

沥青混合料压实状态的数字图像分析

Digital image analysis of compacted asphalt mixture

李智¹, 徐伟¹, 王绍怀², 张肖宁²

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150009, 2. 华南理工大学, 广东 广州 510641)

摘要: 探索了沥青混合料数字图像处理技术的可行性, 并针对沥青混合料试件在不同压实成型方式下内部结构变化, 利用 CCD 相机获取试件立断面的图像数字信息, 采用压实评价参数——颗粒主轴方向, 直观、快速、准确地进行数字图像分析, 并与实际路面结构进行了对比。结果表明效果良好。

关键词: 沥青混合料; 数字图像; 颗粒分析; 主轴方向

中图分类号: U 416

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0451-05

作者简介: 李智(1971-), 男, 黑龙江克山县人, 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院道路与铁道工程专业博士生。

LI Zhi¹, XU Wei¹, WANG Shao-huai², ZHANG Xiao-ning²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150009, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In this paper, the technical feasibility of asphalt mixture digital image processing was explored. According to that the asphalt mixtures were designed with different compacting principles, so the internal structures and performances are different, we use the CCD camera to acquire the digital information in erect section of specimen, and adopt the evaluating parameter of compaction (direction of particle axis) to analyze the digital images directly and exactly. The real pavement structures were also compared; and the results show that the effect is good.

Key words: asphalt mixture; digital image; particle analysis; principal axis direction

1 引言*

众所周知, 沥青混合料是由集料、沥青胶浆和空隙三大体积成分构成的^[1], 从视觉角度来看, 集料接近于白色, 沥青胶浆接近于黑色, 约占 4% 的空隙一般近于深黑色, 可以利用色彩描述混合料体积组分。无疑, 飞速发展的计算机技术, 特别是数字图像处理技术为道路材料研究提供了便捷的工具体, 对探索沥青混合料图像处理技术, 具有重要借鉴意义。

在沥青混合料设计过程中, 马歇尔击实法因操作简单而被广泛使用, 但其原理完全不同于实际路面的施工压实, 成型试件的结构不能准确代表真实路面。虽然轮碾压实、振动压实和旋转压实作为更科学的压实方法被认为其成型试件最接近路面结构, 但目前很难见到有说服力的研究成果。

为此, 本文首先探索了沥青混合料数字图像处理技术的可行性, 在此基础上, 针对不同压实成型的混合料结构, 采用该技术对相应试件立断面的粗集料颗粒取向进行研究。

2 数字图像处理技术

数字图像(Digital Image)技术可以将一幅连续的图像信息利用扫描仪或 CCD 离散为数字信息^[2]。混合料数字图像处理技术主要包括图像获取(数字化)、图像处理及图像分析等过程。一个典型的数字图像处理

过程如图 1 所示。

2.1 数字图像获取

数字图像获取一般利用数字化仪离散(采样、量化)一幅连续的图像。常用的仪器有: 胶片扫描仪, CCD 数字相机或摄像机, CMOS 数字相机等, 其中采用 CCD 数字相机获取数字图像是现在最常用的方法, 本文即采用该种设备。实验表明, 采用 CCD 相机可获得比较理想的沥青混合料数字图像, 见图 2。

2.2 数字图像处理

数字图像处理是指为了某种目的对图像进行一种或几种处理(数学或逻辑运算), 以达到需要效果的过程。沥青混合料数字图像处理过程主要包括:

(1) 几何校正, 对光学镜头边缘引起的像变以及光学主轴不垂直于物面所引起的变形进行纠正。

(2) 消除噪音, 消除由于 CCD 记录过程中电子热运动和数字信号进行光电转换过程中产生的无效信息。

(3) 图像增强技术, 一般情况下, 沥青混合料图像灰度直方图具有明显的双峰性, 图 3 所示, 因此采用灰度图像作为处理对象是适宜的。实际上, 集料并非均一物质, 无论是石灰岩, 花岗岩, 还是玄武岩, 其灰度可能会分布在很大的灰阶(灰度等级)范围内, 以至于可能进入沥青胶浆的灰阶域内, 此时改善图像质量显得

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50078023)

