

基于数字全息三维检测的沥青路面车辙预防 养护辅助设计方法及应用

王敬飞¹,王旺¹,许新权^{1*},黄智健¹,题晶²,姚艳茹²

(1.广东交科技术研发有限公司,广东广州 510550;2.北京崇理科技有限公司,北京市 100081)

摘要:车辙作为沥青路面常见病害之一,其对路面使用寿命和交通安全具有重要的影响。当沥青路面出现中轻度车辙时,在预防养护过程中,车辙形变会导致养护材料用量增加。因此,在养护设计中能否准确计算填补车辙材料用量,对于保证养护质量和养护效率意义重大。该文基于实体养护工程需求,分析传统车辙检测方法和数据在养护设计中存在的问题,提出一种采用数字全息三维检测技术的沥青路面车辙预防养护辅助设计方法。该方法通过数字全息三维检测技术,能够全面获取路面连续高精度三维数据并建立三维模型,通过仿真模拟精准计算填补车辙养护材料用量,有效提高了预防养护的精准性。通过实体工程验证,结果表明:基于数字全息三维检测的沥青路面车辙预防养护辅助设计方法,能够将车辙预防养护材料用量负偏差控制在5%以内,与基于传统检测方法和数据的养护设计相比(材料用量负偏差超过50%),效果显著。

关键词:公路养护;数字全息三维检测;路面三维数据模型;预防养护辅助设计;车辙养护材料用量

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Aided Design Method and Application of Rutting Prevention and Maintenance in Asphalt Pavement Based on Digital Holographic 3D Detection

WANG Jingfei¹, WANG Wang¹, XU Xinquan^{1*}, HUANG Zhijian¹, TI Jing², Yao Yanru²

(1.Guangdong Jiaoke Technology R&D Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510550, China;

2.Beijing Chongli Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: As one of the common diseases of asphalt pavement, rutting has significant impacts on the service life and traffic safety of the pavement. Mild rutting in asphalt pavement during preventive maintenance can lead to increased use of maintenance materials due to rutting deformation. Accurately calculating the amount of materials needed to fill rutting in maintenance designs is of great significance for ensuring maintenance quality and efficiency. Based on the requirements of maintenance engineering, this paper analyzed the problems in maintenance designs that use traditional methods and the data they generate for rutting detection. A design method was proposed for rutting prevention and maintenance in asphalt pavement, assisted by digital holographic 3D detection. With this detection technology, continuous high-precision 3D data of road surfaces were obtained, and a 3D model was constructed. The amount of materials needed to fill rutting was accurately calculated through simulation, indicating that the proposed method can effectively improve the accuracy of preventive maintenance. The results from physical testing show that the proposed design method can achieve a negative deviation of material usage for rutting prevention and maintenance within 5%. The method is highly

收稿日期:2023-11-15(修改稿)

基金项目:广东省交通集团有限公司项目(编号:JT2023YB15)

作者简介:王敬飞,男,硕士,教授级高工.E-mail:15112113911@139.com

*通信作者:许新权,男,博士,教授级高工.E-mail:xuxinquan998@126.com

effective compared with maintenance designs based on traditional detection methods and data (with a negative deviation of material usage exceeding 50%).

Keywords: road maintenance; digital holographic 3D detection; 3D road surface data model; preventive maintenance design; rutting maintenance materials usage

0 引言

近年来,中国高速公路建设发展迅速,截至2022年底,中国高速公路总里程达到14.96万km,其中广东省高速公路总里程达到1.12万km。随着高速公路路面使用年限的延长和累计交通荷载的增加,沥青路面车辙病害持续增加且发展速度不断加快^[1]。车辙是在行车荷载重复作用以及气候(高温)等因素综合作用下,沥青路面产生的一种永久性变形^[2-3],车辙病害的出现直接影响路面行车安全性、舒适性以及使用寿命。

早期的人工车辙检测是采用横断面仪法^[4],此方法效率低、随机性强且受人为影响大,因此测试误差大。近年来,路面车辙深度的数据采集发展到自动车载快速检测阶段。目前,中国自动化车辙仪主要包括点激光车辙仪和线激光车辙仪^[5-7]。当前车辙检测主要采用多功能路况检测车实现自动化数据采集^[8],可较好反映沥青路面整体车辙深度状况,但受采样方法和采样间隔影响,当前车辙检测未能做到连续完整的量测整个道面的形变^[9],数据依然是离散的,车辙体积难以准确量测,车辙预防养护设计中混合料摊铺量的准确计算一直是养护难点,给路面车辙病害预防养护的质量保证带来较大困难^[10-11]。

本文依托广东省GS高速公路沥青路面预防养护工程,基于数字全息三维检测方法,获取高精度连续路面三维数据,并建立路面三维车辙模型,精确计算填补车辙养护材料的用量,辅助沥青路面车辙预防养护设计。

1 当前沥青路面车辙预防养护设计存在问题

1.1 车辙数据采集不能连续覆盖全车道

《多功能路况快速检测设备》(GB/T 26764—2011)和《公路路面技术状况自动化检测规程》(JTG/TE 61—2014)等标准对激光车辙仪相关参数的要求为:纵向采样间距 ≤ 0.2 m(建议采用0.1 m)、横向测

