

基于核密度估计的沥青路面状况动态分段方法

许哲谱, 杨 群

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘 要:针对现有路面静态分段方法不能充分利用基础检测数据以指导实际养护工作等问题, 提出了一种基于核密度估计的沥青路面状况动态分段新方法。基于快速检测设备获取精细的路况数据, 利用线要素核密度估计对路面破损率、国际平整度指数和车辙深度进行分析, 得到以核密度值为指标的连续变化路况地图; 在现有路况评价标准的基础上, 建立以核密度值为指标的路况评价新标准, 实现对沥青路面的动态分段和评价; 通过重分类和组合, 将基于核密度值的路面破损、平整度和车辙深度 3 个指标进行组合, 进一步得到可以同时反映多个指标的组合分段方案。以晋江市和平南路为例, 演示该方法在实践中的应用。最后, 将该方法、静态路段划分方法、基于累积差异法的动态路段划分方法进行对照分析。研究结果表明: 提出的方法可以考虑路况数据的空间自相关特性, 可得到精细的路段划分结果, 将道路划分成若干路段, 使得路段内部的路况尽可能相似, 而路段间路况差异尽可能大; 能够从基于核密度值的路面破损、车辙深度、平整度 3 个单指标或者组合指标的不同角度评价路况, 将路面状况的整体分布情况以及不同路段需要维修的紧急程度呈现出来, 同时保留了基础检测数据的细节; 能够与现有的路面管理系统紧密衔接, 有利于动态分段方法的推广应用。

关键词:道路工程; 沥青路面; 动态分段; 核密度估计; 路面状况

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.02.002

Method for dynamic segmentation of asphalt pavement performance based on kernel density estimation

XU Zhe-pu, YANG Qun

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education,
Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aimed at the problem that the currently used static road segmentation method cannot make full use of the basic detection data to guide the actual maintenance work, a new dynamic segmentation method for asphalt pavement based on kernel density estimation was proposed. Based on the fine pavement condition data acquired by rapid detection equipment, the pavement damage rate, international roughness index and rut depth data were analyzed by a line feature kernel density estimation method, so that a continuously changing pavement condition map with the kernel density value as the index could be obtained. On the basis of the existing pavement

收稿日期: 2019-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600301)

作者简介: 许哲谱(1993-), 男, 江西宜春人, 工学博士研究生, E-mail: xuzhepu@126.com。

通讯作者: 杨 群(1975-), 男, 江苏海安人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: qunyang.w@163.com。

condition evaluation criteria, a new evaluation criteria for pavement condition with the kernel density value as the index was established, thereby achieves the dynamic segmentation and evaluation for the asphalt pavement. Through the re-classification and combination method, the three indices of pavement damage, roughness and rut depth based on the kernel density value could be combined, and to further obtain a comprehensive segmentation scheme show multiple indices simultaneously. South Heping Road in Jinjiang was taken as an example, the application of this method in practice was demonstrated. At last, the proposed method was compared with the static road segmentation method and a dynamic road segmentation method based on cumulative difference approach. The results show that the proposed method can take the spatial autocorrelation of road condition data into consideration and obtain a fine segmentation result, which segments the road into sections, making the road conditions inside the same road section as similar as possible, while the ones between neighbor sections as different as possible. The pavement condition can be evaluated from different point of views, and from the view of the three indices individually or of the comprehensive one, which shows the overall distribution of the pavement condition and the urgency level of maintenance in different sections, and meanwhile retains the details of the basic detection data. The research also shows that this method can link up with the existing pavement management system well, which is conducive to the promotion and application of the dynamic segmentation method. 8 tabs, 6 figs, 29 refs.

Key words: road engineering; asphalt pavement; dynamic segmentation; kernel density estimation; pavement performance

0 引言

路段划分是养护工作的基础,基于路面状况数据将道路划分成若干路段,其中路况不良路段是养护关注的重点。目前,中国采用一种基于定长法的静态分段方法,即将道路按照一个固定的单元进行划分^[1-2]。《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)(简称规范,下同)规定以1 000 m路段长度为基本单元进行分段。然而,现行的分段方法有一定的不足:当基本评价单元很大时,对路况进行评价实际上得到的是一个在较长路段上的路况平均值,这个评价结果往往偏好,会掩盖局部路段路面状况不良的情况^[3];这种情况也难以充分利用精细的检测数据,如规范中规定,当采用快速检测设备时,对于路面损坏检测数据,应以10 m为单位长期保存^[1],而静态分段基本评价单元长度远远大于检测数据单位长度^[4]。如果采用长度小的基本评价单元进行分段,又会存在路段性能过于离散的问题,虽然其可反映路段的真实情况,但是如何将路段进行合并,以找到最适合的养护作业位置非常困难,无法指导实际养护决策^[5-6]。

因此,基于定长法的静态分段方法不适合指导精细化养护作业,需要加以改进。相比于静态

分段,动态分段不需要指定基本评价单元长度,而是根据道路状况自身的特性将道路划分成一个个同质路段。最朴素的动态分段方法是依据控制点或者工程经验进行分段。前者是利用路线设计中或施工过程中的控制点划分路段,使得任意2个相邻控制点间的路段在某个特性上具有同质性,而路段之间具有较大差异;后者主要是根据经验依据路况表现进行划分^[7]。然而这些方法具有明显的缺陷,前者无法考虑道路投入运营之后养护活动对路况的改变,而后者过度依赖于经验,主观性强。后来学者们提出了定量化的动态分段方法,其中,美国公路运输协会(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)提出的累积差异法(cumulative difference approach, CDA)是目前应用较广泛的动态分段方法^[8],其通过判断累积差异曲线走势的突变来确定分段位置,是一种可视化效果好且操作简单的方法。然而,CDA法只能区分出优良路段和不良路段,而同样属于优良或者不良的多个路段之间并没有区分度,且无法控制划分的路段数等^[9]。有学者尝试改进CDA法,Ping等引入了路段最小长度约束和最小均值差异约束,实现了CDA法的自动化^[10]。有些学者则提出了新的动

