

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201807157

# 沥青混凝土均匀性数字图像评价方法

赵毅<sup>1</sup>, 梁乃兴<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 材料科学与工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

**摘要:** 为了实时、连续、定量评价沥青混凝土均匀性, 以安徽省济祁高速砾山段为试验段, 运用数字图像处理技术、统计学方法和单幅图像恢复物体表面形状原理对沥青混凝土摊铺状态和压实状态分别建立了基于四边静矩变异性和构造深度变异性的沥青混凝土均匀性数字图像评价方法及标准。以静矩变异系数和构造深度变异系数作为指标, 评价沥青混凝土数字图像均匀性。为获取沥青混凝土表面准确的图像信息, 规范了数字图像采集和预处理过程, 并推荐了图像采集的光照强度和拍摄高度。研究表明: 沥青混凝土均匀性数字图像评价方法切实可行、便捷高效, 结果定量客观, 较好地反映了沥青混凝土施工质量的均匀性。沥青混凝土摊铺均匀时, 静矩变异系数区间范围为(0, 1.5%]; AC-13和AC-25沥青混凝土压实均匀时, 数字构造深度变异系数区间范围分别为(0, 4.0%]和(0, 8.0%]。以16等分图像面积区域作为沥青混凝土压实图像划分最优方法, 拟合得到不同等分方式数字构造深度变异系数之间相关性方程, 且相关性显著。

**关键词:** 沥青混凝土; 数字图像处理技术; 均匀性; 评价方法; 标准

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)09-0088-08

## Digital image evaluation methods for the homogeneity of asphalt concrete

ZHAO Yi<sup>1</sup>, LIANG Naixing<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Aiming at the real-time, continuous, and quantitative evaluation of the homogeneity of asphalt concrete, taking the Jinan-Qimen Highway of Dangshan section in Anhui as an example, this study adopted the digital image processing technology, statistical method, and the principle of shape from shading to establish the homogeneity evaluation method and standard of asphalt concrete based on the quadrangular static moment variability and the structural depth variability in paving state and compaction state. Moment variation coefficient and structure depth variation coefficient were proposed as evaluation indexes to evaluate the homogeneity of asphalt concrete. To obtain accurate image information of asphalt concrete surface, the processes of digital image acquisition and pre-processing were standardized, and the illumination intensity and shooting height of image acquisition were recommended. The study showed that the proposed digital image evaluation method for the homogeneity of asphalt concrete was feasible and efficient, and the results were quantitative and objective, which could reflect homogeneity in the construction quality of asphalt concrete well. To achieve homogeneity of asphalt concrete paving, the moment variation coefficient should be controlled within (0, 1.5%]. When AC-13 and AC-25 asphalt concretes were homogeneous in compaction state, the structure depth variation coefficient should be controlled within (0, 4.0%] and (0, 8.0%], respectively. Considering the method of subdividing asphalt concrete compaction image into 16 equal areas as the optimum, the correlation equation of the digital image structure depth variation coefficient in different equal subdivision ways was established by coefficient simulation, and the correlations were remarkable.

**Keywords:** asphalt concrete; digital image processing technology; homogeneity; evaluation method; standard

沥青混凝土的均匀性直接影响着沥青路面的路用性能和使用寿命, 是导致沥青路面早期破坏的主

要因素之一<sup>[1-3]</sup>。研究表明, 离析的沥青路面其使用寿命会降低10%~50%<sup>[4]</sup>。沥青混凝土的均匀性是混凝土各组分共同作用的结果, 其中以集料分布均匀性对路面施工质量的影响最大<sup>[5]</sup>。

随着计算机技术的迅速发展, 数字图像处理技术已广泛应用于沥青混合料均匀性定量评价研究<sup>[6-8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>运用数字图像处理技术表征了沥青混合料粗集料的细观结构, 可视为沥青混合料数字图像处理技术研究的开端。文献<sup>[10]</sup>通过比较截面

收稿日期: 2018-07-21

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800704);

中国博士后科学基金(43XB3787XB);

河北省交通运输厅科技项目(QC2018-3);

河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2018201);

河北省科技厅重点研发计划(172176442)

作者简介: 赵毅(1980—), 男, 博士, 副教授;

梁乃兴(1957—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 赵毅, zhaoyi980@163.com

上相等区域里集料累计面积值的大小来评价沥青混合料的离析程度. 该方法主要考虑了截面上集料的累计面积, 即集料的分布数目, 却忽略了集料的分布位置. 文献[11]采用灰度共生矩阵图像分析方法计算表征表面纹理构造的参数. 文献[12]较早采用二维数字图像技术分析沥青混合料粗集料形态特征. 文献[13]采用数字图像处理和识别技术开发了沥青混合料细观结构的图像处理程序. 文献[14]针对集料的分布状态建立了一种基于数字图像处理技术的沥青混合料均匀性研究方法. 文献[15]运用数字图像技术建立了基于分析路面纹理中下凹区域的宏观构造宽度评价沥青路面离析的新方法. 目前, 数字图像处理技术侧重于研究沥青混合料内部结构和构造, 运用数字图像处理技术评价沥青混凝土施工质量均匀性, 能实现实时快速检测和评价的报道相对较少.

本文以安徽省济祁高速砀山段为试验段, 运用数字图像处理技术、统计学方法和单幅图像恢复物体表面形状原理对沥青混凝土摊铺状态和压实状态分别建立基于四边静矩变异性和构造深度变异性的沥青混凝土摊铺均匀性和压实均匀性的评价方法及标准, 规范了图像采集和预处理过程, 并分析了光照强度和拍摄高度对沥青混凝土均匀性数字图像评价的影响, 为开发实时、连续、定量的沥青混凝土均匀性检测评价系统提供理论指导.

