

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.012

沥青路面表面纹理的检测方法及其精准度分析

陈占权 编译

(悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司,江苏 苏州 215000)

摘要:为了准确地测定出沥青路面的表面纹理信息,采用佛罗里达纹理仪(简称FTM)分别对12条沥青路面进行平均轮廓深度(简称 D_{MPD})检测,以检测的 D_{MPD} 数据为依据,分析FTM的精准度,探讨FTM测量数据的影响因素。在此基础上,对比FTM与圆形轨道仪(CTM)测得的数据,进一步验证FTM在沥青道路表面纹理信息测量方面的可靠性。结果表明:FTM可以有效地检测沥青路面表面纹理信息,利用FTM可以快速测得 D_{MPD} ;FTM与CTM两种方法测得结果之间存在很高的相关性,FTM测试结果可以作为表征沥青路面抗滑性能的可靠依据;此外,测试地点、级配类型和集料类型对所测道路表面纹理有显著的影响。

关键词:道路工程;路面表面纹理;佛罗里达纹理仪;抗滑性能;平均轮廓深度(D_{MPD})

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

0 引言

交通安全是道路领域需努力解决的问题,而交通事故与路面的抗滑性能有直接关系^[1]。道路表面纹理是决定道路抗滑性能的重要因素^[2],其按长度可分为0~0.5 mm的微观纹理,0.5~50 mm的宏观纹理和50~500 mm的巨型纹理。现行测量沥青路面表面纹理信息的主要方法有接触式和非接触两类测量方式^[3]。接触式测量方法包括铺砂法、排水法、摆式仪(BPT)法、动态旋转式摩擦因数测试仪(DFTest)法及拖车式摩擦因数仪(Grip Tester)法等,以上方法通过仪器测定相关指标间接评价道路表面纹理状况^[4]。非接触式测量方法包括近景摄影测量(CRP)法、数字灰度图像法、激光测量法和工业CT扫描法。从未来智慧交通的发展角度看,使用非接触的方法评价路面抗滑性更符合未来的发展^[5]。激光和近景摄影在内的非接触式测量方法由于在不干扰试样特性的情况下收集数据,受到了工程领域的广泛关注^[6]。但是,非接触式测量的测试设备和程序也比其他测试方法复杂得多。Liu等^[7]开发了几种非接触方式测量路面宏观纹理的仪器,其中圆形轨道仪(CTM)和佛罗里达纹理仪(FTM)是两种基于激光的便携式设备;Prowell等^[8]比较了CTM和铺砂法测量道路的纹理信息,以评价CTM测量结果的准确性和离散度;

Abe等^[9]、Jackson等^[10]也研究了CTM测试结果的有效性。FTM是一种新型快速检测沥青路面表面纹理信息的设备,其优点是测速快、重量轻且易于操作,可用于现场检测与评价,但是缺乏大量的现场试验数据支撑。因此,该文首先验证FTM测量结果的精准度。同时,分析沥青混合料级配类型、集料类型及不同测量方式对FTM测量结果的影响。此外,在确定了FTM测量结果有效性和精准度的基础上,分析FTM和CTM之间的相关性,以进一步验证FTM测量的可靠性。

1 FTM检测原理与设备

1.1 FTM检测原理

FTM通过将激光探头置于需检测道路区域的表面,设备借助激光信号将道路表面纹理信息反馈至计算机,再经过开发的软件生成 D_{MPD} 数据。其中,FTM底端的圆形测量探头分成了8个区域, D_{MPD} 值是经过8个区域分别测得 D_{MPD} 后计算平均值。

1.2 FTM检测设备

FTM是基于激光研发出的一种用于检测道路表面宏观纹理信息的便携式设备(图1),由佛罗里达州交通运输部(FDOT)设计,后被逐渐应用于沥青路面离析与抗滑性能检测。检测前先保持道路表面干燥并用刷子清洁,以确保没有残留物或松散的颗粒,然