态分段方法,如基于分类与回归树的动态分段^[9]、基于小波变换的动态分段^[11]、基于 k-聚类分析的动态分段^[12]、基于 Fisher 有序聚类的动态分段^[13]、基于模糊聚类分析的动态分段^[14]、基于贝叶斯方法的动态分段^[15]和基于模糊 c 均值聚类的动态分段等^[16]。然而,这些动态分段方法均未考虑路况数据的空间自相关特性^[4],即相邻的路段路况并不是相互独立,而是相互依赖的^[17];此外,这些方法重在理论推导,算法比较复杂,不利于实践应用。

综上,本文提出一种基于核密度估计的动态分段方法,考虑了空间自相关性,可视化效果好,并且简单有效,方便推广。路面养护管理系统(pavement management system,PMS)在中国得到了较好普及,其中,地理信息系统(geographic information system,GIS)是 PMS 中常用的模块,用于道路病害的可视化呈现、数据组织和数据分析^[18-20],而核密度估计又是 GIS 中常见的功能,因此,基于核密度估计的路段动态划分方法有其天然的优势,可以很好地整合到路面管理系统中,并为养护决策提供支持。

1 动态分段方法

1.1 数据获取

动态分段依赖于精细的路况检测数据。随着道路检测技术的进步,获取精细的数据较容易,多功能快速检测设备已经得到很好推广,其具有精度高、客观、标准统一、快速高效等优点,在基础数据采集方面发挥着越来越重要的作用^[21]。

采用自动化快速检测方法进行路况检测时,应根据需要对路面破损、平整度、车辙、抗滑性和结构强度进行检测,并对检测频率提出要求,如表 1 所示^[1]。

表 1 最低检测频率要求

Tab. 1 Minimum detection frequencies requirements

检测项目	路面破坏	路面平整度	抗滑性能	路面车辙	结构强度
高速一级公路	1 次/年	1 次/年	1 次/2 年	1 次/年	抽样检测
二、三、四级公路	1 次/年	1 次/年			

采用快速检测设备检测路面损坏时,纵向应连续检测,横向检测宽度不小于路面宽度的 70%。检测设备应能够分辨 1 mm 以上的路面裂缝,检测结果宜采用计算机自动识别,识别准确率应达到 90%

以上。路面损坏和车辙深度检测数据应以 10 m 为单位长期保存,路面平整度、抗滑性能和弯沉检测数据应以 20 m 为单位长期保存。

1.2 核密度估计理论

获取了路况基础数据后,就可以对其进行核密度估计,得到以核密度值为指标表示的路面状况。核密度估计的核心思想是地理现象和事件可以发生在平面空间上的任何位置,但是发生的概率因位置不同而异。点密集的区域事件发生的概率高,点稀疏的区域则相反。在核密度估计法中,距离较近的对象,可认为相关性关系较大,在计算概率时,所占权重也较大^[22]。

假设 n 个数据 x_1, x_2, \dots, x_n 取自连续分布 $P(x)$,在任一点 x 处的一种核密度估计 $\hat{P}(x)$ 定义为^[23]

$$\hat{P}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \tag{1}$$

式中: $K(\cdot)$ 为核函数; $\hat{P}(x)$ 为核密度估计; h 为带宽或窗宽, h 的取值会影响到 $\hat{P}(x)$ 的光滑程度。

下文介绍一种求最佳窗宽的方法,令

$$M_{\text{ISE}} = E\left[\int (\hat{P}(x) - P(x))^2 dx\right] = E(\hat{P}(x) - P(x))^2 \tag{2}$$

式中: M_{ISE} 为积分均方误差(mean integrated squared error),是关于窗宽 h 的函数,求它的最小值点,可以得出最佳窗宽的估计值; $E(\cdot)$ 为期望函数。

当总体服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布,核函数 $K(\cdot)$ 为 Gaussian 核函数时,最佳窗宽 \hat{h} 为

$$\hat{h} = 1.06\sigma n^{\frac{1}{5}} \tag{3}$$

在实际应用时,式(3)的标准差 σ 应由样本标准差 S 来代替^[24]。

上文主要介绍了一维情况下的核密度估计,由于本文研究的基础数据都是以路段的形式保存的,即基于二维中的线要素,因此,需要将一维情况下的核密度估计拓展到基于线要素的核密度估计。从一维拓展到多维只需要选择多维密度函数作为核函数即可,比如采用 Silverman 提出的四次核函数^[25];而进一步拓展到线要素,可以采用如下策略:对于二维平面上的点,核密度估计相当于在每个点上方均覆盖一个平滑曲面;在点所在位置处表面值最高,随着与点距离的增大表面值逐渐减小,在与点距离等于带宽的位置处表面值为零;每个输出栅格像元的密度均为叠加在栅格像元中心的所有核表面值之和;

拓展到二维平面上的线,可以在每条线上方均覆盖一个平滑曲面,如图 1 所示。其值在线所在位置处最大,随着与线距离的增大此值逐渐减小,在与线距离等于带宽的位置处此值为零。每个输出栅格像元的密度均为叠加在栅格像元中心的所有核表面值之和^[26]。

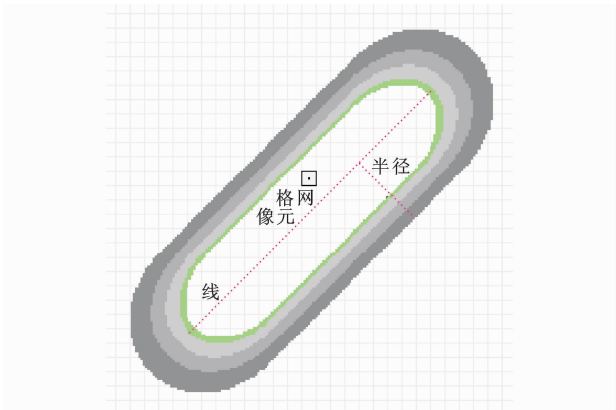


图 1 线要素核密度估计示意

Fig. 1 Sketch of linear feature kernel density estimation

1.3 基于核密度估计的单指标评价

由第 1.1 节的数据采集方法可获取表示路面状况的多个指标的数据,路面破损、车辙和平整度是每年至少 1 次的检测项目,因此,本文主要考虑这 3 个指标。在标准中采用路面损坏状况指数(pavement condition index, PCI)、路面行驶质量指数(riding quality index, RQI)和路面车辙深度指数

