面施工质量控制与评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
YAN Hai-feng. Research on construction quality control and evaluation of asphalt pavement based on non-uniformity[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [8] OTENG-SEIFAH S, MANKE P G. Study of rutting in flexible highway pavements in Oklahoma (abridgment) [J]. Transportation Research Record, 1976 (602): 97-99
- [9] SIMPSON A L, DALEIDEN J F, HADLEY W O. Rutting analysis from a different perspective [J]. Transportation Research Record, 1995(1473): 9-17.
- [10] 侯相深, 马松林, 王彩霞. 基于行车安全的沥青路面车辙测量与评价指标的研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23(8): 14-17.
HOU Xiang-shen, MA Song-lin, WANG Cai-xia. Research on measurement and evaluation of asphalt pavement rutting based-on traffic safety[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(8): 14-17.
- [11] 蒋红妍. 高速公路路面养护管理系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
JIANG Hong-yan. Study on management system of expressway pavement maintenance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [12] 车 法, 陈拴发, 马庆雷, 等. 重载路面车辙评价物元模型构建及应用 [J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2010, 35(4): 633-637, 643.
CHE Fa, CHEN Shuan-fa, MA Qing-lei, et al. Construction and application about the matter-element model for rutting evaluation of heavy load pavement [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2010, 35(4): 633-637, 643.
- [13] 万 成, 张肖宁, 王绍怀. RLWT 车辙仪车辙评价及应用研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(12): 54-56.
WAN Cheng, ZHANG Xiao-ning, WANG Shao-huai. Research in rutting evaluation and application of RLWT[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(12): 54-56.
- [14] 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. Study on rutting measurement, evaluation and prediction technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.