

融合分形维值的路面裂缝损伤评价模型

沈照庆¹, 贾龙超¹, 姚铁山¹, 王爱萍²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:针对路面裂缝损伤评定指数(PCI)计算方法没有顾及裂缝空间相关性的问题,在面向像素的损伤统计计算基础上,重构只含裂缝和背景的二值影像,利用网格法快速计算单个裂缝的分形维值,作为计算裂缝损伤度的有效贡献值,提出了融合裂缝影像分形维值的路面损伤评价指标(FPCI)。计算均方差误差率和相关系数来评价不同裂缝的空间关系,通过计算多个道路影像的裂缝损伤指数,构建了融入裂缝整体特征和裂缝间相互关系的路面裂缝损伤评价模型,并对 20 幅不同类型的水泥和沥青路面影像进行试验分析。研究表明:对同一幅图像,FPCI 与实际损伤度(PPCI)最大相差绝对值为 0.5%,最小相差绝对值为 0.1%,而 PCI 试验结果与 PPCI 的最大相差绝对值为 1.3%,最小相差绝对值为 0.4%,说明 FPCI 方法比 PCI 方法更能准确刻画路面的损伤情况;PCI 损伤度与实际损伤度间的均方根误差大于 FPCI 损伤度与实际损伤度间的均方根误差,FPCI 比 PCI 更能体现路面裂缝的损害程度;FPCI 在数理统计的基础上加入了裂缝的相关特征和空间几何特征分形维值,比 PCI 评价计算更趋合理,能更准确地表征路面裂缝损伤程度,可推广到路面坑槽、沉降、龟裂等其他类型损伤程度的量化计算。

关键词:道路工程;损伤指标;分形维值;裂缝损伤;评价模型

中图分类号:U411

文献标志码:A

Evaluation model of pavement cracks damage based on fractal dimension

SHEN Zhao-qing¹, JIA Long-chao¹, YAO Tie-shan¹, WANG Ai-ping²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In view of the issue that the calculation method of pavement crack index (PCI) doesn't take account of the cracks spatial correlation, the binary images containing only cracks and background were rebuilt on the basis of the statistical calculations of damage in pixels. The fractal dimensions of various cracks were calculated fast by means of grids algorithm, which were regarded as the effective contribution of crack damage values. Then the new pavement cracks evaluation index was proposed on the basis of the crack images fractal dimension (FPCI). The error variance ratio and correlation coefficient were calculated to evaluate the spatial relationship of different cracks, and the damage indexes of a lot of cracks images were calculated to build the

收稿日期:2015-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41204076);陕西省自然科学基金项目(2015JQ4104);

中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室开放研究基金项目(2012PNTT17)

作者简介:沈照庆(1981-),男,山东沂源人,副教授,工学博士,E-mail:aqing666@tom.com。

pavement cracks evaluation model by taking the overall features and correlation of cracks into account. The experimental analysis was conducted on 20 different cement concrete pavement and asphalt pavement images. The results show that for the same image, the absolute value of maximum difference between FPCI and the practical pavement cracks damage index (PPCI) is 0.5% and the minimum is 0.1%, while the maximum absolute difference between PCI and PPCI is 1.3% and the minimum is 0.4%. Therefore, FPCI method can depict the road surface damage more accurately than PCI. The root mean square error between the PPCI and PCI is greater than the one between FPCI and PCI, which demonstrates that FPCI can reflect the damage of pavement crack more significantly than PCI. The relevant characteristics of the cracks and the fractal dimension values of the cracks spatial geometric are taken into the design of FPCI based on mathematical statistics theory, and thus the evaluated calculation is more reasonable than PCI and can reflect the damage extent of pavement cracks more accurately. Besides, FPCI can be popularized to the calculations of other kinds of damages such as pavement pits, subsidence and cracking etc. 3 tabs, 5 figs, 15 refs.

