

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.06.017

基于数字图像技术的沥青路面变异系数 相关性评价及预测

张莹莹¹, 刘飞², 黎晓³(1. 云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041; 2. 云南通衢公路工程有限公司;
3. 云南省交通规划设计研究院有限公司)

摘要:随着现代科学技术的发展,数字图像技术已被广泛应用于公路工程质量的检测、分析和评定工作。该文通过借鉴前人研究成果,采用 Matlab 软件编程计算不同等分法下的变异系数并进行相关性分析,表明各等分法之间存在明显的关联,且 4×4 等分法与另外4种等分法之间的相关系数平均值最大。以 4×4 等分法作为基础建立数字纹理深度变异系数快速预测公式,预测结果非常理想,可为均匀性指标的分析 and 计算减少大量工作量,同时为指导路面施工争取宝贵时间,及早发现沥青混合料摊铺过程中发生的离析现象,及时调整摊铺方式,显著减少沥青路面施工能耗,有利于节能减排、保护环境。

关键词:数字图像;离析;变异系数;相关性;预测

随着现代科学技术的发展,越来越多的高科技被应用到公路工程建设领域。而数字图像技术作为其中的一项,也被广泛应用于工程质量的检测、分析和评价。该技术可方便快捷地获取数据,并完成分析、评价以及结果反馈,显著提高了公路的施工效率和检测效率,大幅降低以往须工程技术人员人工采集和检测相关技术指标的工作量和现场工作的危险程度。

沥青混合料离析是路面工程常见的一类工程问题,离析导致的路面病害问题层出不穷。关于沥青混合料离析的无损检测方法、导致离析的原因以及减少离析的措施,沈吉安从定性角度作出了比较全面的分析,但缺乏定量的评价和判定。随着数字图像技术的兴起和发展,越来越多的研究人员将该技术用于沥青混合料均匀性的定量化分析和评价,并为此进行了大量的研究和探索。其中,有用静矩离散法来判定沥青路面是否离析,用多重分形谱来定量评价沥青路面表面离析,也有采用路面数字纹理深度变异系数或者图像颗粒面积分布变异系数和面积控制系数两个指标来表征沥青混合料颗粒分布的均匀性。

该文采用文献中提出的均匀性评定方法,利用数字图像技术对沥青路面摊铺均匀性的指标进行相关性分析,从中探究不同区域等分法之间的关联,确定适宜

的等分方法,建立沥青路面数字纹理深度变异系数预测公式,以便降低计算机的计算量,同时为指导路面施工争取宝贵时间,及早发现沥青混合料摊铺过程中发生的离析现象,及时调整摊铺方式,减少沥青路面施工能耗,保护环境。

1 变异系数计算

借鉴文献[9]的指标及相关计算公式,在安徽省某高速公路沥青路面摊铺现场采集50张照片,并通过 Matlab 软件编程,对50张沥青路面摊铺照片分别按照 $2\times 2, 3\times 3, 4\times 4, 5\times 5, 10\times 10$ 等分法来计算相应的变异系数 C_V 值,计算公式如下:

$$\overline{H_p} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{pi}}{n} \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{(H_{pi} - \overline{H_p})^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$C_V = \frac{S}{\overline{H_p}} \times 100 \quad (3)$$

式中: H_{pi} 为分块小区域内的平均数字纹理深度; $\overline{H_p}$

收稿日期:2020-07-02(修改稿)

基金项目:云南省交通运输厅科技项目(编号:云交科2017(A)15,云交科2017(A)01)

作者简介:张莹莹,女,硕士,高级工程师, E-mail: zhangyy@stwp.com

为图片的平均数字纹理深度; S 为路面数字纹理深度标准差; C_V 为路面数字纹理深度变异系数(以下简称变异系数); n 为等分个数,文中 n 取值分别为4,9,16,25,100。

