

文章编号:1674-2974(2016)09-0129-07

沥青路面离析的数字图像评价方法*

张争奇^{1†},徐耀辉¹,胡红松²,石伟³,张苛¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064;2. 河南省南阳市公路管理局,河南 南阳 473003;3. 湖南省株洲市规划设计研究院,湖南 株洲 412000)

摘要:为快速有效评价沥青路面的离析程度,文章采用数字图像技术研究沥青路面的非均匀性.文中分析了常用的沥青路面离析的图像处理评价方法的不足,提出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.此法通过对宏观构造中的下凹区域照相并获得二值图像,并将二值图像中对应的下凹区域的平均宽度定义为路表宏观构造宽度 K ,以构造宽度 K 和构造深度 TD 建立模型,来评价沥青混合料的集料离析程度.研究表明:构造宽度 K 值与传统的手工铺砂法测出的构造深度 TD 具有良好的相关性,能较好地表征沥青路面的集料离析程度.

关键词:数字图像;沥青路面;宏观构造宽度 K 值;构造深度;离析;道路工程

中图分类号:U416

文献标识码:A

Digital Image Evaluation Method of the Bituminous Pavement Segregation

ZHANG Zheng-qi^{1†}, XU Yao-hui¹, HU Hong-song², SHI Wei³, ZHANG Ke¹

(1. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an Univ, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. Highway Administration Bureau of Nanyang City, Nanyang, Henan 473003, China; 3. Hunan Province Planning Design Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412000, China)

Abstract: In order to evaluate the segregation level of bituminous pavement quickly and effectively, the digital image processing technique was adopted in studying the heterogeneity of bituminous pavement. The drawbacks of common evaluation methods on image processing of bituminous pavement segregation were firstly discussed, and a new method of evaluating the bituminous pavement segregation was proposed, which is based on the analysis of the macroscopic construction width of the concave area in pavement texture. This method is to get the binary image by taking photos of the concave areas in macroscopic construction, and defines the average width of the related concave area in the binary image as the macroscopic construction width K of bituminous pavement, and then builds a model based on the construction width K and depth TD to evaluate the aggregate segregation level of bituminous mixture. It is found that the construction width K is correlated with the conventional construction depth measured by the traditional manual sand patch method, which better characterizes the aggregate segregation level of bituminous pavement.

* 收稿日期:2015-10-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51008031), National Natural Science Foundation of China(51008031);交通运输部应用基础研究项目(201431981215);陕西省交通科技项目(2014-01K)

作者简介:张争奇(1967-),男,陕西扶风人,长安大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail:794822704@qq.com

Key words: digital image; bituminous pavement; macroscopic construction width K ; construction depth; segregation; road engineering

沥青路面集料离析^[1-4]是影响路面施工质量的重要因素,常用构造深度值 TD 来评价沥青路面的集料离析程度.目前测量路面构造深度 TD 的方法有铺砂法和激光法^[5-7].传统的铺砂法测量路面构造深度效率低、操作繁琐且主观随意性较大;激光法虽然测量构造深度快速、准确,但其所测构造深度值为路面一定长度范围内的平均值,虽能评价路面的横向离析,但无法评价路面的纵向和局部离析,且设备价格昂贵,不利于推广应用.

随着二维数字图像技术^[8-9]的日趋成熟,这一技术也被引用到沥青路面质量控制^[10]中.许多专家学者也对其进行了研究^[11-15],王端宜教授采用普通数码相机记录道路表面构造特征,由图像的像素值分析得出路表面构造深度.张肖宁教授运用数字图像处理技术对沥青混合料内部结构组成的三维图像重构及虚拟力学试验等方面进行了研究.彭勇等运用基于数字图像处理技术,直接对混合料中集料的分布状态,即沥青混合料均匀性进行了研究.以上研究采用图像处理技术研究了沥青路面表面及内部的材料分布情况,为图像技术在沥青路面质量控制研究中起到了促进作用.但鉴于离析问题的复杂性,如何快速、客观、有效地判断沥青路面的离析程度还是一个研究热点.

因此,本文尝试以路面纹理中下凹区域的宏观构造宽度作为研究对象,并在图像处理技术基础上,探讨宏观构造宽度与竖向深度之间的相关性,最终通过易于得到的构造宽度 K 来评价沥青混合料的离析情况,以达到高效的目的.