Key words: road engineering; damage index; fractal dimension; cracks damage; evaluation model

0 引言

针对路面的使用状态描述问题,国外许多组织机构提出了多个路面损伤评价指标,如加拿大的行驶舒适性指数(RCI)、日本的养护管理指数(MCI)和美国军事机构开发的路面损伤状况指数(PCI),这些计算模型将客观数据与标准的评价尺度建立联系,利用统一的尺度评价不同的路面破坏,评价模型包含了多变量和参数,实用性和可操作性受限^[1]。Jitprasithsiri 等提出了统一损伤指数评定方法(UCI),但是该方法没有考虑独立噪声子块、子块损伤密度不一致以及邻域子块间相互影响的问题,其损伤评定并不合理^[2];Wang 等通过把路面裂缝影像作为神经网络的输入来减少特征空间尺度,从而达到提高效率的目的,但裂缝损伤识别计算精度较低^[3-4];李清泉等通过将裂缝影像分为子块,以潜在损伤像素在子块中的比重作为子块的损伤程度值,并设计了金字塔多尺度计算模型,但是并没有考虑裂缝的纹理特性,也不能自动设定裂缝损伤计算的阈值^[5-6]。目前关于裂缝损伤指标的计算大都集中于基于单个栅格象元的数理统计,没有顾及裂缝间的相互关系和裂缝的三维空间特征,因而不能体现整体路面裂缝的损伤程度。此外,上述方法的裂缝损伤统计具有普遍的主观性,对工程师的依赖较大^[7]。为此,本文在 PCI 研究基础上,从路面裂缝影像属性特征及空间特征出发,提出基于分形维值的路面裂缝损伤评价指标,计算过程融入了裂缝空间特征分形维值,其他计算参数采用公路网技术状

况统计数据,并通过试验验证了方法的可靠性。

1 PCI 原理及其评析

路面损伤状况指数(PCI)是在象元空间中基于数理统计直接衡量路面的损坏状态^[6-7],通过裂缝对路面使用性能的影响程度加权累积计算损坏面积,再将潜在病害像素占路面区域的百分率作为衡量该路面损伤程度的依据,其数学表达式为

$$I_{\text{PCI}} = 100 - a_0 I_{\text{DR}}^{a_1} \quad (1)$$

$$I_{\text{DR}} = 100 \frac{\sum_{i=1}^{i_0} w_i A_i}{A} \quad (2)$$

式中: I_{PCI} 为 PCI 的计算参数; I_{DR} 为路面损伤度的计算参数,DR 为路面损伤度,表示损坏面积之和与路面调查面积的百分比,通常利用损伤区域所占的象元数占有道路象元数的比率来衡量; A_i 为第 i 类裂缝路面损坏面积; A 为调查的路面面积(调查长度与有效路面宽度之积); w_i 为第 i 类路面裂缝损坏的权重; i 为考虑裂缝损坏程度的第 i 项裂缝损坏类型; i_0 为考虑裂缝损坏程度(轻、中、重)的裂缝损坏类型总数; a_0 、 a_1 为模型参数,一般通过经验获取。

由于道路表面噪声较多、裂缝损害类型各异以及未考虑相邻损坏区域在不同尺度上的空间关系等特点,故 PCI 指标存在两方面不足:①没有充分考虑路面噪声的影响,由于路面噪声与路面损伤象元存在同质性,空间尺度也具有相似性,使得很多噪声被当作损伤参与统计,影响损伤度的统计精度,使得统计结果并不具有代表性;②没有考虑裂缝区域邻

元在不同尺度上、空间上对路面的影响。单纯从裂缝损伤面积比率来评价路面状态不够科学,由于裂缝损伤区域的连续性,其损伤指数还与损伤区域的空间分布有关系,具有同样 PCI 的路面影像,其中邻域密度大的损伤影像比邻域密度小的损伤影像损伤更严重^[5-6,8]。基于此,本文针对路面裂缝的损伤评价指标计算方法进行研究,设计了融合分形维值的路面裂缝损伤评价模型。

2 融合分形维值的路面裂缝损伤评价

2.1 分形维理论

现实的几何对象一般是不规则、不完整的,仅利用整数拓扑维不能准确刻画对象特征,通常利用 Hausdoff 维进行分形维维数度量。对于 m 维空间点集 X ,记 $N(r)$ 是覆盖 X 所需的半径为 r 的 m 维球的个数,则当 $r > 0$ 时,如果 $N(r)$ 的增长规律服从 $N(r)$ 正比于 $r^{(-D)}$,则称点集 X 的 Hausdoff 维为 D 。将研究对象可分为 N 个局部,每个局部按相似比 β 与整体相似,其分形维数 $D = \ln(N) \ln(1/\beta) = -\ln(N) \ln(\beta)$ ^[9-11]。