5种等分法下的变异系数计算结果见表1。

表1 不同等分法下的变异系数值

照片编号	C_{V4}	C_{V9}	C_{V16}	C_{V25}	C_{V100}
1	4.68	5.04	5.18	5.39	5.60
2	6.17	5.44	5.66	5.65	5.48
3	5.38	5.92	5.65	5.76	6.02
4	4.29	4.81	4.69	5.35	4.43
5	7.86	7.38	7.12	7.09	7.29
6	3.15	3.87	3.55	3.24	2.88
7	3.15	2.77	2.41	2.59	1.80
8	3.58	4.29	4.49	4.6	4.47
9	5.49	6.02	6.04	6.46	5.98
10	5.35	5.78	5.09	5.51	5.51
...
41	4.02	3.86	4.12	3.90	4.00
42	4.62	4.23	3.99	4.13	3.77
43	5.45	4.61	5.38	5.25	5.14
44	4.16	3.29	3.36	2.97	2.80
45	6.46	6.71	6.65	6.69	7.02
46	10.52	9.95	9.98	10.32	10.46
47	5.88	6.35	6.31	6.42	6.42
48	3.46	3.77	3.37	3.81	2.50
49	5.33	5.42	5.33	5.21	5.18
50	6.31	5.8	5.80	5.92	5.2

注: C_{V4} 指 2×2 方式等分的变异系数; C_{V9} 指 3×3 方式等分的变异系数;其余依此类推;下同。

分别选取7、11、20和46号变异系数值与其对应的照片进行对比,结果见表2、图1。

表2 不同等分法下的变异系数值

照片编号	C_{V4}	C_{V9}	C_{V16}	C_{V25}	C_{V100}
7号照片	3.15	2.77	2.41	2.59	1.80
11号照片	4.12	3.76	3.57	3.37	3.84
20号照片	9.95	10.59	11.73	11.73	12.37
46号照片	10.52	9.95	9.98	10.32	10.46

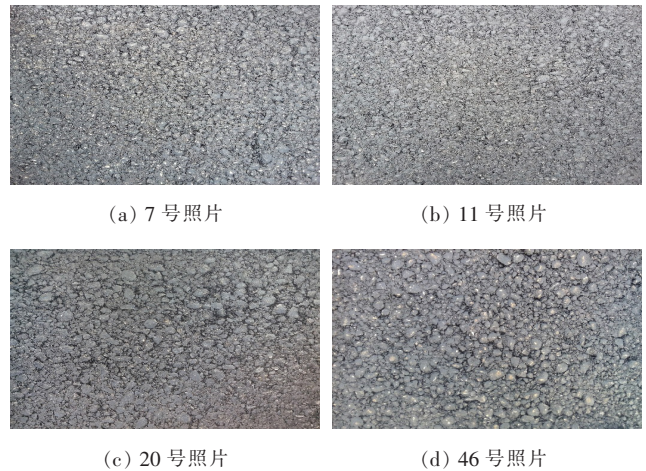


图1 沥青路面照片

从表2、图1中可以看出:7号照片的沥青混合料较为均匀,其对应的5种等分法下的变异系数值为1.8~3.15;11号照片对应的变异系数值处于3.37~4.12,相较于7号照片,沥青混合料更为均匀;20号和46号照片的沥青混合料存在明显的集料离析,其对应的5种等分法下的变异系数值分别为9.95~12.37和9.95~10.52,显著大于7号和20号照片的变异系数值。

由此可见,变异系数 C_V 可用于表征沥青路面摊铺时集料分布的均匀程度, C_V 值越大,则沥青路面构造深度分布越不均匀,路面越有可能发生集料离析。

2 不同等分区域方法的变异系数相关性分析

通过对表1不同等分法下的变异系数值进行观察,可以发现该数值与等分份数之间存在某种关联。为此,对 2×2 、 3×3 、 4×4 、 5×5 、 10×10 共5种等分区域方法得到的 C_V 值进行相关性分析,最终根据相关性分析的结果,从这5种方法中选择一种较为稳定、具有代表性等分法作为沥青路面变异系数的计算标准,以提升离析判定的工作效率。

首先对 C_{V4} 与 C_{V9} 、 C_{V16} 、 C_{V25} 、 C_{V100} 的相关性进行分析。以 C_{V4} 为自变量, C_{V9} 、 C_{V16} 、 C_{V25} 、 C_{V100} 分别作为因变量,绘制相关性分析图(图2),并进行公式拟合。