## 1 沥青混凝土摊铺均匀性评价方法

### 1.1 四边静矩变异性计算模型

假定沥青混凝土粗集料颗粒的形状均为圆形, 密度相同. 以粗集料颗粒面积替代质量对图像四边求静矩, 以静矩变异系数作为评价指标判定沥青混凝土摊铺均匀性. 其计算模型见图1. 静矩变异系数计算公式为

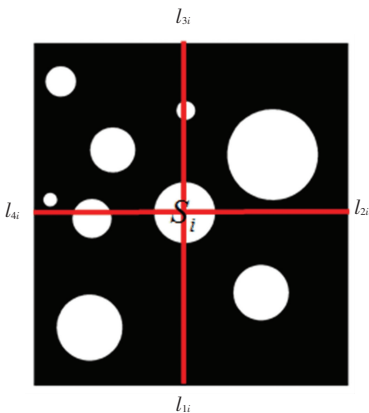


图1 四边静矩变异性计算模型

Fig. 1 Calculation model of quadrangular static moment variability

$$S_1 = \sum_{i=1}^n (A_i \times l_{1i}), S_2 = \sum_{i=1}^n (A_i \times l_{2i}),$$

$$S_3 = \sum_{i=1}^n (A_i \times l_{3i}), S_4 = \sum_{i=1}^n (A_i \times l_{4i}),$$

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 (S_j - \bar{S})^2 / \bar{S}} \quad (1)$$

式中:  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  分别为图像颗粒对正方形四边1、2、3、4的静矩和;  $\bar{S}$  为静矩和平均值;  $A_i$  为图像第  $i$  个集料颗粒的面积;  $l_{1i}$ 、 $l_{2i}$ 、 $l_{3i}$ 、 $l_{4i}$  为图像第  $i$  个集料颗粒距图像四边的距离;  $C_v$  为静矩变异系数.

### 1.2 数字图像预处理

#### 1.2.1 图像采集

图像采集是沥青混凝土均匀性数字图像评价的第1步. 沥青混凝土图像采集简图见图2. 采集设备为数码相机, 拍摄高度为60 cm, 图像分辨率为2 448像素 × 2 448像素, 经测算每幅沥青混凝土图像实际采集面积为72 cm × 72 cm; 粒径4.75 mm和9.5 mm的集料颗粒所占据的像素值取整后分别为200、850. 本文选择粒径大于4.75 mm和大于9.5 mm的集料分别作为AC-13和AC-25沥青混凝土数字图像均匀性评价的研究对象.

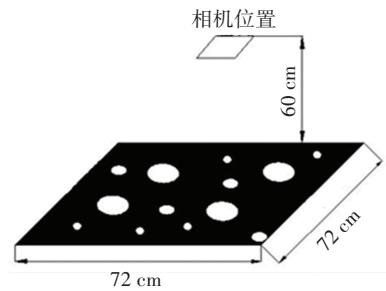


图2 沥青混凝土图像采集简图

Fig.2 Schematic of image collection of asphalt concrete

#### 1.2.2 图像预处理方法

沥青混凝土采集图像为彩色图像, 运用数字图像处理分析前, 通过MATLAB软件图像处理工具箱提供的函数进行系统化的预处理<sup>[16-17]</sup>. 沥青混凝土图像预处理流程: 彩色图像灰度化; 维纳滤波去噪处理; 直方图均衡化处理; 灰度图二值化处理; 颗粒过滤; 图像腐蚀; 图像空隙填补; 图像分割; 图像膨胀. 通过数字图像预处理消除了采集过程中掺杂的噪声、填充了由腐蚀造成的集料内部空隙、对粘连颗粒进行图像分割还原了真实形状、消除了图像二值化后产生的锯齿边缘等一系列问题.

AC-25 沥青混凝土数字图像预处理前后叠加效果见图3. 绿色为预处理后剩余的集料颗粒. 沥青混凝土图像预处理前后叠加效果直观上是比较符合实际. 经统计, 绿色集料颗粒面积所占比例在40%~50%, 与实际情况沥青混凝土级配设计较符合.



图 3 沥青混凝土图像预处理前后叠加效果

Fig.3 Superposition effect of asphalt concrete image pre and post preprocessing

### 1.3 沥青混凝土摊铺均匀性评价指标

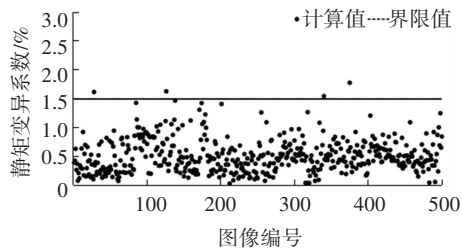
#### 1.3.1 摊铺均匀性评价指标界限值

本文依托安徽省济祁高速砾山段路面工程,采集 AC-13 和 AC-25 沥青混凝土摊铺图像各 500 幅,静矩变异系数计算结果见表 1 和图 4. AC-13 和 AC-25 沥青混凝土摊铺图像静矩变异系数大于 1.5% 分别仅有 4 幅和 20 幅. 结合目测观察和统计分析,选取静矩变异系数为 1.5% 作为 AC-13 和 AC-25 沥青混凝土摊铺均匀性评价指标的界限值.