(rutting depth index, RDI)来分别评价破损情况、行驶质量和车辙情况,而检测车采集到的基础数据是破损率(distress ratio, DR)、国际平整度指数(international roughness index, IRI)和车辙深度(rutting depth, RD),PCI 和 DR, RQI 和 IRI, RDI 和 RD 的关系式如下

$$V_{RQI} = \frac{100}{1 + a_0 e^{a_1 V_{IRI}}}$$
$$V_{PCI} = 100 - a_2 V_{DR}^{a_3}$$
$$V_{RDI} = \begin{cases} 100 - a_4 V_{RD} & V_{RD} < T_1 \\ 60 - a_5 (V_{RD} - T_1) & T_1 \leq V_{RD} \leq T_2 \\ 0 & V_{RD} > T_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_{PCI} 、 V_{DR} 、 V_{RQI} 、 V_{IRI} 、 V_{RDI} 、 V_{RD} 分别为 PCI、DR、RQI、IRI、RDI、RD 的值; a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 为模型参数; T_1 、 T_2 为 RD 临界值,具体取值参考规范^[1]。

式(4)可以看成是对 DR、IRI 和 RD 的一次抽象过程,转换成 PCI、RQI 和 RDI 等百分制评价指标^[27]。为了充分利用检测得到的最直接的基础数据,本文对 DR、IRI 和 RD 进行核密度估计。通过核密度估计得到道路上各位置连续变化的核密度值,可代表路面状况。

规范中给出的各指标路况评价标准如表 2 所示^[1]。但对于 PCI、RQI 和 RDI 评分为 0 的情况,规范中并未给出,这可以通过式(4)反推得到。

表 2 路况评价标准

Tab. 2 Pavement conditions evaluation standards

等级		理论最优	优	良	中	次	差	理论最差
路面损坏状况	PCI 值	100	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	0
	DR 值	0	[0,0.4]	(0.4,2.0]	(2.0,5.5]	(5.5,11.0]	(11.0,100.0]	100.0
路面车辙状况	RDI 值	100	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	0
	RD 值	0	[0,5]	(5,10]	(10,15]	(15,20]	(20,35]	35
路面行驶质量	RQI 值	100	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	0
	IRI 值	0	[0,2.3]	(2.3,3.5]	(3.5,4.3]	(4.3,5.0]	(5.0,13.0]	13.0

从表 2 可以看出,当 PCI 为 90 时,DR 为 0.4,对于分级阈值对应的核密度值,可以虚拟 1 条道路,将道路以 10 m 为间距划分,并设定每段的 DR 为 0.4,对路段进行基于线要素的核密度分析,可以得到核密度的最大值为 5.536,此值可作为以核密度为指标时路面破损情况优和良的划分临界值。同理可以得到其他临界值,如表 3 所示。

由于核密度估计得到的是一个连续变化的核密度值分布平面,因此,可以通过上述标准来提取等值线,从而得到基于核密度的单指标路段划分

结果。

1.4 多指标组合

根据第 1.3 节基于核密度值的路面状况等级评定标准,可以对道路按照 3 个核密度指标分别进行路段划分,并得到 3 套不同的路段划分方案,即按路面平整情况划分、按破损状况划分和按车辙深度划分;将道路划分成优、良、中、次、差 5 个等级,并且能很方便提取出对应的里程桩号。然而,单独的指标并不能全面反映路段的性能,可以用一种简单的方法将 3 种指标进行组合,组合后

表 3 基于核密度值的路况评价标准

Tab. 3 Pavement condition evaluation standards based on kernel density value

等级		理论最优	优	良	中	次	差	理论最差
路面损坏状况	PCI 值	100	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	0
	核密度	0	[0,5.536]	(5.536,27.791]	(27.791,76.424]	(76.424,152.849]	(152.849,1389.534]	1389.534
路面车辙状况	RDI 值	100	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	0
	核密度	0	[0,69.477]	(69.477,138.953]	(138.953,208.430]	(208.430,277.907]	(277.907,486.337]	486.337
路面行驶质量	RQI 值	100	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	0
	核密度	0	[0,31.834]	(31.834,48.634]	(48.634,59.516]	(59.516,69.477]	(69.477,180.639]	180.639

得到的路段划分能够同时反映出路段的路面平整、车辙和破损情况,对养护决策更有利。

上述划分标准,将道路指标表现划分成了优、良、中、次、差 5 个等级,考虑到实际决策情况,同时减少计算工作量,可以将 5 个等级合并成为 3 个等级,即优良、中、次差,并按照表 4 中的规则对定性指标进行量化表达。

表 4 指标量化

Tab. 4 Indexes quantification

等级	优良	中	次差
路面破损	100	200	300
路面车辙	10	20	30
路面平整	1	2	3

按照上述规则组合后得到 27 种情形,分别对应着实际道路的 27 种路面状况,如表 5 所示。以(100 10 1)组合为例加以说明,这个组合代表着该路段路面破损、路面车辙、路面平整均表现优良,这个组合对应的综合值,即求和为 111。通过这种指标组合方法就可以对路段的综合性能进行动态分段,且各路段在破损情况、平整情况和车辙情况的细节也都体现在这个编号中。

表 5 27 种路面性能组合

Tab. 5 27 kinds of combinations for pavement performance

指标组合	求和
(100 10 1), (100 10 2), (100 10 3)	111,112,113
(100 20 1), (100 20 2), (100 20 3)	121,122,123
(100 30 1), (100 30 2), (100 30 3)	131,132,133
(200 10 1), (200 10 2), (200 10 3)	211,212,213
(200 20 1), (200 20 2), (200 20 3)	221,222,223
(200 30 1), (200 30 2), (200 30 3)	231,232,233
(300 10 1), (300 10 2), (300 10 3)	311,312,313
(300 20 1), (300 20 2), (300 20 3)	321,322,323
(300 30 1), (300 30 2), (300 30 3)	331,332,333