试宽度 ≥ 3.5 m,如图1所示。尽管目前多功能道路检测车的车辙采集参数已经达到标准要求,但由于车辙数据纵向不连续,其检测结果不能全面精准反映路面车辙状况。

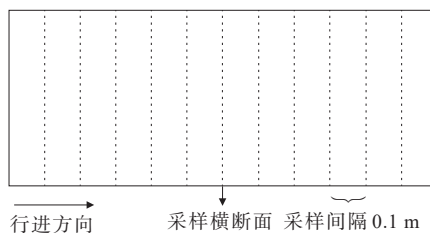


图1 线激光车辙检测车道采集频率

Figure 1 Acquisition frequency for line laser rutting detection

车辙测试数据处理的过程中,根据横断面的数据,采用包络图法来确定断面最大车辙深度(图2),计算测试路段各测试断面最大车辙深度的平均值作为该测试路段的平均车辙深度。《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)要求每10 m计算一个统计值^[12],其代表是10 m路段范围内采样间距 ≤ 0.2 m各个横断面车辙深度计算的平均值,这种方法能在一定程度上对路面车辙深度整体情况作出评价,但无法连续、精准量测车辙变形体积。

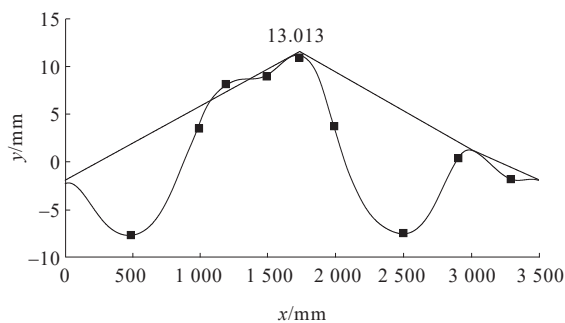


图2 车辙深度计算示意图

Figure 2 Calculation for rutting depth

1.2 车辙填补材料用量计算方法粗糙

当前养护设计中,车辙体积的计算方法通常采用较为粗糙的数学计算模型,以多功能道路检测车采集车辙深度数据为基础,即通过横断面处最大的

车辙深度、估计的车辙断面面积、路段长度简单相乘得到填补车辙材料用量。

在横断面上车辙深度 H_{RD} 采用代表性数据(左、右轮通常每 10 m 一个统计值);车辙深度的影响宽度左右轮迹带各 0.8 m 进行计算(图 3),为更好地贴合车辙形态,增加计算准确率,车辙断面形状按照梯形(即中间 0.4 m 按矩形,两边各 0.2 m 按三角形)进行计算面积,路段长度按每 10 m 计算一次填补车辙深度所需用料。

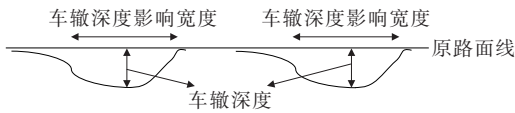


图3 车辙面积计算

Figure 3 Calculation of rut area

这种几何平均计算的方法,忽略了车辙具体的形态变化,尤其对于车辙深度纵向分布差异性明显的路段,计算值与真实材料摊铺量偏差较大。

综上所述,由于传统车辙检测纵向数据采集不连续以及较为粗糙的计算模型,使得车辙体积计算难以符合实际情况。在车辙预防养护设计中,摊铺材料用量的计算结果与实际偏差较大,给预防养护的质量保证和工程材料计量带来困难。

2 基于数字全息三维检测的车辙预防养护辅助设计方法

2.1 全面精准的车辙检测方法

为获取覆盖面更广,颗粒度更细的路面三维数据以辅助进行车辙养护设计,本文采用基于数字全息技术研究的三维路面检测系统对路面车辙进行检测。

数字全息技术是一种将物体的全息图像数字化的技术,可以实现对物体的三维信息的捕捉和重建^[13-14]。其基本原理是将物体的全息图像分别记录

$$I(x, y) = |E_0(x, y) + E_r(x, y)|^2 = [E_0(x, y) + E_r(x, y)][E_0(x, y) + E_r(x, y)]^* = E_0(x, y)E_0^*(x, y) + E_0(x, y)E_r^*(x, y) + E_r(x, y)E_0^*(x, y) + E_r(x, y)E_r^*(x, y) = A_0^2(x, y) + A_r^2(x, y) + A_0(x, y) \cdot A_r(x, y) \exp\{i[\varphi_0(x, y) - \varphi_r(x, y)]\} + A_0(x, y)A_r(x, y) \exp\{-i[\varphi_0(x, y) - \varphi_r(x, y)]\} \quad (3)$$

路面三维模型可以提供高精度的连续的横断面数据^[22],如图 6、7 所示。在车辙评价方面,采用更丰富的指标进行评价,不仅可以计算车辙深度,

在参考光和物光的干涉图上,然后通过数字化的方法将参考光和物光的干涉图进行处理,得到物体的三维信息^[15-17]。技术原理如图 4 所示。

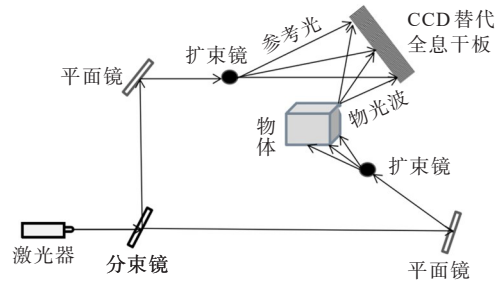


图4 数字全息检测原理示意图

Figure 4 Principles of digital holographic detection

激光器发射光源,通过分束镜分成两部分,一部分激光通过平面镜和扩束镜照射在物体上,经过漫反射被摄物体在激光辐照下形成漫射式的物光波^[18-19],如图 5,由于物光波是经过了被摄物体的调制,故其中包含了物体的形貌信息;另一部分激光作为参考光和物光波叠加产生干涉,把物光波上各点的位相和振幅转换成在空间上变化的强度(即光强),转换公式见式(1)、(2)。通过 CCD 相机拍摄干涉条纹把物光信息记录下来。物光波和参考光在图 4 的任意点 (x, y) 处干涉合成的光强点 $I(x, y)$,见式(3)。依据上述公式即可对参考光和物光进行解析,得到物光波的相位信息,计算并建立被测物体的三维模型^[20-21]。