1 常用的沥青路面离析的数字图像评价方法分析

数字图像处理技术是指通过数码相机或扫描仪将一幅连续的图像离散化为计算机可以处理的信息,并对此信息进行各种处理,以达到某一效果的方法.其过程主要包括图像采集、图像处理及图像分析等.由于数字图像处理技术具有使用方便、经济性好、可利用信息量大和形象化储存等优点,其在道路领域的工程应用已成为国际上的研究热点.数字图像处理由两部分组成:物理图像转化为对应的数字

图像和通过各种运算法则^[16]从数字图像中提取有用信息.

自数字图像技术引用到对路面离析进行评价之后,有许多专家学者对其如何较准确地评价路面离析提出了不同的方法并对其进行了研究.比较常见的方法主要有灰度矩阵拟合构造曲面法、灰度均值法以及分形维数法.

在实验过程中为了减少或避免图像采集时原始图像的信息误差,需要规范沥青路面数字图像采集的操作过程.本文采用一种自制的图像采集设备来获取稳定性、效果均较好的原始图像.此设备如图1所示.它包括一个遮光暗箱,3个LED灯,一个点光控制器和一个相机.LED灯布设在暗箱里面,通过暗箱外的点光控制器可以调节LED灯的功率,从而达到调节箱内光线强度的作用.采集图像时将试样放于遮光暗箱内,调节点光控制器使暗箱内达到理想的光线强度,然后将照相机置于遮光暗箱上的开口处,调节相机焦距来采集图像.



图1 遮光暗箱
Fig. 1 Box that can cover the light

1.1 灰度矩阵拟合构造曲面法

有不少研究利用MATLAB数学软件将沥青路面RGB数字图像转化为灰度图像,并得到图像对应的二维灰度矩阵,然后用灰度矩阵信息拟合构造曲面,最后应用曲面积分等公式计算得到表征路面构造深度的HP.

在操作过程中发现,这种图像处理模型在实际应用中存在一定的局限性,原因是路面的构造纹理极不规则且复杂,当相机像素越高时,由灰度图像得到的灰度矩阵数据量越大,且分布离散.很多情况

下,由这些三维数据点拟合的空间曲面方程的相关系数偏低,难以保证精度要求,且在下一步的积分求体积中,偏差进一步扩大;同时由灰度矩阵拟合曲面方程涉及到一个庞大的数据量处理过程,要通过反复的调节拟合方式和拟合参数才能获得相关性较好的曲面方程,这对计算机运行功能要求较高.因此,本文认为基于灰度矩阵拟合构造曲面模型在用于沥青混合料离析评价的应用前还需要进一步的研究.

1.2 灰度均值法

采用数字图像方法评价沥青路面离析比较常用的方法为灰度均值法.灰度均值法首先通过数码相机拍摄路面不同离析状态下的表面纹理构造图像,然后利用 MATLAB 软件绘制出其相应的路表灰度直方图,接下来跳过拟合曲面的过程,直接考虑路面

图像灰度均值与构造深度的关系,由灰度均值来预测构造深度.这种方法只需要调用 Matlab 中的 mean2() 函数就可实现.

本文采用室内模式试验模拟细集料离析(F)、无离析(N)、低离析(L)、中等离析(M)及严重离析(H)五种不同集料离析程度的沥青混合料.分别成型 10 块无离析(N)AC-20 沥青混合料车辙板和 10 块不同程度集料离析(F, N, L, M, H 各两块)的沥青混合料车辙板,对车辙板进行图像采集后,并用 MATLAB 软件计算每张图像的灰度均值,同时采用人工铺砂法测量其构造深度 TD,其结果见表 1 和表 2.运用统计学方法将无离析车辙板的 TD 和灰度均值以及不同离析程度车辙板的 TD 和灰度均值分别进行线性回归,其结果如图 2 所示.