后使用FTM测量路面的纹理信息。



图1 FTM外观

2 试验条件及安排

2.1 试验路段概况

试验路段位于美国佛罗里达州,选择该地区12条近期铺筑的热拌沥青路面作为测试站点,各试验路段的沥青混合料参数如表1所示。因为道路集料的大小和类型均会影响沥青的表面纹理,所以选择的试验路段由3种常见的沥青和两种不同级配类型的混合料铺筑。试验段采用5种沥青混合类型:SP 9.5、SP 12.5、FC 9.5、FC 12.5和FC-5。

表1 各试验路段的沥青混合料参数

级配类型	混合料类型	集料类型	站点编号
开级配	FC-5	花岗岩	1
		花岗岩	4
		石灰石	7
		石灰石	12
密级配	FC/SP 9.5	花岗岩	2
		花岗岩	5
		石灰石	8
	FC/SP 12.5	石灰石	11
		花岗岩	3
		石灰石	6
		花岗岩	9
		石灰石	10

2.2 试验路段分类

沥青混合料的级配、集料类型和路面服役时间会影响道路表面的纹理信息^[11],为探讨FTM测试数据的影响因素,在选择试验路段时考虑以下因素:

(1) 沥青混合料的级配

最大公称粒径是影响路面纹理的主要因素,沥青混合料的级配变化也会影响路面纹理^[12]。表1中

列出的12个试验路段是根据以下因素选择的,由于SP 9.5和FC 9.5沥青混合料具有相同的级配和最大公称粒径,因此将它们合并在一起,SP 12.5和FC 12.5的情况也是如此。FC 9.5和FC 12.5是磨耗层混合料,最大公称粒径分别为9.5 mm和12.5 mm。SP 9.5和SP 12.5分别是最大公称粒径为9.5 mm和12.5 mm的superpave沥青混合料。FC-5也是一种磨耗层混合料,最大公称粒径为12.5 mm。表2为不同类型沥青混合料的级配范围。

表2 不同类型沥青混合料的级配范围

筛孔尺寸/ mm	SP 9.5或 FC 9.5		SP 12.5或 FC 12.5		FC-5	
	最小/ %	最大/ %	最小/ %	最大/ %	最小/ %	最大/ %
19	—	—	100	—	100	—
12.5	100	—	90	100	85	100
9.5	90	100	—	90	55	75
4.75	—	90	58	—	15	25
2.36	32	67	10	58	5	10
0.075	2	10		10	2	4

(2) 集料类型

佛罗里达州道路铺筑中一般使用石灰石和花岗岩两种集料,该文考虑这两种集料对沥青路面表面纹理的影响。花岗岩的质地相比石灰石更加光滑,这会导致铺筑的沥青路面表面纹理也存在一定差异。

(3) 路面服役时间

在道路服役过程中,车辆荷载使得沥青路面产生磨损^[13]。该文研究目标是分析FTM测量道路表面纹理信息的精准度,所以选择的试验路段均为近期铺筑的沥青路面。对试验路段的路面纹理信息测量在道路铺筑后封闭交通的情况下进行。

2.3 FTM的测量结果

为了避免每个测量设备在测量时的位置产生差异,保证FTM准确地放置在指定位置,设备的边缘用粉笔标记。同样,在使用同一设备进行重复测量时,设备被提起后再次放置在指示位置重复测量。

为了降低FTM测量误差,在每条试验路段随机选择3个测试点,并在每个测试点和行车道内进行标记。3个测试点分别命名为A、B和C,测试站点1测量过程的原始数据如表3所示,每个测试点分别用3个设备测量。

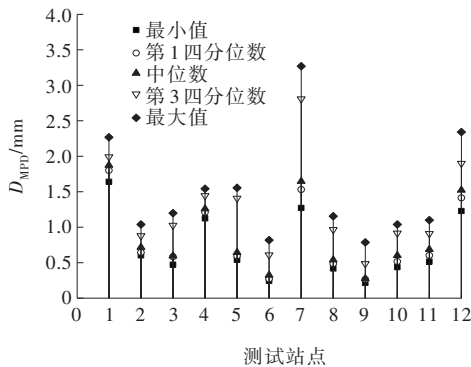
表 3 测试点 1 的测量数据

设备号	重复测量	各测量点的 D_{MPD}/mm		
		A	B	C
1	a	1.991 2	1.837 0	2.141 6
	b	1.791 7	2.084 0	2.267 2
	c	1.985 2	1.992 8	1.988 2
2	a	1.819 2	1.856 4	2.194 3
	b	1.695 9	1.872 4	1.881 1
	c	1.646 6	1.690 3	1.977 4
3	a	1.647 4	1.847 1	2.136 8
	b	1.709 1	1.817 5	1.987 7
	c	1.735 2	1.809 9	2.047 7