物光波的电磁方程:

$$E_0(x, y) = A_0(x, y) \exp[i\varphi_0(x, y)] \quad (1)$$

参考光的电磁方程:

$$E_r(x, y) = A_r(x, y) \exp[i\varphi_r(x, y)] \quad (2)$$

式中: $A_0(x, y)$ 、 $A_r(x, y)$ 分别为物光波和参考光的实振幅; $\varphi_0(x, y)$ 、 $\varphi_r(x, y)$ 分别为物光波和参考光的相位。

还可以对车辙形状进行分析,如计算车辙宽度、体积等,以更全面地评价车辙对行车安全和路面结构的影响。

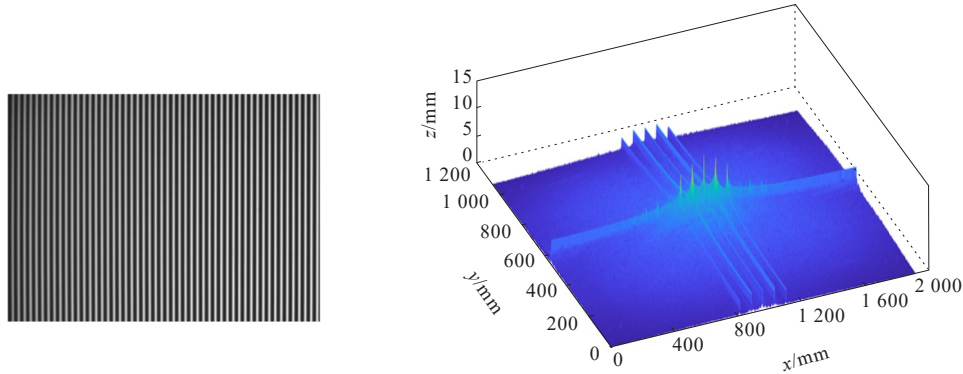


图5 CCD相机拍摄干涉条纹物光信息

Figure 5 Optical information of interference fringes captured by CCD camera

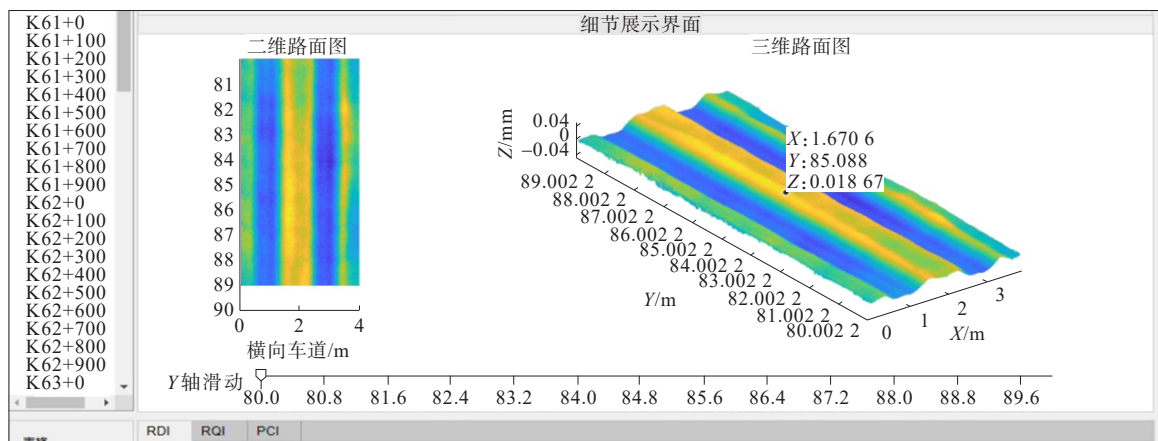


图6 横断面数据

Figure 6 Cross section data

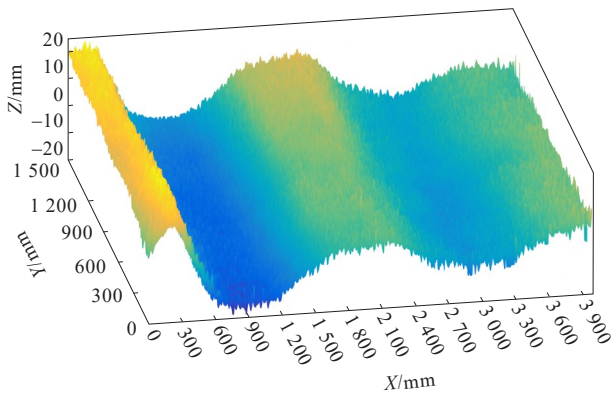


图7 路面三维模型

Figure 7 3D model of road surface

2.2 车辙预防养护辅助设计方法

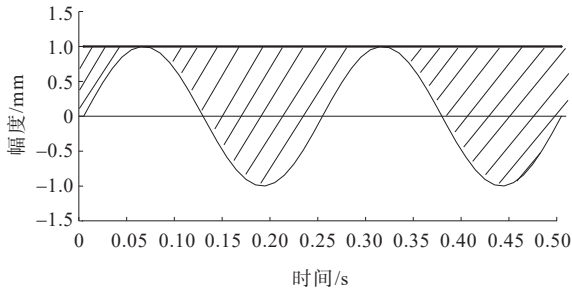
车辙修复摊铺模拟设计主要运用最小二乘法求拟合摊铺拟合平面,然后将摊铺拟合平面与路面三维车辙数据平面的体积积分作为该路面三维车辙区域所需的模拟摊铺量,如图8所示。其中,拟合摊铺平面使用的最小二乘法拟合是一种常用的数据拟合方