2.2 道路裂缝影像的分形特征

分形维具有 5 个基本特征:形态的不规则性;结构的精细性;局部与整体的自相似性;维数的非整数性;生成的迭代性。影像中的道路裂缝曲线和纹理特征也明显具有分形特性^[5]:细节和整体具有近似的自相似特性;具有任意尺度下的比例细节,或者说具有精细的结构;既不是满足某些条件的点的轨迹,也不是某些简单方程的解集,不能用传统的几何语言来描述。图 1 是实测的道路裂缝灰度,对其进行去噪,裂缝增强后见图 2。从图 2 可看出,2 个黑方框内的裂缝曲线具有相似性,它们与整个道路裂缝曲线也具有形状相似性,具有明显的分形特征。

2.3 融合分形维值的路面裂缝损伤评价模型

分形维数是图像物质稳定的表示量,可以用来描述图像裂缝曲线特征,但含裂缝损伤的道路图像数据量大,道路裂缝分形 Hausdoff 维数计算和估计比较困难。目前主要有 3 类计算方法:根据盒维数的定义出发来计算,概率盒法、Sarkar 等差分盒维数法和基于灰度差值法等;基于分形布朗随机场模型的灰度统计法和傅里叶变换功率谱密度法;基于小波分解的分形维算法、地毯覆盖法^[10-14]。盒维数法应用最广泛,计算速度快,通常用在裂缝影像分析中。利用网格法计算道路裂缝分形维值,然后计算融合分形维值的路面裂缝损伤评价指标。

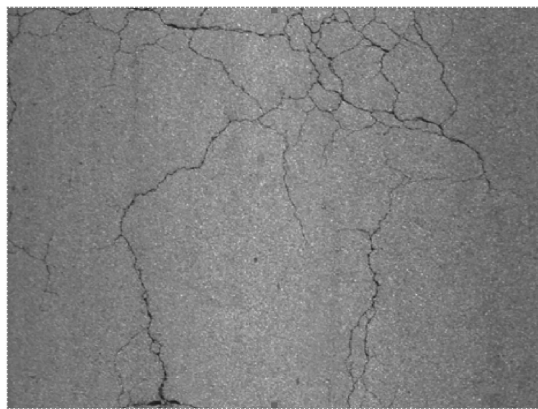


图 1 道路裂缝灰度

Fig. 1 Road crack gray image

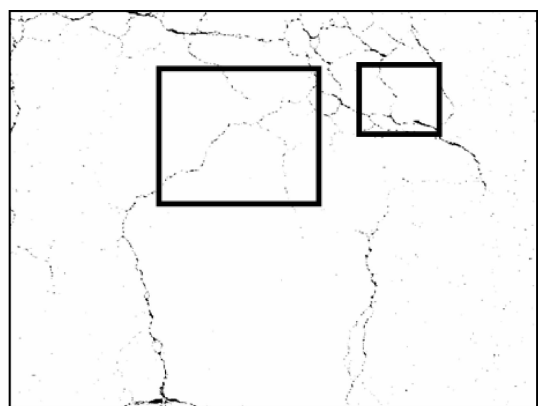


图 2 道路裂缝的分形特性显示

Fig. 2 Road crack fractal feature show

步骤 1:道路裂缝数据预处理

(1)对道路裂缝曲线进行滤波处理,消除噪声。

(2)灰度值归一化,将灰度值由 $[0, 255]$ 归一化到 $[0, 1]$,使坐标系中横纵坐标度量单位统一。

(3)对道路裂缝曲线进行重采样,由于结果不一定正好是 2 的偶数次幂,根据网格法分维计算原理,需要将裂缝的 X 值进行重采样线性内插,使点数 cell max 成为 2 的偶数次幂。