表 1 无离析车辙板的 TD 和灰度均值

Tab.1 The TD and mean gray board of no isolation rut boards

测点	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
TD/mm	0.92	1.08	0.95	0.82	0.9	0.93	0.9	1.02	0.99	0.92
灰度均值	88.7	87.2	91.7	93.3	92.1	89.4	90.5	87.6	88.8	90.9

表 2 不同离析程度车辙板的 TD 和灰度均值

Tab.2 The TD and mean gray board of different isolation rut boards

测点	F1	F2	N1	N2	L1	L2	M1	M2	H1	H2
TD/mm	0.84	0.9	0.92	1.08	1.26	1.18	1.8	1.58	1.89	1.62
灰度均值	87.8	86.6	85.1	85.4	84.2	81.9	84.7	86.4	79.1	80.1

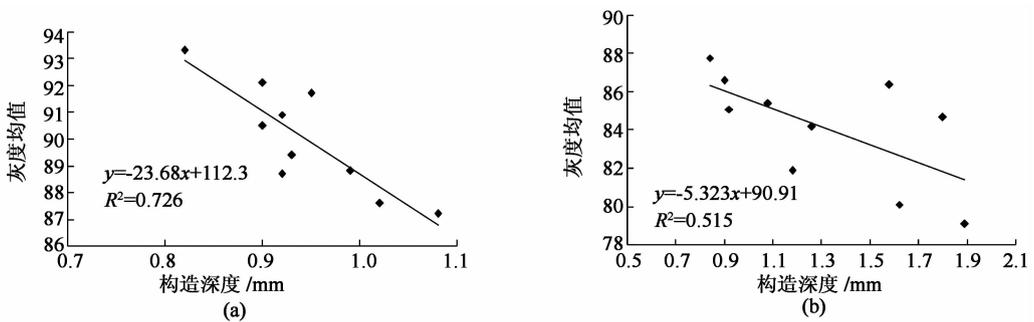


图 2 无离析和不同程度离析车辙板的 TD 和灰度均值的相关性

Fig.2 Correlation diagram in the non segregation state and different degrees of segregation under the State Board of TD and gray mean

从图 2(a)中可以看出,当沥青混合料未产生集料离析时,车辙板图像灰度均值与构造深度 TD 的线性相关系数达到 0.726,说明混合料无集料离析条件下的图像灰度均值与 TD 值具有较好的相关性.但从图 2(b)中发现,当沥青混合料发生不同程度集料离析时,车辙板图像灰度均值与构造深度

TD 的线性相关系数下降到 0.515,虽然这两个指标大致符合线性反比关系,但其相关系数小于 0.6,Remero 提出以相关系数^[17-18]大于 0.6 作为仪器效能的界限值,因此在混合料产生不同程度集料离析时,由灰度均值来预测构造深度 TD 还是存在较大的误差,因此本文认为用该指标判别沥青路面的离

析情况还需进一步研究。

1.3 分形维数法

分形维数^[19-20]法也被用来评价沥青路面的离析。由于沥青路面纹理构造复杂、极不规则,且不同离析程度沥青混合料表面的复杂程度存在显著的差异,可以采用分形维数对其表面纹理构造进行定量描述。本文采用基于 FractalFox 分维数计算软件采用盒子分维法^[21]提取路面纹理构造灰度图像中的

分形维数,定量描述不同离析程度沥青混合料表面的粗糙程度,尝试评价路面离析。选用上文中的 10 块不同程度集料离析的沥青混合料车辙板图像,对所有图像进行灰度化处理,分别导入 FractalFox 软件计算各自的分形维数,计算结果如表 3 所示。

将表 3 的数据运用统计学的方法将 D 与 TD 进行线性回归,结果如图 3 所示。并绘制出 D 随混合料离析逐渐增大而变化的柱状图,如图 4 所示。

表 3 不同离析程度混合料的分形维数 D
Tab. 3 The fractal dimension (D) of mixture with different degrees of segregation

测点	F1	F2	N1	N2	L1	L2	M1	M2	H1	H2
分形维数 D	2.605	2.618	2.610	2.608	2.626	2.609	2.585	2.569	2.594	2.591
构造深度 TD	0.84	0.9	0.92	1.08	1.26	1.18	1.8	1.58	1.89	1.62