法,这种方法在地图绘制、机器视觉、三维建模等领域得到广泛应用。此法通过将数据点拟合到一个平面上来求解平面的参数。其数学原理如下:假设有一组数据点 (x_i, y_i, z_i) ,其中 $i=1, 2, \dots, n$ 表示数据点的编号, x_i, y_i, z_i 分别表示数据点的横、纵、高坐标。通过这些数据点拟合出一个平面,使得平面上的点到数据点的距离最小。平面方程可以表示为: $z = ax + by + c$,其中 a, b, c 分别为平面的参数,需要通过最小二乘法求解。对于任意一个数据点 (x_i, y_i, z_i) ,其到平面的距离可以表示为:

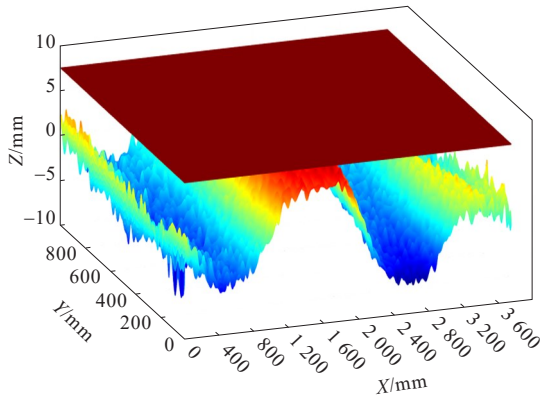
$$d_i = \frac{|ax_i + by_i + c - z_i|}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \quad (4)$$

因此,目标函数是最小化所有数据点到平面的距离之和,即:

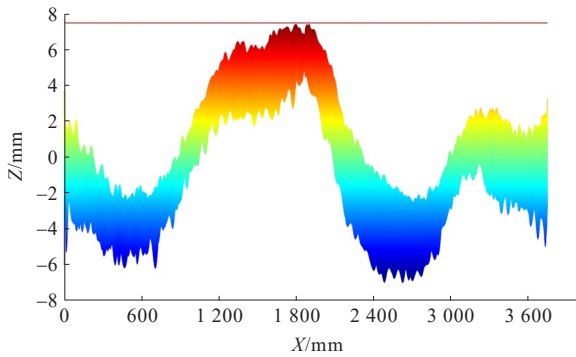
$$\min \sum_{i=1}^n d_i^2 = \min \sum_{i=1}^n \frac{(ax_i + by_i + c - z_i)^2}{a^2 + b^2 + 1} \quad (5)$$



(a) 路面摊铺计算横向剖面图



(b) 路面车辙最小二次拟合平面



(c) 路面车辙摊铺拟合平面

图8 模拟摊铺法计算摊铺量

Figure 8 Simulated paving method for calculating paving volume

为了求解参数 a 、 b 、 c ,通过对上述目标函数求导,令其导数为0,得到:

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n \frac{(ax_i + by_i + c - z_i)^2}{a^2 + b^2 + 1} = 0 \quad (6a)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n \frac{(ax_i + by_i + c - z_i)^2}{a^2 + b^2 + 1} = 0 \quad (6b)$$

$$\frac{\partial}{\partial c} \sum_{i=1}^n \frac{(ax_i + by_i + c - z_i)^2}{a^2 + b^2 + 1} = 0 \quad (6c)$$

对上述3个方程进行求解,得到最小二乘平面的参数 a 、 b 、 c :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7a)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7b)$$

$$c = \bar{z} - a\bar{x} - b\bar{y} \quad (7c)$$

式中: \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 分别为所有数据点的横、纵、高坐标的平均值。

通过模拟铺平车辙平面(红色平面),可以计算出车辙总体积、总面积以及车辙平均深度。假设正弦图为模拟车辙曲线,通过模拟计算:

$$M = \max[f(x)] = \text{mean}[f_{fit}(x)] + D_M \quad (8)$$

$$D_M = \frac{\int_a^b [M - f(x)] dx}{b - a} = \frac{\int_a^b M dx - \int_a^b f(x) dx}{b - a} \quad (9)$$

式中: M 为模拟铺平车辙平面; D_M 为模拟加铺平均深度。

得到拟合平面后,通过体积分计算模拟摊铺量:

$$\iiint_D (f_{\text{拟合平面}} - f_{\text{路面}}) dx dy dz \quad (10)$$

2.3 优势分析

与基于传统的路面自动化检测数据的车辙预防养护设计不同,由于数据全息三维路面检测方法具有精度高、信息全、覆盖范围广、效率高等优点,基于数字全息路面三维检测获取的路面车辙三维数据模型,能够全面精准反映路面的车辙状况;基于数字全息路面三维检测的路面车辙预防养护辅助设计,能够实现车辙预防养护材料的精准计算,确保养护质量。