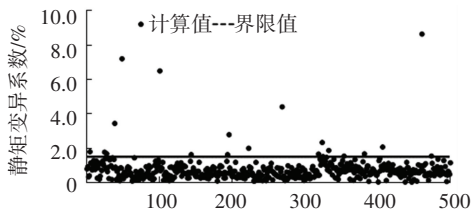
表 1 沥青混凝土摊铺图像静矩变异系数分布对比

Tab.1 Static moment variation coefficient distribution comparison of asphalt concrete paving images

混合料类型	静矩变异系数/%			
	(0,0.5]	(0.5,1.0]	(1.0,1.5]	(1.5,∞]
AC-13	180	159	241	20
AC-25	269	200	27	4



(a) AC-13



(b) AC-25

图 4 沥青混凝土摊铺图像静矩变异系数分布

Fig.4 Static moment variation coefficient distribution of asphalt concrete paving images

#### 1.3.2 摊铺均匀性评价标准

现阶段国内外沥青混凝土施工现场普遍采用目测观察法确定沥青混凝土的均匀性,以此反映施工质量<sup>[18-19]</sup>. 目测法简单快速、无需专用设备,但存在

效率低、主观影响大、检测覆盖率低等问题. 通过观察现场采集的彩色图像发现,静矩变异系数  $C_v$  值越大的图像,集料颗粒分布越不均匀,这也与变异系数越大,数据波动性分散性越大的数学特性相符. 结合目测观察法,经大量现场图像统计分析提出沥青混凝土摊铺均匀性数字图像评价标准,即沥青混凝土摊铺均匀程度为无离析、轻度离析、中度离析和重度离析时,其  $C_v$  值分别在  $(0, 1.5\%]$ 、 $(1.5\%, 3.0\%]$ 、 $(3.0\%, 4.5\%]$  和  $(4.5\%, \infty]$ .  $C_v$  值小于 1.5% 时,集料颗粒分布较为均匀. AC-25 沥青混凝土摊铺图像均匀程度见图 5.

研究表明,沥青混凝土摊铺均匀性数字图像评价标准与施工现场沥青混凝土摊铺质量存在较好的相关性. 数字图像评价方法具有操作简便、实时连续、定量客观、成本低廉、检测全面等优点,是一种非常有前途的沥青混凝土摊铺均匀性识别方法.

## 2 沥青混凝土压实均匀性评价方法

### 2.1 构造深度变异性计算原理

文献[20]首先提出了根据单幅图像恢复物体形状(shape from shading)原理,即利用单幅灰度图像中物体表面的明暗变化来恢复其表面各点的相对高度等参数值,重建物体表面形状. 沥青混凝土压实表面粗糙,凹凸不平,图像采集时,不同光照强度的光线在图像显示的像素值不同. 文献[21-22]研究表明,灰度值与构造深度存在线性关系,即路面构造深度越大,图像的灰度值越小,且沥青混凝土表面构造深度与均匀性密切相关. 本文运用数字图像处理技术以 SFS 原理通过图像像素的明暗程度反映沥青混凝土表面的凹凸情况,以灰度差反映表面凸起和凹下的高度差值,构建三维曲面,计算路面图像的平均构造深度,以构造深度变异系数评价沥青混凝土压实均匀性<sup>[23]</sup>.

通过 MATLAB 工具箱函数将沥青混凝土压实彩色图像转换为二维灰度图,可表示为一个  $m \times n$  的二维矩阵,即  $Z = F(x_m, y_n)$ <sup>[24]</sup>. 根据沥青混凝土压实图像二维灰度图可构建三维曲面见图 6. 数字图像构造深度计算公式为

$$H_p = \frac{\sum_{i=1}^{m \times n} (Z_{\max} - Z_i)}{Z_N \mu}, \quad (2)$$

$$\mu = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{\alpha}. \quad (3)$$

式中:  $H_p$  为数字图像构造深度;  $Z_{\max}$  为二维矩阵像素最大值;  $Z_{\min}$  为二维矩阵像素最小值;  $Z_i$  为二维矩阵像素值;  $Z_N$  为二维矩阵像素个数;  $\mu$  为修正系数;  $\alpha$  为经验系数,  $\alpha$  取 1.36.