收稿日期: 2001-11-19

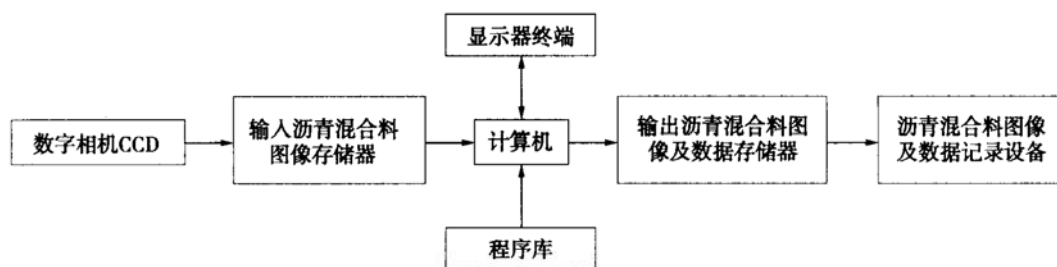


图1 数字图像处理系统

Fig. 1 Digital images processing system

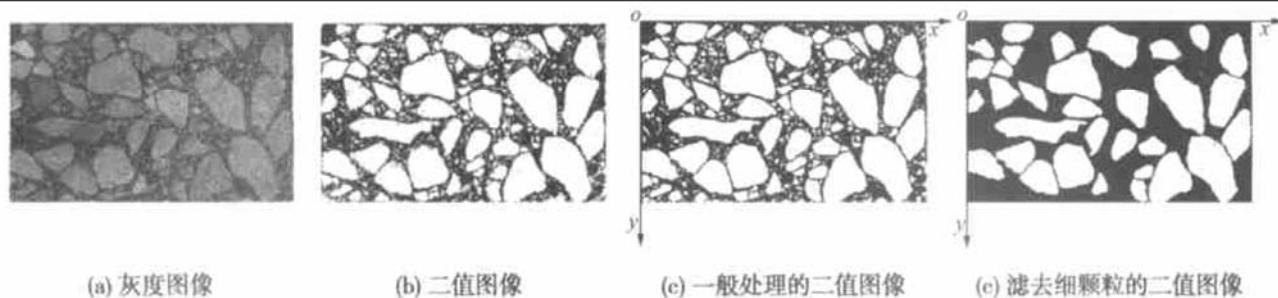


图2 马歇尔试件数字图像(99.8 mm × 61.0 mm, 300 dpi)

Fig. 2 Digital images of Marshall specimen

非常的重要。实验表明,采用空域的处理方法及全局加局部的策略,可获得满意的混合料数字图像。

理以解决粒子连接,判断颗粒内部空洞并将其消除,处理结果参见图2(c)。

坐标系如图2(c)所示,坐标单位可采用 mm、inch 和像素(pixel),为方便计算本文采用像素单位。

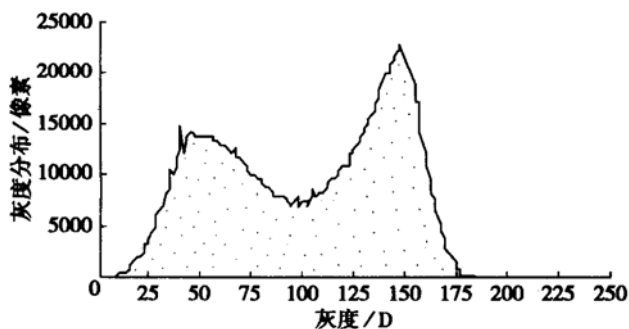


图3 沥青混合料灰度直方图

Fig. 3 Histogram of grayscale image for asphalt mixture

颗粒分离是关键的一步,直接影响最终结果的准确性。对于一幅灰度图像,就是如何在 $[0, 256]$ 的区间内确定分离集料与沥青胶浆之间的阈值像素 k ,介于 $[k, 256]$ 之间的像素被认为是集料,其余部分 $[0, k]$ 作为胶浆(背景)。确定 k 值的方法很多,有双峰法,最大差方法,差分直方图法,Laplace直方图法等。本文采用双峰法,其结果可以满足精度要求。

经过阈值处理后,灰度图像转化为二值图像,集料颗粒更加清晰,如图2(b)所示。此时图像还存在不足,如颗粒间彼此连接、边界模糊、内部存在空洞等。编制了专门软件对粒子进行轮廓跟踪,边缘检测,颗粒识别及描述,从而获得颗粒基本数据,如颗粒质心、面积、周长及边界坐标等,如表1所示。在此基础上,选取 3×3 或 5×5 模板与原图像整体或局部进行卷积处