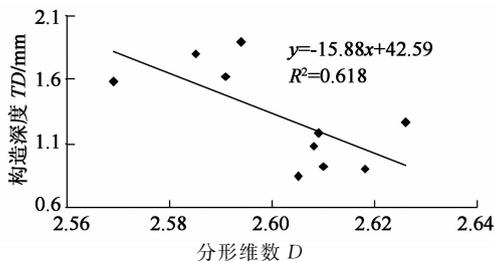


图 3 D 与 TD 的线性相关性

Fig. 3 Linear correlation of D and TD

分形维数反而最大,同时 M 和 H 的分形维数值也不易区分。究其原因, F, N, L 表面纹理构造的复杂程度虽有差异,但该差异的跳跃性并不明显,因而由此计算出的分形维数区分度不大, M, H 同理。

虽然沥青路面构造纹理的复杂程度与分形维数存在一定的相关性,但相关规律并不明显,因此本文认为分形维数暂不适用于沥青混合料集料离析的评价。

2 宏观构造宽度 K 值法

路面纹理构造可分为微观构造和宏观构造。微观构造又称微观纹理,是路面集料表面的微小构造;宏观构造又称宏观纹理,是路面集料之间构成的间隙。从三维立体角度分析,细集料离析混合料的宏观构造竖向深度明显小于粗集料离析混合料,无离析混合料介于两者之间;从二维平面角度分析,细集料离析混合料的宏观构造下凹区域的横向宽度明显小于粗集料离析混合料,同时无离析混合料介于两者之间。因此,本文尝试提取路面纹理中下凹区域即宏观横向宽度作为研究对象,通过建立宏观构造的横向宽度与竖向深度之间的关联,从路面的二维图像中提取三维信息,从而提出一种新的评价离析的方法。

以下是宏观构造宽度 K 值的计算模型。

1) 选取分割阈值:将灰度图像转换为二值图像的关键就是分割阈值的选取,阈值的选取直接决定了二值图像中白色区域面积的大小,本文根据数字图像的最大类内、类间距离阈值判定准则,同时考虑

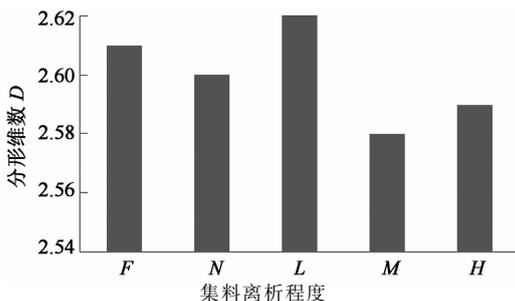


图 4 不同离析程度混合料的 D 值

Fig. 4 The D of mixture at different degrees of segregation

从图 3 可以看到,沥青混合料构造深度 TD 值与分形维数 D 值的线性相关系数为 0.618 8,表明两个指标呈现一定的相关规律,即随着路面构造深度的增大,其分形维数呈减小趋势,说明沥青混合料粗集料离析越严重,其表面构造深度越大,而表面纹理构造的复杂程度降低了。

理论上 F, N, L, M 和 H 五种集料离析程度混合料的分维数大小排序应为: $F > N > L > M > H$,但根据图 4 所示,虽然随着混合料集料离析程度的增加,分形维数整体呈递减趋势,但是 F, N, L 三种离析程度混合料的分形维数的大小区别不明显, L 的

路表宏观构造的渐变特性,由灰度极大值和区域内的灰度均值得到将灰度图像转换成二值图像的分割阈值.计算公式如下:

$$T = k \times (F_{\max} - F_{\text{均}})$$

式中: T 为分割阈值; F_{\max} 为灰度极大值; $F_{\text{均}}$ 为灰度均值; k 为修正系数,取值范围为 5%~15%,本文取 10%.

2)提取白色区域面积:在 Matlab 软件中调用 `rgb2gray()` 函数将灰度图像转换成二值图像后,再调用 `bwarea()` 函数快速读取二值图像中白色像素点个数 X ,即为白色区域总面积.

3)计算白色区域平均宽度 K' 值:调用 `bwmorph(I,'skel',inf)` 函数将二值图像骨架化,得到一幅骨架图像(见图 5),该骨架线条是由各白色小区域最中间的像素点连成的,可以看成是白色面积区域的中心线,调用 `bwarea()` 函数快速读取骨架线条像素点个数 Y ,即为中心线的“长度”,根据面积除以长度得到宽度的思想,二值图像中各白色区域平均宽度为 $K' = X/Y$.