3 结果及分析

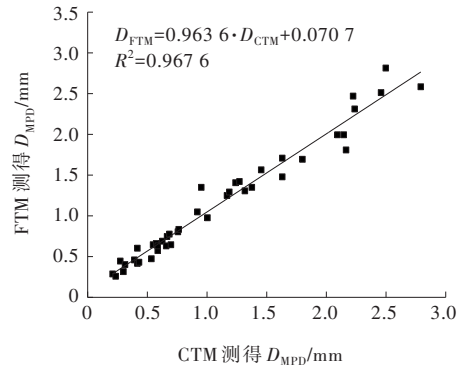
3.1 试验路段纹理分布

在各个测试站点的道路表面纹理检测中发现, D_{MPD} 数据(图 2)存在一定差异, 其中测试站点 7 表面纹理分布差异较大。而且, 测试站点 1、4、7 和 12 的 D_{MPD} 中位数值高于其他测试站点, 因为它们的沥青混合料是 FC-5, 并且级配类型为开级配。

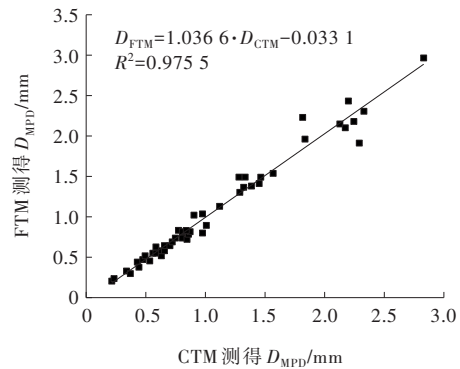
图 2 道路表面纹理 D_{MPD} 数据

3.2 FTM 和 CTM 之间的相关性

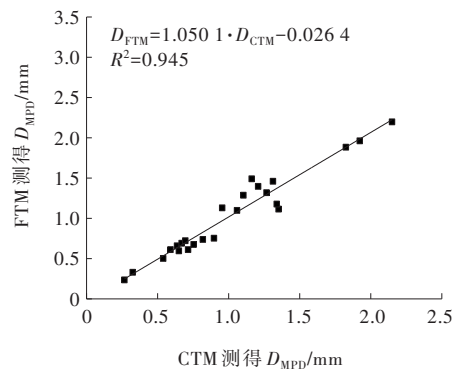
为了确定 FTM 测量路面表面纹理的有效性, 研究 CTM 和 FTM 之间的相关性。在试验路的 1~6 号站点使用两种纹理设备对沥青表面纹理信息进行了测量, 每个试验路段随机选择 25 个测量点, 使用 FTM 和 CTM 分别测量每个测试点的 D_{MPD} , 然后将测量数据的平均值作为该测试点的 D_{MPD} 值。每个测试点的表面纹理通过 3 个 FTM 设备进行测量, 通过线性回归模型统计 D_{MPD} 数据, 分别对每个 FTM 设备测量的数据与 CTM 进行相关性分析, 结果如图 3 所示。



(a) 设备 1



(b) 设备 2



(c) 设备 3

图 3 FTM 与 CTM 测量数据相关性分析

由图 3 可以看出: CTM 和 FTM 测量数据的线性回归分析结果 R^2 大于 0.95, 表明 FTM 和 CTM 测量结果存在较高的相关性, 所以 FTM 和 CTM 测量的 D_{MPD} 可以相互替代。

为了对比 FTM 和 CTM 测量 D_{MPD} 平均值的差异是否显著, 对测量数据进行了 t 检验(表 4)。由表 4 可得出: CTM 和 FTM 测量的 D_{MPD} 在统计上是等效的。