3 数字图像集料颗粒参数分析

以上分析表明,可以应用数字图像处理技术分析沥青混合料体积组成,也可以根据实际应用目的进行深入分析。本文仅选择压实成型结构为例来说明数字图像处理技术的应用,并在此基础上比较了不同压实状态与实际路面材料之间的关系。

在工程实际中,马歇尔击实法采用垂直力击实成型试件,成型过程中集料颗粒仅有竖向位移;轮碾压实模拟压路机滚动压实,颗粒发生竖向位移并沿轮碾滚动方向转动;振动压实利用竖向振动力使颗粒竖向位移并相应转动;旋转压实同时施加竖向力和旋转摆动作用,颗粒发生竖向位移及自由转动。在路面施工中,摊铺机的熨平板给混合料以打击实现初步密实,之后在双轮压路机的碾压及振动作用下,混合料中集料颗粒将向深度及转动荷载的前进方向移动或转动,在轮胎压路机作用下,还将发生侧向位移。竣工通车后,混合料受到行驶车辆轮胎荷载作用进一步密实,集料颗粒也将进入最稳定的排列状态。

在传统的沥青混合料设计方法中,通常用压实密度评价压实效果,比较各种压实方法之间的差异。压实密度是一个统计概念下的平均数值,无法用来精确

表 1 图 3 部分粗集料颗粒参数测量结果

	Table 1 Parameters of some coarse particles in Fig. 3													像素
颗粒编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
颗粒面积	8140	6692	21866	7590	14276	6765	4982	30940	6776	34215	23651	10572	8138	15401
最大主轴	127	103	209	97	116	120	94	227	105	184	137	119	93	137
等效短轴	74.18	76.77	128.93	81.48	100.27	67.52	64.26	159.84	64.52	140.26	112.16	90.28	60.69	111.05
主轴方向 $\alpha/(^{\circ})$	7.18	52.9	24.09	85.63	84.17	5.5	13.67	5.12	19.8	55.47	72.74	63.63	43.81	54.48

地分析判断压实过程中集料颗粒的排列状况。众所周知,经典的集料级配设计依赖于堆积与填充的理论假设,颗粒被假定为均匀粒径的球体,而集料的实际形状为接近于立方体的多面体。混合料的压密过程是集料在压力作用下紧密排列的过程,按照填充理论,几何形状不规则的粗集料多为长形颗粒,存在一个最大“长轴”,集料颗粒只有在长轴取向排列状态下才有可能获得最大填充率,集料排列才能够进入“稳定状态”。沥青路面的碾压过程与车量交通补充压实具有明确的方向性,集料颗粒的长轴排列取向程度将直接影响材料密实度和稳定性。研究表明,粗集料构成混合料的骨架结构,其排列取向是最主要因素,因此,本文选择粗集料颗粒长轴排列取向特性为指标,用来比较评价不同压实方法下压实效果的差异。

日本北海道大学在 80 年代进行过类似研究^[3],其研究目的是分析车辙形成过程中集料排列的变迁,并采用手工计数,工作量大而不准,此后未见相关报道;美国联邦公路局于 90 年代后期组织 SIMAP 小组采用辐射成像技术开展研究^[4],由于获取数字图像手段不同,目前仅限于分析沥青混合料中空隙的分布与排列。根据国内外研究现状和研究目的,本文对此进行了若干尝试与探索。

既然粗集料颗粒具有“长轴”,且具有沿行车方向取向排列的特点,如何描述其取向程度十分重要。统计分析发现,对于粗集料颗粒边界上任意两点的连线(弦),存在唯一最长弦,并确保其上每一点都在边界内部,即与边界只相交于两个端点,称该弦为粗集料颗粒主轴,利用其对应的方向表示颗粒状态方向较为合适。粗集料颗粒主轴方向物理意义如图 4 所示。