从图2可知: C_{V4} 与 C_{V9} 、 C_{V16} 、 C_{V25} 、 C_{V100} 存在较好的线性相关,线性拟合公式见式(4)~(7),其相关系数为0.887 01~0.915 65,拟合结果较为理想。印证了对表1不同等分法下的变异系数值与等分份数之间

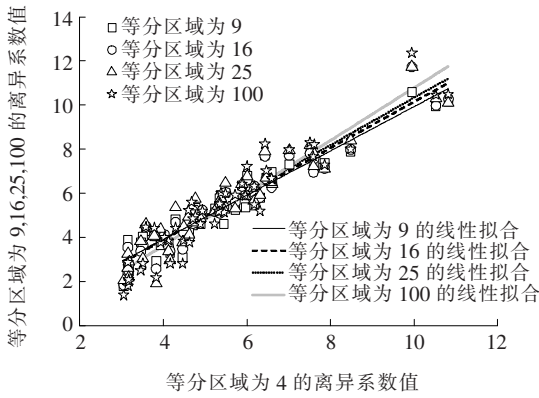


图 2 C_{V4} 与 C_{V9} 、 C_{V16} 、 C_{V25} 、 C_{V100} 的相关性分析

存在一定相关性的观察和猜想。

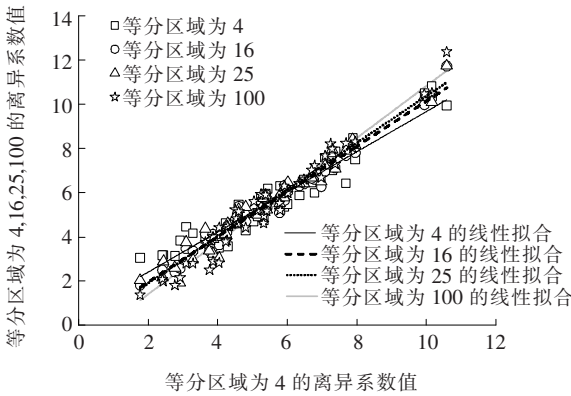
$$C_{V9} = -0.116\ 93 + 1.004\ 94C_{V4}, R^2 = 0.909\ 88 \quad (4)$$

$$C_{V16} = -0.305\ 27 + 1.045\ 57C_{V4}, R^2 = 0.915\ 65 \quad (5)$$

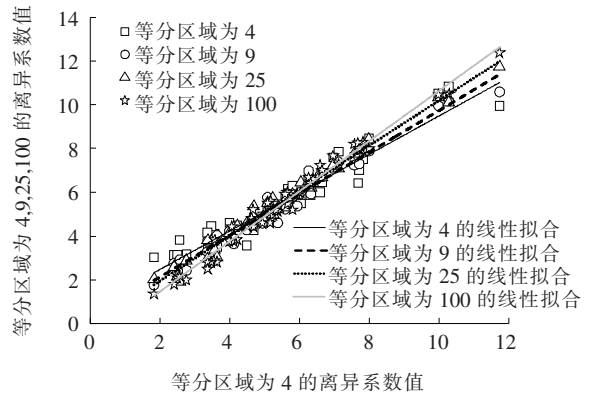
$$C_{V25} = -0.386\ 54 + 1.072\ 48C_{V4}, R^2 = 0.893\ 09 \quad (6)$$