3 实体工程验证

3.1 工程概况

至2021年底,广东省GS高速公路路面大修后通车11年,双向六车道,近年来交通量呈逐年快速增长趋势,且重车比例高,在行车荷载及雨水作用下,部分沥青路面出现了裂缝、坑槽、车辙等病害,个别位置存在粗集料散失的情况,为提高路面使用性能,2021年SG高速公路计划对 $88 \leq I_{\text{PCI}} < 92$ 及轻微车辙路段即下行方向 K2054+550~K2054+050、K2039+300~K2041+100、上行方向 K2037+000~

K2037+500(上行)慢、主、超3个车道2.8 km整体加铺1 cm热拌超薄罩面预防养护。

由于原路面车辙变形对沥青混合料摊铺用量影响较大,根据现场称重以及沥青混合料密度(生产配合比中实测密度 2.463 kg/m^3)可计算现场实际摊铺沥青混合料用量 $1\,369.5 \text{ m}^3$,设计摊铺10 mm(不考虑车辙)的沥青混合料用量 $1\,241.5 \text{ m}^3$,因此实际摊铺填补车辙体积沥青混合料用料共为 128.0 m^3 。

3.2 车辙预防养护材料用量计算

为验证车辙摊铺混合料用量计算方法的准确性,采用传统多功能车检测方法和数字全息三维检

测方法分别进行车辙数据采集与体积模拟计算,并与实际摊铺用量进行比对,验证分析计算的精准性。

3.2.1 基于传统检测方法和数据的材料用量计算

采用多功能道路检测车对罩面处置路段车辙进行检测,参照本文1.2小节几何平均计算方法,车辙深度断面按照梯形进行计算,具体见表1;车辙深度的影响宽度左右轮迹带各按0.8 m,每10 m计算一次填补车辙体积,进而计算得出各路段填补车辙养护材料摊铺用量,各路段摊铺用量计算结果如图9所示。基于传统多功能车检测方法的计算养护材料摊铺量共为 64.7 m^3 ,与实际摊铺量负偏差(即少算)达到49.5%。

表1 多功能车检测车辙深度情况

Table 1 Rut Depth Detection of Multifunctional Vehicles

路段 编号	起始桩号	长度/ m	车道位置	统计 点数	车辙深度 H_{RD} /mm			变异系 数/%
					平均值	最大值	最小值	
1	K2054+550(下行)	500	慢车道左轮	50	6.3	10.0	2.1	23.9
			慢车道右轮	50	5.8	12.0	1.7	33.7
			小计	100	6.1	12.0	1.7	28.9
2	K2054+550(下行)	500	主车道左轮	50	6.3	11.2	2.3	31.3
			主车道右轮	50	5.8	9.2	1.9	29.2
			小计	100	6.0	11.2	1.9	30.5
3	K2054+550(下行)	500	超车道左轮	50	4.3	9.2	0.3	37.6
			超车道右轮	50	3.8	7.2	1.2	34.6
			小计	100	4.1	9.2	0.3	36.5
4	K2041+100(下行)	1 800	慢车道左轮	180	8.9	13.0	4.3	16.4
			慢车道右轮	180	6.7	15.4	2.9	26.4
			小计	360	7.8	15.4	2.9	24.6
5	K2041+100(下行)	1 800	主车道左轮	180	6.6	12.1	2.2	21.0
			主车道右轮	180	7.9	12.9	2.3	20.0
			小计	360	7.2	12.9	2.2	21.7
6	K2041+100(下行)	1 800	超车道左轮	180	4.6	10.1	0.2	36.1
			超车道右轮	180	5.9	10.9	0.4	31.7
			小计	360	5.2	10.9	0.2	35.7
7	K2037+000(上行)	500	慢车道左轮	50	8.2	12.6	3.8	34.3
			慢车道右轮	50	10.3	14.4	5.7	26.2
			小计	100	9.2	14.4	3.8	32.7
8	K2037+000(上行)	500	主车道左轮	50	6.3	10.1	4.2	27.2
			主车道右轮	50	5.5	9.3	3.7	26.0
			小计	100	5.9	10.1	3.7	27.8
9	K2037+000(上行)	500	超车道左轮	50	4.3	8.1	2.2	28.0
			超车道右轮	50	3.5	7.3	1.7	28.6
			小计	100	3.9	8.1	1.7	29.5
合计		8 400		1 680	6.3	15.4	0.2	36.6

3.2.2 基于数字全息三维检测方法和数据的材料用量计算

采用数字全息三维检测装备于超薄罩面加铺前

对养护处置路段进行了检测,并对其进行了三维数据建模。图10为GS高速某横向3.75 m、纵向1.00 m的路段路面三维数据模型。

将其推广应用到整个路段进行计算,图11所展示的是一段横向长度3.75 m,纵向长度为10.00 m的路面三维数据模型。按照1 cm热拌超薄罩面填补车辙

的养护方案,采用横向长度3.75 m,纵向长度1.00 m为最小计算单元,如图12所示。根据式(7)~(9)模拟计算填补车辙体积,得到此横向长度3.75 m,纵向

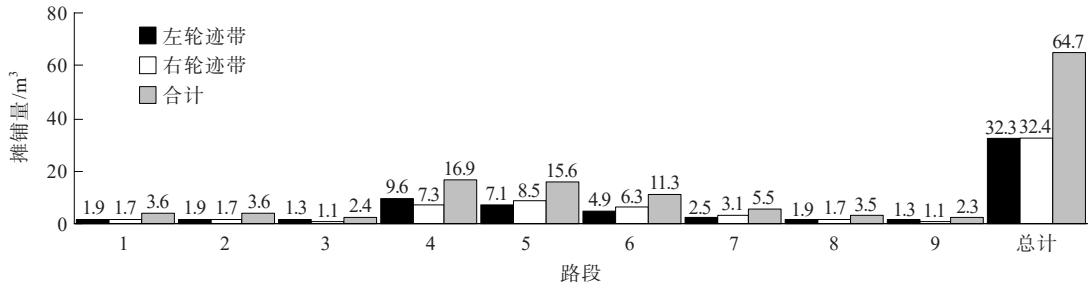


图9 传统多功能车检测方法车辙摊铺量计算

Figure 9 Calculation of rut paving volume using traditional multifunctional vehicle detection methods