3.3 FTM 精度分析

精度是指在相同条件下, 多次测量所得数值的一致程度。每次测量过程都有一些不可避免的误差, 这会导致测试结果变化。因此, 采用重复性和重

现性来评价FTM测量的精度。重现性评价方法是使用多个设备和试验员测量,对相同路面各作单次测量,在95%概率水平两个独立测试结果的最大差值,而重复性分析是用一个装置和操作员测量的结

果,在95%概率水平两个独立测试结果的最大差值。

试验过程中,分别对12个站点进行了表面纹理信息检测,分别通过标准差和变异系数来对重复性和重现性进行分析。测试结果见表5。

表4 FTM和CTM测量数据的t检验

设备号	平均值/mm		方差/mm		假设平均差/mm		P	
	FTM法	CTM法	FTM法	CTM法	FTM法	CTM法	FTM法	CTM法
1	1.07	1.10	0.51	0.49	0	—	0.11	—
2	0.94	0.94	0.37	0.40	0	—	0.92	—
3	0.97	0.99	0.22	0.25	0	—	0.34	—

注: $H_0:\mu=\mu_0$ (零假设,即FTM和CTM测得的 D_{MPD} 均值相等);P为显著性水平。

表5 FTM测量数据的重复性和再现性统计

路面类型	级配类型	集料类型	测试站点	均值	同一设备			不同设备		
					方差	标准差	变异系数/%	方差	标准差	变异系数/%
开级配	FC-5	花岗岩	1	1.907	0.010 6	0.103	5.396	0.016 5	0.128	6.737
			4	1.314	0.005 1	0.071	5.424	0.008 4	0.092	6.985
		石灰石	7	2.054	0.007 2	0.085	4.132	0.012 8	0.113	5.509
			12	1.729	0.008 8	0.094	5.422	0.009 7	0.098	5.691
密级配	FC/SP 9.5	花岗岩	2	0.755	0.002 7	0.052	6.950	0.002 8	0.053	7.056
			5	0.866	0.002 1	0.046	5.175	0.003 4	0.059	6.603
		石灰石	8	0.684	0.002 8	0.053	5.998	0.004 2	0.065	8.553
	FC/SP 12.5	花岗岩	11	0.737	0.002 5	0.050	6.764	0.004 1	0.064	8.663
			3	0.745	0.001 9	0.044	5.920	0.003 1	0.056	7.530
		石灰石	6	0.439	0.000 3	0.018	3.996	0.004 5	0.067	15.205
			9	0.352	0.001 0	0.032	9.162	0.001 5	0.039	11.029
			10	0.673	0.002 5	0.050	7.448	0.002 9	0.053	7.944
			开级配均值	—	0.007 9	0.088 2	—	0.011 9	0.107 8	—
			密级配均值	—	0.002 0	0.043 1	—	0.003 3	0.057 0	—
			整体均值	—	0.004 0	0.058 2	—	0.006 2	0.073 9	—

由表5可以看出:① FC-5混合料的标准差高于其他混合料的标准差。由于FC-5沥青混合料是开级配的,因此集料粒径的变化可能会导致较大的标准差;② 测试站点2和10的相同设备和不同设备之间的标准差几乎相同。当设备差异的方差在零附近波动,表明设备之间的检测结果一致性较高。此外,测试站点6和9的设备间 D_{MPD} 的变异系数最高,表明相对于其他站点,测试站点6和9的 D_{MPD} 差异较大。

表6为使用FTM测量的可接受偏差范围,并将其用于评估FTM所测量纹理的精度。以开级配混合料和单设备精度为例,使用相同设备和操作员同时正确操作的两个 D_{MPD} 的最大可接受偏差范围不应超过

0.25 mm。但是,对于多机精度和开级配沥青混合料,使用不同的设备和操作员正确进行两次测量 D_{MPD} 的最大可接受偏差范围应不超过0.31 mm。此外,表7为FTM设备的标准差平均值,这表明FTM设备的最大可接受偏差范围分别为0.18 mm和0.22 mm。

表6 FTM测量数据精度统计

级配类型	测试指标	标准差/mm	可接受偏差范围/mm
开级配	单机精度	0.089	0.25
	多机精度	0.109	0.31
密级配	单机精度	0.045	0.13
	多机精度	0.058	0.16