$$C_{V100} = -1.133\ 59 + 1.191\ 93C_{V4}, R^2 = 0.887\ 01 \quad (7)$$

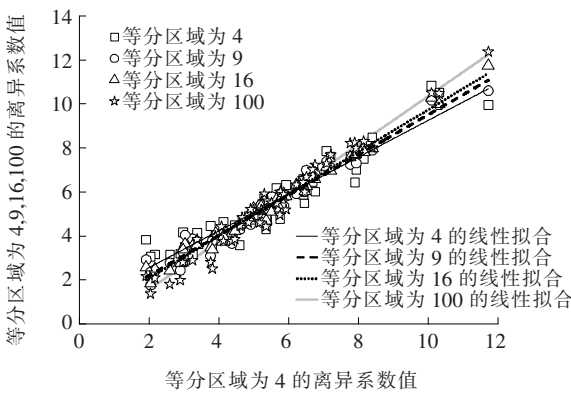
同理,分别对 C_{V9} 与 C_{V4} 、 C_{V16} 、 C_{V25} 、 C_{V100} ; C_{V16} 与 C_{V4} 、 C_{V9} 、 C_{V25} 、 C_{V100} ; C_{V25} 与 C_{V4} 、 C_{V9} 、 C_{V16} 、 C_{V100} ; C_{V100} 与 C_{V4} 、 C_{V9} 、 C_{V16} 、 C_{V25} 作相关性分析,结果见图 3 和表 3。



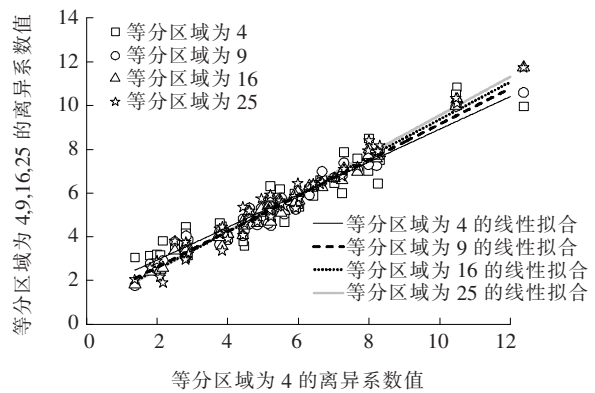
(a) C_{V19} 与 C_{V4} 、 C_{V16} 、 C_{V25} 、 C_{V100} 的相关性



(b) C_{V16} 与 C_{V4} 、 C_{V9} 、 C_{V25} 、 C_{V100} 的相关性



(c) C_{V25} 与 C_{V4} 、 C_{V9} 、 C_{V16} 、 C_{V100} 的相关性



(d) C_{V100} 与 C_{V4} 、 C_{V9} 、 C_{V16} 、 C_{V25} 的相关性

图 3 相关性分析结果

从图 3 和表 3 可知:5 种等分法下的变异系数值均具有较好的线性相关性。同时,相关系数最小值为 0.887 01,对应的是 2×2 和 10×10 等分法下的变异系数线性拟合结果,最大值为 0.983 64,对应的是 4×4 和 5×5 等分法下的变异系数线性拟合结果。而通过对变异系数值的相关系数求平均值可以发现,5 种

等分法得到的 C_V 相关性均大于 0.9,说明不同等分区域法之间存在明显的关联。其中以 4×4 与其他 4 种等分法的相关系数平均值最大,即 4×4 等分法下的变异系数值与 2×2 、 3×3 、 5×5 、 10×10 等分法下的变异系数值相关性最好。

表3 不同等分法下的 C_v 相关系数值汇总

项目	R_4^2	R_9^2	R_{16}^2	R_{25}^2	R_{100}^2
R_4^2	1	0.909 88	0.915 65	0.893 09	0.887 01
R_9^2	0.909 88	1	0.972 47	0.963 53	0.960 78
R_{16}^2	0.915 65	0.972 47	1	0.983 64	0.980 07
R_{25}^2	0.893 09	0.963 53	0.983 64	1	0.967 84
R_{100}^2	0.887 01	0.960 78	0.980 07	0.967 84	1
平均值 \bar{R}^2	0.921 13	0.961 33	0.970 37	0.961 62	0.959 14

3 不同等分区域方法的变异系数预测

基于上述分析结果,以 4×4 等分区域法作为基础,对其他不同等分区域方法下的变异系数进行预测。

首先,根据图 3(b)建立预测公式如式(8)所示:

$$C_{V_n} = A_{16} \times C_{V_{16}} + B_{16}, n=4, 9, 16, 25, 100 \quad (8)$$

式中: C_{V_n} 为需要预测的等分区域为 n 时的变异系数值($n=4, 9, 16, 25, 100$); $C_{V_{16}}$ 为已知 4×4 等分法下的变异系数值; A_{16} 、 B_{16} 为预测系数。