步骤 2:不同尺度下网格迭代计算

(1)按照公式 $t = \log_2(\text{cell max}) + 1$ 计算网格迭代次数。

(2)通过迭代计算,计算不同尺度下道路裂缝曲线所占网格数目,得到网格数对 $(e, N(e))$, $e = 1, 2, \dots, t$, $N(e)$ 为在尺度为 e 时道路裂缝曲线所占网格上网数,对其取对数,得到: $(\log_2(\text{cellsize}(e)), \log_2(N(e)))$, $e = 1, 2, \dots, t$ 。

步骤 3:道路裂缝分形维值计算

对步骤 2 中求取的网格尺度和网格数对进行最小二乘线性拟合,斜率就是道路裂缝的网格分形维

数 D , 由盒式分形维值计算原理知 $1 < D < 2$ 。

$$\left. \begin{aligned} P &= \text{polyfit}(\log_2(\text{cellsize}(e)), \\ &\log_2(N(e), 1), e=1, 2, \dots, t) \\ D &= P(1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

步骤 4: 融合分形维值的道路裂缝损伤评价指标(FPCI)计算

$$I_{\text{PCI}} = 100 - a_0 I_{\text{DR}}^{a_1} f \quad (4)$$

$$I_{\text{DR}} = 100 \frac{\sum_{i=1}^{i_0} w_i A_i}{A} \quad (5)$$

式中: f 为某区域子块的分形维值。

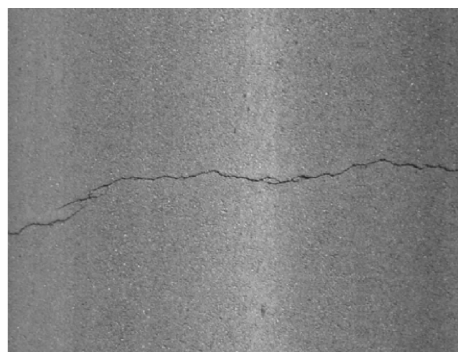
3 试验分析

为了验证算法的有效性, 本文从路面损伤采集车获取的影像中随机抽取了 20 幅包含各种裂缝损伤的影像, 采用线阵 CCD 获取影像, 空间分辨率为 1 mm。为了使试验更有针对性, 从 20 幅影像中抽取 2 张具有代表性的影像进行试验, 以说明 PCI 方法与 FPCI 方法的差异。一幅为简易裂缝, 另一幅为复杂裂缝, 如图 3(a)、图 3(b) 所示。

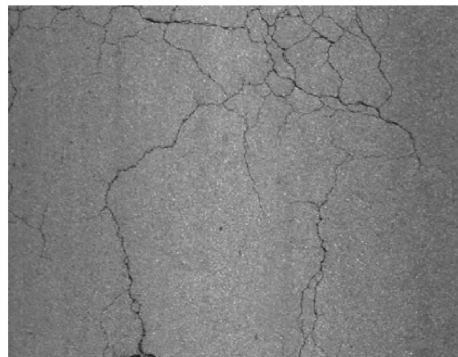
首先利用 K-均值法^[15]对图像进行裂缝识别, 去噪归一化后得二值灰度图 3(c)、图 3(d), 通过统计损伤象元数与影像总的象元数的比率来计算 PCI 损伤度。对灰度图进行三维化处理得到下页图 4(a)、图 4(b)。从 2 组图的对比可看出, 2 幅裂缝图像的局部和整体都具有明显的相似性, 即分形特征。利用式(3)计算 2 幅图像裂缝的分形维值分别为 1.107 和 1.315。对损伤度的计算方法进行调整, 将分形维值融合到 PCI 中, 利用式(4)、式(5)计算 FPCI 裂缝损伤度。其中: 沥青路面 a_0 取 15.00, 水泥路面 a_0 取 10.66; 沥青路面 a_1 取 0.412, 水泥路面 a_1 取 0.461; 沥青路面 i_0 取 21, 水泥路面 i_0 取 20^[6], 得其损伤度分别为 5.4% 和 12.8%。