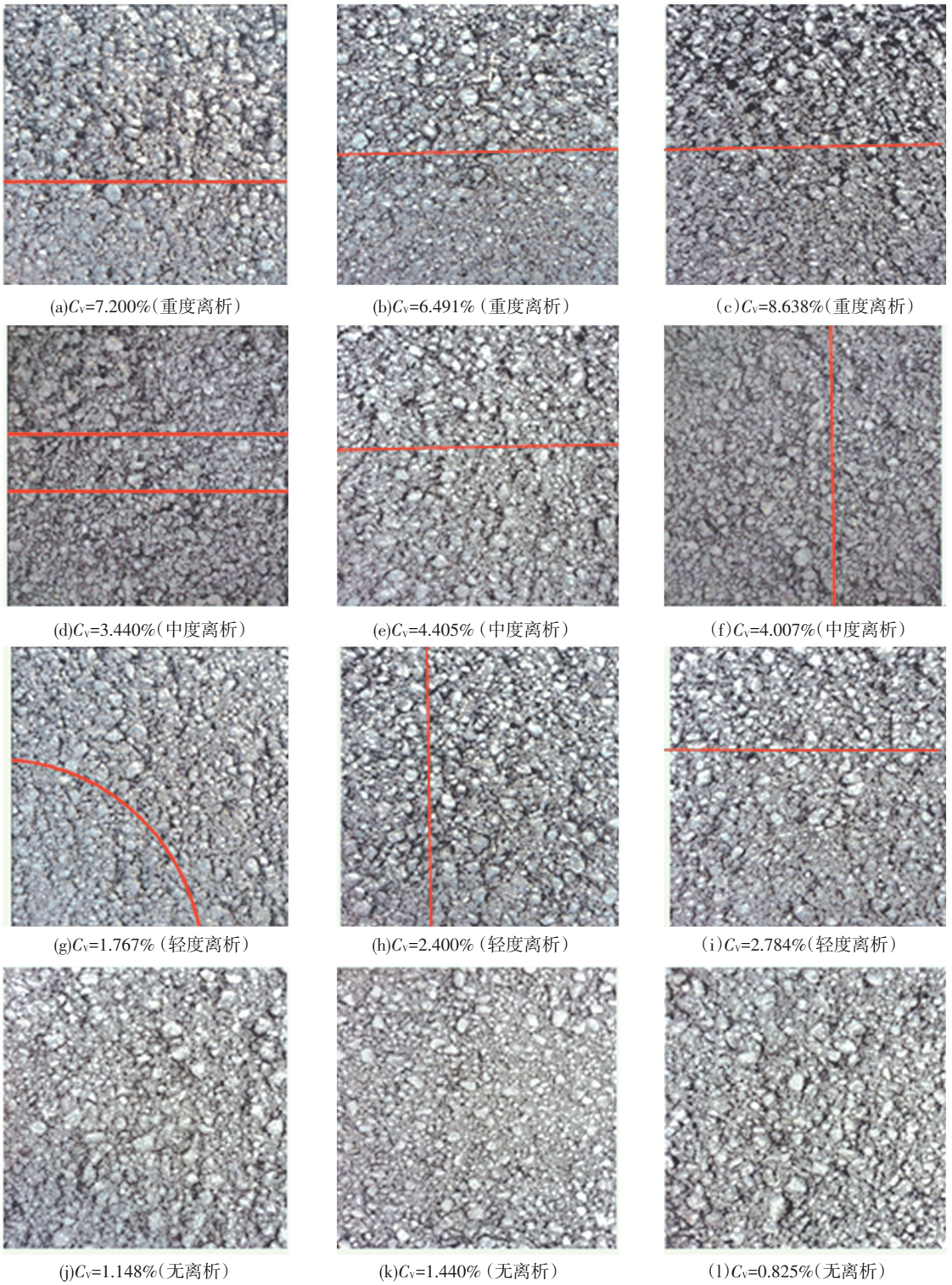


图5 AC-25 沥青混凝土摊铺图像均匀程度

Fig.5 Homogeneity of AC-25 asphalt concrete paving images

沥青混凝土压实图像可按 4、9、16、25、100 划分方式等分,以 16 为例见图 7。

沥青混凝土压实图像各等分区域的平均构造深度  $H_{Pi}$ 、区域间的方差  $S$  及数字图像构造深度变异系数  $C_{vn}$  计算公式为

$$\bar{H}_{Pn} = \sum_{i=1}^n H_{Pi}/n, \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{(H_{Pi} - \bar{H}_{Pn})^2}{n - 1}}, \quad (5)$$

$$C_{vn} = \frac{S}{\bar{H}_{Pn}} \times 100. \quad (6)$$

式中:  $H_{Pi}$  为各等分区域的平均数字构造深度;  $\bar{H}_{Pn}$  为图像  $n$  等分的平均数字构造深度;  $n$  为等分区域个数,  $n = 4、9、16、25、100$ 。