2 动态分段实例

利用多功能检测车,采集到了福建省晋江市和平南路的路面状况 DR、RD 和 IRI 指标数据,该道路为沥青道路,长度为 3.7 km。其中 DR 和 RD 数据以 10 m 为间距保存,IRI 以 20 m 为间距保存,下文分析时通过插值将 IRI 也处理成以 10 m 为间距保存。按照表 2 的分级标准用不同的灰度值标识不同的路面状况,可以得到路面状况如图 2 所示。

2.1 核密度估计与单指标分段结果提取

本文利用最常用的 GIS 软件 ArcGIS 进行核密度估计^[28]。利用 ArcGIS 的线要素核密度估计工具,对上述 3 套指标数据进行线核密度分析,采用 ArcGIS 默认的带宽参数即可。按照表 3 中建立的基于核密度单指标的分级标准,得到图 3 所示的路面状况地图,可见,核密度分析图已经非常直观的将检测道路车辙情况、平整度情况和破损情况呈现出来。对照相应的图例以及表 3 中的值可知,不同灰度值对应不同的路况严重程度,这已经达到了动态分段的效果,通过 ArcGIS 的交互功能就能得到各路段对应的起终点桩号。

2.2 综合指标分段结果提取

为了得到 3 个指标组合下的最终分段方案,需要执行如下步骤。

(1)重分类,即按照一定的规则将第 2.1 节中得到栅格图的核密度值转换成重分类值,ArcGIS 有相应的工具可供使用。按照第 1.4 节将指标分成 3 个等级,如表 6 所示。

(2)栅格相加,即将重分类得到的 3 套栅格图以像素为基本单元实行加法操作,从而达到分类值组合的效果,以表 5 中所列组合值表示的路面状况如图 4 所示。然后,采用笔者编写的 Python