为了进一步验证 FPCI 裂缝损伤评估的有效性, 选取 20 幅路面损伤影像, 分别按照 PCI 方法和 FPCI 方法计算对应的裂缝损伤度。通过实际地面调查、人工统计和基于像素级影像的区域增长方式得到路面实际损伤度(PPCI)。比较 2 种方法在实际损伤度的误差值见下页表 1, 三者得到损伤度的曲线如下页图 5 所示。分析 2 种方法与实际地面统计的实际损伤度之间的差别, 其中相关性分析采用相关性计算公式, 偏离度分析采用均方根误差率计算公式, 试验计算结果如下页表 2、表 3 所示。

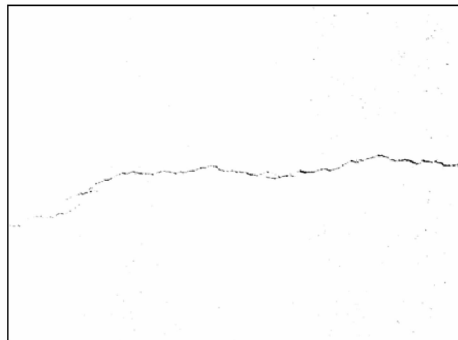
表 1 表明, 对同一幅图像, FPCI 与 PCI 最大相



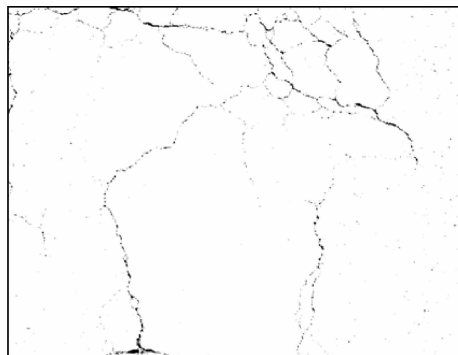
(a) 简易裂缝



(b) 复杂裂缝



(c) 单一裂缝提取



(d) 混合裂缝提取

图 3 道路裂缝识别结果

Fig. 3 Road cracks recognition results image

差绝对值为 0.5%, 最小相差绝对值为 0.1%, 而 PCI 试验结果与实际损伤度的最大相差绝对值为 1.3%, 最小相差绝对值为 0.4%, 说明 FPCI 方法比

表 1 PCI,FPCI 与实际裂缝损伤度对比
Tab.1 Comparison of PPCI, PCI and FPCI

图像编号	PPCI	FPCI	PCI	FPCI-PPCI	PCI-PPCI	图像编号	PPCI	FPCI	PCI	FPCI-PPCI	PCI-PPCI
1	1.3	1.0	2.0	0.7	0.7	11	5.8	5.5	4.5	−0.3	−1.3
2	6.7	6.9	4.9	−1.8	−0.8	12	2.3	2.7	3.0	0.4	0.7
3	2.1	1.8	3.2	1.1	1.1	13	6.5	6.9	7.6	0.4	1.1
4	1.8	1.5	2.2	0.4	0.4	14	2.1	1.9	2.6	−0.2	0.5
5	1.1	1.4	2.2	1.1	1.1	15	0.8	1.2	1.5	0.4	0.7
6	5.3	5.7	4.5	−0.8	−0.4	16	3.3	3.8	4.2	0.5	0.9
7	0.9	1.1	1.4	0.5	0.5	17	7.8	7.7	7.0	−0.1	−0.8
8	2.7	2.6	3.3	0.6	0.6	18	1.2	1.4	2.1	0.2	0.9
9	7.5	7.9	8.5	1.0	0.8	19	8.1	8.3	9.2	0.2	1.1
10	4.1	4.4	3.2	−0.9	−0.9	20	5.4	5.7	6.2	0.3	0.8