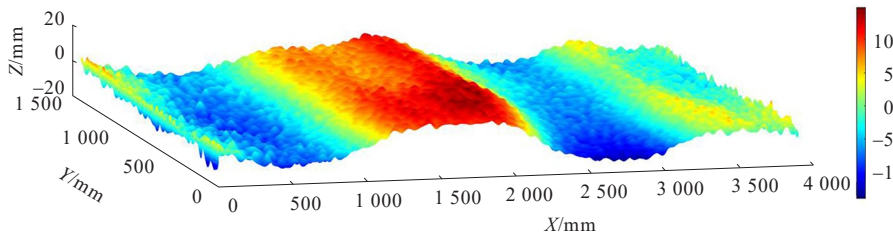


图10 路面三维数据模型 3.75 m×1.00 m

Figure 10 3D road surface data model (3.75 m×1.00 m)

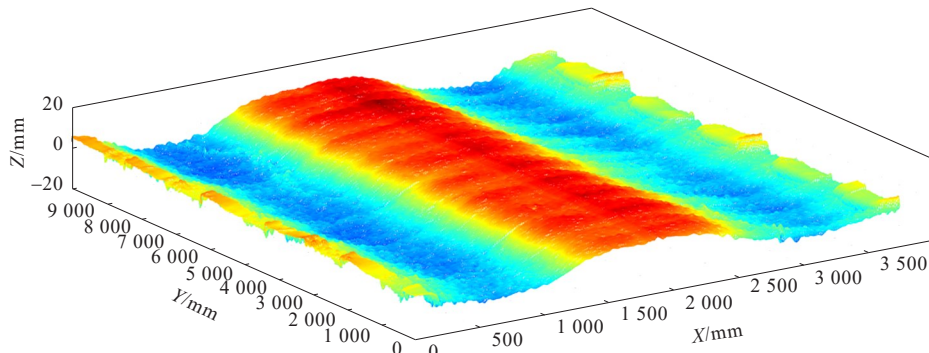


图11 路面三维数据模型 3.75 m×10.00 m

Figure 11 3D road surface data model (3.75 m×10.00 m)

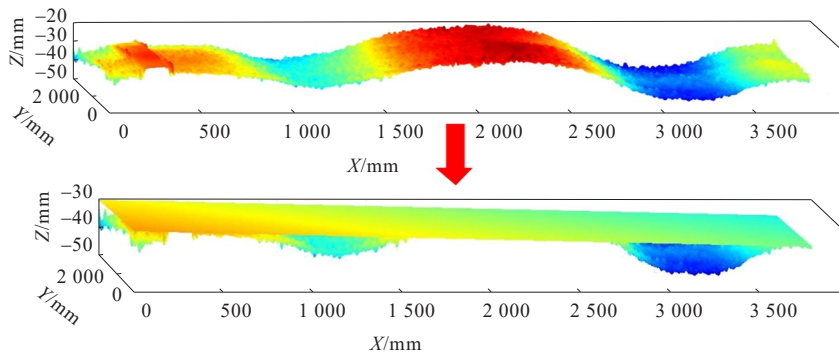


图12 超薄罩面模拟效果

Figure 12 Simulation effect of ultra-thin cover

长度 10.00 m 的路段总摊铺量为 0.372 m³。

根据以上车辙体积模拟计算方法对全路段单车道 8.4 km 进行摊铺量计算,结果如图 13 所示,计算摊铺量共需 121.800 m³,与实际摊铺量负偏差(即少算)为 4.84%。

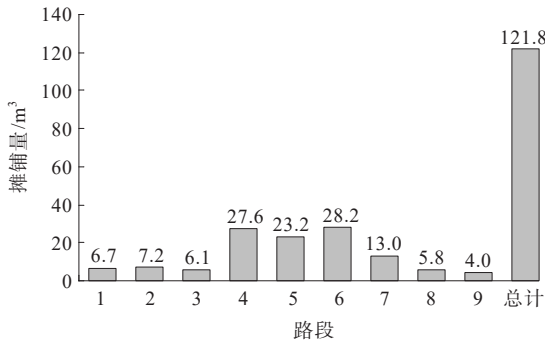


图 13 数字全息三维检测方法车辙摊铺量计算结果

Figure 13 Calculation of rut paving volume using digital holographic 3D detection method

3.3 对比分析

从全路段整体计算结果来看,传统检测方法计算结果与实际摊铺量负偏差(即少算)50%左右,且均为负偏差,与实际情况出入较大;而基于数字全息三维检测方法的计算结果与实际摊铺量负偏差在 5% 以内。考虑到沥青混合料施工运输、摊铺过程中损耗,该计算结果精度较高,对于指导沥青路面车辙预防养护设计具有重要的意义。