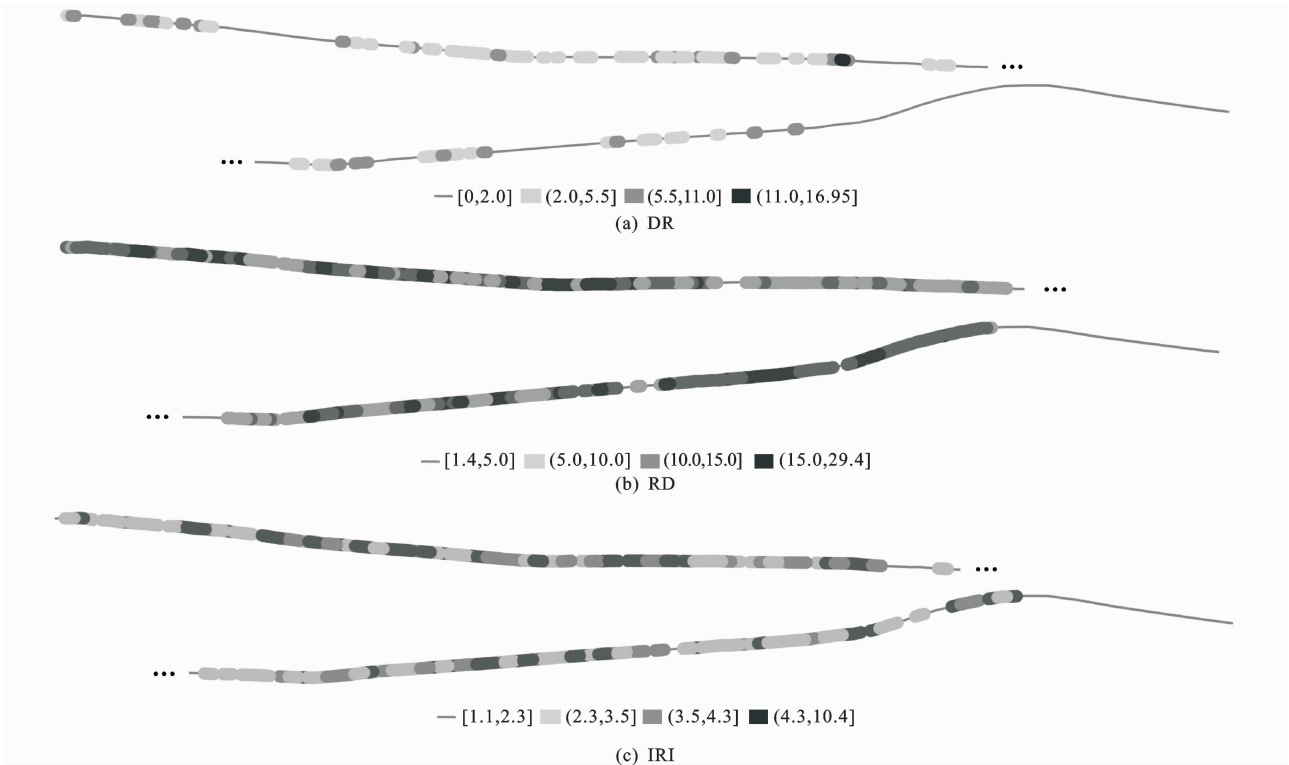


图 2 案例道路的原始路况数据
Fig. 2 Raw data of pavement conditions of case road

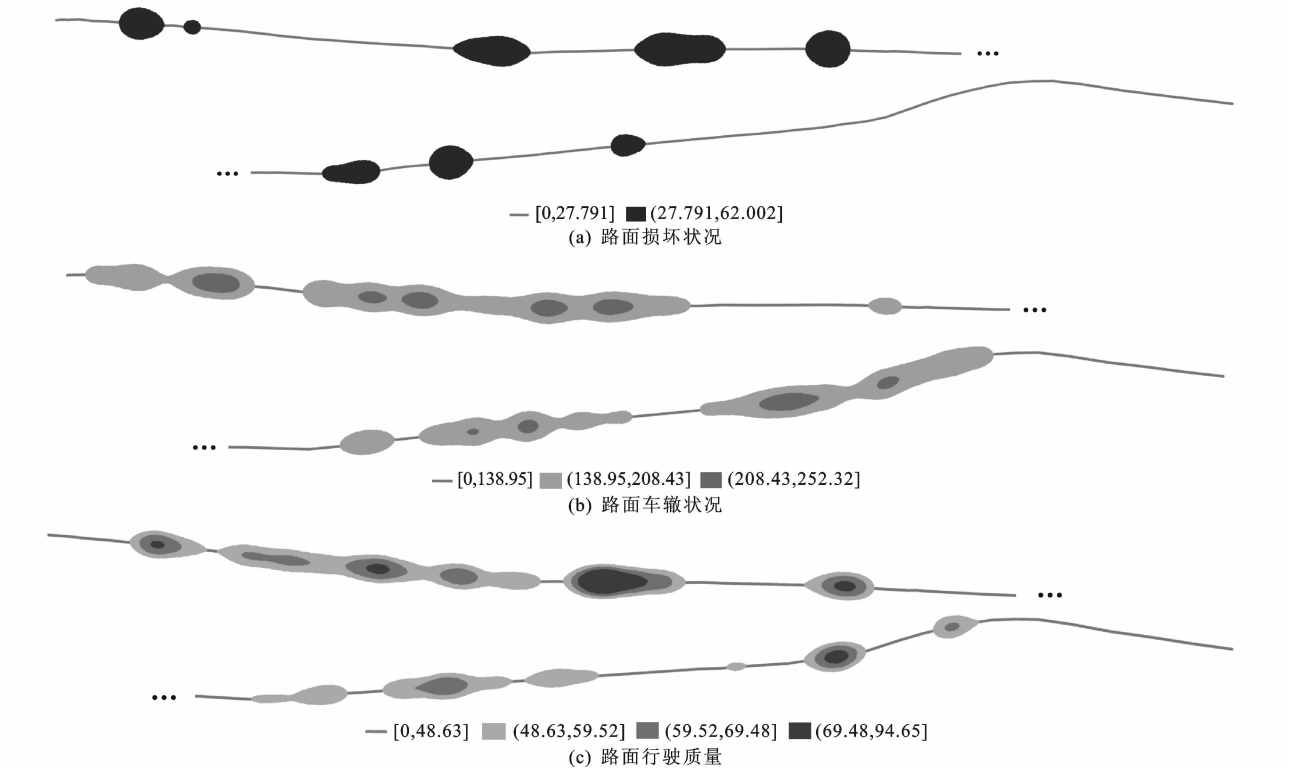


图 3 案例道路基于单指标核密度值分级标准的路况
Fig. 3 Conditions of case road based on evaluation standard of individual kernel density value

代码^[29]将分段的起终点和各路段以组合值表达的得到最后的分段结果,一共划分成 36 个路段,路面状况提取出来。见图 5 所示,对应的数据见表 7。以序号为 8

表 6 重分类取值
Tab. 6 Re-classification values

指标	判断条件	道路性能	重分类值
路面破损	$[0, 27.791]$	优良	100
	$(27.791, 76.424]$	中	200
	$(76.424, 1389.534]$	次差	300
路面车辙	$[0, 138.953]$	优良	10
	$(138.953, 208.430]$	中	20
	$(208.430, 486.337]$	次差	30
路面平整	$[0, 48.634]$	优良	1
	$(48.634, 59.516]$	中	2
	$(59.516, 180.639]$	次差	3

的路段为例,该路段的起终点位置分别是 716 和 806 m,长度为 90 m;该路段的路况代号为 122,意味着其破损情况良好,车辙深度一般,平整度也一般,在地图中用浅灰色线段表示。可以看到,图 5 达到了本文预期的动态分段效果,每个分段的长度是变化而不是固定的,每个路段的起终点桩号也不是预定的,而是依据实际路面状况进行划分的,将具有相似状况的路段归并在一起;此外,通过本文的动态分段方法处理,各路段存在的问题清晰可见,细节信息没有丢失,且可充分利用精细的基础数据,对安排养护维修有很好的指导作用。

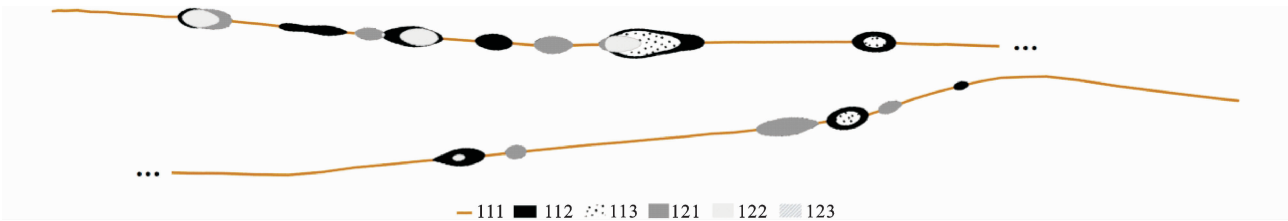


图 4 以组合值表示的路面状况
Fig. 4 Pavement conditions with combination values

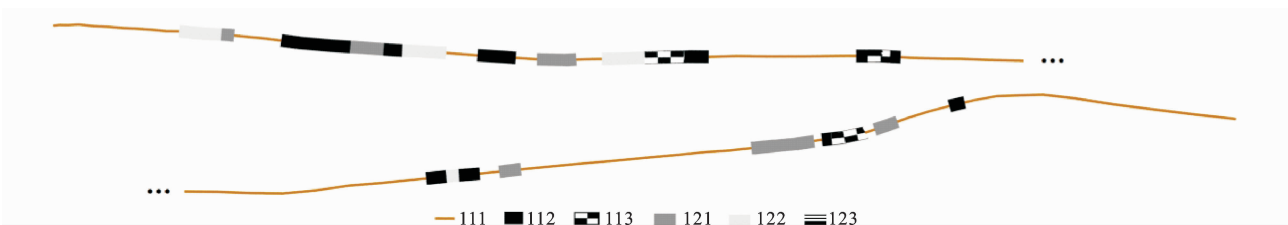


图 5 案例道路采用核密度动态分段得到的最后结果
Fig. 5 Final scheme of case road by kernel density dynamic segmentation estimation