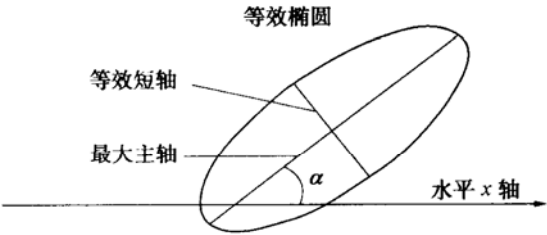


图 4 混合料颗粒主轴及主轴方向

Fig. 4 Particle principal axis and direction of mixture
粗集料主轴是指颗粒的凸边界上两点距离 (2a)

最大的连线,与水平 x 轴所夹的锐角表示主轴方向,用 $\alpha(0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ})$ 表示,如图 4 所示。为了从混合料图像的大量颗粒中提取粗颗粒,需要寻找一个类似于粒径筛分尺寸的参数,而大量颗粒统计分析表明,粗集料颗粒平面形状更接近于椭圆,无疑,采用与原颗粒具有等效面积的椭圆的短轴(简称等效短轴, $2b$) 符合要求。相应的椭圆有两种:一是具有与原颗粒相等面积和周长的椭圆,另一是与原颗粒具有相同面积和最大主轴的椭圆。分析表明,后者与原颗粒具有更密切的联系,且等效椭圆短轴更具实用意义。参考粗细集料分界的方孔筛尺寸一般为 4.75 mm 以及规范推荐的对应圆孔筛转换系数 1.2,并考虑采用等效短轴描述粒子所带来的误差,初步确定分离图像粗细颗粒的阈值尺寸为 4 mm(300 dpi 图像对应的像素值为 47.24),实际分析表明,用该值可以提取粗集料颗粒。表 1 给出了图 2 部分颗粒分析结果。

此外,在颗粒方向分析过程中发现,近似于圆形的颗粒对压实力作用的转动效应不显著。经验表明,对于 $a/b < 1.5$ 的颗粒在压实过程中仅竖向运动,转动很小,在压实后期较难发生移动。本文在颗粒方向分析时,未考虑这一类粗颗粒。

4 实验设计及分析

4.1 实验设计

本文针对马歇尔击实、轮碾压实、振动压实及旋转压实成型试件及路面钻芯试样进行分析。

实验设计如下,试件压实成型后,用双面切割锯沿压实力作用方向切开试件,根据需要进行必要的边缘打磨,然后对断面进行清洗烘干,最后利用 CCD 数码相机获得断面的数字图像,并保存到计算机中以便进行分析。

实验设备:马歇尔击实仪、轮碾压实机、振动压实仪、旋转压实仪、双面锯、图像处理系统。

石料:花岗岩;沥青:北方普通沥青 70#;混合料级配:AC-20I,见表 2。

混合料试件的压实参数和断面尺寸见表 3。试件立断面随机选取,因而对 6 幅图像的颗粒进行了统计分析,以提高数据可靠性(样本量见表 4)。

表 2 集料级配

Table 2 Gradation of aggregate

规格/mm	> 26.5	> 19	> 16	> 13.2	> 9.5	> 4.75	> 2.36	> 1.18	> 0.6	> 0.3	> 0.15	> 0.075	油石比/%
AC-20I/%	100	95	73	61	50	35	24	17	12	9	6	5	4.2

注: 该级配参考美国 SuperPave 设计标准。

表 3 混合料试件压实成型参数及立面尺寸

Fig. 3 Compaction parameters and erect section size of mixture specimen

压实方法	马歇尔击实		轮碾压实		振动压实			旋转压实	
	击实功	正、反面次数	压力/kN	次数	系统压力/MPa	平衡压力/MPa	时间/s	最大压力/MPa	次数
压实指标	标准	各 50	9	28(预压 4)	0.7	0.21	25	0.6	75
断面尺寸/mm	100×62		300×53		125×80			150×123	

表 4 颗粒主轴方向的统计分析

Table 4 Statistical analysis of direction of particle principal axis

压方法	马歇尔击实	轮碾压实	振动压实	旋转压实	新建路面	通车一年路面
样本量/个	354	425	829	896	328	320
样本均值/度		25.91	31.43	30.44	23.77	22.16
样本方差		516.52	552.66	566.88	459.05	403.73
参数 a		1.300	1.787	1.63	1.230	1.216
参数 b		0.050	0.057	0.054	0.052	0.055
峰值角 $\alpha_m / (^\circ)$		5.97	13.84	11.81	4.45	3.94
密度/(g·cm ⁻³)	2.384	2.375	2.336	2.369	2.380	2.385