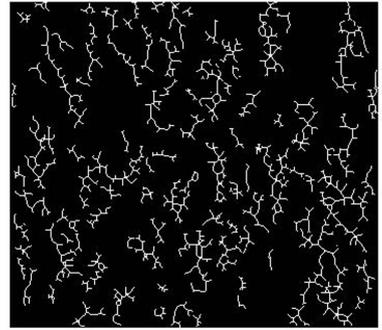


图 5 路表构造骨架图

Fig. 5 The frame diagram of road surface structure

4)计算宏观构造宽度 K 值:统计图像内校准尺长度 L 范围内对应的数字图像像素数量 M ,由公式 $\epsilon = L/M$ 得到数字图像的像素当量,再由公式 $K = \epsilon K'$ 得到路面宏观构造宽度 K 值.

分别对 10 块无离析(N) AC-20 沥青混合料车辙板和 10 块不同程度集料离析(F, N, L, M, H 各两块)的沥青混合料车辙板进行图像采集,并计算每块车辙板的 K 值,计算结果如表 4 和表 5 所示.

表 4 10 块无离析车辙板的 K 值
Tab. 4 10 no segregation rut boards' K value

离析程度	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
K 值/0.1 mm	2.22	2.3	2.19	2.0	2.19	2.24	2.27	2.25	2.18	2.1
构造深度 TD /mm	0.92	1.08	0.95	0.82	0.93	0.99	1.02	0.97	0.97	0.88

表 5 10 块不同离析程度车辙板的 K 值
Tab. 5 10 different segregation rut boards' K value

离析程度	F1	F2	N1	N2	L1	L2	M1	M2	H1	H2
K 值/0.1 mm	1.93	2.34	2.22	2.3	2.41	2.52	2.81	2.58	3.08	2.88
构造深度 TD /mm	0.84	0.9	0.92	1.08	1.26	1.18	1.8	1.58	1.89	1.62

将表 4 和表 5 的数据运用统计学的方法将 K 与 TD 进行线性回归,结果如图 6 和图 7 所示.并绘制出 K 值随混合料离析逐渐增大而变化的柱状图,如图 8 所示.

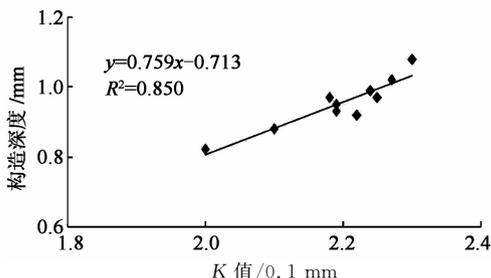


图 6 无离析车辙板 K 值与 TD 的相关性
Fig. 6 The correlation of K and TD value of no segregation rut boards

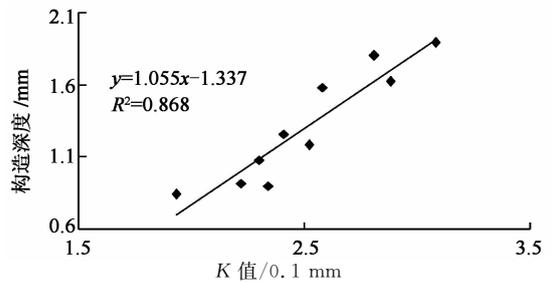


图 7 不同离析程度车辙板 K 值与 TD 的相关性
Fig. 7 The correlation of K and TD value of different segregation rut boards

从图 6 和图 7 可知,当沥青混合料无离析时,其构造深度 TD 值与构造宽度 K 值的线性相关系数 R^2 为 0.850,当沥青混合料产生不同程度集料离析时,其 TD 值与 K 值的线性相关系数 R^2 为 0.868,

说明 K 值与 TD 值具有较好的线性相关性,因此通过计算 K 值来预测路面构造深度 TD 值是可行的,同时研究表明,当路面产生不同程度集料离析时, K 值与 TD 值的相关系数不降反升,表明 K 值与 TD 值的线性相关性不会随混合料的集料离析而降低。

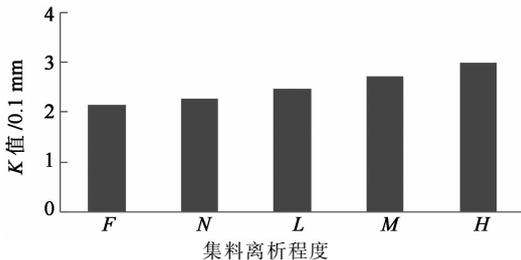


图8 不同离析程度混合料 K 值的变化规律
Fig. 8 The K value change rule of mixture at different degrees of segregation