从各路段计算结果来看,较数字全息三维检测方法,传统检测方法路段 1~路段 9 车辙摊铺量偏差率绝对值分布在 32.8%~60.7%(表 2),路段 6 偏差率 -59.9%,偏差量为 -16.9 m³,主要原因是超车道车辙深度变异性大,变异系数为 35.7%;通过分析偏差率及其与各路段车辙深度变异系数之间关联性可知(图 13),偏差率与车辙深度变异系数呈明显正相关规律(相关系数达到 0.9),车辙深度变异系数越大,传统检测方法偏差率越高;通过分析偏差率及其与各路段车辙深度平均值之间关联性可知(图 14),偏差率与车辙深度平均值相关性较低。

4 结语

本文通过与传统多功能车路面车辙检测及计算方法对比,提出了基于数字全息三维检测的沥青路面车辙预防养护辅助设计方法,依据高精度路面三维数据建立相应的车辙摊铺量计算模型,准确计算

表 2 传统多功能检测较数字三维全息检测方法偏差计算

Table 2 Calculation of deviation of traditional multifunctional testing and digital 3D holographic testing

路段编号	传统多功能检测方法摊铺量/m ³	数字三维全息检测方法摊铺量/m ³	偏差量/m ³	偏差率/%
1	3.6	6.7	-3.1	-46.3
2	3.6	7.2	-3.6	-50.0
3	2.4	6.1	-3.7	-60.7
4	16.9	27.6	-10.7	-38.8
5	15.6	23.2	-7.6	-32.8
6	11.3	28.2	-16.9	-59.9
7	5.5	13.0	-7.5	-57.7
8	3.5	5.8	-2.3	-39.7
9	2.3	4.0	-1.7	-42.5
总计	64.7	121.8	-57.1	-47.6(平均值)

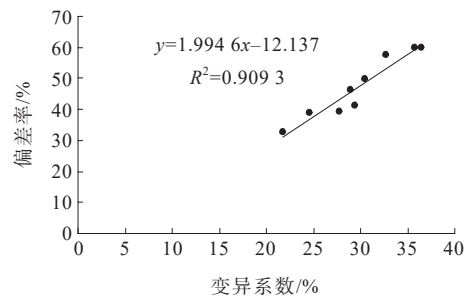


图 13 摊铺量偏差率与车辙变异系数关联分析

Figure 13 Correlation analysis of deviation rates of paving volume and coefficients of rutting variation

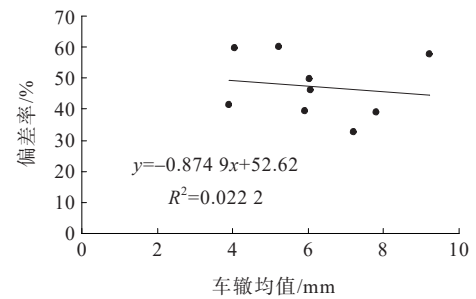


图 14 摊铺量偏差率与车辙平均值关联分析

Figure 14 Correlation analysis of deviation rates of paving volume and average values of rutting

出养护所需的材料用量,从而达到精细化养护的目的,并成功将其应用于实际工程中。

通过工程实践,基于数字全息三维检测方法建模计算摊铺量与现场实际摊铺量误差在 5% 以内,表

明该方法能够准确、高效地计算填补车辙所需的养护材料用量,且计算模型更直观,数据样本多样化,不同路段均可独立分段计算。此方法为沥青路面车辙预防养护设计和施工材料核算提供了科学的数据支撑,提高了车辙预防养护设计的精准性,保证了路面养护质量。

参考文献:

References:

- [1] 马凡红. 沥青路面车辙病害原因分析及防治措施[J]. 科学技术创新,2022(32):117-120.
MA Fanhong. Cause analysis and prevention measures of rutting disease on asphalt pavement[J]. Scientific and Technological Innovation,2022(32):117-120.
- [2] 郑涛辉. 沥青路面车辙病害形成机理及防治措施探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版),2020,16(11):185-187.
ZHENG Taohui. Discussion on formation mechanism and prevention measures of rutting disease on asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Applied Technology Edition), 2020,16(11):185-187.
- [3] 张金喜,王佩荣,曹丹丹,等. 基于行车振动的路面车辙评价方法可行性研究[J]. 中外公路,2023,43(4):45-51.
ZHANG Jinxi, WANG Peirong, CAO Dandan, et al. Feasibility study of pavement rutting evaluation method based on driving vibration[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(4):45-51.
- [4] 马建,赵祥模,贺拴海,等. 路面检测技术综述[J]. 交通运输工程学报,2017,17(5):121-137.
MA Jian, ZHAO Xiangmo, HE Shuanhai, et al. Review of pavement detection technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2017,17(5):121-137.
- [5] 田发伟. 沥青混凝土路面施工试验检测与质量控制研究[J]. 砖瓦世界,2022(2):217-219.
TIAN Fawei. Research on construction test and quality control of asphalt concrete pavement[J]. Brick & Tile World,2022(2):217-219.
- [6] 汪恩军,陈先桥,初秀民,等. 车辙检测中超声测距数据采集方法[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(1):138-141.
WANG Enjun, CHEN Xianqiao, CHU Xiumin, et al. Data acquisition method by ultrasonic wave distance measurement for rut detection[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2008,30(1):138-141.
- [7] 张磊. 基于线激光的道路车辙检测方法研究[D]. 西安:长安大学,2015.
ZHANG Lei. Method research of rutted road detection based on line laser[D]. Xi'an: Chang'an University,2015.
- [8] 马荣贵. 路面三维检测系统原理及方法研究[D]. 西安:长安大学,2008.
MA Ronggui. Study on the principle and method of road three-dimension measurement system[D]. Xi'an: Chang'an University,2008.
- [9] 徐晓波. 沥青路面现场车辙的精准化评价方法[J]. 北方交通,2020(4):51-53.
XU Xiaobo. Precise evaluation method for on-site rutting on asphalt pavement[J]. Northern Communications, 2020(4):51-53.
- [10] 钟彪. 沥青混凝土路面预防性养护措施决策与应用[J]. 中外公路,2018,38(6):58-62.
ZHONG Biao. Decision and application of preventative maintenance measures for asphalt concrete pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway,2018,38(6):58-62.
- [11] 朱浩然,张杨,马辉,等. 微波辅助加热就地热再生在高速公路养护中的应用研究[J]. 中外公路,2023,43(5):37-42.
ZHU Haoran, ZHANG Yang, MA Hui, et al. Application and research of microwave-assisted heating hot in-place recycling in expressway maintenance[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(5):37-42.
- [12] 交通运输部公路科学研究院. 公路技术状况评定标准: JTG 5210—2018[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Highway performance assessment standards: JTG 5210—2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [13] 刘鸿. 道路检测中三维激光扫描技术的应用[J]. 交通世界,2023(增刊1):128-130.
LIU Hong. Application of 3D laser scanning technology in road detection[J]. TranspoWorld,2023(sup 1):128-130.
- [14] 罗鲁华. 二维与三维检测技术在道路综合检测中的应用研究[J]. 交通世界,2022(21):162-164.
LUO Luhua. Research on application of 2D and 3D detection technology in road comprehensive detection[J]. TranspoWorld,2022(21):162-164.
- [15] 吴传海,题晶,马健萍. 基于全息三维检测技术的沥青路面养护信息数字化[J]. 广东公路交通,2023,49(1):1-7.