3.4 FTM 测量影响因素分析

为了分析FTM测量的影响因素,对数据进行了方差分析。使用线性模型以95%置信区间进行分析,并且 P 值(显著性水平)小于等于0.05的因素被认为是具有显著影响,结果如表8所示。

表 7 FTM 测量数据精度统计汇总

测试指标	标准差/mm	可接受偏差范围/mm
单机精度	0.063	0.18
多机精度	0.078	0.22

表 8 FTM 测量的因素分析

影响因素	SS	df	F	P
测试点	95.960	11	91.630	0
设备	0.054	2	0.283	0.754
平行样本量	0.028	2	0.144	0.866
级配类型	84.440	2	331.166	0
集料类型	0.267	1	3.782	0.039

注:df为自由度;SS为平方和;当 $P>0.05$ 时,表示该因素影响不显著。

由表8可以看出:①测试地点、级配类型和集料类型对所测道路表面纹理有显著的影响;②使用不同的FTM进行 D_{MPD} 测量以及使用同一个FTM进行重复测量对最终获取的测量结果没有显著的影响。

4 结论

(1) FTM是一种适合测量路面纹理信息的设备,其测量结果具有较高的重复性和重现性,所以FTM可以精准地测量出沥青路面的 D_{MPD} 。

(2) FTM测得的 D_{MPD} 存在一定差异,开级配沥青混合料铺筑的道路普遍具有较高的 D_{MPD} 。

(3) 通过线性回归模型的统计方法进行分析,结果表明FTM和CTM测量结果存在较高的相关性,所以FTM和CTM测量的 D_{MPD} 可以相互替代。

(4) FTM测量中,测试地点、级配类型和集料类型对所测道路表面纹理有显著的影响。另外,使用不同的FTM进行 D_{MPD} 测量以及使用同一个FTM进行重复测量对最终获取的测量结果没有显著的影响。

参考文献:

[1] BAQERSAD M, MOHAMMADFZALI M, CHOUBANE B,

- et al. Precision assessment of the Florida texture meter in hot mix asphalt[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2018, 144(2): 04018003.
- [2] LEE H, UPSHAW P, HOLZSCHUHER C, et al. Detection of asphalt concrete segregation using laser texture meters[C]// Proceedings of the Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, 2014.
- [3] SUN L, WANG Y Y. Three-dimensional reconstruction of macrotexture and microtexture morphology of pavement surface using six light sources-based photometric stereo with low-rank approximation[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(2): 04016054.
- [4] BAQERSAD M, MOHAMMADFZALI M, CHOUBANE B, et al. Application of laser macrotexture measurement for detection of segregation in asphalt pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2018, 144(3): 04018032.
- [5] 陈嘉颖, 黄晓明, 郑彬双, 等. 基于近景摄影测量技术的沥青路面纹理实时识别系统[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(5): 973-980.
- [6] 周兴林, 肖神清, 刘万康, 等. 沥青路面表面纹理的多重分形特征及其磨光行为[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 175-180.
- [7] LIU Q F, KAVANAGH L, SHALABY A, et al. Comparison of pavement texture measurements from a three-dimensional profiler and a circular track meter at MnROAD test facilities[J]. Transportation Research Record, 2016, 2591(1): 121-129.
- [8] PROWELL B D, HANSON D I. Evaluation of circular texture meter for measuring surface texture of pavements[J]. Transportation Research Record, 2005, 1929(1): 88-96.
- [9] ABE H, TAMAI A, HENRY J J, et al. Measurement of pavement macrotexture with circular texture meter[J]. Transportation Research Record, 2001, 1764(1): 201-209.
- [10] JACKSON N M, CHOUBANE B, HOLZSCHUHER C. Assessment of precision of circular track meter and dynamic friction tester[J]. Transportation Research Record, 2009, 2093(1): 118-127.
- [11] MATAEI B, ZAKERI H, ZAHEDI M, et al. Pavement friction and skid resistance measurement methods: A literature review[J]. Open Journal of Civil Engineering, 2016, 6(4): 537-565.
- [12] 王元元. 沥青路面抗滑特性与其表面粗糙特性之关系研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [13] 朱晟泽. 基于路面宏观纹理的轮胎抗滑行为数值模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.