通过相关性分析可知: 4×4 等分法下的变异系数值与 $2 \times 2, 3 \times 3, 5 \times 5, 10 \times 10$ 等分法下的线性拟合系数见表 4。

表4 4×4 等分法下的变异系数值与 $2 \times 2, 3 \times 3, 5 \times 5, 10 \times 10$ 等分法下的线性拟合系数

等分份数	A_{16}	B_{16}	R^2
4	0.877 39	0.721 27	0.915 65
9	0.951 03	0.231 42	0.972 47
16	1	0	1
25	1.029 97	-0.096 39	0.983 64
100	1.146 46	-0.820 82	0.980 07

从表 4 可知: $C_{V_{16}}$ 与 C_{V_n} ($n=4, 9, 16, 25, 100$) 之间的预测系数 A_{16} 、 B_{16} 均与等分份数相关。对此进行分析,得到图 4、5。

则对应的预测系数 A_{16} 、 B_{16} 见式(9)~(10):

$$A_{16} = 0.780 79 + 0.079 28 \times \ln(n - 0.574 79), R^2 = 0.998 71, n=4, 9, 16, 25, 100 \quad (9)$$

$$B_{16} = 1.183 39 - 0.430 04 \times \ln(n - 0.969 87), R^2 = 0.980 72, n=4, 9, 16, 25, 100 \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(8),得到根据已知 4×4 等分法下的变异系数值 $C_{V_{16}}$ 来预测等分区域为 n 时变

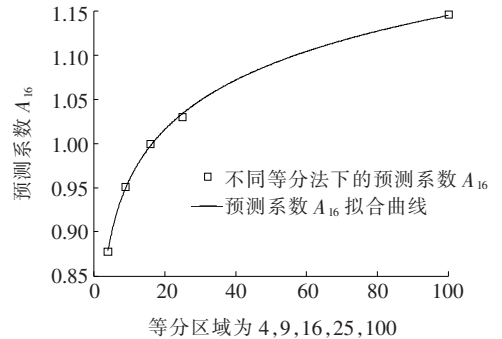


图4 A_{16} 与等分份数 n 的相关性分析

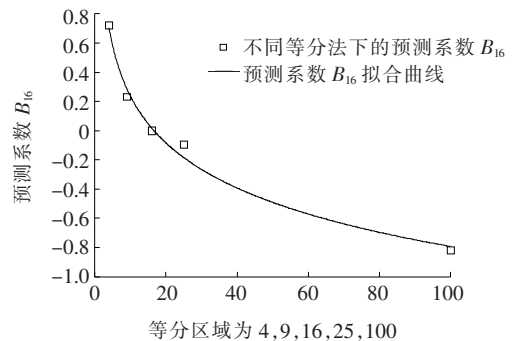


图5 B_{16} 与等分份数 n 的相关性分析

异系数值 C_{V_n} ($n=4, 9, 16, 25, 100$) 的预测公式:

$$C_{V_n} = [0.780 79 + 0.079 28 \times \ln(n - 0.574 79)] \times C_{V_{16}} + [1.183 39 - 0.430 04 \times \ln(n - 0.969 87)], n=4, 9, 16, 25, 100 \quad (11)$$

将 $C_{V_{16}}$ 作为已知值,根据式(11)预测 C_{V_n} ($n=4, 9, 16, 25, 100$),得到的变异系数实测结果与预测结果关系图如图 6 所示。

由图 6 可见:根据经验公式(11)预测得到的 C_{V_n} ($n=4, 9, 16, 25, 100$) 和实测值极为接近。采用相对误差 = $\frac{\text{预测值} - \text{实测值}}{\text{实测值}} \times 100\%$ 公式进行统计后发现,共计 250 组的对比数据中,有 209 组数据(占比 83.60%)相对误差的绝对值 $\leq 10\%$, 27 组数据(占比