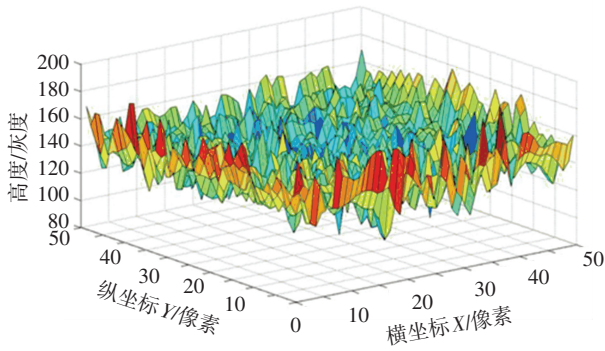


图 6 沥青混凝土表面图像三维曲面

Fig.6 3D surface of asphalt concrete surface image

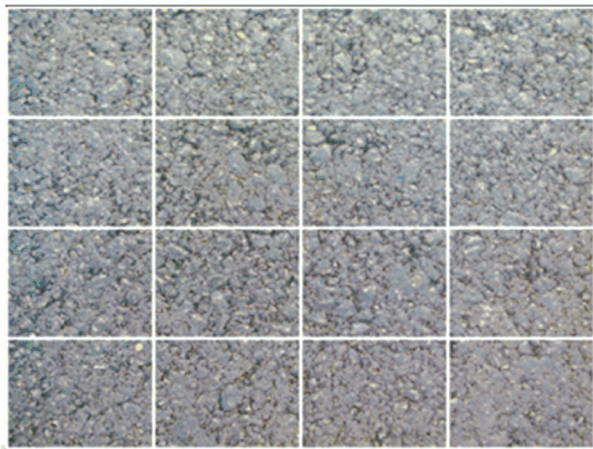


图 7 压实图像 16 等分方式

Fig.7 Sixteen equal subdivision areas of compaction image

### 2.2 沥青混凝土压实均匀性评价指标

选取 50 幅沥青混凝土压实图像,通过 MATLAB 软件编程计算不同等分方式的数字图像构造深度变异系数  $C_{vn}$  ( $n = 4, 9, 16, 25, 100$ ) 如图 8 所示. 不同等分方式的数字构造深度变异系数虽略有差异,但总体分布趋势相似,且存在相关性. 通过线性方程  $y = ax + b$  拟合得不同等分方式数字构造深度变异系数相关性方程见表 2. 自变量  $x$  为  $C_{v4}$ 、 $C_{v9}$ 、 $C_{v16}$ 、 $C_{v25}$ 、 $C_{v100}$  时,其相关系数平方  $R^2$  分别为 0.83~0.91、0.91~0.96、0.89~0.98、0.88~0.98、0.83~0.98. 4 和 100 等分方式的相关性相对较差,而 9、16、25 等分方式存在显著的相关性. 考虑到区域划分越多,其运算速度越慢,故选取图像 16 等分作为沥青混凝土压实均匀性数字图像评价方法的图像划分方式.

结合目测观察发现,  $C_{v16}$  与沥青混凝土集料分布均匀性存在一定的相关性,即随着  $C_{v16}$  的增大,沥青混凝土集料分布的均匀性越差. 当  $C_{v16}$  大于等于 8.0% 时,沥青混凝土集料分布已存在明显的离析. 因此,推荐以  $C_{v16}$  等于 8.0% 作为 AC-25 沥青混凝土压实图像离析判定的临界值.

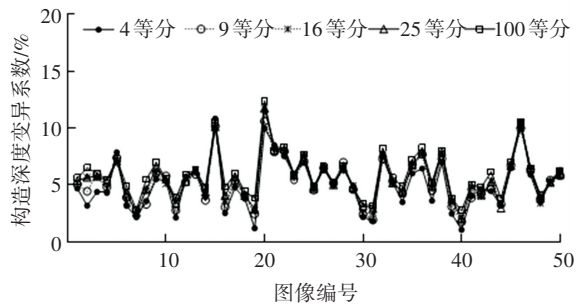


图 8 不同等分方式的数字图像构造深度变异系数分布  
Fig.8 Structure depth variation coefficient distribution of digital images in different equal ways

表 2 数字图像构造深度变异系数相关性

Tab.2 Correlation of digital image structure depth variation coefficient

自变量 $x$	因变量 $y$	线性回归方程拟合参数		$R^2$
		$a$	$b$	
$C_{v4}$	$C_{v9}$	0.85	0.93	0.91
	$C_{v16}$	0.83	1.14	0.89
	$C_{v25}$	0.81	1.40	0.88
	$C_{v100}$	0.78	1.87	0.83
$C_{v9}$	$C_{v16}$	0.97	0.26	0.96
	$C_{v25}$	0.95	0.53	0.96
	$C_{v100}$	0.21	1.00	0.92
$C_{v16}$	$C_{v25}$	0.97	0.31	0.98
	$C_{v100}$	0.95	0.75	0.96
$C_{v25}$	$C_{v100}$	0.98	0.44	0.98

同理,本文采集 100 幅 AC-13 沥青混凝土压实图像,  $C_{v16}$  分布如图 9 所示.

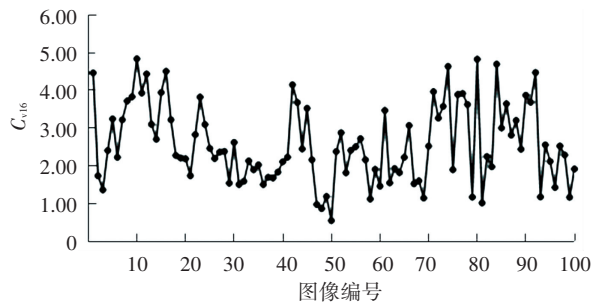


图 9 数字图像构造深度变异系数  $C_{v16}$  分布

Fig.9 Distribution of digital images of structure depth variation coefficient  $C_{v16}$

结合图 9 实测统计分析结果和目测沥青混凝土压实均匀程度,本文推荐 AC-13 沥青混凝土压实均匀性评价指标数字图像构造深度变异系数的界限值为 4.0%.

## 3 数字图像评价方法影响因素分析

### 3.1 拍摄高度

#### 3.1.1 拍摄高度对摊铺均匀性评价的影响

以 AC-13 沥青混凝土为例,选取 100 个测点,拍摄高度取 50、60、70、80 cm 4 种工况,每个测点按

不同拍摄高度选取 1 幅图像, 即选 400 幅图像. 同一位置不同拍摄高度 AC-13 沥青混凝土摊铺均匀性评价指标静矩变异系数分布见图 10. 同一位置不同拍摄高度 AC-13 沥青混凝土均匀性评价指标静矩变异系数存在变化, 拍摄高度减小, 静矩变异系数略有增大. 但总体而言, 拍摄高度介于 50~80 cm 之间时, 静矩变异系数分布未出现明显的变化. 因此, 拍摄高度在 50~80 cm 时, 可忽略拍摄高度对沥青混凝土摊铺均匀性数字图像评价的影响.