注: 马歇尔击实试件颗粒主轴方向无明显统计规律, 未作统计分析。

4.2 实验分析

压实成型试件的数字图像粗颗粒统计分析结果见图 5~ 8 和表 4。

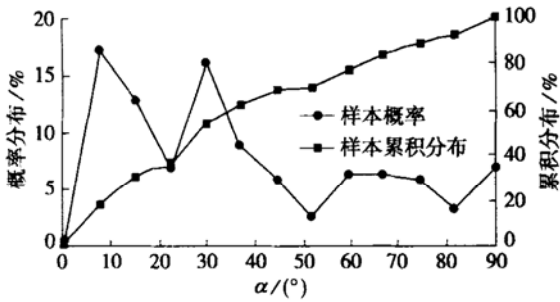


图 5 马歇尔试件颗粒主轴方向分布

Fig. 5 Distribution of direction of particle principal axis in Marshall specimens

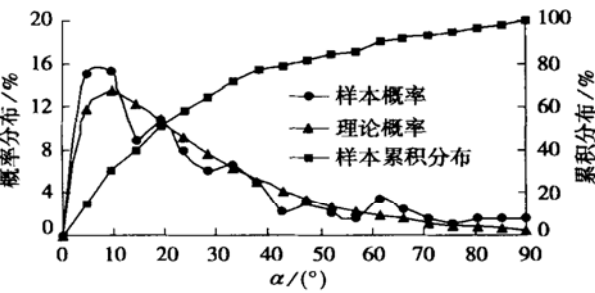


图 6 轮碾压实试件颗粒主轴方向分布

Fig. 6 Distribution of direction of particles principal axis in rolling compacted specimens

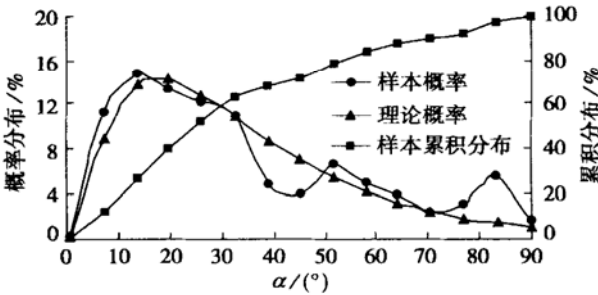


图 7 振动压实试件颗粒主轴方向分布

Fig. 7 Distribution of direction of particle principal axis in vibrating compacted specimens

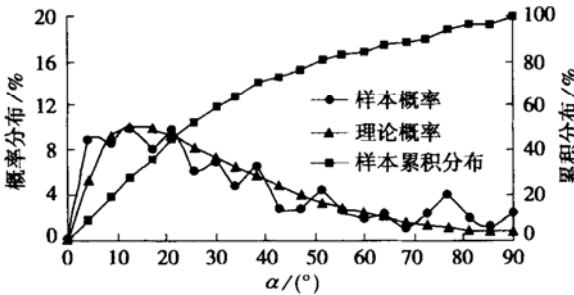


图 8 旋转压实试件颗粒主轴方向分布

Fig. 8 Distribution of direction of particle principal axis in gyratory compacted specimens

马歇尔试件颗粒呈现无规则分布, 虽然较大比例的颗粒分布于小角度区域, 但却无明显趋势, 在概率分布图中表现为多个峰值, 故无法用有效的统计参数来

描述。这与实际情况是相符合的,也进一步证明了马歇尔击实不是合理的混合料成型方法。

轮碾压实、振动压实和旋转压实则呈现出了良好的压实效果,主要表现在样本概率分布曲线的规律性和偏峰性,峰值靠近0点。值得注意的是0点附近的颗粒并不是很多,是因为颗粒自身外形的不规则性,致使其不会出现严格意义的 0° ,更为重要的是颗粒之间相互嵌挤作用限制了其向 0° 运动的趋势。进一步分析发现,颗粒主轴方向基本符合伽玛分布^[5]:

$$f(x) = \frac{b}{\Gamma(a)} \cdot (bx)^{a-1} \cdot e^{-bx} \quad (x \geq 0) \quad (1)$$