综上可以看出,相比于现有的以 1 个综合指标(比如路面使用性能指数 PQI)表达路面状况的方法,本文方法更加精细,且可从其指标组合值得到具体的破坏类型。在组合值的基础上,可以将其进一步分成不同的梯度以呈现不同维修需求紧急程度,比如组合值 333 代表路面破损严重、车辙很严重、平整度很差,相比于 222,即路面破损一般,车辙一般,平整度也一般,前者更需要得到维修。在养护决策中,可以根据预算进行选择性的维修,预算充足时可将有破坏路段全部维修,预算紧张时仅可维修最迫切维修梯度的路段。

单指标图和指标组合图可以将路况数据的细节呈现出来,并且结合核密度估计与 GIS 的优势,可以集成到道路养护管理系统中,为养护决策提供支撑。

3 对比分析

将本文方法和中国现广泛采用的静态路段划分

方法^[1],以及国际上应用最多的动态路段划分方法,即累积差异法(CDA)^[8]进行对比分析。采用本文第 2 节的实践案例数据,分别采用 3 种方法进行分段,并将其结果进行对比。由于 3 种方法都可以运用于所有的指标,而本节重点是探究三者 in 分段上的差异,因此仅以 IRI 数据为例进行分析。

静态划分,顾名思义就是将道路按照固定的模式进行划分,不考虑实际道路的路况,通常采用定长法。如引言部分提到的,中国对于公路的路段划分是以 1 000 m 路段长度为基本评价单元进行分段的。考虑到案例道路长度仅为 3.7 km,本文以 500 m 作为路段划分的基本单元。

累积差异法是 AASHTO 推荐的路段划分方法,其通过比较 IRI 在路段上的实际累积值与路段上的平均累积值来实现分段。采用多功能检测车检测路面平整度时,是以 20 m 为单元进行保存的。现假设路况检测得到的 IRI 数据 $x_i(i=1,2,\cdots,n)$,

表 7 最后结果中各分段起终点和路况

Tab. 7 Road conditions of start points and end points of each segments in final scheme

序号	路段起点/m	路段终点/m	路况代号
1	0	257	111
2	257	344	122
3	344	370	121
4	370	467	111
5	467	609	112
6	609	678	121
7	678	716	112
8	716	806	122
9	806	870	111
10	870	949	112
11	949	992	111
12	992	1 073	121
13	1 073	1 125	111
14	1 125	1 213	122
15	1 213	1 294	113
16	1 294	1 344	112
17	1 344	1 646	111
18	1 646	1 670	112
19	1 670	1 716	113
20	1 716	1 738	112
21	1 738	2 487	111
22	2 487	2 528	112
23	2 528	2 554	122
24	2 554	2 597	112
25	2 597	2 637	111
26	2 637	2 682	121
27	2 682	3 156	111
28	3 156	3 285	121
29	3 285	3 301	111
30	3 301	3 321	112
31	3 321	3 390	113
32	3 390	3 411	111
33	3 411	3 461	121
34	3 461	3 572	111
35	3 572	3 605	112
36	3 605	3 700	111

其所在路段 i 的长度就是 20 m。构造一个累积差异值序列 z_1, z_2, \dots, z_n , 其计算如下

$$z_k = \sum_{i=1}^k x_i - k\bar{x} \quad k = 1, 2, \dots, n$$

(5)

式中:参数 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

CDA 法认为, z_k 斜率正负号发生变化的点就是分段的边界点。由于 IRI 数据变异性较大,实际

处理时,为了不让分段结果过于破碎,常通过中值滤波以及设置最小划分间距等方法进行约束^[4]。

采用静态划分法、CDA 法和本文方法的路段划分结果如图 6 所示。可以看到,CDA 法和本文提出的动态分段方法对路段划分比静态划分更加精细,并且每个划分路段内部路况比较相似,而路段之间区别比较明显,划分得到的路段起终点桩号是依据路况得到且动态变化的。

分段的目的是得到同质路段,也就是说划分为同一个路段的各局部路段路况应该尽可能相似,且相邻路段应差异较明显。为了量化评价分段效果,提出评价路段内路况相似性指标 P_1 ,评价路段间路况差异性指标 P_2 ,计算如下

$$\begin{cases} P_1 = \sum_q (x_{m,q} - \mu_m)^2 & m = 1, 2, \dots, M; \\ q = 1, 2, \dots, Q_m \\ P_2 = \sum_m (\mu_m - \mu_{m+1})^2 & m = 1, 2, \dots, M-1 \end{cases}$$

(6)

式中: $x_{m,q}$ 为第 m 个划分路段内第 q 个小路段的 IRI 值; μ_m 为第 m 个划分路段内所有小路段的 IRI 平均值; M 为划分的路段总数; Q_m 为第 m 个划分路段内小路段的总数。

显然 P_1 越小,同时 P_2 越大时的分段效果越好。3 种分段方法的量化指标值见表 8。由表 8 可以看出,本文方法 P_1 值最小且 P_2 值最大,即本文方法划分得到的结果使得路段内部差异最小,相邻路段间差异最大。本文方法划分效果最好,其次为 CDA 法、静态分段方法。

表 8 分段结果量化指标对比

Tab. 8 Comparisons of quantification indices of segmentation results

路段分段方法	P_1	P_2
静态分段	457.945	2.547
CDA 法	331.929	40.033
本文方法	302.752	43.280

从图 6 和表 8 可以看出:静态分段方法路段划分得到同质路段区分效果不佳;CDA 法与本文方法得到的结果比较接近,但是稍逊于本文方法。CDA 法无法考虑路况数据的空间自相关性,仅从数字特征角度进行路段划分;而本文方法则将空间上具有相似属性的路段聚在一起,不仅可以实现更加精细的路段划分,在路段内相似性和路段间差异性上也表现更好。