图8是不同离析程度混合料的 K 值变化规律,从图中可以发现, K 值随混合料粗集料离析程度的增加呈递增趋势,且存在明显的规律性,大致规律为 $F < N < L < M < H$. 因此 K 值同构造深度 TD 值类似,也能较好地表征不同程度集料离析路面的纹理构造特征,因此用 K 值来评价沥青路面的非均匀性是可行的。

表6 K 值划分沥青混合料集料离析程度的标准

Tab. 6 The standard of asphalt mixture segregation when using the K value to divide it

混合料类型	细集料离析	无离析	轻度离析	中度离析	严重离析
AC-13	< 1.40	1.40~1.60	1.60~1.80	1.80~2.00	> 2.00
AC-20	< 2.20	2.20~2.40	2.40~2.60	2.60~2.80	> 2.80
AC-25	< 2.40	2.40~2.70	2.70~3.00	3.00~3.40	> 3.40

4 结论

本文分析比较了几种数字图像技术评价沥青路面的离析可能性的方法,研究发现:

1)由灰度矩阵拟合构造曲面模型在评价沥青混合料离析中,得到的三维数据点拟合的空间曲面方程的相关系数不到0.2,较难保证精度要求。

2)灰度均值法,在混合料无离析条件下的图像灰度均值与 TD 值具有较好的相关性,但当沥青混合料发生不同程度离析时,车辙板图像灰度均值与构造深度 TD 的线性相关系数下降到0.515。

3)沥青路面构造纹理的复杂程度与分形维数 D 存在一定的相关性,但相关规律并不明显,因此本文认为分形维数暂不适用于沥青混合料离析的评价。

4) K 值随混合料离析程度的增加呈递增趋势,

鉴于宏观构造宽度 K 值的计算方法简便,图像采集过程操作简单,且计算值与传统的手工铺砂法具有良好的线性相关性,能较好地表征沥青路面集料的离析程度,因此推荐基于路面宏观构造宽度 K 值的图像处理模型作为评价沥青路面非均匀性的主要无损检测工具之一。

3 基于 K 值评价沥青混合料集料离析的方法

这里提出两种利用 K 值评价沥青路面集料离析的方法:

1)第1种方法是找出路面图像 K 值与构造深度 TD 值的线性相关性,通过计算 K 值来预测 TD 值,最终还是用构造深度 TD 值的大小来评价路面集料的离析程度。

2)第2种方法是基于本文对沥青混合料不同离析程度的室内模拟试验,对不同离析程度的车辙板进行图像采集并计算其 K 值,整合出不同离析程度的 K 值划分标准,本文通过室内离析混合料的模拟试验,整合的 K 值划分标准如表6所示。

存在明显的规律性,能较好地表征不同离析程度路面的纹理构造特征,因此可用构造深度 K 值来评价沥青路面的离析情况。

参考文献

- [1] 韩立志,梁增培,彭余华,等. AC-25 级配离析的分形评价标准及预测方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2014,34(6):27-33.
HAN Li-zhi, LIANG Zeng-jie, PENG Yu-hua, et al. Fractal evaluation criteria and prediction method of AC-25 gradation segregation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science, 2014, 34(6): 27-33. (In Chinese)
- [2] MEEGODA J N, HETTIARACHCHI C H, BANDARA N, et al. Correlation of surface texture, segregation, and measurement of air voids[J]. Proc XIICSMFE Sanfrancisco, 2002,3:19-26.
- [3] 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,2014,34(4):90-93.
LI Xiang, LIANG Nai-xing, ZHAO Yi. Research on digital