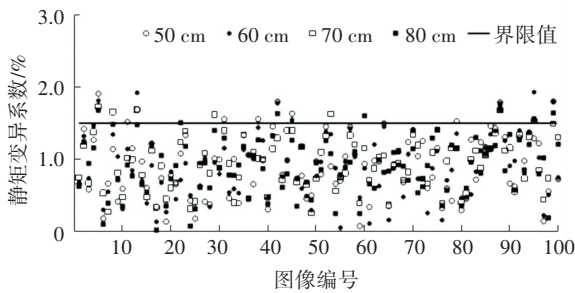


图 10 不同拍摄高度数字图像静矩变异系数分布

Fig.10 Static moment variation coefficient distribution of digital images with different shooting heights

### 3.1.2 拍摄高度对压实均匀性评价的影响

以 AC-13 沥青混凝土压实路面为例, 选取 3 个测点, 拍摄高度分 50、55、60、65、70 cm 5 种工况, 每个测点采集 4 幅图像, 取数字图像构造深度平均值作为代表值. 不同拍摄高度沥青混凝土压实数字图像构造深度代表值见图 11. 不同拍摄高度的沥青混凝土压实数字图像构造深度变化幅度很小, 相差介于 0.01~0.02 mm. 由此说明, 拍摄高度介于 50~70 cm 之间时, 可忽略拍摄高度对沥青混凝土压实数字图像构造深度和变异系数的影响.

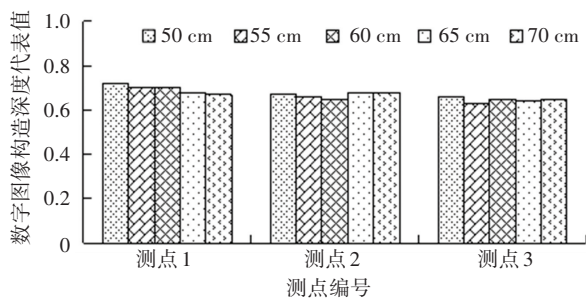


图 11 不同拍摄高度数字图像构造深度代表值分布

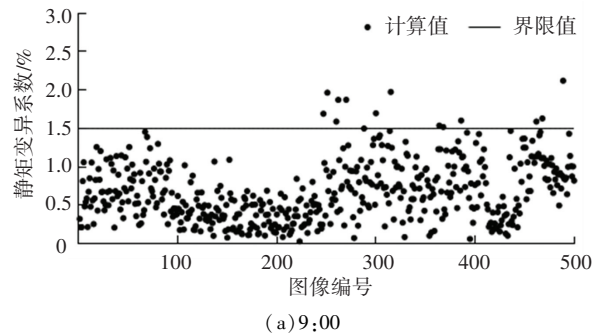
Fig.11 Structure depth representative values distribution of digital image with different shooting heights

## 3.2 光照高度

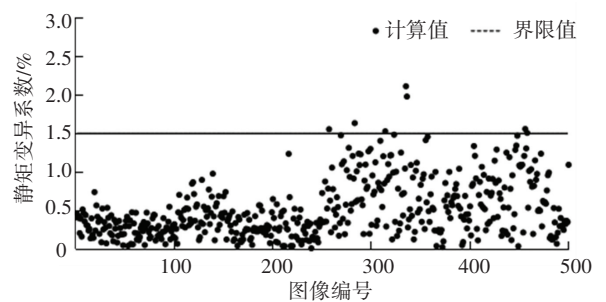
### 3.2.1 光照强度对摊铺均匀性评价的影响

以 AC-13 沥青混凝土为例, 在晴天条件下 (照度计实测光照度介于 1431~81 010 lx), 选取一天的 4 个时刻, 即 9:00、13:00、15:00、17:00, 拍摄高度为 60 cm, 每个时刻筛选 500 幅沥青混凝土摊铺图像计

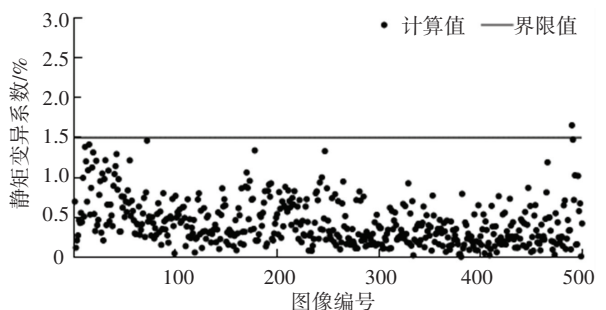
算静矩变异系数. 不同光照强度 (时刻) 下 AC-13 沥青混凝土摊铺图像静矩变异系数分布见图 12. 13:00 和 15:00 时刻图像静矩变异系数稳定性较好. 总体上, 不同时刻, 沥青混凝土摊铺图像静矩变异系数绝大多数分布小于 1.5%, 故可忽略晴天条件下光照强度对沥青混凝土摊铺图像均匀性评价的影响.



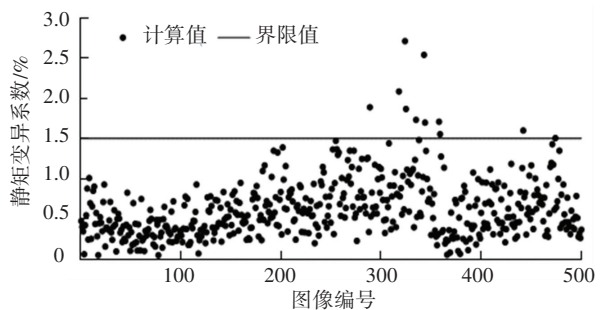
(a) 9:00



(b) 13:00



(c) 15:00



(d) 17:00

图 12 不同光照强度下 AC-13 沥青混凝土摊铺图像静矩变异系数分布

Fig.12 Static moment variation coefficient distribution of AC-13 asphalt concrete paving images at different light intensities