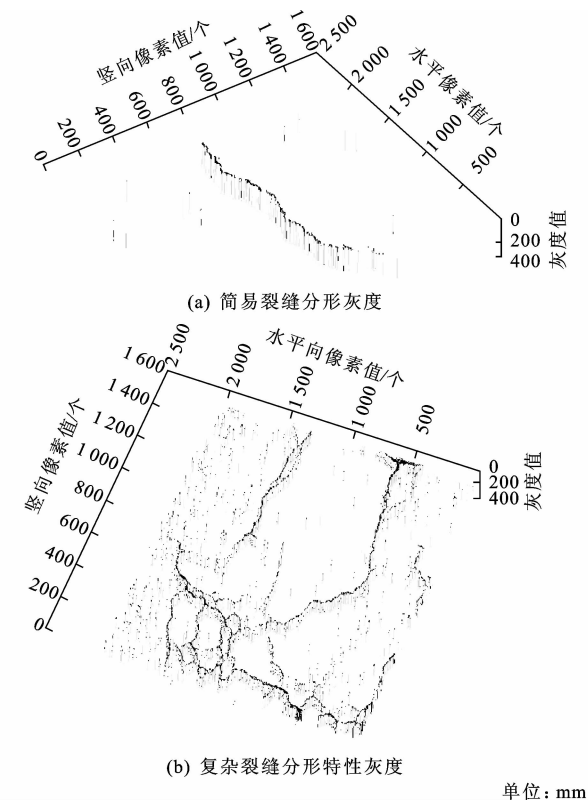


图 4 道路裂缝图像分形特征
Fig.4 Road crack image fractal feature

表 2 PPCI,PCI 及 FPCI 间的相关系数

类别	PCI 损伤度	实际损伤度	FPCI 损伤度
PCI 损伤度	1.000 0	0.977 1	0.953 2
实际损伤度	0.977 1	1.000 0	0.982 7
FPCI 损伤度	0.953 2	0.982 7	1.000 0

表 3 PPCI,PCI 及 FPCI 间的均方根误差率

类别	PCI 损伤度	实际损伤度	FPCI 损伤度
PCI 损伤度	0	15.79	23.52
实际损伤度	15.79	0	5.61
FPCI 损伤度	23.52	5.61	0

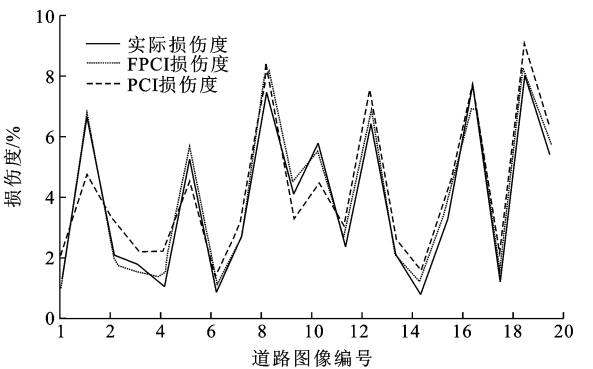


图 5 损伤度对比
Fig.5 Comparison of PPCI,PCI and FPCI damage degree

PCI 方法更能准确刻画路面的损伤情况,体现了采用分形维值表征裂缝空间特征并融入损伤评价指标的合理性。从图 5 可看出,对于同一幅图像,FPCI 损伤度与实际损伤度更为接近。由表 2 可得出:PCI 方法与 FPCI 方法计算得损伤度与实际损伤度有很强的相关性,三者的变化趋势相同,损伤越严重的影像,PCI 损伤度与 FPCI 损伤度值都越大,反之则越小,说明两者都能刻画路面损伤的程度。由表 3 可得出:PCI 损伤度与实际损伤度间的均方根误差大于 FPCI 损伤度与实际损伤度间的均方根误差,说明 FPCI 较 PCI 更能体现路面裂缝的损害程度,原因在于 FPCI 在数理统计的基础上加入了裂缝的相关特征和空间几何特征分形维值。

4 结 语

(1)利用网格法可快速计算单个裂缝的分形维值,均方差误差率和相关系数可评价不同裂缝的空间关系,可作为计算裂缝损伤度的有效贡献值。在面向像素的统计方法刻画损伤的基础上,构建了融入裂缝整体特征和裂缝间相互关系的损伤计算模型。

(2)将道路裂缝的分形特征值应用到损伤指标 FPCI 的计算中,作为评价裂缝损伤程度的一部分,提高了损伤评估的合理性。多幅道路影像试验结果表明,FPCI 方法比 PCI 方法能更准确地表征在小尺度和大尺度上的裂缝损伤程度,可为道路养护管理提供合理的运营损伤信息。