- image technology of asphalt pavement based on aggregate segregation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(4): 90-93. (In Chinese)
- [4] 包秀宁,张肖宁.路面颗粒材料离析性的评价方法[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(3):31-36.
BAO Xiu-ning, ZHANG Xiao-ning. Segregability evaluation of granular pavement materials [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 2010, 38(3): 31-36. (In Chinese)
- [5] 马荣贵,王建锋,李平.沥青路面构造深度精确检测方法研究[J].科学技术与工程,2014,14(8):265-268.
MA Rong-gui, WANG Jian-feng, LI Ping. Research on high precision measurement of pavement texture depth[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(8): 265-268. (In Chinese)
- [6] JTG E60-2008 公路路基路面现场测试规程[S].北京:人民交通出版社,2008:90-92.
JTG E60-2008 Field test methods of subgrade and pavement for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2008:90-92. (In Chinese)
- [7] 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):42-45.
WANG Duan-yi, LI Wei-jie, ZHANG Xiao-ning. Evaluation and measurement of asphalt pavement surface texture depth with digital image technique[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 2004, 32(2): 42-45. (In Chinese)
- [8] MASAD E, MUHUNTHAN B, SHASHIDHAR N, *et al.* Quantifying laboratory compaction effects on the internal structure of asphalt concrete[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1691:179-185.
- [9] WANG L B, WANG X, MOHAMMAD L, *et al.* Application of mixture theory in the evaluation of mechanical properties of asphalt concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(2): 167-174.
- [10] 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:长安大学公路学院,2011:57-60.
YAN Hai-feng. Research on construction quality control and evaluation of asphalt pavement based on non-uniformity[D]. Xi'an: Highway College of Chang'an University, 2011:57-60. (In Chinese)
- [11] 王端宜,吴文亮,张肖宁,等.基于数字图像处理和有限元建模方法的沥青混合料劈裂试验数值模拟[J].吉林大学学报:工学版,2011,41(4):968-973.
WANG Duan-yi, WU Wen-liang, ZHANG Xiao-ning, *et al.* Numerical simulation of splitting test of asphalt mixture based on DIP-FEM[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology, 2011, 41(4): 968-973. (In Chinese)
- [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):166-173.
ZHANG Xiao-ning. Basic methods of digital image technology for material structure of asphalt mixtures [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 2012, 40(10): 166-173. (In Chinese)
- [13] 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):334-337.
PENG Yong, SUN Li-jun, WANG Yuan-qing, *et al.* Application of digital image processing in evaluating homogeneity of asphalt mixture [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology, 2007, 37(2): 334-337. (In Chinese)
- [14] 宋毅.应用分形理论描述沥青混合料级配离析及其相关问题研究[D].广州:华南理工大学土木与交通学院,2010:6-16.
SONG Yi. Study on grading segregation description of asphalt mixtures and related problems based on fractal theory [D]. Guang Zhou: College of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 2010:6-16. (In Chinese)
- [15] 周吴军.基于分形理论沥青路面离析判别方法研究[D].长沙:湖南大学土木工程学院,2009:28-44.
ZHOU Wu-jun. Research on construction quality control and evaluation of asphalt pavement based on non-uniformity [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2009:28-44. (In Chinese)
- [16] 刘思峰,方志耕,谢乃明.基于核和灰度的区间灰数运算法则[J].系统工程与电子技术,2010,32(2):313-316.
LIU Si-feng, FANG Zhi-geng, XIE Nai-ming. Algorithm rules of interval grey numbers based on the "Kernel" and the degree of greyness of grey numbers [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(2): 313-316. (In Chinese)
- [17] PENTLAND P. Fractal-based description of natural scenes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6(6): 661-674.
- [18] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature [M]. San Francisco; W. H. Freeman and Company, 1982: 361-366.
- [19] 王耀南,王绍源,毛建旭.基于分形维数的图像纹理分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2006,33(5):67-72.
WANG Yao-nan, WANG Shao-yuan, MAO Jian-xu. Image texture analysis based on fractal dimension [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33(5): 67-72. (In Chinese)
- [20] 赵明华,戴杰,张玲,等.基于分形理论的粉煤灰渗透率研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(1):75-80.
ZHAO Ming-hua, DAI Jie, ZHANG Ling, *et al.* Fractal theory-based study of the permeability of fly ash [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(1): 75-80. (In Chinese)
- [21] 赵海英,杨光俊,徐正光.图像分形维数计算方法的比较[J].计算机系统应用,2010,20(3):238-246.
ZHAO Hai-ying, YANG Guang-jun, XU Zheng-guang. Comparison of calculation methods-based image fractal dimension [J]. Computer Systems & Applications, 2010, 20(3): 238-246. (In Chinese)