### 3.2.2 光照强度对压实均匀性评价的影响

以 AC-13 沥青混凝土压实路面为例,选取 3 个测点,在晴天条件下,将一天分为 5 个时刻,即 9:00、11:00、13:00、15:00、17:00,拍摄高度为 60 cm. 不同光照强度(时刻)下沥青混凝土压实数字图像构造深度代表值分布见图 13. 9:00 时刻的数字图像构造深度普遍高于其他时刻 0.03 ~ 0.06 mm;测点 3 在 11:00 和 13:00 时刻的数字图像构造深度与其他时刻的一致性较差,最大相差 0.03 mm,而 15:00 和 17:00 在 3 个测点的相差均在 0.01 mm 范围内,一致性较好. 综合而言,晴天条件下,不同时刻光照强度的变化对沥青混凝土数字图像构造深度存在一定影响,但并不明显. 通常数字图像采集清晰,可忽略光照强度对沥青混凝土数字图像构造深度的影响.

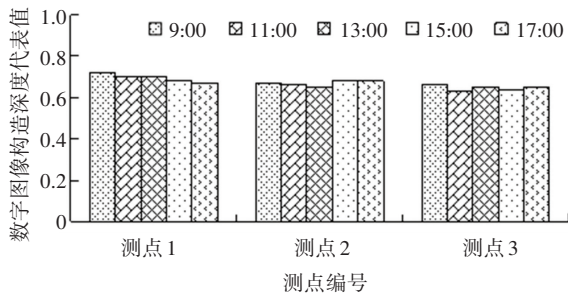


图 13 不同光照强度下数字图像构造深度代表值分布

Fig. 13 Structure depth representative values distribution of digital images at different light intensities

## 4 结 论

1) 运用数字图像处理技术、统计学方法和单幅图像恢复物体表面形状原理建立了沥青混凝土均匀性数字图像评价方法. 该方法切实可行,具有便捷高效、定量客观、检测全面等优点,图像分析和数据处理实现了程序化运算,可为开发沥青混凝土均匀性实时连续检测评价系统提供指导.

2) 以静矩变异系数作为评价指标,建立了基于四边静矩变异性的沥青混凝土摊铺均匀性评价方法. 沥青混凝土摊铺均匀时,推荐静矩变异系数的变化区间为(0, 1.5%],并建立了沥青混凝土摊铺数字图像离析等级及评价标准.

3) 以构造深度变异系数作为评价指标,建立了基于构造深度变异性的沥青混凝土压实均匀性评价方法. 以 16 等分图像面积区域作为沥青混凝土压实图像划分最优方法,并建立不同等分方式数字构造深度变异系数之间的相关性方程,且相关性显著. 推荐以构造深度变异系数  $C_{v16}$  等于 4.0% 和 8.0% 分别作为 AC-13 和 AC-25 沥青混凝土离析判定的界限值.

4) 光照强度和拍摄高度对沥青混凝土均匀性

数字图像评价存在一定的影响. 但光照强度介于 1 430~81 000 lx 即晴天时和拍摄高度介于 50~80 cm 之间时,可忽略其对沥青混凝土均匀性数字图像评价的影响.

## 参考文献

- [1] ZHANG W, HUANG X, YANG J, et al. Effect of segregation on rutting resistance of asphalt pavement[J]. Construction & Building Materials, 2017, 147: 525
- [2] 彭勇,孙立军,石永久,等. 沥青混合料均匀性与材料力学性能关系[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(6): 142  
PENG Yong, SUN Lijun, SHI Yongjiu, et al. Relationship between homogeneity and mechanical properties of asphalt mixture[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(6): 142
- [3] ZHANG J, LIU H, WANG P, et al. Evaluation of aggregate gradation and distributing homogeneity based on the images of asphalt mixture[J]. Road Materials & Pavement Design, 2017, 18(17): 1
- [4] STROUP-GARDINER M, BROWN E R. Segregation in asphalt mixture pavements [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2000
- [5] 杨博,郑健龙,刘宏富,等. 沥青混合料级配离析定量评价划分标准的研究与探讨[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 1099.  
YANG Bo, ZHENG Jianlong, LIU Hongfu, et al. Quantitative evaluation of criteria for asphalt mixture gradation segregation Journal of Building Materials, 2015, 18(6): 1099
- [6] 吴文亮,李智,张肖宁. 用数字图像处理技术评价沥青混合料均匀性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(4): 921  
WU Wenliang, LI Zhi, ZHANG Xiaoning. Evaluation of asphalt mixture homogeneity with digital image processing technique[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(4): 921.
- [7] 黄志福,赵毅,梁乃兴,等. 基于数字图像处理技术的沥青混合料摊铺均匀性实时监测评价方法[J]. 公路交通科技, 2017, 34(4): 8  
HUANG Zhifu, ZHAO Yi, LIANG Naixing, et al. A method for real-time monitoring and evaluating asphalt mixture paving uniformity based on digital image processing technology[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(4): 8
- [8] 陈尚江,张肖宁. 基于数字图像处理技术的沥青混合料分形特性[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(3): 451  
CHEN Shangjiang, ZHANG Xiaoning. Fractal characteristics of asphalt mixtures based on digital image processing technique[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(3): 451
- [9] YUE Z Q, MORIN I. Digital image processing for aggregate orientation in asphalt concrete mixtures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23: 479
- [10] HUNTER A, AIREY G, COLLOP A. Aggregate orientation and segregation in laboratory-compacted asphalt samples[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1891(1): 8
- [11] DE LEÓN E, FLINTSCH G W. Application of digital image technology to measure hot mix asphalt homogeneity[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2007, 76: 41
- [12] 张肖宁. 沥青混合料材料结构数字图像技术的基本方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 166