式中 $f(x)$ 为伽玛概率密度函数; a , b 为特征参数; $\Gamma(a)$ 为参数 a 的伽玛函数值。

统计结果表明,轮碾压实对于集料颗粒取向排列效果显著,在5 cm厚的沥青混合料试件断面上,颗粒沿主轴方向排列最为集中,大部分分布在 10° 左右。由概率密度公式(1)可求得其概率密度曲线最大峰值(概率值最大)对应的角度(称为峰值角)约 5.97° ,其物理意义为颗粒最可能的分布趋势。但也注意到,压实作用沿试件深度方向的影响在不断减弱,少数立断面下侧粗集料集中;对于更厚的振动压实试件(> 7.5 cm)、旋转压实试件(> 10 cm)由于分别采用独特的压实方式,基本上获得了比较满意的压实状态,但由于试件相对较厚,未能达到轮碾压实的状态。应当指出是,振动压实并未获得预先人们所期望的优良效果,表明振动作用对混合料压实的贡献并不理想,要比旋转压实弱,而对于旋转压实,应当说效果较好。

对于新建路面和通车一年后路面的AC20-I型表面层沥青混合料钻芯取样,其分析结果见图9、10及表4。

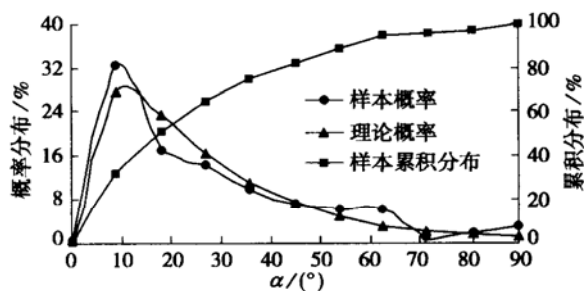


图9 新建路面钻芯试件颗粒主轴方向分布

Fig. 9 Distribution of direction of particle principal axis in core samples from the new pavement

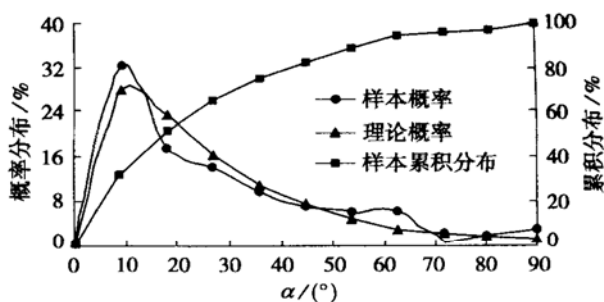


图10 通车一年路面钻芯试件颗粒主轴方向分布

Fig. 10 Distribution of direction of particle principal axis in core samples from the pavement after one year

分析表明,经一年行车荷载作用,集料颗粒取向过程仍在继续,峰值角由通车时的 4.45° 减到 3.94° ,混合料仍在不断密实。将其与四种室内实验成型方式的压实效果进行比较,轮碾压实获得的集料颗粒取向排列效果最接近路面芯样,马歇尔击实结果与路面实际状况相差最大。

5 结 论

本文研究获得以下结论:

- (1) 验证了沥青混合料数字图像处理技术的可行性。结果表明该方法具有直观、快速、准确的特点。
- (2) 利用图像处理技术研究了混合料压实成型结构,首次较系统地提出了利用粗集料颗粒主轴方向描述压实结构,效果良好。
- (3) 直观地验证了道路在使用过程中仍不断密实,而轮碾压实成型的沥青混合料结构与之最接近。

参考文献:

- [1] 张肖宁,郭祖辛,吴矿怀.按体积法设计沥青混合料[J].哈尔滨建筑大学学报,1995,(2):28-36.
- [2] Kenneth R C. 数字图像处理[M].北京:电子工业出版社,2000.2-5.
- [3] 菅原照雄,等.沥青路面搓揉作用[A].沥青混合料力学性能研究论文集[C].哈尔滨:哈尔滨建筑工程学院出版社,1982.137-144.
- [4] Shashidhar. X-Ray Tomography of Asphalt Concrete [R]. TRB99, 1999.
- [5] 周复恭,倪加勋,等.应用数理统计学[M].北京:中国人民大学出版社,1989.170-175.