4 结 语

(1)基于核密度估计,提出了一种新的路面状况动态分段方法。根据现有的道路性能评价标准

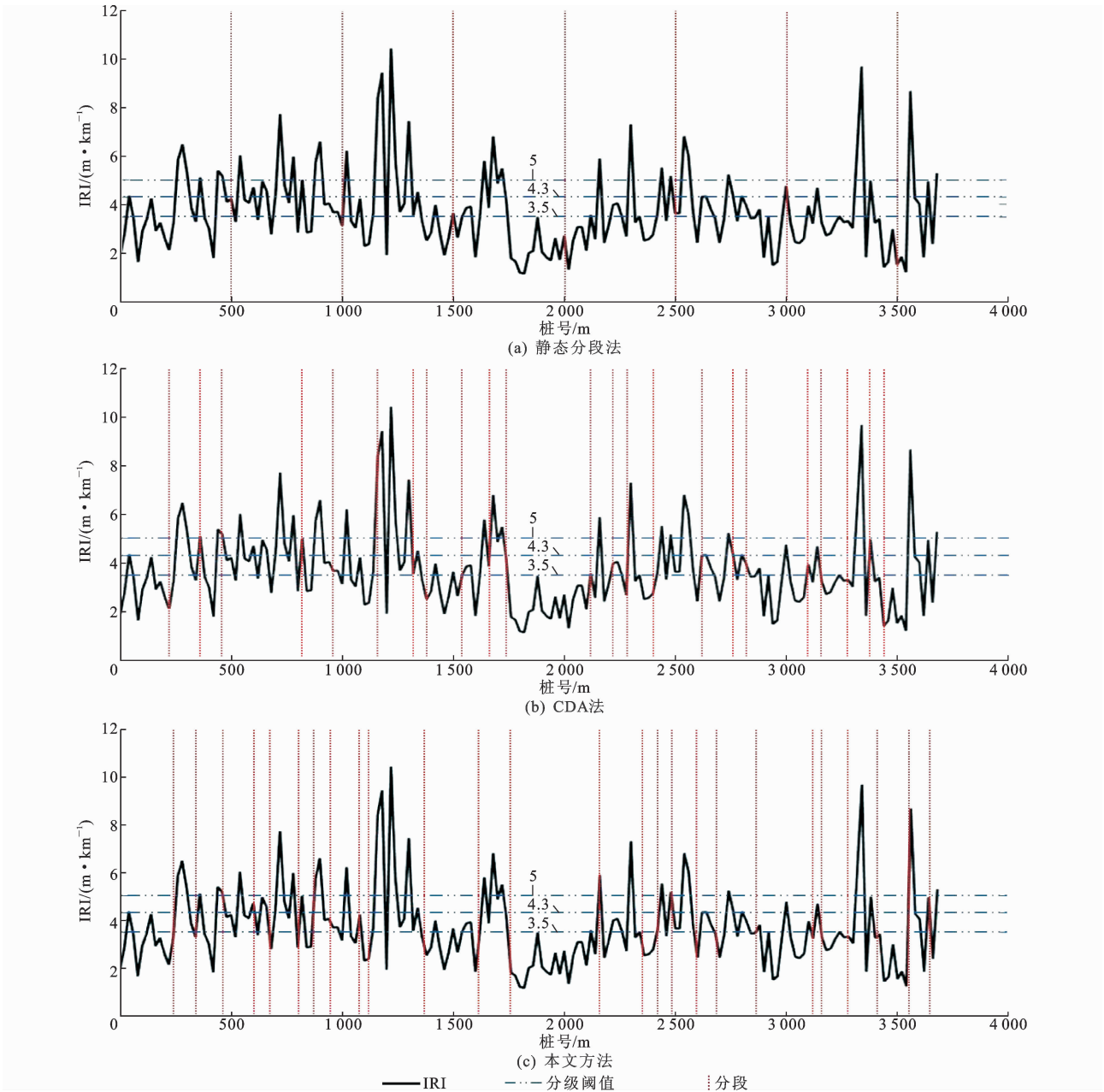


图6 三种方法分段结果对比

Fig. 6 Comparisons of segmentation results of three methods

提出了以核密度为指标的分级标准,通过核密度估计对单指标进行动态分段;在单指标核密度估计的基础上,提出了组合多个单指标的方法,得到综合动态分段结果;并以晋江市 3.7 km 长的和平南路沥青路面状况动态分段为例,验证了本文方法的可行性。

(2)本文方法可从基于核密度值的路面破损、车辙深度、路面平整 3 个单指标或者指标组合的角度评价路况,将路面状况的整体分布以及路段需维修的紧急程度同时呈现,同时保留了基础检

测数据的细节。

(3)本文方法与现有养护管理系统紧密衔接,可以充分利用现有养护管理系统 GIS 功能;核密度估计是 GIS 常用的功能,其原理简单、可视化效果好,可以给养护决策者提供支持。

(4)将本文方法和现有常用的静态分段方法和基于 CDA 的动态分段方法对比,结果表明,本文方法可以考虑路况数据的空间自相关性,得到的路段划分结果更加精细,划分的路段内部路况差异最小,且相邻路段之间的路况差异最大。相

比于其他方法,本文方法分段效果最优。

(5)本文方法以及现有的其他分段方法都还存在局限性,即只能针对单指标进行路段划分,尚无法同时考虑多指标问题。虽然本文提出了一个多指标组合解决方案,但这种方法认为指标间是相互独立的,而实际上,多指标之间可能存在相互关联,如果忽视了这种关联而对路段进行机械的划分,得到的路段划分结果会比较破碎,且可能不是最优的划分方案。因此,下一步将开展多指标融合动态分段问题研究。

参考文献:

References:

- [1] JTG 5210—2018,公路技术状况评定标准[S].
JTG 5210—2018, Highway performance assessment standards[S].
- [2] CJJ 36—2006,城镇道路养护技术规范[S].
CJJ 36—2006, Technical code of maintenance for urban road[S].
- [3] 许哲谱. 系统聚类分析在沥青路面养护路段动态划分中的应用[J]. 城市建筑, 2016(30):293,295.
XU Zhe-pu. Application of system cluster analysis to dynamic segmentation of asphalt pavement maintenance sections[J]. Urbanism and Architecture, 2016 (30):293,295.
- [4] MOO Y K. Segmentation of highway networks for maintenance operations [D]. Austin: University of Texas at Austin, 2016.
- [5] YANG C , TSAI Y , WANG Z . Algorithm for spatial clustering of pavement segments[J]. Computer Aided Civil & Infrastructure Engineering, 2008, 24 (2) : 93-108.
- [6] 白日华. 沥青路面病害检测与养护决策研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
BAI Ri-hua. Research on detecting asphalt pavement disease and maintenance decision making[D]. Chang-chun: Jilin University, 2013.
- [7] SCULLION T, SMITH R. TxDOT's pavement management information system: Current status and future directions[R]. San Antonio: Texas Transportation Institute, 1997.
- [8] AASHTO. AASHTO guide for design of pavement structures[M]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- [9] MISRA R, DAS A. Identification of homogeneous sections from road data [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2003, 4(4): 229-233.
- [10] PING W, YANG Z, GAN L, et al. Development of procedure for automated segmentation of pavement rut data [J]. Transportation Research Record, 1999 (1655): 65-73.
- [11] CUHADAR A, SHALABY K, TASDOKEN S. Automatic segmentation of pavement condition data using wavelet transform[C]//IEEE. Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. New York: IEEE, 2002: 1009-1014.
- [12] 沈海生. 基于 K-聚类分析法的预防性养护路段划分 [J]. 安徽建筑, 2015, 22(3): 127, 194.
SHEN Hai-sheng. Dividing the preventive maintenance section based on the K-means[J]. Anhui Architecture, 2015, 22(3): 127, 194.
- [13] 钟连德, 陈永胜, 孙小端, 等. 基于有序聚类分析的高速公路路段长度划分研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(1): 43-46.
ZHONG Lian-de, CHEN Yong-sheng, SUN Xiao-duan, et al. Research on section division of freeway with ordinal clustering method[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008, 32(1): 43-46.
- [14] 农家萍, 张肖宁. 模糊聚类分析在沥青路面养护路段划分中的应用[J]. 中外公路, 2006, 26(3): 119-122.
NONG Jia-ping, ZHANG Xiao-ning. Application of fuzzy cluster analysis to dynamic segmentation of asphalt pavement maintenance sections [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26(3): 119-122.
- [15] THOMAS F. Automated road segmentation using a Bayesian algorithm[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 131(8): 591-598.
- [16] YANG C, TSAI Y, WANG Z. Algorithm for spatial clustering of pavement segments[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2009, 24 (2) : 93-108.
- [17] SMITH M J. 地理空间分析——原理、技术与软件工具[M]. 杜培军, 张海荣, 冷海龙, 等译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2009.
SMITH M J. Geospatial analysis: A comprehensive guide to principle, techniques and software tools[M]. Translate by DU Pei-jun, ZHANG Hai-rong, LENG Hai-long. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Elec-

- tronics Industry, 2009.
- [18] 何 政. 基于 GIS 的城市道路路面养护辅助决策系统的研究与开发[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.
HE Zheng. Research and development of aided decision-making system for urban road pavement maintenance based on GIS[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [19] 王 丹. 基于 GIS 的道路综合信息管理系统研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
WANG Dan. Research of comprehensive information management system for road based on GIS[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [20] PAREDES M, FERNANDO E, SCULLION T. Pavement management applications of GIS: A case study [J]. Transportation Research Record, 1990 (1261): 20-26.
- [21] JTG/T E61—2014, 公路路面技术状况自动化检测规程[S].
JTG/T E61—2014, Specifications of automated pavement condition survey[S].
- [22] 孙劲宇, 邱汉骐, 张兰芳. 基于核密度模型的上海市快速路交通事件空间自相关分析[J]. 上海公路, 2014 (4): 71-74.
SUN Jin-yu, QIU Han-qi, ZHANG Lan-fang. Spatial autocorrelation analysis of Shanghai expressway traffic events based on kernel density estimation [J]. Shanghai Highways, 2014(4): 71-74.
- [23] 王 星, 褚挺进. 非参数统计[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2014.
WANG Xing, CHU Ting-jin. Non-parametric statistics [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [24] 谢中华. MATLAB 统计分析与应用: 40 个案例分析 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2010.
XIE Zhong-hua. Statistical analysis and application of MATLAB: An analysis of 40 cases [M]. Beijing: Beihang University Press, 2010.
- [25] SILVERMAN B W. Density estimation for statistics and data analysis[M]. New York: Chapman and Hall, 1986.
- [26] ESRI. How kernel density works [EB/OL]. (2019-07-23) [2014-12-12]. [http://desktop. arcgis. com/zh-cn/arcmap/10. 3/tools/spatial-analyst-toolbox/kernel-density. htm](http://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/kernel-density.htm).
- [27] 武建民. 路面养护管理系统[M]. 北京:人民交通出版社, 2014.
WU Jian-min. Pavement maintenance management system [M]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [28] 牟乃夏, 刘文宝, 王海银. ArcGIS 10 地理信息系统教程——从初学到精通[M]. 北京:测绘出版社, 2012.
MOU Nai-xia, LIU Wen-bao, WANG Hai-yin. ArcGIS 10 tutorial: From beginner to master [M]. Beijing: China Surveying and Mapping Press, 2012.
- [29] XU Zhe-pu. Dynamic segmentation [EB/OL]. (2019-07-23) [2019-03-28]. [https://github. com/xuzhepu1993/Dynamic_segmentation](https://github.com/xuzhepu1993/Dynamic_segmentation).