(3)融合分形维值的路面裂缝损伤评价方法,改变了传统裂缝损伤度统计方法的局限性,评价计算更趋合理,同时可推广到路面坑槽、沉降、龟裂等其他类型损伤程度的量化计算。但 FPCI 只面向 CCD 二维影像计算损伤指标,还没有考虑裂缝的深度和大片道路沉降损伤的评价,以后还需加强这方面的研究。

参考文献:

References:

- [1] 张娟,沙爱民,高怀钢,等.基于数字图像处理的路面裂缝自动识别与评价系统[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(2):18-22.
ZHANG Juan, SHA Ai-min, GAO Huai-gang, et al. Automatic pavement crack recognition and evaluation system based on digital image processing[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 18-22. (in Chinese)
- [2] Jitprasithsiri S, Lee H, Soric R G, et al. Development of digital image-processing algorithm to compute unified crack index for salt lake city[J]. Transportation Research Record, 1996(1526): 142-148.
- [3] Wang K C P, Gong W. Real-time automated survey system of pavement cracking in parallel environment[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(3): 154-164.
- [4] Zhang C, Wang H N, You Z P, et al. Sensitivity analysis of longitudinal cracking on asphalt pavement using MEPDG in permafrost region[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(1): 40-47.
- [5] 李清泉,刘向龙.路面影像损伤加权评定方法[J].中国公路学报,2009,22(4):45-49.
LI Qing-quan, LIU Xiang-long. Pavement image distress evaluation method based on weighted scheme[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 45-49. (in Chinese)
- [6] 刘向龙,李清泉.基于金字塔结构的海量路面影像损伤统计模型[J].武汉大学学报:信息科学版,2008,33(4):430-432.
LIU Xiang-long, LI Qing-quan. A pyramid-based cracks statistical model for massive pavement images [J]. Journal of Wuhan University: Geomatics and Information Science, 2008, 33(4): 430-432. (in Chinese)
- [7] 赵怀志,李强,程珊珊,等.公路技术状况评定指南[M].北京:人民交通出版社,2008.
ZHAO Huai-zhi, LI Qiang, CHENG Shan-shan, et al. Highway performance assessment guidelines [M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [8] 李清泉,邹勤,毛庆洲.基于最小代价路径搜索的路面裂缝检测[J].中国公路学报,2010,23(6):28-33.
LI Qing-quan, ZOU Qin, MAO Qing-zhou. Pavement crack detection based on minimum cost path searching [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 28-33. (in Chinese)
- [9] Pentland A P. Fractal-based description of natural scenes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6(6): 661-674.
- [10] Keersmaecker M L, Frankhauser P, Thomas I. Using fractal dimensions for characterizing intra-urban diversity: the example of Brussels[J]. Geographical Analysis, 2003, 35(4): 310-328.
- [11] El-sanbaly L A, Khashaba U A, Lseliny A, et al. Prediction of surface roughness profiles for milled using an artificial network and fractal geometry approach [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008 (200): 271-278.
- [12] 李洁,朱金兆,朱清科.分形维数计算方法研究进展[J].北京林业大学学报,2002,24(2):71-78.
LI Jie, ZHU Jin-zhao, ZHU Qing-ke. Review on methods of calculating fractal dimension[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(2): 71-78. (in Chinese)
- [13] 侯建荣,黄培清,骆建文.多分维分形曲线维数计算的小波方法[J].上海交通大学学报,2004,38(增1):18-21.
HOU Jian-rong, HUANG Pei-qing, LUO Jian-wen. A wavelet method for dimension evaluation of fractal multi-dimension curves[J]. Journal of Shanghai Jiao-tong University, 2004, 38(S1): 18-21. (in Chinese)
- [14] 鲁植雄,赵兰英,侯占峰.路面不平度的分形特征[J].江苏大学学报:自然科学版,2008,29(2):111-114.
LU Zhi-xiong, ZHAO Lan-ying, HOU Zhan-feng. Fractal behavior of road profile roughness[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(2): 111-114. (in Chinese)
- [15] 张建辉. K-means 聚类算法研究及应用[D].武汉:武汉理工大学,2007.
ZHANG Jian-hui. Research and application of K-means clustering algorithm[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)