- melting agent[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 13(5): 62-64.
- [15] 全国化学标准化委员会无机化工分技术委员会. 融雪剂: GB/T 23851—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. SAC/AC63/SC1. Snow-melting agent: GB/T 23851—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [16] 王腾, 郭德栋, 周小鹏, 等. 道路融雪剂融冰能力试验方法的改进研究[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 195-198. WANG Teng, GUO Dedong, ZHOU Xiaopeng, et al. Research on test method improvement for deicing ability of road snow-melting agent[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(2): 195-198.
- [17] 程洋洋. 道路除冰融雪剂关键评价指标与试验方法的优化研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2018. CHENG Yangyang. Road deicing snow melt agent key evaluation index and test methods of optimization research [D]. Ji'nan: Shandong Jiaotong University, 2018.
- [18] 李萍, 魏西应, 念腾飞, 等. 季节性冻土区沥青路面融雪剂凝冰点测试[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(5): 1561-1567. LI Ping, WEI Xiying, NIAN Tengfei, et al. Freezing point test of deicers on asphalt pavement in seasonal frozen region[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(5): 1561-1567.
- [19] DAN H C, TAN J W, DU Y F, et al. Simulation and optimization of road deicing salt usage based on water-ice-salt model[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 169: 102917.
- [20] 谢康. 高速公路除冰融雪技术应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018. XIE Kang. Research on the application of expressway deicing and snow-melting technology[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [21] 关永胜, 张志祥, 黄子杰, 等. 不同融雪物质的化冰性能及评价方法研究[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 220-224. GUAN Yongsheng, ZHANG Zhixiang, HUANG Zijie, et al. Study on deicing performance and evaluation method of different snow melting substances[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(2): 220-224.
- [22] 霍尚斌. 融雪剂非均匀撒布技术的研究[J]. 山西交通科技, 2015(6): 14-17. HUO Shangbin. The study on non-uniform spraying technology of snowmelting agent[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2015(6): 14-17.
- [23] 霍尚斌. 脉冲式融雪剂撒布装置的研发[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(2): 87-91. HUO Shangbin. Research and development of pulsed snow-melting agent spraying device[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(2): 87-91.

(上接第261页)

- WU Chuanhai, TI Jing, MA Jianping. Digitalization of asphalt pavement maintenance information based on holographic 3D detection technology[J]. Guangdong Highway Communications, 2023, 49(1): 1-7.
- [16] 陆树荣. 基于三维激光的车辙表面纹理特征研究[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 48-51. LU Shurong. Research on texture feature of rut surface based on 3D laser[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 48-51.
- [17] 方翠. 对称式线激光路面车辙检测技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. FANG Cui. Study on the symmetric line laser rut detection technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [18] 陈梁友, 闫浩. 基于数字全息和数字图像相关方法的面内位移测量[J]. 光子学报, 2022, 51(4): 0409002. CHEN Liangyou, YAN Hao. In-plane displacement measurement based on digital holography and digital image correlation[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4): 0409002.
- [19] ZHENG Q, MASHIWA N, FURUSHIMA T. Evaluation of large plastic deformation for metals by a non-contacting technique using digital image correlation with laser speckles[J]. Materials & Design, 2020, 191: 108626.
- [20] KULKARNI R, RASTOGI P. Three-dimensional displacement measurement from phase signals embedded in a frame in digital holographic interferometry[J]. Applied Optics, 2015, 54(11): 3393-3397.
- [21] 郝雪丽, 孙朝云, 李伟, 等. 基于结构光的路面三维重构技术[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(8): 2303-2307. HAO Xueli, SUN Zhaoyun, LI Wei, et al. 3D road reconstruction research based on structured light[J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(8): 2303-2307.
- [22] YAN H, PAN B. Three-dimensional displacement measurement based on the combination of digital holography and digital image correlation[J]. Optics Letters, 2014, 39(17): 5166-5169.