10.80%)为10%~15%,10组数据(占比4%)为15%~20%,4组数据(占比1.60%)>20%,详见图7。

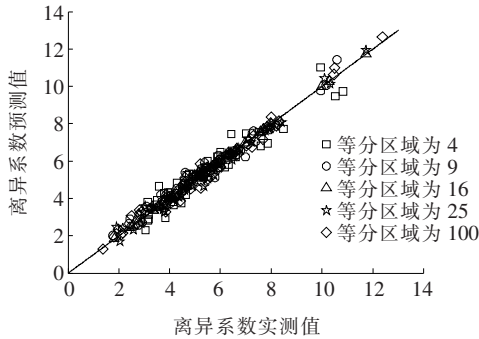


图6 变异系数的实测结果与预测结果关系图
(等分份数 $n=4,9,16,25,100$)

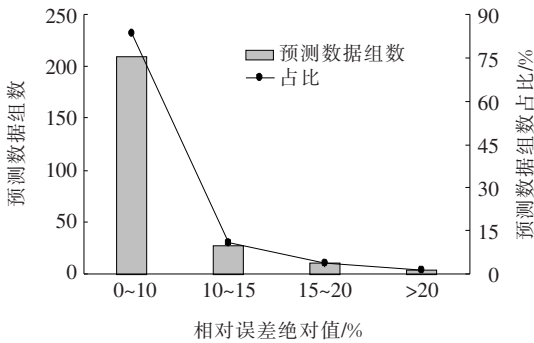


图7 变异系数预测结果统计分析

4 结论

(1) 采用 $2 \times 2, 3 \times 3, 4 \times 4, 5 \times 5, 10 \times 10$ 共5种等分法,对不同等分法下的路面数字纹理深度变异系数 C_v 值与对应的路面摊铺照片对比,明确了 C_v 值判定沥青路面是否发生集料离析的可行性。

(2) 通过对比分析 $2 \times 2, 3 \times 3, 4 \times 4, 5 \times 5, 10 \times 10$ 共5种等分法下两两相关系数可知, 4×4 等分法下的变异系数数值与其他等分法下的变异系数数值相关性最

好,最具有代表性。

(3) 以 4×4 等分区域法作为基础,采用公式 $C_{Vn} = [0.78079 + 0.07928 \times \ln(n - 0.57479)] \times C_{V16} + [1.18339 - 0.43004 \times \ln(n - 0.96987)]$, $n=4,9,16,25,100$ 来对5种不同等分区域方法下的变异系数进行预测,且据此得到高达83.60%占比的对比数据,其预测值与实测值相对误差的绝对值在10%以内。

(3) 通过建立变异系数的快速预测公式,可减少计算机的计算量,为指导路面施工争取宝贵时间,及早发现沥青混合料摊铺过程中发生的离析现象,有利于节能减排、保护环境。

参考文献:

- [1] 陆健. 图像系统在路面破损检测中的应用研究[D]. 东南大学硕士学位论文,2006.
- [2] 刘佳辉. 基于OTSU法分区图像识别技术及其在路面均匀性评价中的应用研究[D]. 华南理工大学硕士学位论文,2012.
- [3] 曹佳煜. 基于图像处理的路面裂缝自动检测技术研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2014.
- [4] 牛冬瑜,黄慈航,仁乾龙珠,等. 应用两种不同数字图像分析法对沥青裹覆集料的检测与评价[J]. 中外公路,2018(6).
- [5] 沈金安. 关于沥青混合料的均匀性和离析问题[J]. 公路交通科技,2001(6).
- [6] 曹源文,张军,吕瑞,等. 基于数字图像技术的沥青混凝土路面摊铺离析研究[J]. 公路,2017(4).
- [7] 潘艳珠,吴文亮,王端宜. 基于数字图像处理技术的沥青混合料级配离析评价方法[J]. 中外公路,2011(4).
- [8] 周兴林,肖神清,冉茂平. 基于多重分形理论的沥青路面集料离析评价方法[J]. 武汉科技大学学报,2016(4).
- [9] 李想,梁乃兴,赵毅. 基于数字图像技术沥青路面集料离析的研究[J]. 中外公路,2014(4).
- [10] 杜镇宇,梁乃兴,赵毅. 数字图像技术分析沥青路面均匀性的方法[J]. 中外公路,2017(5).