- ZHANG Xiaoning. Basic methods of digital image technology for material structure of asphalt mixtures[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(10): 166
- [13] 张丽娜. 基于数字图像处理技术的沥青混合料微观结构分析方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2000
- ZHANG Jingna. Research on microstructure analysis method of asphalt mixture based on digital image processing technology [D]. Shanghai: Tongji University, 2000
- [14] 彭勇, 孙立军, 王元清, 等. 数字图像处理在沥青混合料均匀性评价中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(2): 334
- PENG Yong, SUN Lijun, WANG Yuanqing, et al. Application of digital image processing in evaluating homogeneity of asphalt mixture [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(2): 334
- [15] 张争奇, 徐耀辉, 胡红松, 等. 沥青路面离析的数字图像评价方法[J]. 湖南大学学报(自科版), 2016, 43(9): 129
- ZHANG Zhengqi, XU Yaohui, HU Hongsong, et al. Digital image evaluation method of the bituminous pavement segregation[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(9): 129
- [16] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. 数字图像处理 (MATLAB) [M]. 2 版. 阮秋琦, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014
- GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. Digital image processing (MATLAB) (ition)[M]. 2nd ed. Translated by RUAN Qiuqi. Beijing: Electronic Industry Press, 2014
- [17] 黄文柯, 张肖宁. 利用形态学多尺度算法分割粗集料粘连图像[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 125
- HUANG Wenke, ZHANG Xiaoning. Segmentation of coarse aggregate adhesion images using morphological multiscale algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 125
- [18] 王端宜, 张肖宁, 王绍怀. 表面离析作为沥青混凝土路面施工质量评价指标的研究[J]. 公路, 2005(1): 54
- WANG Duanyi, ZHANG Xiaoning, WANG Shaohuai. Study on surface segregation as evaluation index for construction quality of asphalt concrete pavement[J]. Highway, 2005(1): 54
- [19] MARY S G. Influence of segregation on pavement performance[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2000, 69: 424
- [20] HORN B K P, BROOKS M J. Shape from shading [M]. Cambridge: MIT Press, 1989.
- [21] 宋永朝, 梁乃兴, 闫功喜, 等. 基于数字图像技术的露石混凝土路面纹理构造抗滑性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(2): 123
- SONG Yongchao, LIANG Naixing, YAN Gongxi, et al. Skid-resistant performance of texture structure of exposed-aggregate cement concrete pavement based on digital image technology[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(2): 123
- [22] MILLER T, SWIERTZ D, TASHMAN L, et al. Characterization of asphalt pavement surface texture [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2295(1): 19
- [23] 高欣健, 张旭东, 高亚捷, 等. 基于单幅灰度图像的快速三维重建方法研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 42
- GAO Xinjian, ZHANG Xudong, GAO Yajie, et al. Fast method of 3D surface reconstruction based on single gray image[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 42
- [24] 王端宜, 李维杰, 张肖宁. 用数字图像技术评价和测量沥青路面构造深度[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 42
- WANG Duanyi, LLeijie, ZHANG Xiaoning. Evaluation and measurement of asphalt pavement surface texture depth with digital image technique [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(2): 42

(编辑 魏希柱)

(上接第 87 页)

- [15] VINCENT P, LAROCHELLE H, LAJOIE I, et al. Stacked denoising autoencoders: learning useful representations in a deep network with a local denoising criterion [J]. Journal of Machine Learning Research, 2010, 11(12): 3371
- [16] MA X, TAO Z, WANG Y, et al. Long short-term memory neural network for traffic speed prediction using remote microwave sensor data[J]. Transportation Research Part C, 2015, 54: 187
- [17] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Unsupervised coding with lococode [C]// International Conference on Artificial Neural Networks. Berlin: Springer Verlag, 1997: 655
- [18] KINGMA, DIEDERIK P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization [C]// International Conference on Learning Representations. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 1572
- [19] 张威威, 李瑞敏, 谢中教. 基于深度学习的城市道路旅行时间预测[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(10): 2309
- ZHANG Weiwei, LI Ruimin, XIE Zhongjiao. Urban road travel time prediction based on deep learning [J]. System Simulation Journal, 2017, 29(10): 2309
- [20] HINTON G E, SRIVASTAVA N, KRIZHEVSKY A, et al. Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors [J]. Neural and Evolutionary Computing, 2012(7): 1
- [21] DUNNE S, GHOSH B. Weather adaptive traffic prediction using neurowavelet models [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 370
- [22] NÓBREGA J P, De Oliveira A L I. Improving the statistical arbitrage strategy in intraday trading by combining extreme learning machine and support vector regression with linear regression models [C]// International Conference on TOOLS with Artificial Intelligence. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 182
- [23] XU Dongwei, WANG Yongdong, JIA Limin, et al. Real-time road traffic states estimation based on kernel-KNN matching of road traffic spatial characteristics [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(9): 2453
- [24] 裴玉龙, 王晓宁. 基于 BP 神经网络的交通影响预测模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(8): 1034
- PEI Yulong, WANG Xiaoning. Traffic impact forecast model based on the BP network [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(8): 1034

(编辑 魏希柱)